



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

Optické planární mnohavidové výkonové rozbočnice

Optical planar multimode power splitter

Bakalářská práce

Marian Knieta

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Komunikační technika

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

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Knieta Marian**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Optické planární mnohavidové výkonové rozbočnice**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy planárních monohavidových optických vlnovodů.
- 2) Seznamte se s postupy návrhu fotonických struktur pomocí softwaru BeamProp.
- 3) Navrhněte výkonové mnohavidové optické rozbočnice ze zvolených polymerních materiálů.
- 4) Podílejte se na výrobě navržených struktur.
- 5) Proveďte diagnostiku vyrobených struktur.
- 6) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam odborné literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. R. Maštera: Návrh optické planární mnohavidové výkonové 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna, ČVUT 2013, Bakalářské práce.
3. V. Prajzler, M. Neruda, J. Špírková: Planar Large Core Polymer Optical 1x2 and 1x4 Splitters Connectable to Plastic Optical Fiber, Radioengineering, Vol. 22, No. 3, 2013, ISSN 1210-2512, str. 751-757.

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

Platnost zadání: LS 2015/2016



Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 22. 1. 2015

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce, pánu doc. Ing. Václavovi Prajzlerovi, Ph.D., za vzácne rady pri návrhu a výrobe rozbočníc a za čas, ktorý mi venoval pri konzultáciách. Pod'akovanie tiež patrí pani Ing. Pavle Nekvindovej, Ph.D. z Vysokej školy chemicko-technologickej v Prahe za meranie indexu lomu pomocou jednohranolovej vidovej spektroskopie.

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne v súlade s Metodickým pokynom č. 1/2009 O dodržovaní etických princípů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Nemám dôvod pre použitie tohto diela v zmysle Zákona č. 121/2000 Sb. § 60, o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Prahe dňa 13.5.2015

Marian Knieta

Názov práce: Optické planární mnohavidové výkonové rozbočnice
Autor: Marian Knietel
Katedra (ústav): Katedra mikroelektroniky
Vedúci práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.
E-mail vedúceho práce: xprajzlv@fel.cvut.cz

Abstrakt: Bakalárska práca sa zaoberá návrhom, výrobou a meraním planárnych mnohovidových výkonových rozbočníc 1x2Y a 1x4Y pre POF (Plastic Optical Fiber) vlákna. V prvej časti práce je popísaný princíp šírenia svetla v planárnych štruktúrach, rozdelenie optických rozbočníc a ich popis a príklady týchto štruktúr z literatúry. Následne je uvedený návrh rozbočníc, ktorý zahŕňa dva spôsoby: prvým je teoretický návrh na základe vzťahov pre výpočet geometrických parametrov rozbočníc a činiteľa priepustnosti a odrazivosti, a druhým návrh v simulačnom programe BeamPROPTM, v ktorom sa využíva metóda šírenia optického zväzku (Beam Propagation Method). Na základe týchto simulácií bolo vybraných sedem navrhnutých motívov, ktoré boli vyrobené vytvorením drážok do PMMA (polymetylmetakrylát) substrátu pomocou CNC gravírovania a použité boli vlnovodné materiály NOA73, OG113 a NOA1625, ktoré boli nanosené do drážok a vytvrdené UV žiarením. Popísaná je tiež diagnostika navrhnutých štruktúr a dosiahnuté výsledky.

Kľúčové slová: mnohovid, planárna rozbočnica, metóda BPM, vložný optický útlm

Title: Optical planar multimode power splitter
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 bachelor project deals with design, construction and measurement of planar multimode power splitters for plastic optical fibers with dividing power ratio 1:2 and 1:4. In the first part of the project the principle of light propagation in planar structures is described, types of optical waveguides are characterized and some examples of structures reported in literature are given. Then design of splitters is described, which includes two methods: the first is theoretical design based on relations for calculation of geometric parameters of splitters and relations for calculation of transmittance and reflectivity factor and the second is using BeamPROPTM simulation program which is based on Beam Propagation Method. Subsequently seven types of simulated splitters were chosen for construction, which included creating grooves into the PMMA (Polymethyl methacrylate) substrate using CNC engraving. NOA73, OG113 and NOA1625 polymers were used as waveguide materials and were applied to the grooves and cured by UV light. In the last part of the project diagnostics of designed splitters is described and achieved results are given.

Keywords: multimode, planar splitter, BPM Method, optical insertion loss

Zoznam symbolov a skratiek

symbol	veličina	jednotka
α	optický útlm	dB
α_t	koeficient útlmu	m^{-1}
β	pozdlžna konštanta šírenia	m^{-1}
d	dĺžka taperovaného vlnovodu	m
Δ	relatívny kontrast indexu lomu	-
E	intenzita elektrického poľa	V/m
ε	permitivita prostredia	F/m
ε_0	permitivita vákua	F/m
ε_r	relatívna permitivita	-
Φ	fázový posun pri totálnom odraze	rad
H	intenzita magnetického poľa	A/m
h	hrúbka planárneho vlnovodu	m
θ	uhol medzi výstupnými vlnovodmi	°
ϑ_c	medzný (kritický) uhol	rad
j	imaginárna jednotka	-
ϑ_r	uhol odrazu	rad
ϑ_t	uhol prestupu	rad
k	vlnový vektor	m^{-1}
k	konštanta šírenia	m^{-1}
k	kolmica dopadu	-
L_C	celková dĺžka rozbočnice	m
L_{in}	dĺžka vstupného vlnovodu	m
L_{out}	dĺžka výstupného vlnovodu	m
$L_{(S)bend}$	dĺžka vlnovodného ramena	m
L_W	celková šírka rozbočnice	m
m	vidové číslo	-
NA	numerická apertúra	-
n	normálový vektor	-
n_{ef}	efektívny index lomu	-
n_f	index lomu vlnovod. vrstvy	-
n_s	index lomu substrátu	-
n_c	index lomu krycej vrstvy	-
u	rýchlosť šírenia vlny	m/s
v_f	fázová rýchlosť	m/s
v_s	skupinová rýchlosť	m/s
ω	uhlová rýchlosť	s^{-1}
skratka	význam skratky	slovenský popis
BPM	Beam Propagation Method	Metóda šírenia opt. zväzku
EPO-TEK	Epoxy Technology Inc.	spoločnosť v USA
NOA	Norland Optical Adhesive	spoločnosť v USA
PMMA	Polymethyl methacrylate	polymetylmetakrylát
POF	Plastic Optical Fiber	plastické optické vlákno
UV	Ultra Violet	ultrafialové žiarenie

Obsah

1. Úvod	8
2. Princíp vedenia svetla v planárnych optických vlnovodoch	10
3. Depozičné testy pre určenie materiálových konštánt	17
4. Optické mnohovidové rozbočnice	19
4.1 Štruktúra planárnych optických rozbočníc	20
4.2 Príklady realizovaných rozbočníc	21
5. Návrh rozbočníc	24
5.1 Voľba materiálov	24
5.2 Teoretické výpočty parametrov rozbočníc	24
5.3 Metóda šírenia optického zväzku	27
5.4 Návrh optických rozbočníc	29
5.4.1 Návrh rozbočnice 1x2Y	30
5.4.2 Návrh rozbočnice 1x4Y	38
6. Výroba navrhnutých rozbočníc	42
7. Diagnostika a meranie vyrobených rozbočníc	46
7.1 Meranie indexov lomu	46
7.2 Meranie transmisných spektier	47
7.3 Optická kontrola vyrobených rozbočníc	48
7.4 Meranie optického útlmu	49
7.5 Meranie prenosovej rýchlosti	56
8. Záver	58
9. Použitá literatúra	60
Príloha A	
Príloha B	
Príloha C	
Príloha D	

1. Úvod

V telekomunikačných systémoch sa v súčasnosti na kratšie vzdialenosti čoraz viac používajú POF vlákna (mnohovidové plastové optické vlákna). Jadro vlákna je tvorené polymetylmakrylátom (PMMA) a plášť fluór - polymérom PMMA. Jadro POF vlákna máva priemer až 980 μm pri priemere plášťa 1000 μm . Hlavnými prednosťami tohto druhu vlákien sú tepelná odolnosť (súčasná vlákna sú odolné voči teplotám 200 až 300 $^{\circ}\text{C}$) a jednoduchá montáž. Ich slabšou stránkou je merný útlm. V súčasnosti je dosiahnuteľný útlm okolo 10 dB/km, ktorý je akceptovateľný pre siete typu FTTH (Fiber To The Home) [1].

Optoelektronické telekomunikácie sú v značnej miere obmedzované prevodmi elektrického na optický signál a naopak. To prináša v mnohých prípadoch značne zložité riešenia a snahou je rôzne funkcie, napr. spájanie, prepájanie, moduláciu a i. uskutočňovať vo svetelnej oblasti. V súčasnosti sa už konštruujú zariadenia, ktoré umožňujú zlúčiť rôzne funkcie na spoločnom substráte. Takéto realizácie sú miniatúrne, spoľahlivé, znižuje sa potrebné napájanie aj cena. Takéto štruktúry sú nazývané integrovaná optika, ktorej základom sú planárne optické vlnovody (svetlovody).

V integrovanej optike sa na rozdiel od prenosu signálu na veľké vzdialenosti, kde sa používajú kruhové optické vlákna, realizujú krátke (centimetrové) spoje a využívajú sa ploché a tenké vlnovody [1].

Planárne polymérové rozbočnice sú pasívne prvky, podobne ako napríklad optické rozvádzače či optické zásuvky. Rozdeľujú optický výkon rovnomerne podľa počtu výstupných vlnovodov, avšak výkon prechádzajúci rozbočnicou býva ovplyvnený jej optickým útlmom. Medzi základné druhy rozbočovačov možno zaradiť druhy 1x2Y alebo 1x4Y. Vstupnými a výstupnými vláknami môžu byť POF (Plastic Optical Fiber) vlákna, prípadne planárne optické vlnovody. Šírka vstupných a výstupných vlnovodov rozbočnic s POF vláknami býva 1 mm.

Tieto rozbočnice sa využívajú v rôznych oblastiach, napríklad v prenosových systémoch - v domácich sieťach, PON – pasívnych optických sieťach (napr. v prípade štandardu 10GEPON je dosahovaná prenosová rýchlosť až 10 Gb/s), FTTH (Fiber To The Home) distribučných sieťach, a bývajú aj súčasťou automobilov, lodí a ďalších dopravných prostriedkov, kde sa využíva ich nižšia hmotnosť a bezpečnosť pri ich prevádzkovaní [2, 3].

V rámci tejto bakalárskej práce som sa najskôr oboznámil s teoretickými základmi týkajúcimi sa problematiky planárnych výkonových rozbočnic. Pred návrhom rozbočnic som pomocou teoretických vzťahov pre rozbočnice 1x2Y vypočítal vybrané parametre. Nasledoval návrh štruktúr pomocou simulačného programu BeamPROPTM od firmy RSoft. Porovnal som jednotlivé druhy navrhnutých motívov na základe ich rozmerov a najmä dosiahnutých výsledkov simulácií a vybrané rozbočnice boli vyrobené pomocou CNC gravírovania. Podieľal som sa na výrobe navrhnutých rozbočnic vkladáním POF vlákien, aplikovaním a vytvrdzovaním vlnovodných vrstiev. Vyskúšal som tiež leštenie koncov vlákien pomocou leštiacej súpravy s cieľom dosiahnuť zníženie útlmov.

Po vytvrdení štruktúr boli zmerané výstupné výkony vyrobených rozbočníc a z týchto hodnôt bol vypočítaný vložný optický útlm.

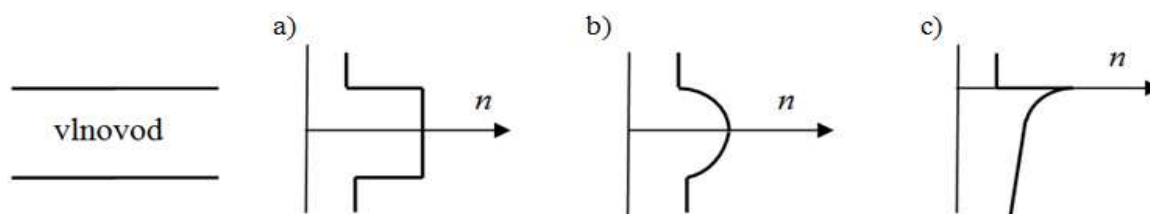
Spolu bolo vyrobených sedem rôznych motívov planárnych rozbočníc, z toho šesť 1x2Y rozbočníc (označených ako motívy č. 1 - 6) a jedna 1x4Y rozbočnica (motív č. 7) pri použití substrátu z materiálu PMMA a troch druhov vlnovodných materiálov – NOA73, NOA1625 a OG113. Uskutočnených tiež bolo 38 depozičných testov rôznych vlnovodných materiálov nanesených na substráty a vytvrdených pod UV lampou.

2. Princíp vedenia svetla v planárnych optických vlnovodoch

Svetlo je možné chápať ako elektromagnetickú vlnu, ktorá je popísaná Maxwellovými rovnicami rovnako ako vlny inej oblasti frekvenčného spektra. Tento prístup je dôležitý pri hlbšom skúmaní javov ako je šírenie vln vo vlnovode, odraz, disperzia, útlm alebo napr. väzba vidov [4].

V optickej komunikačnej technike sa používajú dva základné druhy vlnovodov – planárne a vláknové. Planárne vlnovody slúžia na prenos optického signálu na vzdialenosť najviac niekoľko centimetrov a používajú sa prevažne v integrovaných fotonických mikroštruktúrach (IPC), kde slúžia na prenos žiarenia medzi jednotlivými funkčnými blokmi čipu. Vláknové vlnovody sú vhodné pre prenos na desiatky metrov až tisíce kilometrov, v závislosti na použítom druhu vlákna [2,4].

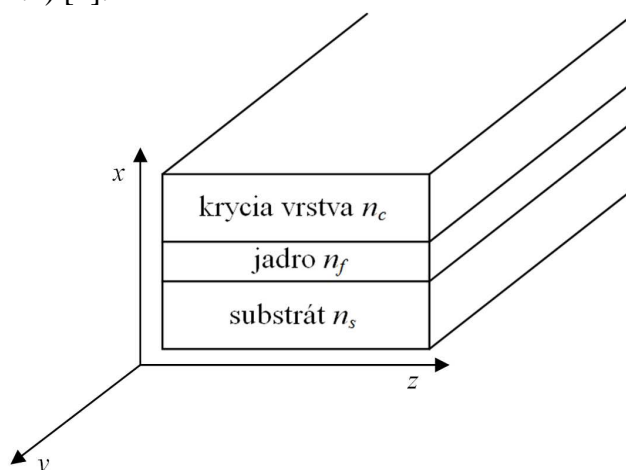
Optické vlnovody sa tiež delia na základe vidovosti, a to na jednovidové a mnohovidové. Podľa homogenity vlnovodnej vrstvy môžeme vlnovody rozdeliť na tri druhy (obr. 2.1). V prípade vlnovodov s homogénnou vlnovodnou vrstvou (so skokovým indexom lomu) dochádza k úplnému odrazu vlny na rozhraní, pokiaľ je index lomu vlnovodnej vrstvy väčší ako index lomu prostredia po oboch stranách (obr. 2.1a)). Nehomogénne vlnovody (obr. 2.1b)) sa vyznačujú plynulým poklesom indexu lomu zo stredu vlnovodu k rozhraniám (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. 2.1c)). Vedenie vlny je spôsobené kombináciou predchádzajúcich spôsobov [2, 5, 6, 7].



Obr. 2.1: Priebeh indexu lomu v prípade: a) vlnovodu so skokovým indexom lomu, b) vlnovodu s indexom lomu klesajúcim zo stredu vlnovodu, c) vlnovodu s indexom lomu klesajúcim od okraja vlnovodu [4].

Planárny optický vlnovod býva najčastejšie vytvorený tak, že na planárnu podložku (substrát) s indexom lomu n_s je nanosená vlnovodná, transparentná dielektrická vrstva s indexom lomu n_f , ktorá môže mať na povrchu ďalšiu kryciu vrstvu dielektrika n_c . Krycia vrstva môže mať ochrannú funkciu alebo vytvára požadované vlnovodné vlastnosti štruktúry. Pokiaľ je jeden z priečných rozmerov vlnovodnej štruktúry neobmedzený, čo sa týka veľkosti, hovoríme o dvojrozmernom vlnovode. Rozloženie poľa vlny je v tomto prípade funkciou iba dvoch premenných – jednej priečnej a jednej pozdĺžnej vzhľadom k smeru šírenia vlny [4].

Pokiaľ planárna vlnovodná štruktúra vlnu v oboch priečných rozmeroch obmedzuje, jedná sa o 3D vlnovod (obr. 2.2) [4].



Obr. 2.2: Planárna štruktúra v tvare dielektrickej vrstvy.

Rozlišujeme viacero typov 3D planárnych vlnovodov (obr. 2.3) – napr. pásikové, s ponoreným pásikom, rebrový, vlnovod zaťažený pásikom alebo difúzny kanálik [2,4].



Obr. 2.3: Príklady typov 3D vlnovodov: a) pásikový, b) s ponoreným pásikom, c) zaťažený pásikom, d) difúzny kanálik [4].

Na riešenie mechanizmov vedenia vln v planárnych štruktúrach sa používajú dva prístupy. Prvou je metóda geometrickej optiky, ktorej prednosťou je jednoduchosť a názornosť a slabou stránkou je to, že určité problémy neumožňuje riešiť. Tento prístup zahŕňa použitie Snellovho zákona odrazu a lomu. Pomocou tejto metódy bol odvodený vzťah pre výpočet numerickej apertúry, ktorá je jedným z najzákladnejších parametrov všetkých optických vlákien. Druhou je vlnová teória, ktorá vychádza z Maxwellových rovníc. Táto metóda je zložitejšia, ale aj účinnejším nástrojom. Pomocou nej je možné vysvetliť napr. interferenčné úkazy vyplývajúce z vlnového charakteru žiarenia, nelineárne, disperzné a polarizačné mechanizmy, atď. [4,8].

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 je definovaný vzťahom [4]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 n^2 \quad (2.1)$$

kde ε_0 je permitivita vákuu.

Pokiaľ uvažujeme straty, teda pohlcovanie určitej energie materiálom, platí vzťah [4]:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 \varepsilon_{rk} = \varepsilon_0 n_k^2 \quad (2.2)$$

kde n_k je komplexný index lomu.

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

Fázová rýchlosť vlny (rýchlosť zmeny fázy) vo vlnovode je definovaná nasledovne [4]:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.3)$$

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 [4]:

$$v_s = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (2.4)$$

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 [4]:

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.5)$$

kde k_0 je konštanta šírenia vo voľnom priestore.

Vidy vo vlnovode

Vlna sa vo vlnovode šíri pomocou tzv. vidov (módov). Vidy ψ_1 až ψ_m sú riešeniami rovnice [9]:

$$\nabla^2 = \frac{1}{u^2} \cdot \frac{\sigma^2 \psi}{\sigma^2} \quad (2.6)$$

kde ψ je vlnová funkcia závislá na čase a priestore, u je rýchlosť šírenia vlny a t je čas. ψ_1 až ψ_m predstavujú rôzne typy elektromagnetických vln, ich počet m závisí na rozmeroch a parametroch štruktúry [9].

Pomocou vlnovej optiky môžeme u dvojrozmerných planárnych vlnovodov zistiť rozloženie intenzít a energie poľa. V tomto prípade rozlišujeme TE a TM vlny (vidy). TE (transverzálne elektrické) vidy majú iba zložky intenzít E_y , H_x a H_z , TM (transverzálne magnetické) vidy majú zložky H_y , E_x a E_z (podľa usporiadania osí na obr. 2.2).

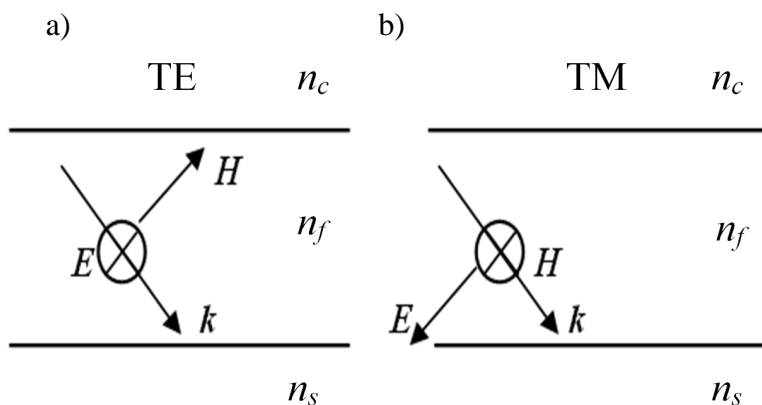
V prípade trojrozmerných vlnovodných štruktúr, medzi ktoré zaraďujeme pásikové a kanálikové vlnovody, existujú iba hybridné vlny, ktoré majú všetkých šesť zložiek elektromagnetického poľa, inak by neboli splnené podmienky na rozhraní jadra a okolia. Tieto vlny sa označujú ako EH_{mp} a HE_{mp} podľa druhu polarizácie. Vidové čísla m , p určujú variácie poľa v smere osi x a y [4].

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 [9].

Počet vedených vidov je možné určiť zo vzťahu [4]:

$$m = \text{Int} \left\{ \frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (2.7)$$

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 vln je $p_{13} = 1$ (obr. 2.4a)), v prípade vln TM je $p_{13} = (n_f/n_c)^2$ (obr. 2.4b)).



Obr. 2.4: Orientácia vln vzhľadom na smer šírenia: a) TE polarizácia, b) TM polarizácia [4].

Zákon odrazu a zákon lomu

Pri šírení vln vo vlnovode, v prípade riešenia vedenia vln pomocou geometrickej optiky, zohrávajú dôležitú úlohu zákon odrazu a zákon lomu (Snellove zákony).

Pri dopade na rovinu rozhrania dvoch prostredí sa lúč čiastočne láme a čiastočne odráža (obr 2.5).

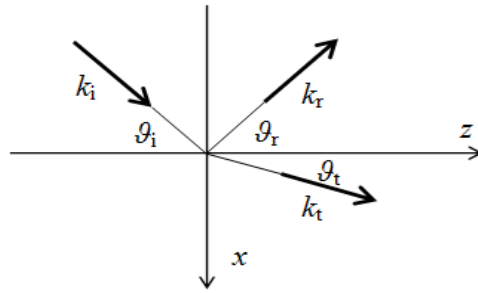
Zákon odrazu hovorí, že uhol odrazu vlny na rozhraní sa rovná uhlu dopadu [4]:

$$\vartheta_r = \vartheta_i. \quad (2.8)$$

Zákon lomu je vyjadrený vzťahom [4]:

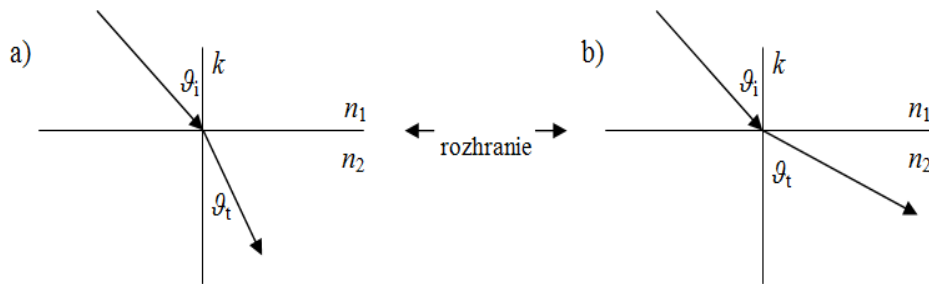
$$k_1 \cdot \cos \vartheta_i = k_2 \cdot \cos \vartheta_t \quad (2.9)$$

kde $k_1 = \mathbf{k}_i$ (vlnový vektor dopadajúcej vlny), $k_2 = \mathbf{k}_t$ (vlnový vektor prenikajúcej vlny) a ϑ_t je uhol lomu.



Obr. 2.5: Odraz a lom vlny na rozhraní [4].

Pokiaľ lúč prechádza z prostredia s nižším indexom lomu n_1 do prostredia s vyšším indexom lomu n_2 , uhol lomu ϑ_t je menší ako uhol dopadu ϑ_i (obr. 2.6a)). V tomto prípade sa jedná o lom ku kolmici dopadu k . V opačnom prípade, keď $n_1 > n_2$, je uhol lomu ϑ_t väčší ako uhol dopadu ϑ_i a nastáva lom od kolmice dopadu (obr. 2.6b)) [2, 3, 4].



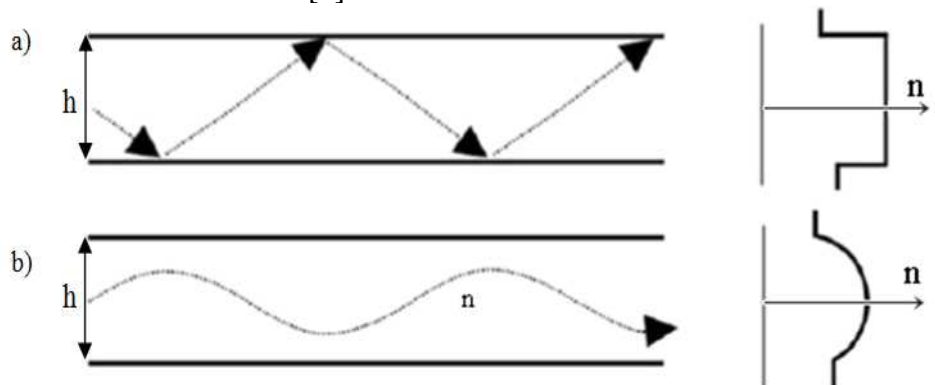
Obr. 2.6: (a) Lom ku kolmici dopadu, (b) lom od kolmice dopadu [4].

Vedenie vln vo vlnovode

U optických vln sa stretávame s dvomi mechanizmami vedenia vln, je to totálny odraz a ohyb vln (obr. 2.7). Pokiaľ $n_1(n_f) > n_2(n_s)$, môže nastať prípad, kedy $\vartheta_i = 0$. V prípade totálneho odrazu vzniká superpozíciou vln odrážajúcich sa od rozhraní jadro-krycia vrstva a jadro-substrát stojatá vlna. Uhol ϑ_c , ktorý zodpovedá tomuto stavu je kritický (medzný) uhol, ktorý je určený vzťahom [4]:

$$\vartheta_c = \arccos \frac{n_s}{n_f} \quad (2.10)$$

Po oboch stranách rozhraní vzniká evanescentná (povrchová) vlna, ktorej amplitúda so vzdialenosťou od rozhrania klesá [4].



Obr. 2.7: a) Totálny odraz, b) ohyb vlny [2, 4, 10].

Aby mohol nastať totálny odraz a vlna sa vlnovodnou vrstvou šíri, 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, 9].

Pri prechode lúča vlnovodnou štruktúrou sa mení jeho fáza (obr. 2.8). Pri postupe lúča o vzdialenosť ds sa zmení jeho fáza o $d\Phi = k_f ds = k_0 n_f ds$. 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 [4]:

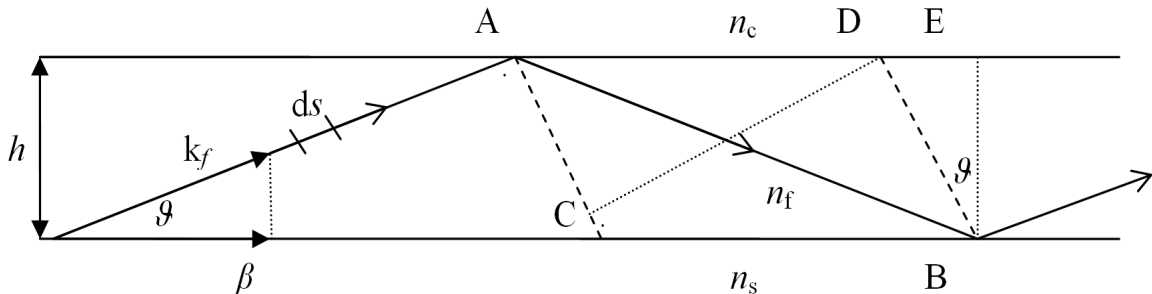
$$k_f \overline{AB} + \Phi_{12} + \Phi_{13} = k_f \overline{CD} + 2m\pi \quad (2.11)$$

kde Φ_{12} , Φ_{13} sú fázové posuny pri totálnom odraze a m je celé číslo $m = 0, 1, 2, \dots$

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 [4]:

$$2hk_{fx} + \Phi_{12} + \Phi_{13} = 2m\pi \quad (2.12)$$

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 počet vedených vidov [2, 4].



Obr. 2.8: Šírenie lúča vo vlnovodnej vrstve s vyznačenými vlnoplochami vlny (čiarkovane) [4].

Optické straty

Pri prenose optického výkonu vlnovodnou štruktúrou dochádza k určitým stratám. Pokles energie určitého vidu šíriaceho sa vlnovodom v smere osi z je možné popísať vzťahom $\exp(-\alpha_i z)$, kde α_i je koeficient útlmu zodpovedajúci optickým stratám.

V prípade planárnych vlnovodov prispievajú k optickým stratám najmä tieto tri mechanizmy:

1. absorpcia, ktorá je vlastnosťou použitého materiálu, závisí však aj na prítomnosti prímiesí
2. rozptyl na nehomogenitách rozložených v objeme vlnovodu (praskliny, hranice zrna)
3. rozptyl na nerovnostiach na oboch rozhraniach vlnovodu s okolitým prostredím [7, 9].

Koeficient útlmu α_t možno vyjadriť ako súčet čiastkových koeficientov útlmu prislúchajúcich jednotlivým stratovým mechanizmom [7]:

$$\alpha_t = \alpha_a + \alpha_{vs} + \alpha_{ss} \quad (2.13)$$

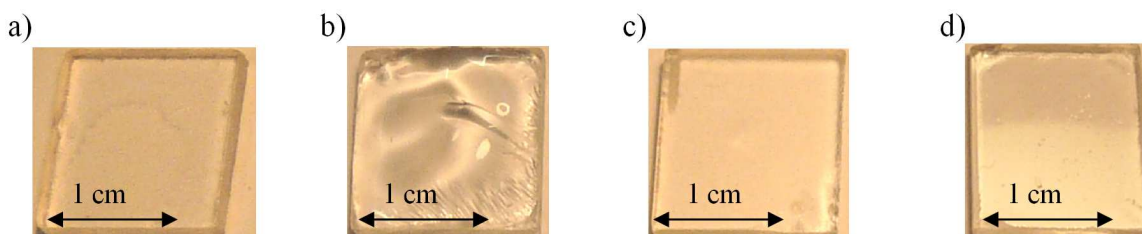
kde α_a je koeficient útlmu absorpčných strát, α_{vs} koeficient útlmu objemového rozptylu a α_{ss} je koeficient útlmu povrchového rozptylu.

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, dokonca bývajú často dominantné [7, 9].

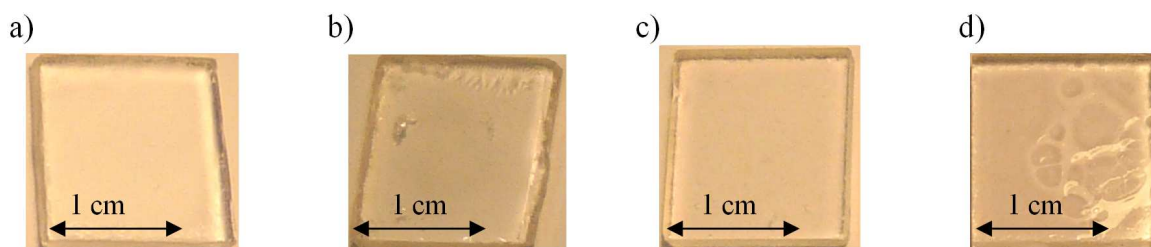
3. Depozičné testy pre určenie materiálových konštant

Hlavným cieľom týchto testov, ktoré prebiehajú pred samotnou výrobou rozbočníc, je príprava polymérnych materiálov na meranie indexov lomu, pomocou ktorých je možné vypočítať a nasimulovať rozmery planárnych štruktúr. Pri týchto testoch sa tiež zisťuje doba potrebná na to, aby vlnovodný materiál nanosený na substrát a vystavený UV žiareniu získal žiaducu štruktúru. Na začiatku testov je na substráty nanosený acetón a následne sú očistené rýchlym rotačným pohybom v špeciálnom vákuovom prístroji. Následne sa skontroluje, či bolo čistenie dostatočné a na substráte sa nenachádzajú viditeľné nečistoty. Nasleduje nanosenie vrstvy testovaného polyméru a opäť sú substráty vložené do vákuového prístroja, aby sa táto vrstva rovnomerne rozliala po celej ploche substrátu – rotačné liatie. Nakoniec sa táto vzorka vystaví žiareniu UV lampy a meria sa čas potrebný na to, aby vrstva polyméru nadobudla žiaduce vlastnosti. Výsledky úvadzajúce čas potrebný na vytvrdenie jednotlivých vzoriek materiálov sú uvedené v tab. D1 v Prílohe D. Najkratší čas na vytvrdenie potrebovala vzorka, kde bol ako substrát použitý SiO_2 a vlnovodnou vrstvou bol materiál NOA72 a vzorka s materiálmi SiO_2 /Photobond 400(DELO). Najnáročnejšie na čas bolo vytvrdzovanie materiálov NOA164.

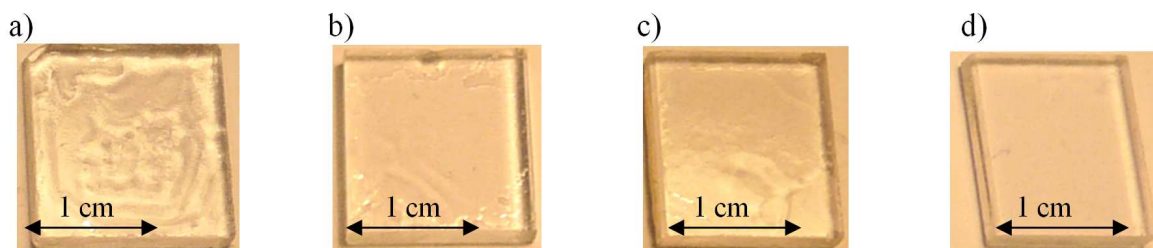
Na nasledujúcich obrázkoch 3.1 až 3.3 sú odfotené vybrané vzorky pokryté vytvrdenými vlnovodnými vrstvami.



Obr. 3.1: Vzorky s nanesenými polymérnymi materiálmi,
a) NOA72 (č. 190), b) NOA73 (č. 191), c) DY 3225 (č. 192), d) DELO 300 (č.193).



Obr. 3.2: Vzorky s nanesenými polymérnymi materiálmi,
a) DELO400 (č. 194), b) NOA164 (č. 195), c) DY 3221-SC (č. 196), d) NOA88 (č.197).

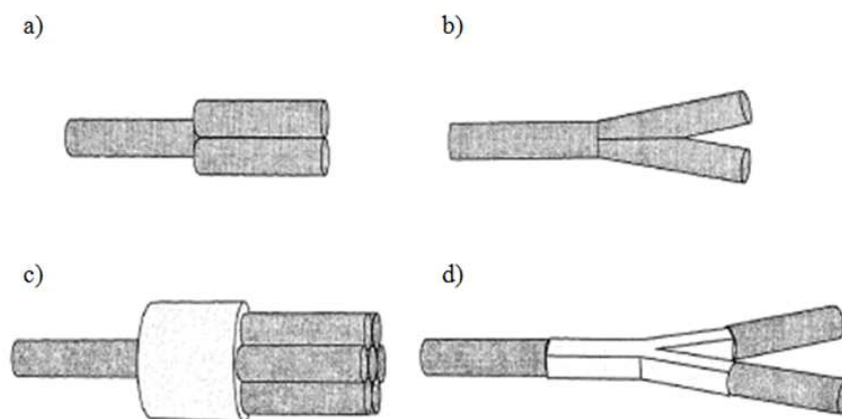


Obr. 3.3: Vzorok s nanesenými polymérnymi materiálmi,
a) DY OP-4-20632 (č. 199), b) NOA72 (č. 201), c) NOA73 (č. 202), d) OG113 (č. 203).

4. Optické mnohovidové rozbočnice

Optické rozbočnice patria medzi základné fotonické štruktúry, ktoré sú využívané v praxi v rámci prenosových sietí a bývajú napojené na optické vlákna. Rozlišujeme rozbočnice jednovidové a mnohovidové podľa počtu vedených vidov. Základnými druhmi sú rozbočnice $1 \times 2Y$, tzn. s 1 vstupným kanálom a dvomi výstupnými, ktoré rozdeľujú vstupujúci výkon do dvoch vetiev ideálne v rovnakom pomere (obr. 4.2), potom $1 \times 4Y$ so 4 výstupnými kanálmi, ktoré bývajú vytvorené kaskádovým spojením rozbočníc $1 \times 2Y$. Netypickým riešením sú štruktúry s nepárnym počtom výstupov. Rozbočnice s plastovými optickými vláknami sa označujú ako POF (Plastic Optical Fiber) rozbočnice.

Existuje viacero metód realizácie POF rozbočníc, niektoré sú uvedené na obr. 4.1. Výhodou prvej metódy (obr. 4.1a)) je jednoduchosť, nevýhodou je okrem vložného útlmu aj ďalší útlm spôsobovaný tým, že existujú oblasti vstupného POF vlákna, z ktorých nie je svetlo naviazané do výstupných vlákien a problémom je tiež odraz na rozhraní vlákien. V druhom prípade (obr. 4.1b)) je útlm nižší v dôsledku použitia výstupných vlákien zbrúsených na koncoch, tento spôsob je však zložitejší v porovnaní s prvým spôsobom. Tretie riešenie (obr. 4.1c)) obsahuje viacero výstupných vlákien. Medzi nimi a vstupným vláknom sa nachádza zmiešavací valec zo skla alebo plastu. Najviac flexibilným spôsobom riešenia POF rozbočnice je metóda s planárnou rozbočnicou (obr. 4.1d)). Hlavnou výhodou je nízky celkový útlm [11].

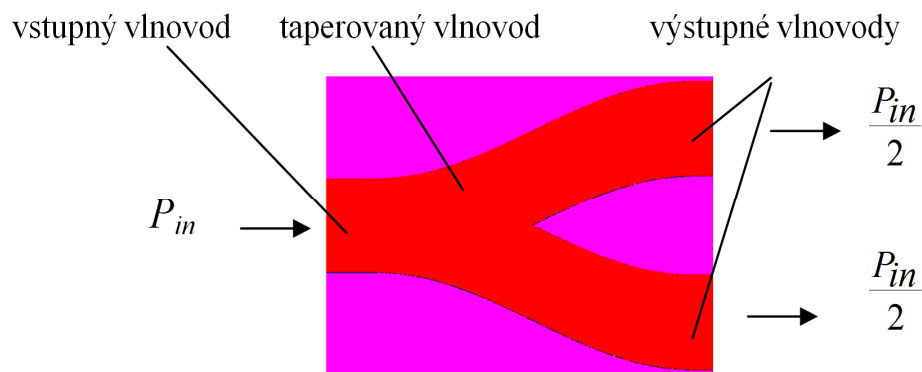


Obr. 4.1: Možnosti realizácie rozbočníc s POF vláknami, a) 1×2 rozbočnica s mechanicky prepojenými vláknami, b) 1×2 rozbočnica so zbrúsenými vláknami, c) 1×7 rozbočnica s vláknami prepojenými skleneným valcom, d) $1 \times 2Y$ planárna rozbočnica pripojená na optické vlákna [11].

Zaujímavú možnosť ponúka využitie filtrov v planárnych rozbočniciach, ktoré prepúšťajú iba lúč určitej vlnovej dĺžky, tým možno napr. dosiahnuť selektivitu vlnovej dĺžky lúča prechádzajúceho určitým ramenom rozbočnice. Filtre sú vhodné pre použitie na demultiplexovanie signálu prenášaného optickým vláknom. Keďže jedným optickým vláknom môžeme prenášať viacero kanálov s rôznymi vlnovými dĺžkami (vlnové združovanie WDM), je možné rozbočnicu použiť na vyčlenenie jednotlivých kanálov so zodpovedajúcimi vlnovými dĺžkami zo spoločného vlákna.

4.1 Štruktúra planárnych optických rozbočníc

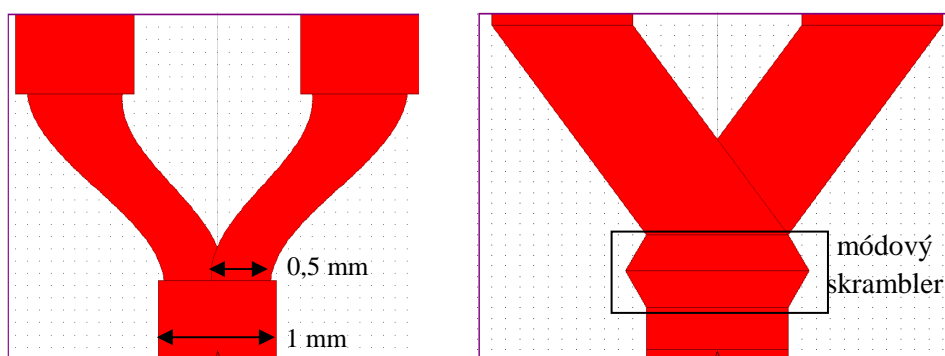
Planárna optická rozbočnica sa skladá z viacerých častí: vstupný vlnovod, do ktorého sa ukladá vstupné optické vlákno, naň nadväzuje rozširujúci sa vlnovod nazývaný taperovaný vlnovod a nasledujú vlnovodné ramená, ktorých počet závisí na type rozbočnice (obr. 4.2). Vlnovodné ramená môžu byť užšie ako vstupné a výstupné vlnovody. Vstupné a výstupné kanálikové vlnovody rozbočníc navrhovaných v rámci tejto práce majú šírku 1 mm na vstupe a výstupe z dôvodu priemeru jadra optického vlákna, ktoré je do nich vkladané. Šírka vlnovodných ramien môže byť napr. 0,5 mm, podľa rozbočnice navrhutej p. T. Klotzbücherom a jeho spolupracovníkmi (obr. 4.3a)) [11]. Existuje tiež viacero tvarových riešení výstupných ramien, napr. tvaru S (S-bend) alebo lomeného tvaru . Do rozbočnice sa tiež môžu vložiť ďalšie špeciálne vlnovodné súčasti, ako je napr. módový skrambler podľa práce publikovanej tímom pod vedením p. Yanga Gao (vidový premiešavač zložený z 2 taperovaných vlnovodov, obr. 4.3b)) [12]. Takýto skrambler sa skladá z dvoch rozširujúcich sa vlnovodov otočených oproti sebe dlhšou stranou. Príklady rozbočníc uvedených v odborných článkoch sú uvedené v kapitole 4.2.



Obr. 4.2: Optický rozbočovač typu 1x2Y s vyznačením ideálneho pomeru výstupných výkonov.

a)

b)

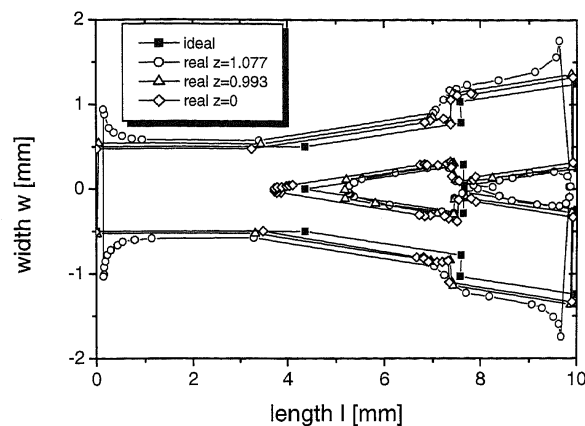


Obr. 4.3: Pozdĺžny rez rozbočníc 1x2Y v simulačnom programe BeamPROPTM, a) podľa návrhu T. Klotzbüchera [11], b) s módovým skramblerom [12].

4.2 Príklady realizovaných rozbočníc

V odbornej literatúre sa môžeme stretnúť s viacerými postupmi návrhu a výroby planárnych rozbočníc. Vedecké tímy sa zaoberajú rôznymi technológiami výroby a testujú použitie rozličných materiálov pre realizáciu planárnych štruktúr.

Jeden z prvých návrhov planárnych POF rozbočníc môžeme nájsť v práci vedeckého tímu z ústavu Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH pod vedením T. Klotzbüchera [11]. Jedná sa o rozbočnicu 1x2Y s rozmermi vlnovodnej vrstvy 1x1 mm, ktorá bola simulovaná lúčovou metódou (Ray-Tracing) a vyrobená pomocou technológie Laser – LIGA (obr. 4.4). V prípade tejto metódy je v polymére vytvorená štruktúra odstránením určitých častí pomocou excimerového lasera, vyplnením získanej štruktúry sa získa razník, ktorý je oddelený od polyméru. Na výrobu rozbočnice bol v danom prípade použitý niklový razník, ktorým bol v polymére PMMA vytvorený požadovaný motív. Šírka vstupného a výstupných vlnovodov rozbočnice bola 1 mm, ramená rozbočnice boli široké 0,5 mm. Do drážok bola nanosená živica, ktorá bola následne vytvrdená pomocou UV svetla. Vložné optické útlmy rozbočníc vyrobených touto metódou dosahovali najviac 6 dB pri vlnovej dĺžke 660 nm [2,11].

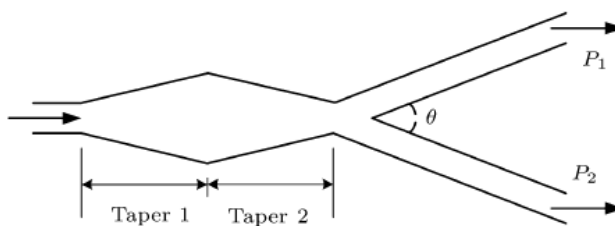


Obr. 4.4: Štruktúra rozbočnice podľa návrhu T. Klotzbüchera [11].

Ďalší postup výroby planárnej polymérnej rozbočnice bol uverejnený v roku 2006. Vedecký tím vedený H. Mizunom z Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai, Japonsko najskôr vytvoril motív z fotorezistívneho materiálu, z ktorého bol jeho tvar znovu formovaný v gume. Z gumovej formy bol vyrobený razník vytvrdením polymérnej živice. Týmto razníkom bol vytvorený motív v polymére PMMA. Vyrobené štruktúry mali vložný optický útlm pri vlnovej dĺžke 650 nm asi 1,6 dB [13].

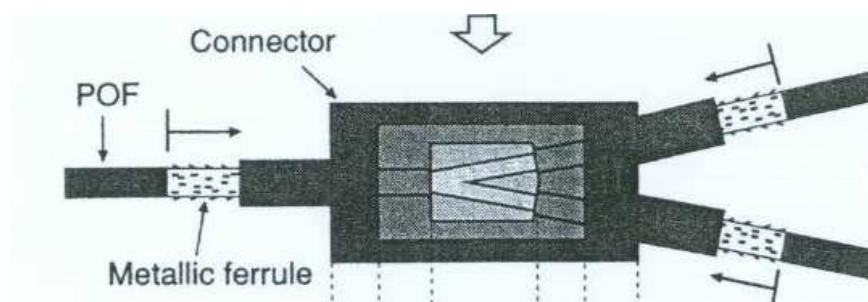
Ďalšie riešenie optickej rozbočnice bolo popísané v článku, ktorý uverejnila skupina vedeckých pracovníkov pod vedením Yanga Gao zo Zhejiang University, Hangzhou. Pri jej výrobe bola použitá technika iónovej výmeny. Jadro rozbočnice s hĺbkou 50 μm bolo vytvorené v substráte zo skla. Pre zlepšenie rovnomernosti rozbočenia bola súčasťou rozbočnice štruktúra vytvorená z dvoch taperovaných vlnovodov, ktoré spolu tvorili tzv. vidový skrambler (obr. 4.5). Celková dĺžka rozbočnice dosahovala 24,5 mm. Najnižší

zmeraný útlm bol menší ako 0,1 dB/cm pri použití zdroja svetla s vlnovou dĺžkou 1550 nm [12].



Obr. 4.5: Štruktúra rozbočnice so skramblerom [12].

V článku z roku 1994, ktorý uverejnil tím pod vedením Yoshitaka Takezawy, je demonštrovaná výroba Y rozbočnice metódou injekčného nanášania. Jadro rozbočnice bolo vytvorené z amorfneho vinylového polyméru a plášť (substrát, krycia vrstva) z transparentného polyolefínu. Do kovovej formy bol injektovaný materiál plášťa, neskôr bol aplikovaný materiál jadra. Štruktúra bola zakrytá krycou vrstvou a na kryciu vrstvu bol nainštalovaný konektor na fixáciu POF vlákien do štruktúry (obr. 4.6). Priemerné hodnoty optického útlmu tohto typu štruktúry sa pohybovali na úrovni 1,9 dB pri vlnovej dĺžke 660 nm [14].



Obr. 4.6: Rozbočnica vyrobená metódou injekčného nanášania [14].

Návrhy rozbočníc s použitím metódy šírenia optického zväzku (Beam Propagation Method) možno nájsť v bakalárskych prácach Radka Maštera s názvom *Návrh optické planárnej mnohavidovej výkonovej 1x2Y a 1x3Y rozbočnice pro POF vlákna* a Miloše Nerudu s názvom *Návrh optické planárnej mnohavidovej rozbočnice* (obidve ČVUT FEL).

V prvej menovanej práci boli navrhnuté a vyrobené rozbočnice 1x2Y a 1x3Y s vlnovodmi tvaru S základného typu s rovnakou šírkou kanálikov – 1 mm a typu podľa návrhu T. Klotzbüchera. V prípade 1x3Y rozbočníc (obr. 4.7) boli simulované aj rozbočnice s vloženou obdĺžnikovou oblasťou pre dosiahnutie symetrického rozloženia výstupného optického výkonu do všetkých troch výstupných kanálikových vlnovodov. Navrhnuté štruktúry boli vyrobené dvomi spôsobmi – pomocou CNC gravírovania a pomocou výroby negatívnej predlohy. U rozbočníc 1x2Y bol najnižší útlm dosiahnutý v prípade vzorky so substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA88, konkrétne 2,26 dB na vlnovej dĺžke 850 nm. Zo štruktúr 1x3Y je uvedená najnižšia hodnota útlmu 2,81 dB opäť na vlnovej dĺžke 850 nm, a to znovu pre rozbočnicu tvorenú substrátom PMMA a vlnovodnou vrstvou NOA88 [2].



Obr. 4.7: Rozbočnica 1x3Y [2].

M. Neruda sa vo svojej práci zaoberal primárne návrhom a výrobou rozbočníc 1x2Y so šírkou kanálikov 1 mm a substrátom z materiálu PMMA. Kanáliky boli do substrátu vytvárané CNC gravírovaním. V prípade niektorých rozbočníc bol vyskúšaný vlnovodný materiál NOA1625. Najlepší výsledok vložného optického útlmu bol 2,7 dB na vlnovej dĺžke 532 nm v prípade rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA1625. Popísaný a vyrobený bol tiež jeden motív 1x4Y so substrátom z PMMA a vlnovodným materiálom NOA1625. Najnižšia hodnota útlmu bola v tomto prípade 13,9 dB na vlnovej dĺžke 850 nm [15].

Návrh rozbočnice ďalšou odlišnou metódou, pracujúcou na princípe dopadajúcich a odrazených lúčov na rozhraní dvoch prostredí popísanom Snellovým zákonom, môžeme nájsť v diplomovej práci Phama Ngoc Kiena s názvom Návrh mnohavidové optické rozbočnice pomocou metódy Ray Tracing (FEL ČVUT). Na simulácie bol použitý software od firmy OptiCAD Corporation. Navrhnuté rozbočnice boli vyrábané 3 technológiami – CNC gravírovaním, laserovým gravírovaním a metódou nazývanou imprinting. Najnižší útlm bol nameraný v prípade rozbočnice so substrátom PMMA a vlnovodným materiálom NOA73 vyrobenej CNC gravírovaním, a to 3,5 dB na vlnovej dĺžke 532 nm [3].

5. Návrh rozbočníc

5.1 Voľba materiálov

Pred výrobou optických rozbočníc je dôležité vybrať vhodné materiály substrátu, vlnovodnej a krycej vrstvy.

Pri výrobe rozbočníc som používal ako substrát priehľadný materiál polymetylmakrylát (PMMA), v prípade prvej sady vyrobených štruktúr boli ako vlnovodné materiály použité polyméry NOA73 (NOA – Norland Optical Adhesive) a OG113, v prípade druhej sady bol výber materiálov prehodnotený, pretože sa použitie materiálu OG113 ukázalo ako nevhodné z hľadiska doby potrebnej na vytvrdenie pod UV lampou a kvality dosahovanej po vytvrdení a použitý bol polymér NOA73 a v jednom prípade NOA1625.

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 a má nízku hodnotu indexu lomu [3, 16].

Materiál NOA73 od firmy Norland Optical Adhesive 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 [17].

EPO-TEK OG113 od firmy Epoxy Technology Inc. je číry tekutý bezfarebný materiál s nízkou viskozitou a s nižšími hodnotami indexu lomu ako NOA73 a NOA1625 [18].

Existuje rad ďalších polymérov vhodných na aplikáciu v planárnych štruktúrach, napr. ďalšie druhy NOA polymérov (NOA72, NOA88), polymér ENR (Epoxy Novolak Resin), DELO (DELO300, DELO400), EPO-TEK (OG116, OG125) a iné.

5.2 Teoretické výpočty parametrov rozbočníc

Pred návrhom rozbočníc v simulačnom programe BeamPROP™ od firmy RSoft som urobil základný teoretický návrh podľa analýzy, ktorú publikoval D. Beltrami v článku *Planar multimode waveguides and devices* v roku 1999 [19] a vypočítal som tiež hodnoty činiteľa priepustnosti a odrazivosti pre vybrané vlnové dĺžky.

Medzi dôležité parametre pri návrhu rozbočnice patrí maximálny uhol θ , ktorý zvierajú výstupné vlnovody [20]:

$$\theta \leq \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{n_f} \quad (5.1)$$

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

Minimálna dĺžka spoločného – taperovaného vlnovodu d sa vypočíta zo vzťahu [20]:

$$D = \frac{d \cdot \sin \Omega}{\rho(2 - \cos \Omega)} \quad (5.2)$$

kde D je normovaná dĺžka ($D = 1$), w je šírka vlnovodu, $\rho = w/2$ a Ω je uhol, ktorý vypočítame zo vzťahu [20]:

$$\Omega \leq \frac{\theta D}{D+1} \quad (5.3)$$

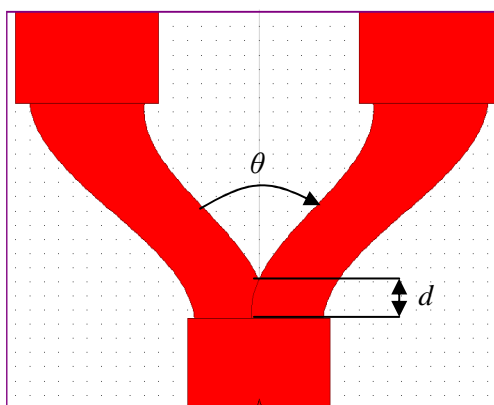
Ďalším kľúčovým parametrom je bezrozmerná veličina nazývaná numerická apertúra, ktorá nám hovorí, pod akým najväčším uhlom je možné do rozbočnice naviazať optický signál tak, aby bol vedený bez radiačných strát [8,20]:

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (5.4)$$

Relatívny kontrast indexu lomu získame zo vzťahu [8]:

$$\Delta = \frac{n_f^2 - n_s^2}{2n_f^2} \quad (5.5)$$

U klasických telekomunikačných optických vlákien je tento parameter typicky menší ako 0,01. V prípade planárnych vlnovodov dosahuje vyššie hodnoty [8].



Obr. 5.1: Rozbočnica 1x2Y s vyznačenou dĺžkou taperovaného vlnovodu d a uhlom θ .

Podľa uvedených vzťahov som vypočítal parametre rozbočnice 1x2Y pre tri kombinácie substrát/vlnovodný materiál, a to PMMA/NOA1625, PMMA/NOA73 a PMMA/OG113 (tab. 5.1 až 5.3). Hodnoty indexu lomu n_f a n_s boli odčítané z grafu hodnôt zmeraných pomocou zariadenia Metricon (kap. 7.1).

Tab. 5.1: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/NOA1625.

λ (nm)	n_f (-)	n_s (-)	θ (°)	Ω (°)	d (mm)	NA (-)	Δ (-)
532	1,637	1,495	24,04	12,02	2,45	0,667	0,083
650	1,625	1,489	23,61	11,80	2,50	0,651	0,080
850	1,617	1,486	23,22	11,61	2,54	0,638	0,078

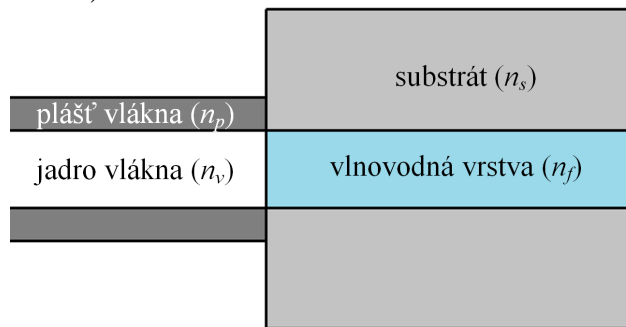
Tab. 5.2: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/NOA73.

λ (nm)	n_f (-)	n_s (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	NA (-)	Δ (-)
532	1,564	1,495	17,08	8,54	3,40	0,459	0,043
650	1,555	1,489	16,75	8,38	3,47	0,448	0,042
850	1,549	1,486	16,40	8,20	3,54	0,437	0,040

Tab. 5.3: Vypočítané parametre rozbočnice 1x2Y pri použití materiálov PMMA/OG113.

λ (nm)	n_f (-)	n_s (-)	Θ (°)	Ω (°)	d (mm)	NA (-)	Δ (-)
532	1,547	1,495	14,90	7,45	3,89	0,398	0,033
650	1,538	1,489	14,50	7,25	3,99	0,385	0,031
850	1,532	1,486	14,08	7,04	4,11	0,373	0,030

Aby dochádzalo k čo najmenším stratám pri šírení svetla rozbočnicou, musí byť rozhranie medzi optickým vláknom a vlnovodnou vrstvou aplikovanou do vlnovodnej rozbočnice čo najviac priepustné (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Rozhranie medzi optickým vláknom a vlnovodnou vrstvou v substráte.

Činitele odrazu R (reflektancia) a priepustnosti rozhrania T (transmitancia) súvisiace s lomom a odrazom lúča na rozhraní dvoch rôznych materiálov je možné pre kolmý dopad na rozhranie vypočítať podľa vzťahov [21]:

$$R = \left(\frac{n_f - n_v}{n_f + n_v} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$T = \frac{4n_f n_v}{(n_f + n_v)^2} \quad (5.7)$$

kde n_f je index lomu vlnovodnej vrstvy v planárnom kanáliku a n_v je index lomu jadra vláknového vlnovodu.

V nasledujúcich tabuľkách 5.4 a 5.5 sú uvedené vypočítané hodnoty R a T pre rozhrania materiálu PMMA, ktorý tvorí jadro vlákna, a vlnovodných vrstvičiek NOA1625, OG113 a NOA73 aplikovaných do substrátu pri uvažovaní dvoch druhov vlákien, ktoré boli použité pri výrobe rozbočníc. Hodnoty indexu lomu n_f boli odčítané z grafu hodnôt zmeraných pomocou zariadenia Metricon (kap. 7.1), hodnoty n_v sú hodnoty uvedené výrobcami vlákien - Toray Industries, Inc. [22] a Thorlabs, Inc. [23]. Materiál PMMA tvoriaci jadro vlákien sa odlišuje indexom lomu od PMMA, ktorý tvorí substrát rozbočnice.

Tab. 5.4: Vypočítané hodnoty činiteľa priepustnosti a činiteľa odrazu pre rozhranie PMMA/NOA1625, PMMA/OG113 a PMMA/NOA73, vlákno PFU-UD1001-22V.

$\lambda(\text{nm})$	PMMA/NOA1625			PMMA/NOA73			PMMA/OG113		
	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$
473	1,643	0,0024	0,9976	1,569	0,0007	0,9993	1,552	0,0004	0,9996
532	1,637	0,0022	0,9978	1,564	0,0006	0,9994	1,547	0,0004	0,9996
650	1,625	0,0019	0,9981	1,555	0,0006	0,9994	1,538	0,0003	0,9997
850	1,617	0,0017	0,9983	1,549	0,0004	0,9996	1,532	0,0002	0,9998
964	1,614	0,0016	0,9984	1,546	0,0003	0,9997	1,528	0,0002	0,9998
1260	1,609	0,0015	0,9985	1,543	0,0003	0,9997	1,524	0,0001	0,9999
1311	1,608	0,0015	0,9985	1,543	0,0003	0,9997	1,524	0,0001	0,9999
1560	1,606	0,0014	0,9986	1,540	0,0003	0,9997	1,521	0,0001	0,9999

* $n_v = 1,490$ (pre všetky vlnové dĺžky) [22]

Tab. 5.5: Vypočítané hodnoty činiteľa priepustnosti a činiteľa odrazu pre rozhranie PMMA/NOA1625, PMMA/OG113 a PMMA/NOA73, vlákno FG910LEC.

$\lambda(\text{nm})$	PMMA/NOA1625			PMMA/NOA73			PMMA/OG113		
	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$	$n_f(-)$	$R(-)$	$T(-)$
473	1,643	0,0036	0,9964	1,569	0,0014	0,9986	1,552	0,0010	0,9990
532	1,637	0,0034	0,9966	1,564	0,0013	0,9987	1,547	0,0009	0,9991
650	1,625	0,0030	0,9970	1,555	0,0011	0,9989	1,538	0,0007	0,9993
850	1,617	0,0027	0,9973	1,549	0,0009	0,9991	1,532	0,0006	0,9994
964	1,614	0,0026	0,9974	1,546	0,0009	0,9991	1,528	0,0006	0,9994
1260	1,609	0,0025	0,9975	1,543	0,0009	0,9991	1,524	0,0005	0,9995
1311	1,608	0,0024	0,9976	1,543	0,0008	0,9992	1,524	0,0005	0,9995
1560	1,606	0,0024	0,9976	1,540	0,0008	0,9992	1,521	0,0005	0,9995

* $n_v = 1,457$ (pre všetky vlnové dĺžky) [23]

Z nameraných hodnôt vyplýva, že činiteľ priepustnosti T rastie s vlnovou dĺžkou. Najvyššie hodnoty dosahuje u oboch typov vlákien v prípade vlnovodného materiálu OG113.

Po teoretických výpočtoch nasledovalo oboznámenie sa so simulačným programom pre návrh planárnych štruktúr BeamPROPTM, ktorý využíva metódu šírenia optického zväzku.

5.3 Metóda šírenia optického zväzku

Názov tejto metódy pochádza z anglického spojenia Beam Propagation Method (BPM). Jedná sa o metódu založenú na simulácií šírenia lúča vo vlnovodných štruktúrach. Využíva metódu konečných diferencií pre riešenie Helmholtzovej vlnovej rovnice v parabolickom alebo paraxiálnom priblížení [2, 24, 25].

Pokiaľ je pole skalár, má Helmholtzova rovnica pre monochromatickú vlnu tvar [2, 24, 25]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k(x, y, z)^2 \phi = 0 \quad (5.8)$$

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, 24, 25]:

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z) e^{j\bar{k}z} \quad (5.9)$$

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, 24, 25]:

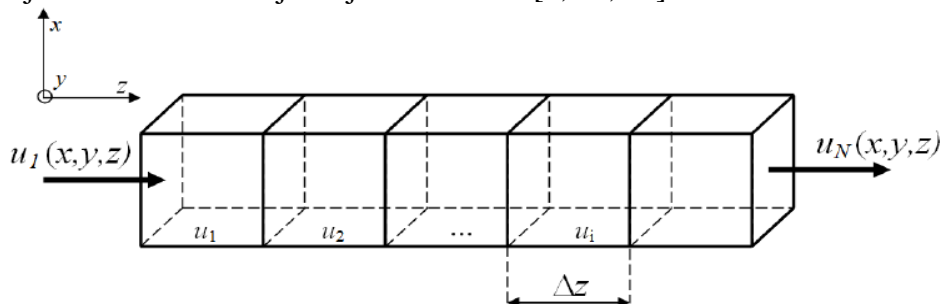
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad (5.10)$$

Za predpokladu, že lúče zvierajú s osou šírenia veľmi malý uhol a pri splnení podmienky pomaly sa meniaceho elektromagnetického poľa, môže byť zanedbaná druhá derivácia podľa z a získame rovnicu, ktorá je základom metódy BPM pre 3D prostredie [2, 24, 25]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right) \quad (5.11)$$

Táto metóda je výhodná z hľadiska nižšej výpočtovej náročnosti. 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, 24].

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 zrejماً z obr. 5.3 [2, 24, 25].



Obr. 5.3: Crank-Nicholsonova schéma [2, 24, 25].

Crank-Nicholsonovu schému možno popísať vzťahom [2, 24, 25]:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{j}{2k} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} \left(k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2 \right) \right) \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} \quad (5.12)$$

kde δ^2 je štandardný diferenciálny operátor, ktorý je určený vzťahom [2, 24, 25]:

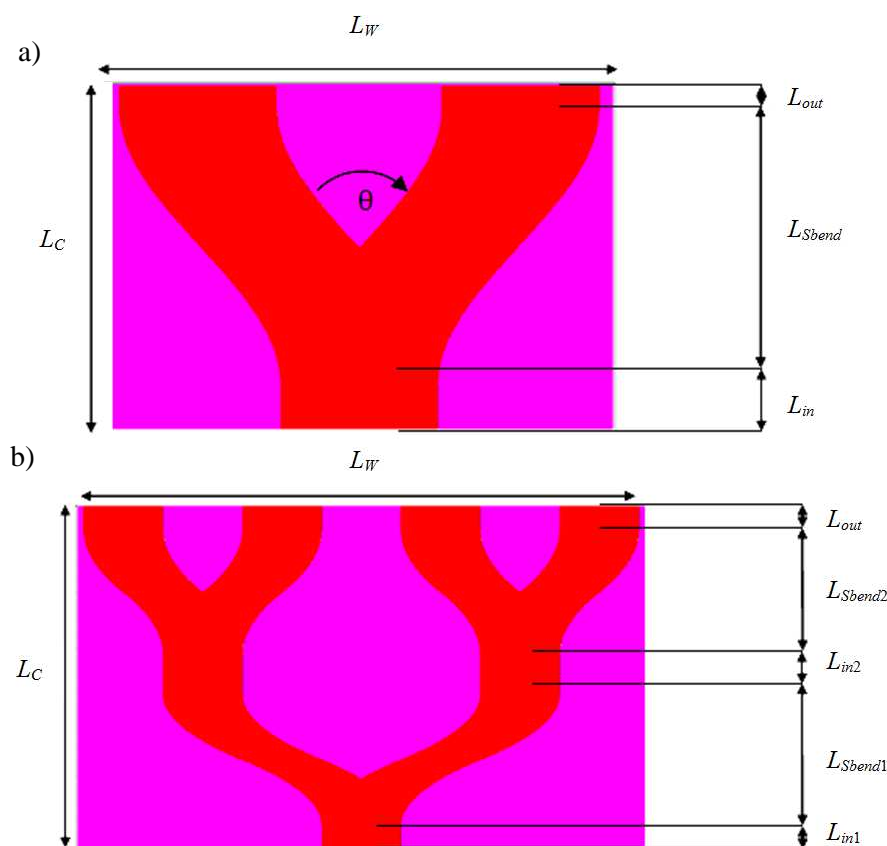
$$\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i). \quad (5.13)$$

5.4 Návrh optických rozbočníc

V simulačnom programe BeamPROPTM som postupne vytvoril desať 2D motívov planárnych rozbočníc. Nasledovalo simulovanie prenosu výkonu prechádzajúceho štruktúrou zo vstupného vlnovodu do výstupných vlnovodov.

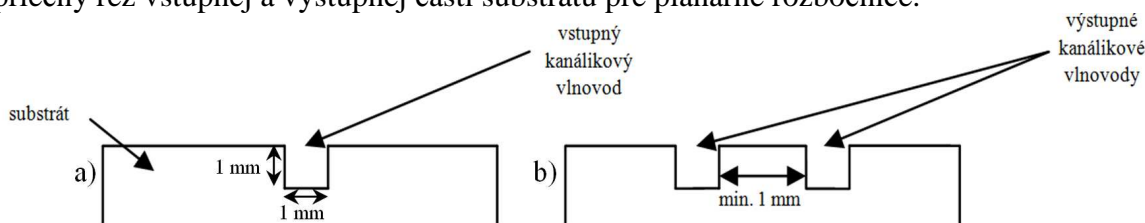
Dôležitým parametrom navrhovanej rozbočnice sú vždy jej rozmery, v prípade ktorých sa snažíme dosiahnuť čo najmenšiu šírku a celkovú dĺžku pri súčasnom zachovaní dobrých výsledkov simulácie, teda čo najlepšej symetrie a veľkosti výstupných výkonov.

Na nasledujúcich profiloch rozbočníc (obr. 5.4) je uvedené používané označenie dĺžok základných komponentov rozbočníc 1x2Y a 1x4Y.



Obr. 5.4: Pozdĺžny rez rozbočnice s vyznačenými dĺžkami jednotlivých komponentov, a) 1x2Y, b) 1x4Y.

Navrhované boli rozbočnice s kanálikovými vlnovodmi (drážkami), ktoré mali priechne rozmery 1x1 mm. Do týchto drážok sú pri výrobe rozbočnice vkladané POF vlákna. Hrúbka plášťa týchto vlákien ovplyvňuje vzdialenosť výstupných kanálikových vlnovodov. Je dôležité, aby ich bolo možné bezproblémovo vložiť vedľa seba pri pripieňovaní do substrátu. Z tohto dôvodu je vzdialenosť medzi výstupnými kanálikmi minimálne 1 mm, s čím som počítal už pri simuláciách v programe BeamPROP™. Na obr. 5.5 je uvedený priečny rez vstupnej a výstupnej časti substrátu pre planárne rozbočnice.



Obr. 5.5: Priečny rez substrátu rozbočnice, a) vstupný pohľad, b) výstupný pohľad.

Postupne som sa zaoberal návrhom rozdielnych štruktúr – šiestich rozbočníc 1x2Y a štyroch 1x4Y rozbočníc. Simulované boli rozbočnice s rovnakou šírkou všetkých vlnovodných kanálikov, ďalej rozbočnice podľa práce T. Klotzbüchera [11], ktoré boli čiastočne upravené z technických dôvodov a rozbočnice s módomým skramblerom. Práve vyskúšanie použitia módomých skramblerov v planárnych štruktúrach bolo jedným z hlavných cieľov práce.

V rámci návrhu rozbočníc bol simulovaný prenos normovaného výkonu rozbočnicou v programe BeamPROP™ a následne porovnané rôzne typy 1x2Y a 1x4Y rozbočníc, líšiac sa veľkosťou a tvarovým riešením jednotlivých častí kanálikových vlnovodov (napr. použitie módomého skrambleru, rôznej šírky vlnovodov). Navrhnutých bolo spolu desať odlišných štruktúr, z ktorých sedem bolo vybratých za účelom ich výroby.

U každej navrhutej rozbočnice je okrem profilu indexu lomu s farebnou stupnicou, ktorej zodpovedá farba indexu lomu rozbočnice a okolitého substrátu a grafických výstupov simulácie uvedená aj tabuľka s celkovou šírkou a dĺžkou rozbočnice a pozdĺžnymi rozmermi jednotlivých častí danej štruktúry (označenie základných komponentov vlnovodov je podľa obr. 5.4a) pre 1x2Y rozbočnicu resp. podľa obr. 5.4b) pre 1x4Y rozbočnicu).

5.4.1 Návrh rozbočnice 1x2Y

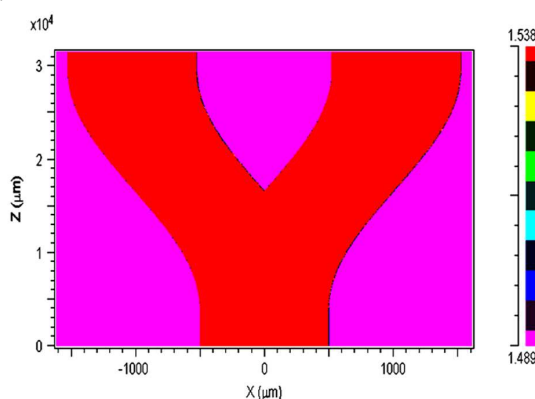
Rozbočnice 1x2Y rozdeľujú v ideálnom prípade vstupujúci výkon do výstupných vetiev v pomere 50%:50% .

Základom rozbočnice bol substrát z materiálu PMMA, v ktorom boli vytvorené kanálikové vlnovody (Y - drážka) štvorcového resp. obdĺžnikového priečného rezu s hĺbkou 1 mm a šírkou 1 mm na vstupe a výstupe štruktúry. Výstupné ramená sú lomeného tvaru alebo majú tvar písmena S. Vlnovodnými materiálmi boli NOA73, OG113 a NOA1625. V simulačnom programe BeamPROP je najskôr vytvorený profil rozbočnice v móde pre 2D štruktúru a pri definovanej presnosti výpočtov *grid size* je vykreslená závislosť normovaného výkonu na vzdialenosti od začiatku rozbočnice.

V prípade rozbočníc s deliacim pomerom 1:2 označuje P_{out1} vo všetkých grafoch normovaný výkon prechádzajúci ľavým ramenom rozbočnice a P_{out2} normovaný výkon prechádzajúci pravým ramenom. Simulácie prebiehali pri zadaní vlnovej dĺžky 650 nm.

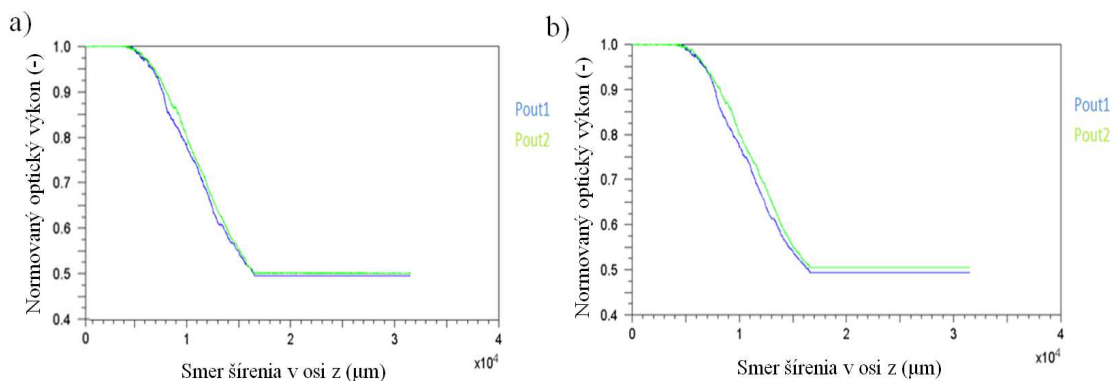
1x2Y rozbočnica - základný typ

Prvou navrhnutou štruktúrou je jednoduchá rozbočnica s výstupnými kanálikovými vlnovodmi tvaru S (obr. 5.6). Vstupný vlnovod, aj výstupné vlnovody majú šírku 1 μm . Lúč najskôr prechádza vstupným kanálikovým vlnovodom, následne sa dostáva do taperovaného kanálikového vlnovodu, ktorý sa postupne rozširuje a prechádza do dvoch výstupných vlnovodov.

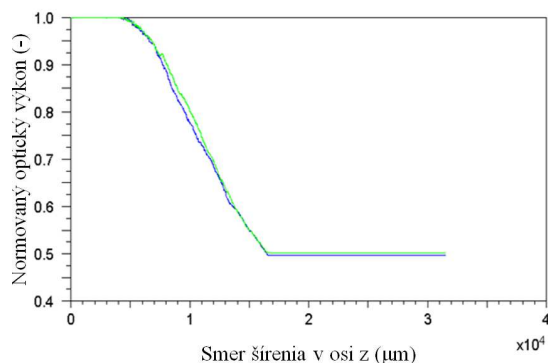


Obr. 5.6: Rozbočnica 1x2Y základného typu, profil indexu lomu ($\lambda=650$ nm) pre materiály PMMA/NOA73.

Táto rozbočnica bola simulovaná a optimalizovaná pre použitie vlnovodnej vrstvy NOA73, následne bolo simulované aj použitie materiálov OG113 a NOA1625. Ako môžeme vidieť na grafe závislosti veľkosti normovaného optického výkonu na vzdialenosti od začiatku štruktúry, dosiahnutá symetria výstupných výkonov je v prípade NOA73 veľmi dobrá, $P_{out1}:P_{out2}$ je 49,7:50,3 (obr. 5.7a). Pri použití materiálu OG113 je pomer výstupných výkonov o niečo horší (49,4:50,6, obr. 5.7b). V prípade NOA1625 je tento pomer rovnaký ako u NOA73, teda 49,7:50,3 (obr. 5.8). Táto štruktúra bola vyrobená a označená ako *motív 5*.



Obr. 5.7: Rozbočnica 1x2Y, základný druh ($\lambda=650$ nm), a)PMMA/NOA73, b)PMMA/OG113.



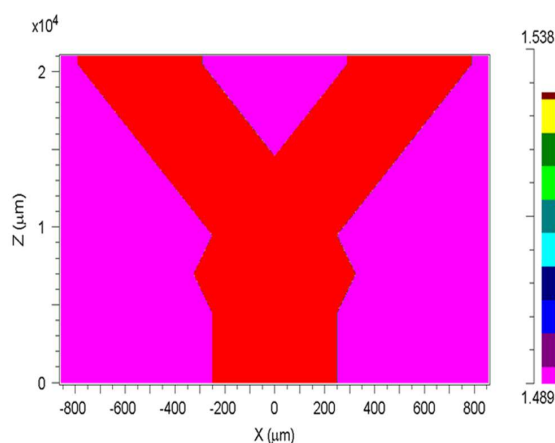
Obr. 5.8: Rozbočnica 1x2Y, základný druh ($\lambda=650$ nm), PMMA/NOA1625.

Tab. 5.6: Parametre rozbočnice 1x2Y, základný druh.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	L_{Sbend} (μm)	θ ($^\circ$)
31600	3040	4000	2000	25500	4,6

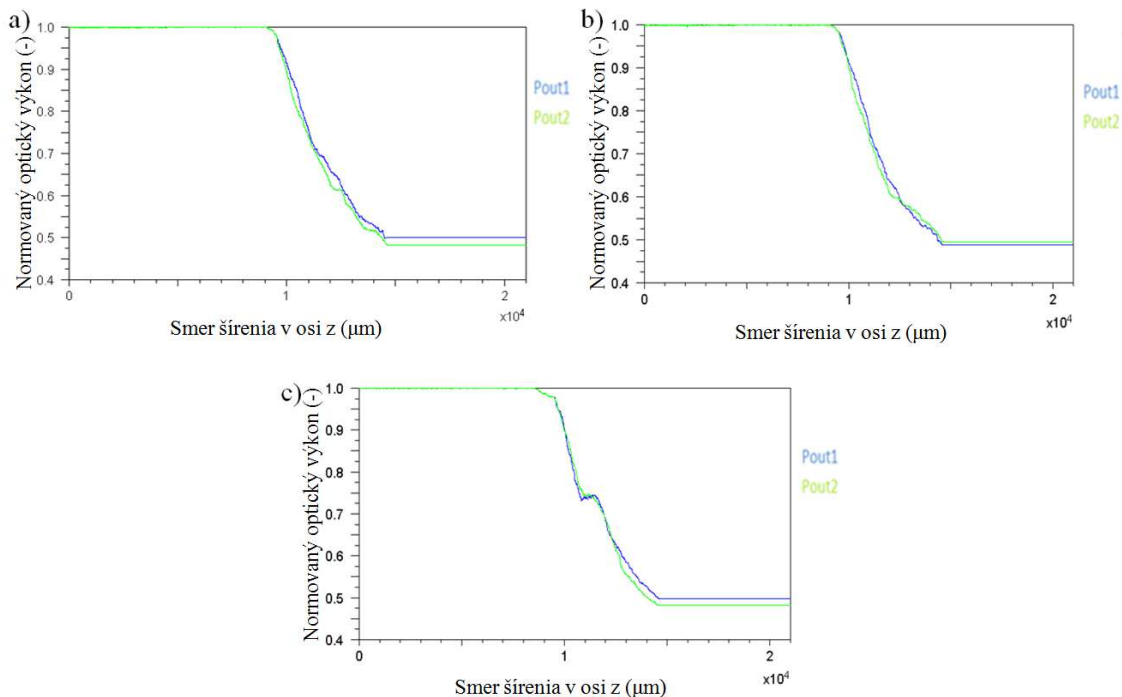
1x2Y rozbočnica s módovým skramblerom – návrh č. 1

Ďalšou navrhnutou štruktúrou je rozbočnica 1x2Y, ktorá sa odlišuje od predchádzajúcej tým, že obsahuje špeciálny vlnovodný prvok - módový skrambler podľa práce Yanga Gao [12] (obr. 5.9).



Obr. 5.9: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č. 1, profil indexu lomu ($\lambda=650$ nm) pre materiály PMMA/NOA73.

Menšie rozmery sú dosiahnuté z dôvodu šírky vstupného a výstupných vlnovodov 0,5 mm. Simulované bolo použitie vlnovodných materiálov NOA73, OG113 a NOA1625. Pomery výstupných normovaných výkonov sú v prípade NOA73 50,9:49,1 (obr. 5.10a)), v prípade OG113 49,7:50,3, (obr. 5.10b)) a pre materiál NOA1625 bol dosiahnutý pomer 50,8:49,2 (obr. 5.10c)). Z výsledkov je zřejmé, že z hľadiska symetrie výstupných výkonov bol najlepší výsledok dosiahnutý u vlnovodného materiálu OG113. Táto rozbočnica bola vyrobená a označená ako *motív 4*. Z technických dôvodov však nebolo možné vyrobiť motív so šírkou vlnovodov iba 0,5 mm, preto bol tento návrh pred výrobou upravený.



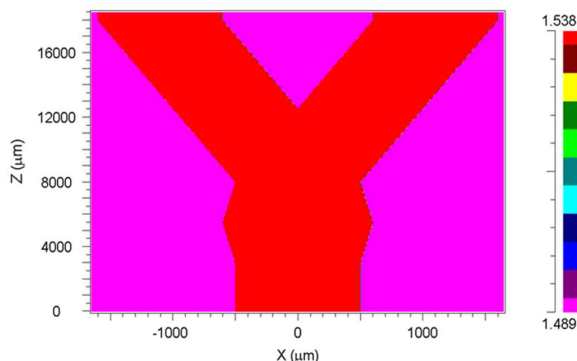
Obr. 5.10: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č. 1 ($\lambda=650$ nm), a) PMMA/NOA73, b) PMMA/OG113, c) PMMA/NOA1625.

Tab. 5.7: Parametre rozbočnice 1x2 so skramblerom, návrh č.1.

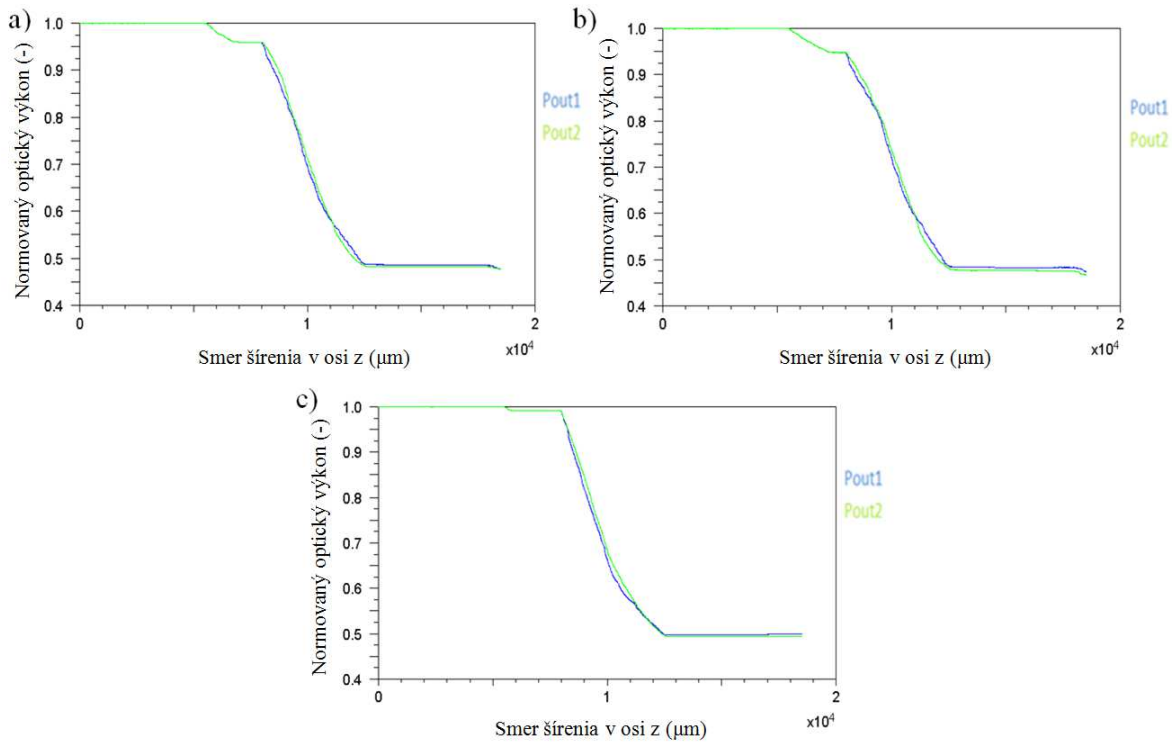
L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	dĺžka skrambleru (μm)	L_{bend} (μm)
21000	1580	4500	500	5000	11000

1x2Y rozbočnica s módovým skramblerom – návrh č. 2

Ďalšia optická štruktúra s módovým skramblerom [12] je na obr. 5.11. V porovnaní s predchádzajúcou rozbočnicou so skramblerom je kratšia, ale má väčšiu šírku. Najlepšia symetria výstupných výkonov bola u tejto rozbočnice dosiahnutá v prípade PMMA/NOA73 (obr. 5.12a)). V tomto prípade bol pomer výkonov 50:50. Naopak, najmenej symetrický výsledok je zrejmy v prípade kombinácie materiálov PMMA/OG113 s pomerom 50,4:49,6 (obr. 5.12b)). Podobný výsledok bol dosiahnutý aj pre kombináciu PMMA/NOA1625 (obr. 5.12c)). V tomto prípade bol nasimulovaný pomer výstupných normovaných výkonov 50,3:49,7. Tento motív bol vyrobený a označený ako *motív 3*.



Obr. 5.11: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č. 2, profil indexu lomu ($\lambda=650$ nm) pre materiály PMMA/NOA73.



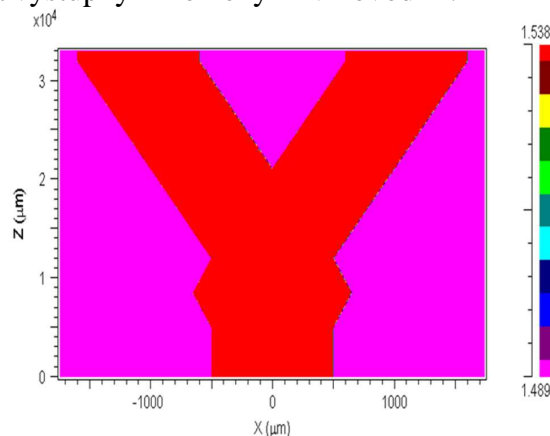
Obr. 5.12: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č.2 ($\lambda=650$ nm),
a)PMMA/NOA73, b)PMMA/OG113, c)PMMA/NOA1625.

Tab. 5.8: Parametre rozbočnice 1x2 so skramblerom, návrh č.2.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	dĺžka skrambleru (μm)	L_{bend} (μm)
18500	3200	3000	5000	10000	500

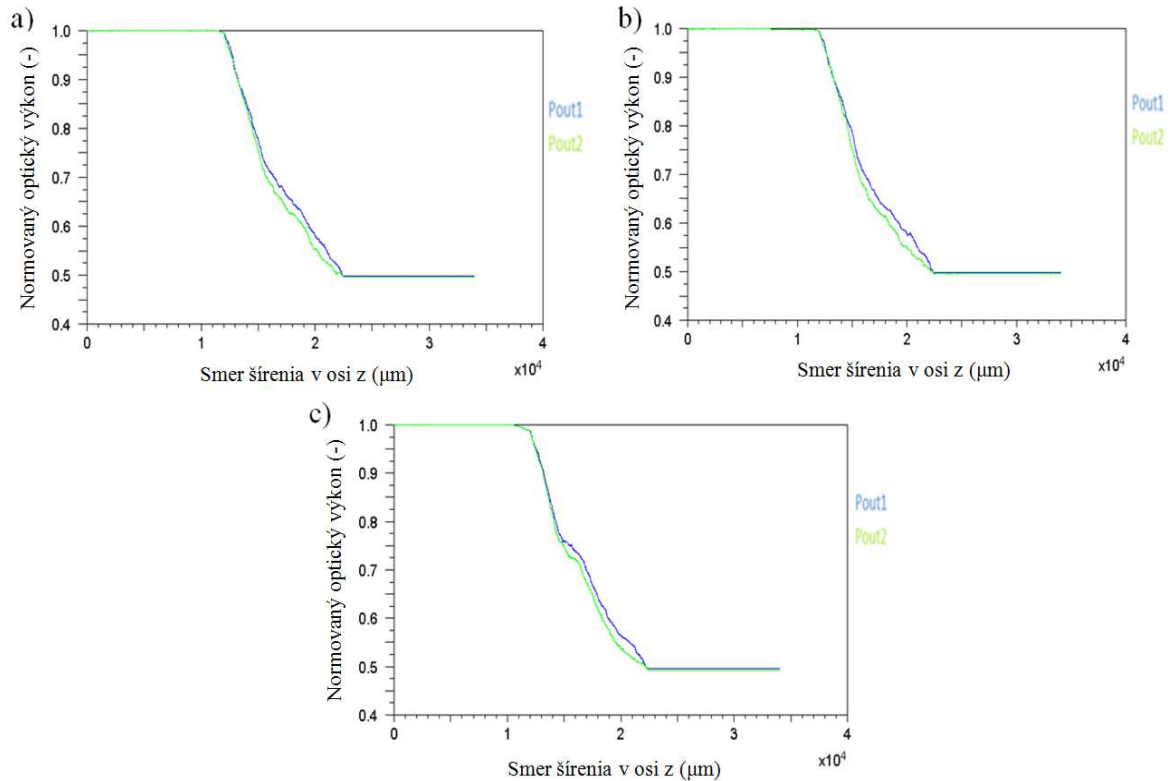
1x2Y rozbočnica s módomým skramblerom – návrh č. 3

Rozbočnica, ktorej profil indexu lomu je na obr. 5.13, bola vyrobená a označená ako *motív 6*. Jedná sa o najdlhšiu navrhnutú rozbočnicu so skramblerom. Lúč svetla prechádza vstupným vlnovodom, nasleduje módomý skrambler [12], ktorý zapríčiňuje mierny pokles prenášaného výkonu, ktorý však nemá významný vplyv na veľkosť výstupných výkonov, následne lúč prechádza výstupnými lomenými vlnovodmi.



Obr. 5.13: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č. 3,
profil indexu lomu ($\lambda=650$ nm) pre materiály PMMA/NOA73.

Pomer výstupných výkonov je v prípade použitého materiálu NOA73 50,2:49,8 (obr. 5.14a)), pre OG113 je pomer 50,1:49,9 (obr. 5.14b)), rovnako ako pre NOA1625 (obr. 5.14c)). To znamená, že pre všetky tri materiály je dosiahnutá symetria výstupných výkonov vyhovujúca.



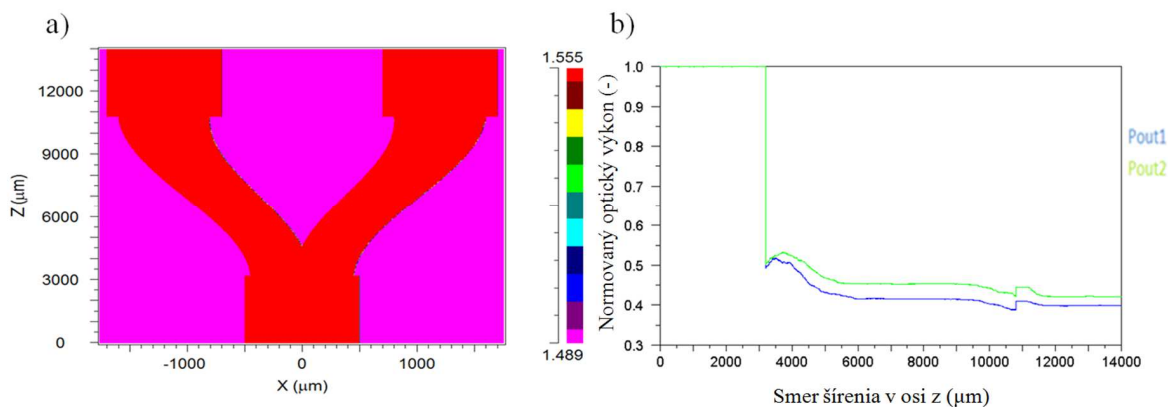
Obr. 5.14: Rozbočnica 1x2Y so skramblerom - návrh č. 3 ($\lambda=650$ nm),
a) PMMA/NOA73, b) PMMA/OG113, c) PMMA/NOA1625.

Tab. 5.9: Parametre rozbočnice 1x2 so skramblerom, návrh č. 3.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	dĺžka skrambleru (μm)	L_{bend} (μm)
34000	3000	3000	1000	9000	21000

1x2Y rozbočnica podľa práce T. Klotzbüchera, návrh č. 1

Posledným druhom navrhovaných štruktúr sú rozbočnice odvodené od štruktúry, ktorá bola popísaná v práci T. Klotzbüchera a jeho spolupracovníkov [11]. Prvá navrhovaná rozbočnica má postupne sa rozširujúce vlnovodné ramená, ktoré majú počiatočnú šírku 0,5 mm a na konci 0,8 mm, vstupný a výstupné vlnovody majú štandardnú šírku 1 mm (obr. 5.15a)). Táto rozbočnica bola vyrobená najmä pre jej malé rozmery a označená ako *motív 1*. Jedná sa o najmenšiu navrhnutú a vyrobenú rozbočnicu. Optimalizovaná bola pre použitie vlnovodného materiálu NOA73. Pre tento materiál bol dosiahnutý pomer výkonov 47,9:52,1 (5.15b)).



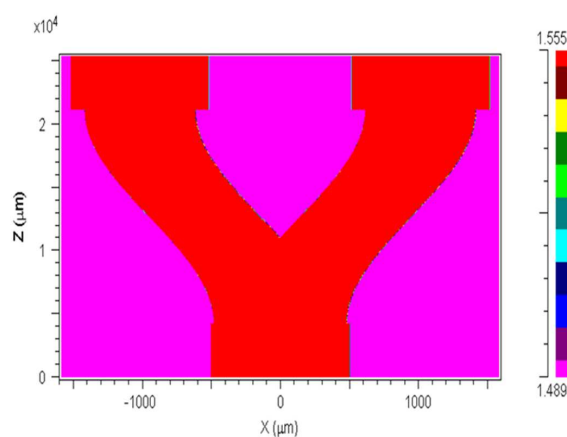
Obr. 5.15: Rozbočnica 1x2Y podľa Klotzbüchera - návrh č. 1 ($\lambda=650 \text{ nm}$),
a) profil indexu lomu b) výsledok simulácie PMMA/NOA73.

Tab. 5.10: Parametre rozbočnice 1x2Y podľa T. Klotzbüchera, návrh č. 1.

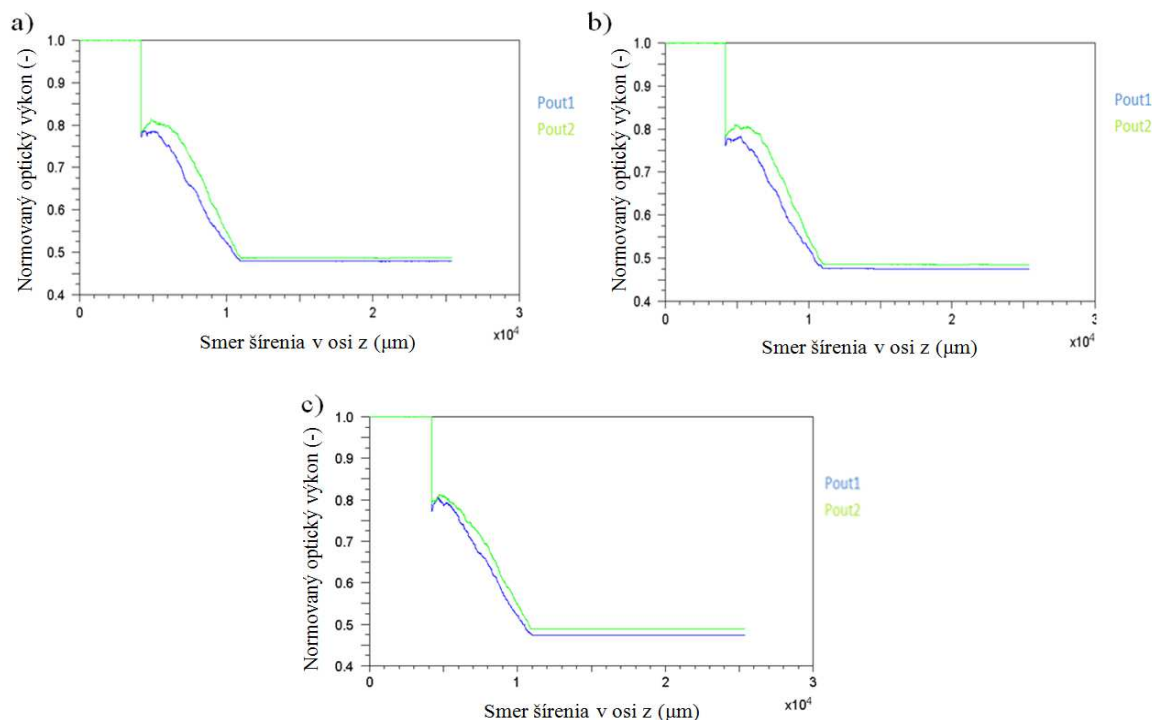
$L_C (\mu\text{m})$	$L_W (\mu\text{m})$	$L_{in} (\mu\text{m})$	$L_{out} (\mu\text{m})$	$L_{Sbend} (\mu\text{m})$	$\theta (^{\circ})$
14000	3400	3200	3200	7600	7,5

1x2Y rozbočnica podľa práce T. Klotzbüchera, návrh č. 2

Ďalšou simulovanou štruktúrou typu 1x2Y je štruktúra so šírkou užších vlnovodov 0,8 mm (obr. 5.16). Šírka vstupnej a výstupných drážok je 1 mm. V danom prípade nemalo takéto riešenie výrazný pozitívny vplyv na výstupné normované výkony. Vo výslednom grafe závislosti normovaného optického výkonu na pozdĺžnom rozmere štruktúry sa prejavuje vo vzdialenosti asi 4 mm skok spôsobený prechodom medzi vstupným vlnovodom so šírkou 1 mm a spoločným taperovaným vlnovodom so šírkou 0,8 mm. Najlepší výsledok bol dosiahnutý v prípade použitia vlnovodného materiálu NOA73 (5.17a)), o niečo horší v prípade OG113 (obr. 5.17b)) a najväčšia nesymetria výstupných výkonov bola v prípade vlnovodného materiálu NOA1625 (5.17c)). Pomery výstupných normovaných výkonov boli nasledovné: NOA73 – 49:6:50,4, OG113 – 49,4:50,6 a NOA1625 – 49,2:50,8. Táto rozbočnica bola vyrobená pod označením *motív 2*.



Obr. 5.16 Rozbočnica 1x2Y podľa Klotzbüchera - návrh č. 2,
profil indexu lomu ($\lambda=650 \text{ nm}$) pre materiály PMMA/NOA73.



Obr. 5.17: Rozbočnica 1x2Y podľa T. Klotzbüchera - návrh č.2 ($\lambda=650$ nm),
a) PMMA/NOA73, b) PMMA/OG113, c) PMMA/NOA1625.

Tab. 5.11: Parametre rozbočnice 1x2Y podľa T. Klotzbüchera, návrh č.2.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	L_{out} (μm)	L_{Sbend} (μm)	θ ($^\circ$)
25400	3040	4200	4200	17000	6,3

V nasledujúcej tabuľke 5.12 sú prehľadne uvedené výsledky simulácií rozbočníc 1x2Y. V stĺpci *druh a motív* sú uvedené čísla motívov, pod ktorými boli rozbočnice vyrobené.

Tab. 5.12: Výsledky simulácií navrhnutých rozbočníc 1x2Y.

L_C (mm)	druh a motív	vlnovod.materiál	P_{out1} (-)	P_{out2} (-)	$P_{out1}:P_{out2}$ (%)
32	základný, motív č. 5	PMMA/NOA73	49,6	50,1	49,7:50,3
		PMMA/OG113	49,4	50,6	49,4:50,6
		PMMA/NOA1625	49,6	50,2	49,7:50,3
21	s módovým skramblerom (návrh 1), motív č. 4	PMMA/NOA73	50,1	48,3	50,9:49,1
		PMMA/OG113	48,8	49,4	49,7:50,3
		PMMA/NOA1625	49,7	48,2	50,8:49,2
18,5	s módovým skramblerom (návrh 2), motív č. 3	PMMA/NOA73	47,7	47,7	50,0:50,0
		PMMA/OG113	47,5	46,7	50,4:49,6
		PMMA/NOA1625	49,9	49,4	50,3:49,7
34	s módovým skramblerom (návrh 3), motív č. 6	PMMA/NOA73	48,3	48,0	50,2:49,8
		PMMA/OG113	49,0	48,9	50,1:49,9
		PMMA/NOA1625	49,5	49,3	50,1:49,9

Tab. 5.12: Výsledky simulácií navrhnutých rozbočníc 1x2Y – pokračovanie.

L_C (mm)	druh a označenie	materiály	P_{out1} (-)	P_{out2} (-)	$P_{out1} \cdot P_{out2}$ (%)
14	podľa T. Klotzbüchera (návrh 1), motív 1	PMMA/NOA73	39,9	43,4	47,9:52,1
26	podľa T. Klotzbüchera (návrh 2), motív 2	PMMA/NOA73	47,9	48,6	49,6:50,4
		PMMA/OG113	47,5	48,6	49,4:50,6
		PMMA/NOA1625	47,3	48,9	49,2:50,8

Veličiny P_{out1} a P_{out2} sú výstupné normované optické výkony. Je zrejmé, že najlepšia symetria výkonov bola dosiahnutá v prípade 1x2Y rozbočníc u motívu 3 s módovým skramblerom v prípade vlnovodného materiálu NOA73 – pomer výstupných výkonov je 50,0:50,0. Najviac celkového výkonu na výstupe v porovnaní s výkonom vstupujúcim dosahuje rozbočnica 1x2Y základného typu (súčet výstupných normovaných optických výkonov je 100).

5.4.2 Návrh rozbočnice 1x4Y

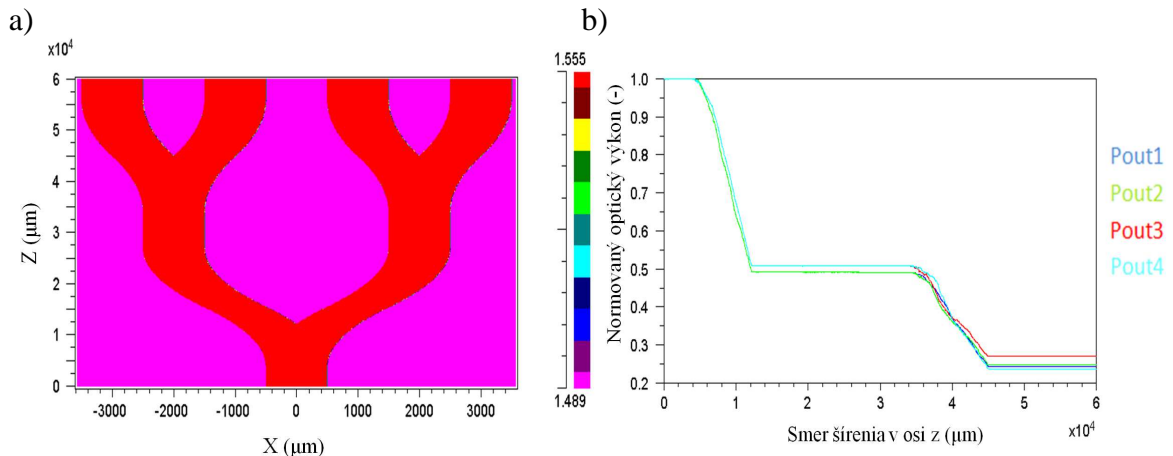
Ďalším typom mnohovidových výkonových rozbočníc, ktoré som navrhoval, sú 1x4Y, ktoré rozdeľujú výkon do 4 vetiev, kde v ideálnom prípade je v každej vetve 25% zo vstupujúceho výkonu. Jedná sa o zložitejšie štruktúry, preto sú aj ich rozmery výrazne väčšie.

Základom 1x4Y planárnej optickej rozbočnice bol opäť substrát z materiálu PMMA, v ktorom boli vyfrézované kanálikové vlnovody s konštantnou hĺbkou 1 mm pozdĺž celej štruktúry a šírka vstupného a výstupných vlnovodov bola 1 mm. V tomto prípade sú však uvedené výsledky simulácií vždy iba jedného vlnovodného materiálu – rozbočnice boli optimalizované pre vlnovodný materiál NOA73, pre materiály OG113 a NOA1625, ktoré boli uvažované v prípade 1x2Y rozbočníc, neboli pri simuláciách dosahované uspokojivé výsledky. Všetky štyri navrhnuté štruktúry majú rovnaký tvar ramien – tvar písmena S, dĺžka rozbočníc je 54 až 60 mm.

Výkony označené ako P_{out1} až P_{out4} zodpovedajú výstupným výkonom v jednotlivých ramenách smerom zľava doprava.

1x4Y rozbočnica základného typu

Prvým návrhom je rozbočnica so šírkou ramien 1 mm (obr. 5.18a)). Simulovaná bola pre materiály PMMA/NOA73. Lúč prechádza vstupným kanálikovým vlnovodom, ďalej taperovaným vlnovodom, ktorý sa rozširuje a rozvetvuje do dvoch ramien. Nasleduje vlnovod spájajúci každé rameno s nadväzujúcimi výstupnými ramenami a napokon výstupný vlnovod. Nasimulované výstupné výkony sú však nesymetrické, najmä výkon v ramene č. 3 zľava je vyšší ako v ostatných ramenách. Pomer výstupných normovaných výkonov je 24,4:24,8:27,0:23,8 (obr. 5.18b)).



Obr. 5.18: Rozbočnica 1x4Y, základný typ ($\lambda=650$ nm),
 a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie PMMA/NOA73.

Tab. 5.13: Parametre rozbočnice 1x4Y, základný typ.

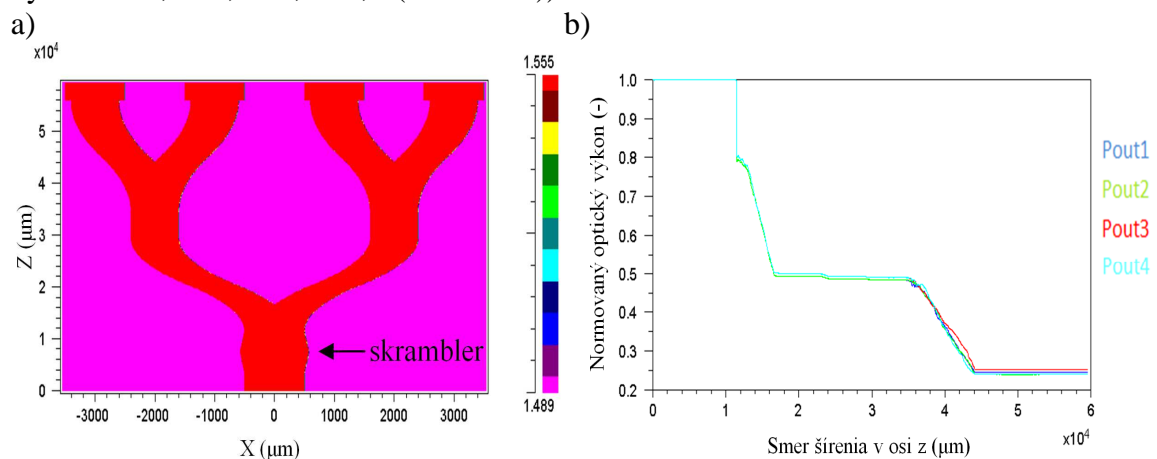
L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in1} (μm)	L_{Sbend1} (μm)	L_{in2} (μm)	L_{Sbend2} (μm)	L_{out} (μm)
60000	7000	4000	23000	7000	22000	4000

Nasledujúce dve štruktúry (obr. 5.19a), 5.20a)) s kanálikovými vlnovodmi tvaru S so šírkou 0,8 mm majú viaceré spoločné vlastnosti:

- konce výstupných vlnovodov sú rozšírené – 1 mm (podľa návrhu T. Klotzbüchera).
- obsahujú vidový premiešavač – módový skrambler – u rozbočnice na obr. 5.19a) sa vyskytuje jeden módový skrambler, u ďalšej na obr. 5.20a) tri skramblery.
- majú rovnakú celkovú šírku aj dĺžku.

1x4Y rozbočnica s 1 módovým skramblerom

V prípade rozbočnice s jedným módovým skramblerom [12] tvoreným 2 taperovanými vlnovodmi so šírkou vstupného a výstupného vlnovodu 1 mm a šírkou najširšej časti 1,15 mm, nachádzajúcim sa medzi vstupným vlnovodom a vlnovodnými ramenami na obr. 5.19a) bol dosiahnutý pre materiál NOA73 pomer normovaných výstupných výkonov 24,9:24,6:25,8:24,7 (obr. 5.19b)).



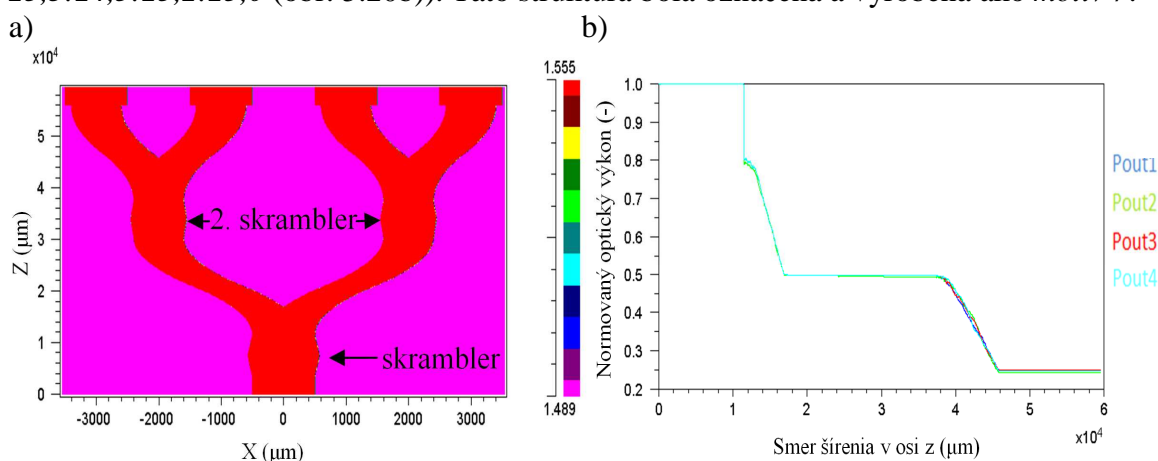
Obr. 5.19: Rozbočnica 1x4Y s 1 módovým skramblerom ($\lambda=650$ nm),
 a) profil indexu lomu b) výsledok simulácie pre materiály PMMA/NOA73.

Tab. 5.14: Parametre rozbočnice 1x4Y s 1 módovým skramblerom.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in1} (μm)	L_{Sbend1} (μm)	L_{in2} (μm)	L_{Sbend2} (μm)	L_{out} (μm)	dĺžka skrambleru (μm)
59500	7000	3500	18000	5000	21500	3500	8000

1x4Y rozbočnica s 3 módovými skramblermi

Tvarovo najzložitejšou navrhnutou štruktúrou bola rozbočnica s 3 módovými skramblermi [12] (obr. 5.20a)). V tomto prípade lúč prechádza vstupným vlnovodom, nasleduje prvý módový skrambler so šírkou vstupnej a výstupnej časti 1 mm a šírkou najširšej strednej časti 1,15 mm. Nasleduje spoločný taperový vlnovod, ktorý ústi do dvoch vlnovodných ramien so šírkou do 0,8 mm. Lúč následne prechádza ďalším, menším ľavým alebo pravým módovým skramblerom so šírkou vstupnej a výstupnej časti 0,8 mm a najširšej časti 0,9 mm, taperovým vlnovodom a napokon cez výstupné ramená so šírkou do 0,8 mm vstupuje do výstupných vlnovodov, ktoré majú šírku 1 mm. Pomer výstupných normovaných výkonov v prípade použitia vlnovodného materiálu NOA73 je 25,3:24,5:25,2:25,0 (obr. 5.20b)). Táto štruktúra bola označená a vyrobená ako *motív 7*.



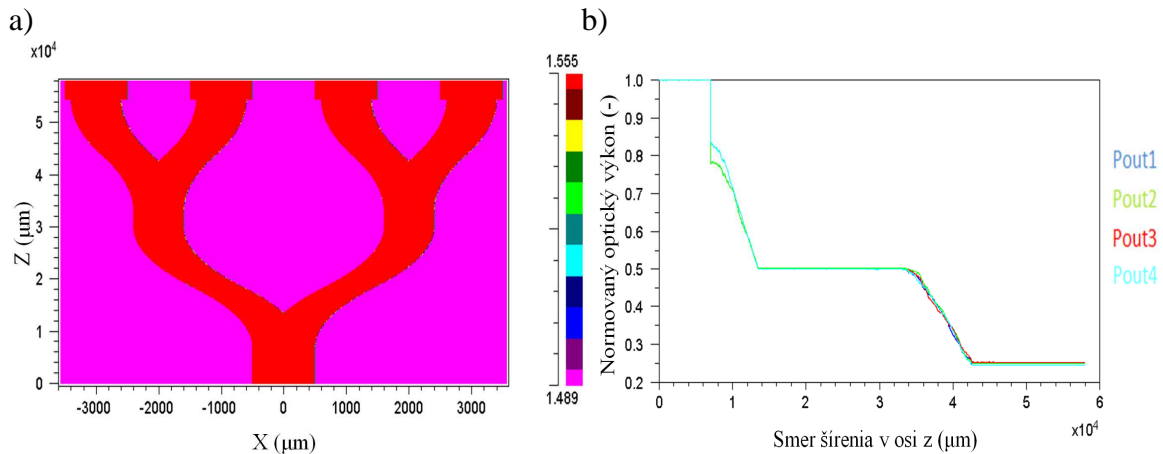
Obr. 5.20: Rozbočnica 1x4Y s 3 módovými skramblermi ($\lambda=650$ nm),
a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie PMMA/NOA73.

Tab. 5.15: Parametre rozbočnice 1x4Y s 3 módovými skramblermi.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in} (μm)	dĺžka skrambleru (μm)	L_{Sbend1} (μm)	dĺžka 2. skrambleru (μm)	L_{Sbend2} (μm)	L_{out} (μm)
59500	7000	3500	8000	19000	7000	18550	3500

1x4Y rozbočnica podľa návrhu T. Klotzbüchera

Poslednou navrhovanou štruktúrou bola rozbočnica 1x4Y. Táto rozbočnica bola odvodená od rozbočnice 1x2Y, ktorú prezentoval T. Klotzbücher v [11], s kanálikovými vlnovodmi tvaru S (obr. 5.21a)). Navrhnutá štruktúra má šírku užších častí vlnovodov 0,8 mm, rozšírené komponenty (vstupný a výstupné vlnovody) majú 1 mm. Lúč najskôr prechádza vstupným vlnovodom, následne taperovaným vlnovodom, na ktorý nadväzujú dve vlnovodné ramená. Ďalej sa lúč v každej vetve dostáva do rovného úseku vlnovodu s dĺžkou 3,5 cm, na ktorý sú napojené cez ďalší taperovaný vlnovod ramená zakončené výstupnými vlnovodmi. U tejto rozbočnice bola dosiahnutá pre materiál PMMA/NOA73 uspokojivá symetria výstupných výkonov (obr.5.21b)). Pomer výstupných normovaných výkonov bol 25,0:25,0:25,4:24,6.



Obr. 5.21: Rozbočnica 1x4Y podľa T. Klotzbüchera ($\lambda=650$ nm),
a) profil indexu lomu, b) výsledok simulácie PMMA/NOA73.

Tab. 5.16: Parametre rozbočnice 1x4Y podľa T. Klotzbüchera.

L_C (μm)	L_W (μm)	L_{in1} (μm)	L_{Sbend1} (μm)	L_{in2} (μm)	L_{Sbend2} (μm)	L_{out} (μm)
58000	7000	7000	23000	3500	21500	3500

V nasledujúcej súhrnnej tabuľke 5.17 sú uvedené výsledky dosiahnuté pri simuláciách v programe BeamPROPTM pre jednotlivé navrhované druhy štruktúr 1x4Y. V prípade, ak bola daná rozbočnica vyrobená, je u nej v stĺpci *druh a motív* uvedené číslo motívu, pod ktorým bola vyrobená.

Tab. 5.17: Výsledky simulácií navrhnutých rozbočníc 1x4Y.

L_C (mm)	druh a motív	materiály	P_{out1} (-)	P_{out2} (-)	P_{out3} (-)	P_{out4} (-)	$P_{out1}:P_{out2}:P_{out3}:P_{out4}$ (%)
52	základný	PMMA/NOA73	24,3	24,7	26,9	23,7	24,4:24,8:27,0:23,8
57	s 1 módovým skramblerom	PMMA/NOA73	24,4	24,1	25,3	24,1	24,9:24,6:25,8:24,7
60	s 3 módovými skramblermi, motív č. 7	PMMA/NOA73	25,1	24,3	25,0	24,8	25,3:24,5:25,2:25,0
57	podľa T. Klotzbüchera	PMMA/NOA73	24,9	25,0	25,3	24,5	25,0:25,0:25,4:24,6

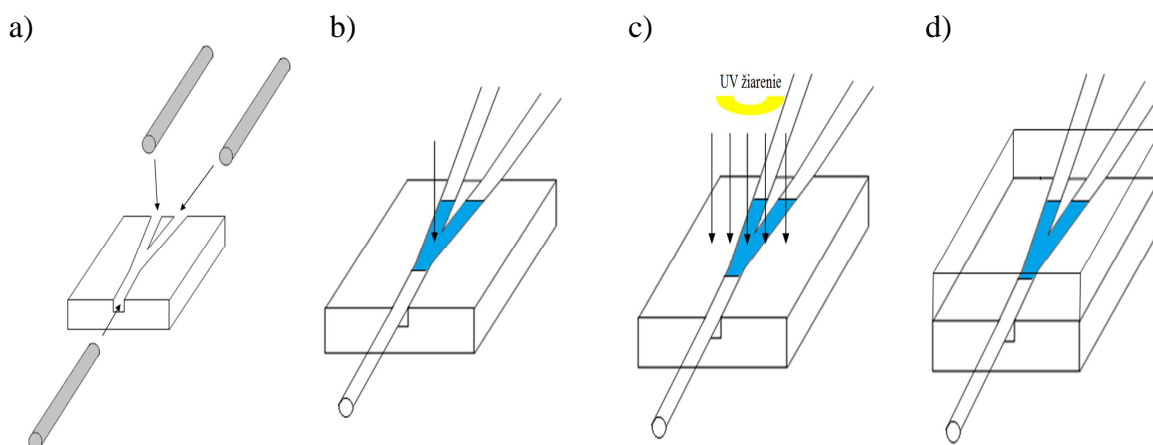
Veličiny P_{out1} až P_{out4} označujú výstupné normované optické výkony. Najlepšia symetria normovaných výkonov v prípade 1x4Y rozbočníc bola dosiahnutá u dvoch motívov – u motívu 7 s tromi módovými skramblermi (pomer výkonov 25,3:24,5:25,2:25,0) a motívu odvodeného od štruktúry T. Klotzbüchera (pomer 25,0:25,1:25,4:24,6). Najviac celkového výkonu preneseného na výstup v porovnaní s výkonom vstupujúcim bolo v prípade rozbočnice 1x4Y podľa práce T. Klotzbüchera (súčet výkonov je 99,7).

6. Výroba navrhnutých rozbočníc

Výroba navrhnutých štruktúr sa začína vytvorením kanálikových vlnovodov pre vlnovodnú vrstvu do polyméru PMMA. Motívy rozbočníc boli vyrobené na Katedre mikroelektroniky ČVUT FEL pomocou CNC prístroja s frézku s priemerom 0,8 mm, rýchlosťou otáčania 1800 ot/min a posunom 36 mm/min [2].

Po vygravírovaní drážok do substrátu sa do štruktúry vložia konce POF vlákien, z ktorých bol odstránený plášť pomocou špeciálnych klieští. Tieto konce musia byť dostatočne zafixované, aby sa pri manipulácii so štruktúrou a pri vytvrdzovaní neuvolňovali. Čím dlhšia časť vlákna je vložená do vstupného a výstupného vlnovodu, tým je aj lepšia jeho fixácia v rozbočnici, prípadne môže byť použitá napr. lepiaca páska. Stredná časť štruktúry medzi vloženými koncami vstupného a výstupných vlákien sa vyplní vlnovodnou vrstvou, pričom je dôležité, aby táto vrstva bola zarovnaná do výšky okolitého substrátu a nebránila doľahnutiu krycej vrstvy na substrát po vytvrdnutí. Nanášaný materiál je možné aplikovať priamo z nádoby, v ktorej je uskladnený alebo pomocou injekčnej striekačky. Pri aplikácii vlnovodného materiálu do drážok môže dôjsť ku vzniku nežiaducich vzduchových bublín, ktoré majú vplyv na vedenie lúča danou vrstvou a ovplyvňujú straty vo vlnovode. Preto je vhodné tieto nehomogenity ešte pred ďalšou fázou výroby rozbočnice odstrániť. Niekedy to však nie je možné a je potrebné očakávať väčšie straty pri prenose signálu. Nanesená vrstva je následne vytvrdená pod UV lampou, väčšinou je v priebehu vytvrdzovania niekoľkokrát kontrolovaná. Pri nedostatočnom vytvrdnutí vlnovodnej vrstvy môže dôjsť k odlomeniu vlákien. Napokon sa na substrát s pripevnenými vláknami a vlnovodným materiálom zhora priloží krycia vrstva a tieto 2 časti sa spoja pomocou skrutiek a matíc.

Nanášanie vlnovodnej vrstvy a vytvrdzovanie prebiehalo v Laboratóriu technológie ČVUT.



Obr. 6.1: Postup výroby rozbočnice 1x2Y, a) vloženie POF vlákien do substrátu, b) nanášanie vlnovodnej vrstvy, c) vytvrdenie UV žiarením, d) zakrytie substrátu krycou vrstvou.

Pri výrobe rozbočníc boli použité dva druhy vlákien – štandardné POF vlákna PFU-UD1001-22V (obr. 6.2a)) bez FC konektorov a s FC konektormi a širokopásmové vlákna (FG910LEC) of firmy Thorlabs s veľkým priemerom jadra kompatibilným s rozmermi štandardných POF vlákien a zakončené FC konektormi (obr. 6.2b)).

a)

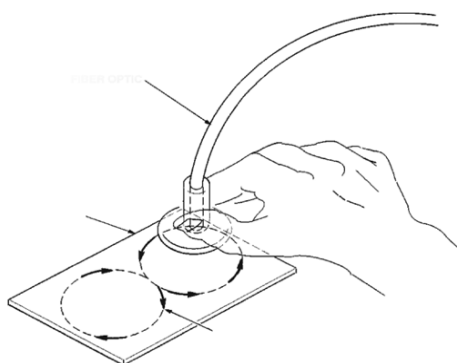


b)



Obr. 6.2: a) Vlákno s odnímateľným BAR (Bare Fiber Adapter) konektorom [3],
(b) vlákno FG910LEC s FC konektorom.

Vlákna boli pred uložením do štruktúr leštené pomocou špeciálnej leštiacej sady. Na leštenie boli použité dva leštiace papiere s rôznou hrúbkou zrna. Koniec vlákna, tzv. ferula, z ktorého bol odstránený plášť, bol vložený do leštiaceho prípravku tak, aby zvieral s brúsnyim papierom pravý uhol. Následne bol koniec vlákna vedený po leštiacom papieri po dráhe tvaru čísla osem (obr. 6.3). Tento proces trval zhruba 1 až 3 minúty. Cieľom leštenia bolo zarovnanie koncov vlákien, a tým dosiahnutie menšieho vložného útlmu a spätného odrazu signálu. V prípade zakončenia vlákien FC konektormi nebolo potrebné ich konce leštiť.



Obr. 6.3: Leštenie POF vlákna [26].

Spolu bolo vyrobených 41 substrátov s drážkami a rovnaký počet prislúchajúcich krycích vrstiev. Ako prvé boli vyrobené rozbočnice s použitím vlnovodnej vrstvy NOA73 a OG113, konkrétne motívy č. 1 až 4, spolu 20 rozbočníc. Po skúsenostiach získaných

najmä pri výrobe (z hľadiska času potrebného na dostatočné vytvrdenie pod UV lampou) a zmeraní optického útlmu vyrobených rozbočníc sa vlnovodný materiál OG113 ukázal ako menej vhodný a bol použitý materiál NOA1625, ktorý však tiež nedosahoval dobré vlastnosti. Problémom tohto materiálu bola rovnako dlhá doba potrebná na vytvrdenie pod UV lampou. V prípade materiálu NOA73 sa tento čas pohybuje väčšinou medzi 15 až 20 minútami, kým v prípade NOA1625 táto doba dosiahla viac ako 1 hodinu. Nevýhodou NOA1625 je tiež aplikácia pomocou injekčnej striekačky, pri ktorej často dochádza k nanieseniu materiálu aj mimo vlnovod a ku vzniku vzduchových bublín v nanesej vrstve.

Z prvej sady vyrobených rozbočníc boli na základe výsledkov meraní vložného optického útlmu zvolené motívy 1 a 4 pre opätovnú výrobu a okrem nich boli vyrobené aj nové motívy 5 až 7. V druhej sade bolo vyrobených spolu 21 vzoriek, ako vlnovodný materiál bol použitý výlučne NOA73.

Jednotlivé vzorky každého motívu boli odlišené číslami (napr. boli vyrobené dve vzorky motívu č. 2 a označené boli číslami 21 a 22, kde prvá číslica označuje číslo motívu a druhá odlišuje jednotlivé vzorky toho istého motívu).

Tabuľka všetkých vyrobených vzoriek je uvedená v Prílohe B.

Vyrobene motívy boli rozdelené do štyroch typov označených písmenami A až D (tab. 6.1) na základe tvarového riešenia kanálikových vlnovodov. Typu A zodpovedá základný druh rozbočnice 1x2Y, typu B prislúchajú štruktúry 1x2Y odvodené z návrhu T. Klotzbüchera [11], do typu C spadajú motívy 1x2Y s módovým skramblerom líšiace sa rôznou celkovou dĺžkou a typ D predstavuje 1x4Y rozbočnica s 3 módovými skramblermi.

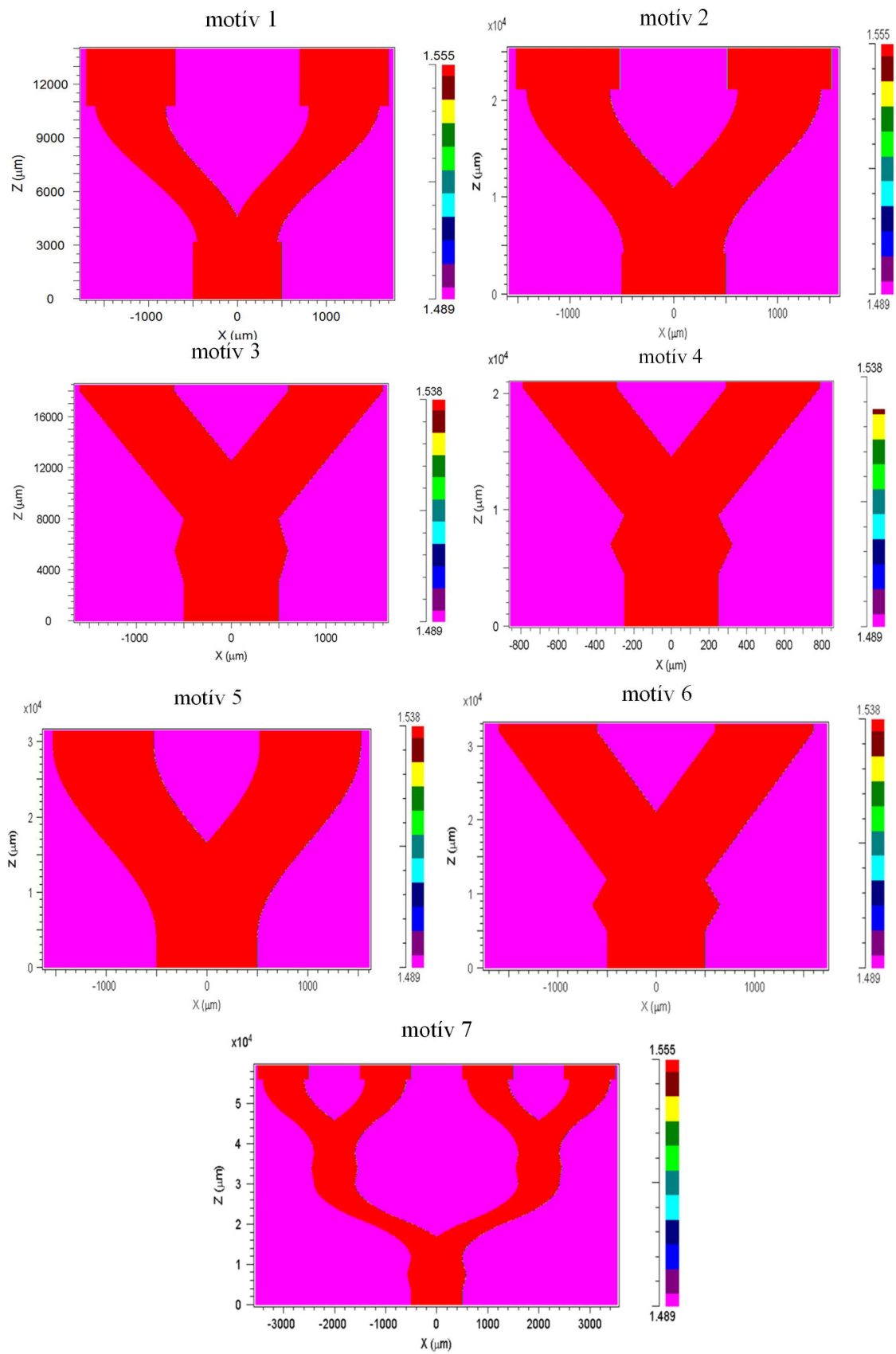
Vlnovodné ramená štruktúr typu A, B a D sú tvaru S, v prípade typu C boli navrhnuté lomené ramená.

Tab. 6.1: Popis typov vyrobených rozbočníc.

typ	prislúchajúce motívy	stručný popis
A	motív 5	<i>základný typ</i> , šírka vlnovodov 1 mm, vlnovodné ramená tvaru S
B	motívy 1, 2	šírka vstupného a výstupných vlnovodov 1 mm, šírka vlnovodných ramien 0,8 mm (<i>topológia štruktúry podľa T. Klotzbüchera</i>), ramená tvaru S
C	motívy 3, 4, 6	<i>štruktúra s dvojitým módovým skramblerom</i> , šírka vstupného a výstupných vlnovodov 1 mm, lomený tvar vlnovodných ramien
D	motív 7	<i>štruktúra s tromi dvojitými módovými skramblermi</i> , šírka vstupného a výstupných vlnovodov 1 mm, šírka vlnovodných ramien 0,8 mm, ramená tvaru S

V ďalšom texte sú jednotlivé vzorky rozlíšené podľa typov uvedených v tab. 6.1.

Profily indexu lomu vytvorené v programe BeamPROPTM všetkých vyrobených motívov pre $\lambda=650$ nm sú uvedené na obr. 6.4.

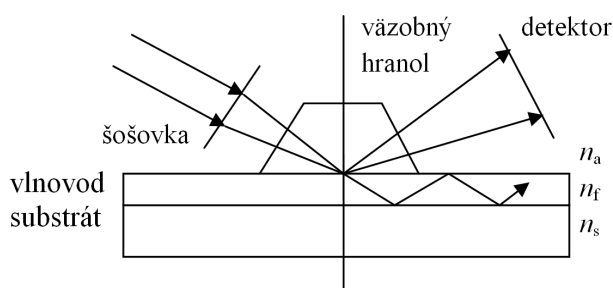


Obr. 6.4: Profily indexu lomu vyrobených rozbočnic 1x2Y a 1x4Y.

7. Diagnostika a meranie útlmu vyrobených rozbočníc

7.1 Meranie indexov lomu

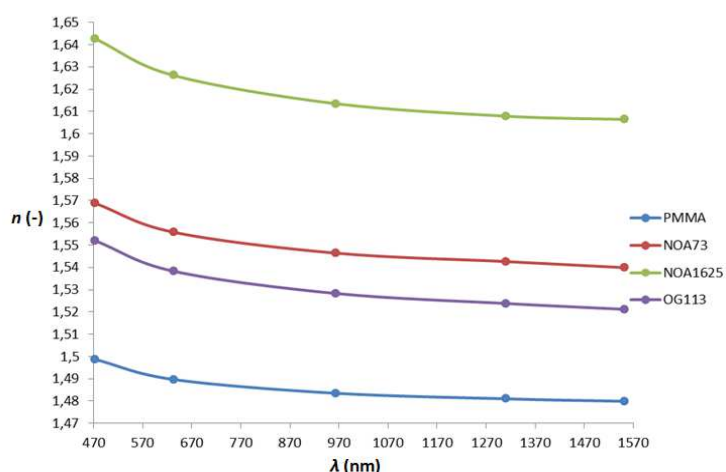
Závislosť indexu lomu materiálov na vlnovej dĺžke pre vlnové dĺžky 473 nm, 632,8 nm, 964 nm, 1311 nm a 1552 nm bola zmeraná prostredníctvom zariadenia Metricon, ktoré využíva metódu jednohranolovej vidovej spektroskopie, ktorej princíp je uvedený na obr. 7.1.



Obr. 7.1: Princíp merania indexu lomu zariadením Metricon [15].

Toto zariadenie meria synchronne uhly, z ktorých možno určiť závislosť priebehu indexu lomu na hrúbke vlnovodnej vrstvy alebo určiť index lomu objemových vzoriek. Pri tejto metóde je laserový zväzok zaostrý na základňu hranola do oblasti optického kontaktu. Zväzok sa od základne hranola odráža a na detektore vytvára svetelnú stopu s tmavými čiarami. Tento jav je spôsobený naviazaním časti svetla dopadajúceho na základňu hranola pod synchronnými uhlami do vlnovodu, tým pádom sa táto časť svetla na detektore nezobrazí a vzniká tmavá čiara. Vázobná oblasť musí byť čo najmenšia, inak by dochádzalo k vyvážovaniu svetla z vlnovodu [15, 27, 28].

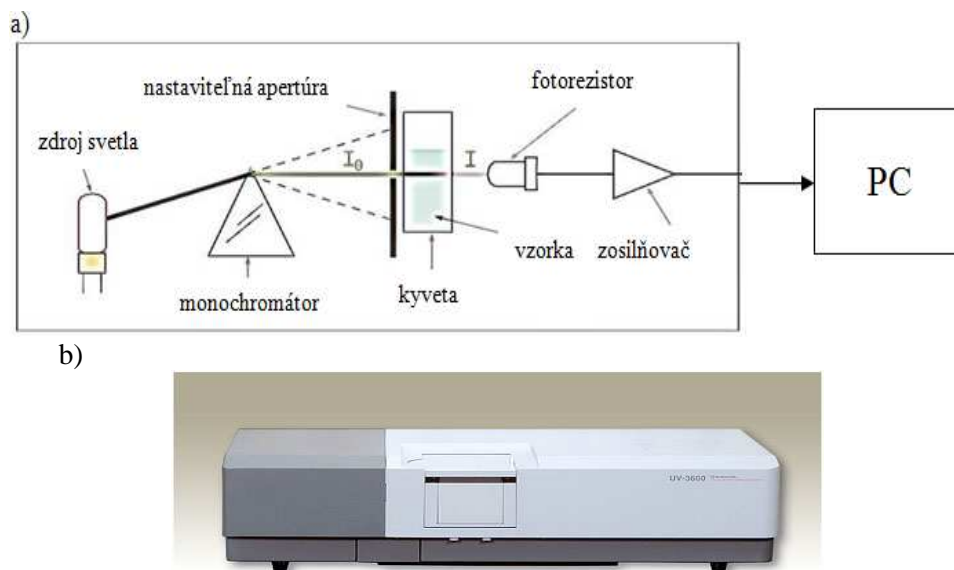
Graf zmeraných hodnôt indexu lomu vybraných materiálov je na obr. 7.2.



Obr. 7.2: Indexy lomu materiálov použitých pri výrobe rozbočníc zmerané zariadením Metricon.

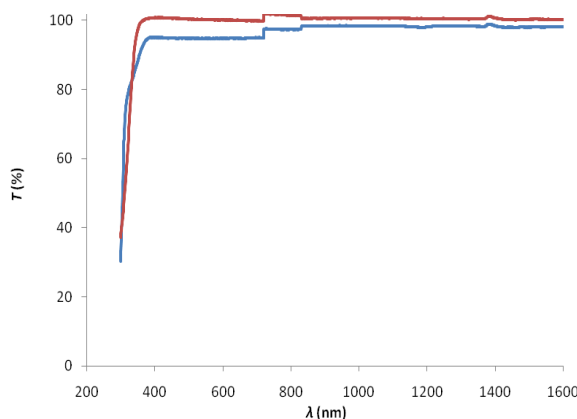
7.2 Meranie transmisných spektier

Okrem indexu lomu boli zmerané aj transmisné spektrá materiálov NOA73 a OG113 v rozmedzí vlnových dĺžok od 300 nm do 1600 nm. Pre tento účel bolo použité zariadenie UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600 (obr. 7.3b)). Meracie pracovisko je tvorené nasledujúcimi súčasťami: zdroj svetla, Czerného – Tumerov monochromátor, meraná vzorka, detektor – fotonásobič (v prípade UV a viditeľného svetla) alebo fotodióda (pre infračervené žiarenie), zosilňovač a počítač, v ktorom sa vyhodnotia výsledky (obr. 7.3) [15].



Obr. 7.3: Meranie transmisných spektier materiálov:
a) meracie pracovisko [15], b) zariadenie Shimadzu UV 3600 [29].

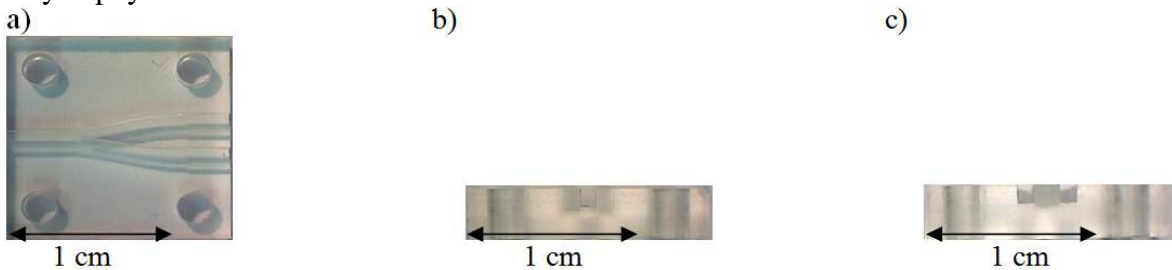
Na obr. 7.4 je graf závislosti priepustnosti T (transmitancia) materiálov NOA73 a OG113 na vlnovej dĺžke. Z grafu je zrejmé, že dané materiály dosahujú priepustnosť blížiacu sa 100% až pri vlnových dĺžkach vyšších ako 300 nm. Priepustnosť pre požadované pracovné vlnové dĺžky, na ktorých sú vyrobené rozbočnice testované, je vyhovujúca.



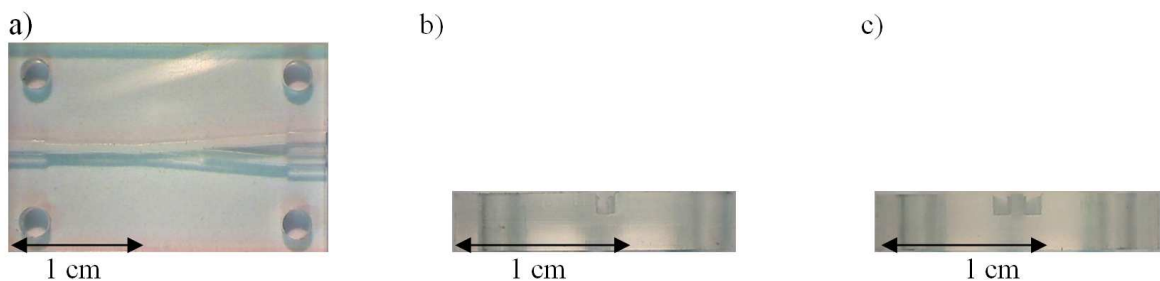
Obr. 7.4: Transmisné spektrá NOA73 a OG113 zmerané pomocou zariadenia UV-VIS-NIR Shimadzu UV 360.

7.3 Optická kontrola vyrobených substrátov rozbočníc

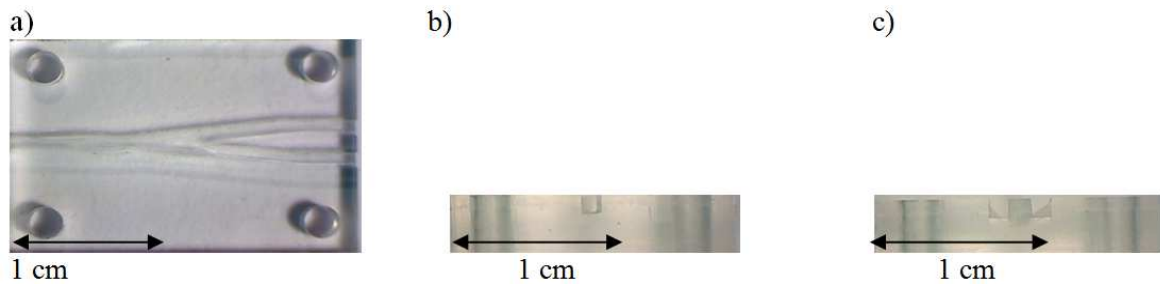
Vyrobené substráty s vygravírovanými drážkami boli nafotené pomocou mikroskopickej kamery. Na obr. 7.5 až 7.11 sú uvedené substráty jednotlivých motívov nafotené pri pohľade zhora (a) a zo vstupnej (b) a výstupnej strany (c), kde je vidieť tvar vstupného a výstupných kanálikov.



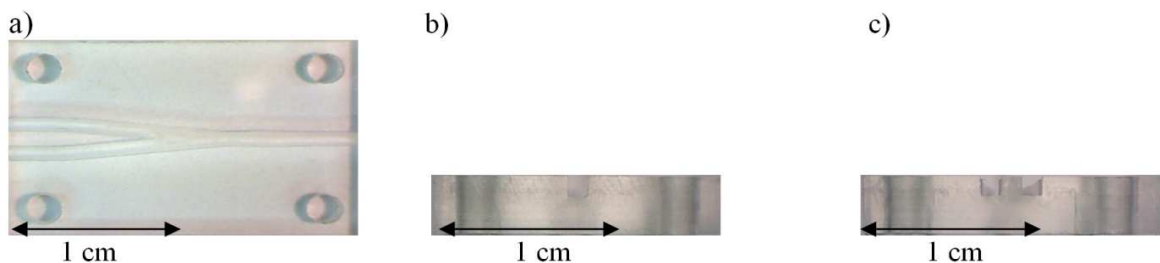
Obr. 7.5: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 1):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



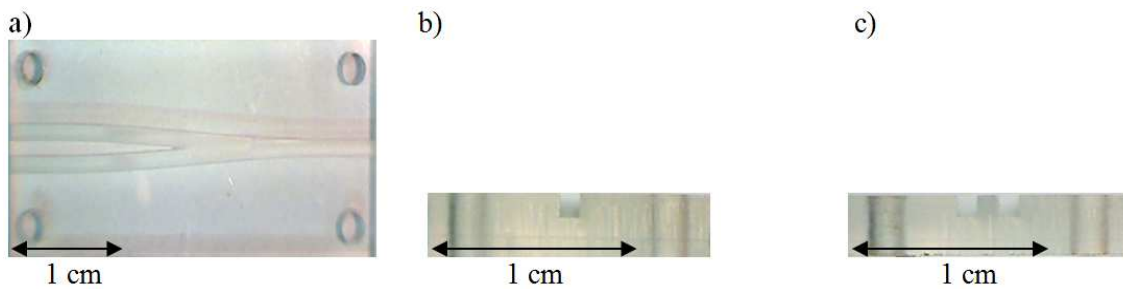
Obr. 7.6: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 2):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



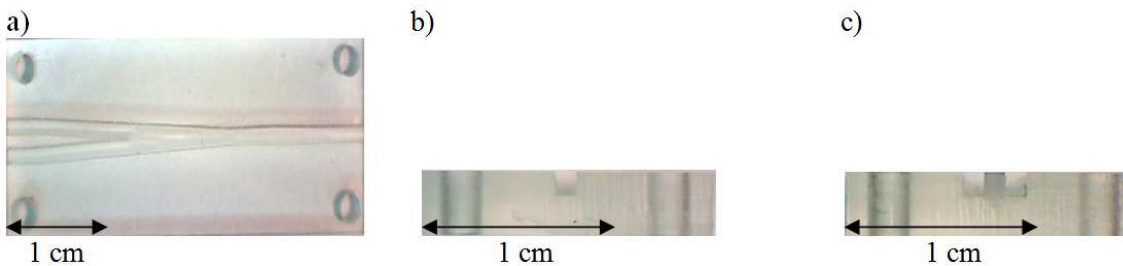
Obr. 7.7: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 3):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



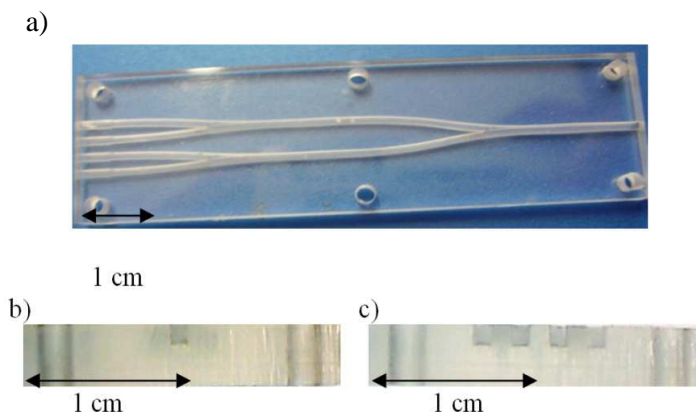
Obr. 7.8: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 4):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



Obr. 7.9: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 5):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



Obr. 7.10: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 6):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.



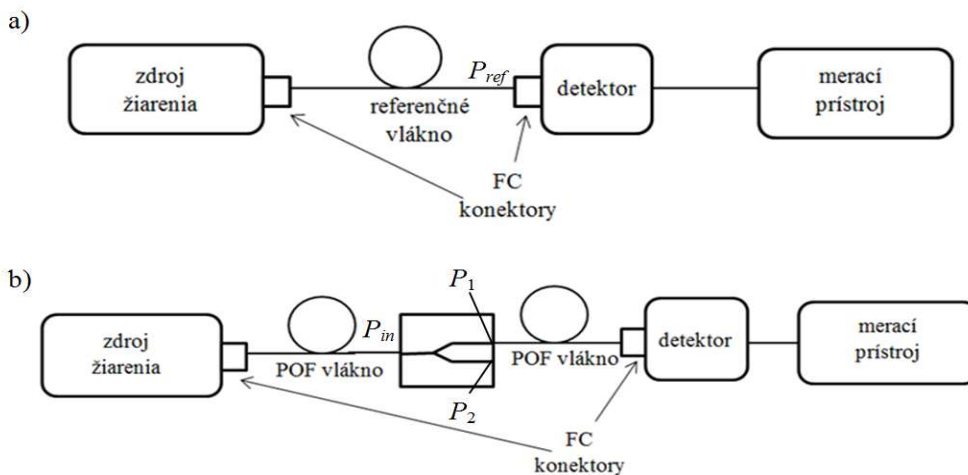
Obr. 7.11: Podložka s drážkami pre NOA73 vlnovod (motív 7):
a) pohľad zhora, b) vstupný pohľad, c) výstupný pohľad.

Z obrázkov vyplýva, že sa podarilo pripraviť drážky do PMMA substrátov s rozmermi blízky návrhu a bez viditeľných chýb a porúch.

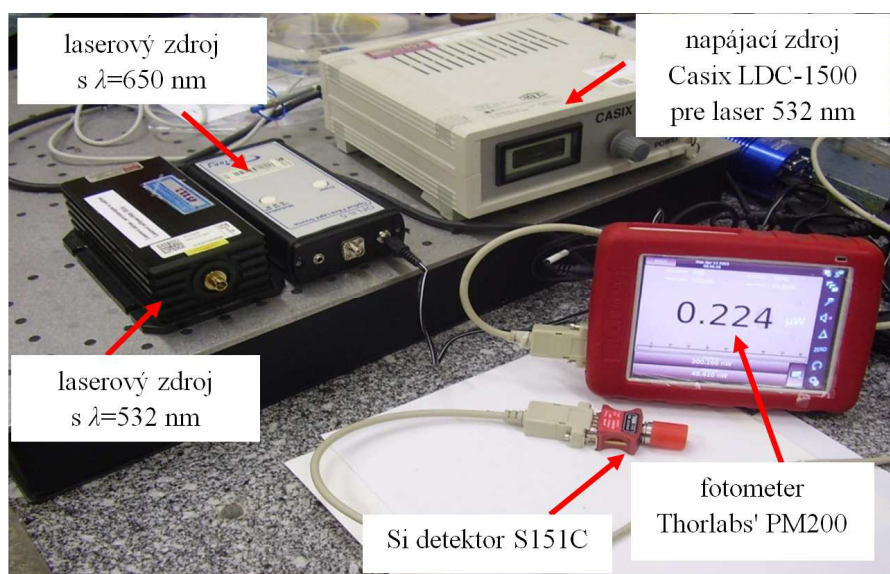
7.4 Meranie optického útlmu

Na meranie optického výkonu som používal fotometer Thorlabs' PM200, na ktorom som volil vlnovú dĺžku detekovaného žiarenia. Zdrojmi žiarenia boli laserové zdroje pracujúce s vlnovými dĺžkami 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm. Zdroj s $\lambda = 532$ nm bol pripojený k napájaciemu zdroju Casix LDC-1500, na ktorom som pred meraním nastavil výstupný prúd na 0,5 A. Prvým krokom merania bola voľba vhodného referenčného vlákna rovnakej dĺžky, akú mala meraná rozbočnica s POF vláknami (obr. 7.12a)).

Po zmeraní výstupného výkonu referenčného vlákna pre požadované vlnové dĺžky som pomocou FC konektorov prepojil laserový zdroj s testovanou štruktúrou a s detektorom S151C vhodným pre vlnové dĺžky od 400 nm do 1100 nm, resp. s detektorom S154C vhodným pre vlnové dĺžky od 800 nm do 1700 nm. Pomocou meracieho prístroja Thorlabs' PM200 som zistil výstupné výkony v jednotlivých ramenách rozbočnice (obr. 7.12b)). V prípade vlákien s pripevnenými FC konektormi bolo meranie jednoduchšie, u vlákien bez konektorov bolo nutné vždy pred meraním nasunúť rozoberateľné POF konektory (Bare Fiber Adapter). Meracie pracovisko pre meranie výstupných výkonov je na obr. 7.13.



Obr. 7.12: Schéma zapojenia meracieho pracoviska, a) meranie výstupného výkonu referenčného vlákna, b) meranie výstupných výkonov rozbočnice.



Obr. 7.13: Meracie pracovisko.

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

$$\alpha = -10 \cdot \log \frac{P_1 + P_2}{P_{ref}} \quad (7.1)$$

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

Pre 1x4Y rozbočnicu platí pre výpočet vložného optického útlmu vzťah:

$$\alpha = -10 \cdot \log \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{P_{ref}} \quad (7.2)$$

kde P_1 až P_4 sú namerané výstupné výkony vystupujúce z jednotlivých vlákien štruktúry a P_{ref} je výstupný výkon referenčného vlákna.

Na zistený útlm má vplyv viacero faktorov – napr. druh vlnovodnej vrstvy, nehomogenity v nanosenej vlnovodnej vrstve, kvalita vytvrdenia vrstvy, vyleštenie koncov optických vlákien osadených do štruktúry, dĺžka rozbočnice, uhol, ktorý zvierajú výstupné vlnovody, alebo aj presnosť meracieho prístroja použitého na meranie výstupných výkonov.

Pre porovnanie s meranými hodnotami vyrobených rozbočníc boli zmerané výstupné výkony a vypočítaný vložný optický útlm rozbočníc bez vlnovodnej vrstvy. Výsledky pre vybrané motívy sú uvedené v tabuľke 7.1.

Tab. 7.1: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm **1x2Y** rozbočníc typu A a C **bez vlnovodnej vrstvy s POF** vláknami **bez FC konektorov**.

vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
49	C	21,0	650	5,8	3,7	61:39	11,2
			532	39,1	24,7	61:39	14,0
56	A	32,0	650	2,2	3,7	37:63	13,2
			532	66,7	111,3	37:63	9,5
66	C	34,0	650	6,8	5,9	54:46	9,9
			532	50,8	45,7	53:47	12,2

V tab. 7.2 sú uvedené výsledky merania mnou navrhutej a realizovanej vzorky so širokopásmovými vláknami FG910LEC. Jedná sa o vzorku základného typu A s vlnovodným materiálom NOA73 (vzorka č. 55). Následne som pre porovnanie s touto rozbočnicou zmeral dve ďalšie vzorky s vláknami FG910LEC, jednu s vlnovodnou vrstvou NOA1625, druhú s NOA72, ktoré boli vyrobené a popísané R. Mašterom v jeho bakalárskej práci *Návrh optické mnohavidové výkonové rozbočnice 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna* [2]. Výsledky meraní výstupných výkonov a vypočítané vložné optické útlmy týchto dvoch rozbočníc sú uvedené v tab. 7.3.

Tab. 7.2: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm rozbočnice **1x2Y** typu A so širokopásmovými vláknami **FG910LEC** pri použití vlnovodného materiálu **NOA73**.

vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
55	A	32,0	532	784,6	668,4	54:46	5,0
			650	41,9	35,1	54:46	5,9
			850	12,8	11,2	53:47	6,6
			1310	133,3	115,0	54:46	6,2
			1550	34,0	32,9	53:47	7,3

Najnižší vložný optický útlm bol v prípade mnou vyrobenej vzorky č. 55 zistený na vlnovej dĺžke 532 nm, hodnota útlmu bola 5,0 dB. Symetria výstupných výkonov bola 53:47, resp. 54:46.

Tab. 7.3: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm **1x2Y** rozbočníc navrhnutých R. Mašterom so širokopásmovými vláknami **FG910LEC** pre porovnanie s vyrobenými rozbočnicami.

vzorka	materiály	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
144B	PMMA/NOA1625	532	343,0	339,2	42:58	5,2
		650	23,2	33,9	41:59	7,6
		850	11,2	14,6	43:57	6,0
		1310	122,0	175,1	41:59	5,0
		1550	18,3	27,5	40:60	8,6
146A	PMMA/NOA72	532	364,0	339,0	52:48	5,8
		650	37,5	33,0	53:47	6,3
		850	7,3	8,3	53:47	8,2
		1310	119,4	110,3	52:48	6,1
		1550	51,9	49,7	51:49	6,2

Vzorka s vlnovodnou vrstvou NOA1625 (vzorka č. 144B) vyrobená R. Mašterom mala najnižší vložný optický útlm, 5,0 dB, na vlnovej dĺžke 1310 nm. Vzorka s vlnovodnou vrstvou NOA72 (vzorka č. 146A) taktiež realizovaná R. Mašterom, dosahovala najnižší útlm na vlnovej dĺžke 532 nm, hodnota útlmu bola 5,8 dB. Vložné optické útlmy v prípade vzorky 146A je možné porovnať s výsledkami, ktoré uviedol R. Maštera vo svojej bak. práci [2]. Tieto hodnoty sa pohybovali v rozmedzí od 3,64 dB do 5,31 dB. Mnou namerané hodnoty sú vyššie, dôvodom môže byť starnutie použitého vlnovodného materiálu.

Z výsledkov merania rozbočníc s FG910LEC vláknami, ktoré som uskutočnil, je zrejmé, že hodnoty útlmov mnou realizovanej rozbočnice sú porovnateľné s hodnotami útlmov, ktoré som namerál v prípade rozbočníc realizovaných R. Mašterom [2].

V tabuľkách 7.4 až 7.6 sú uvedené výsledky rozbočníc 1x2Y s použitou vlnovodnou vrstvou NOA73 a OG113 so štandardnými POF vláknami s FC a bez FC konektorov.

Tab. 7.4: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm **1x2Y** rozbočníc typu B a C s **POF** vláknami s **FC konektormi** pri použití vlnovodného materiálu **NOA73**.

vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
12	B	14,0	650	21,3	13,6	61:39	9,7
			532	171,0	109,4	61:39	9,9
32	C	18,5	650	13,7	14,2	49:51	10,4
			532	126,2	124,6	50:50	10,7
41	C	21,0	650	12,2	9,2	57:43	11,0
			532	75,7	57,1	57:43	13,0
48	C	21,0	650	12,3	20,9	37:66	10,0
			532	122,0	205,0	37:66	10,0

Najnižší vložný optický útlm bol v prípade rozbočníc s POF vláknami s FC konektormi dosiahnutý u vzorky typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera (vzorka č. 12) na vlnovej dĺžke 650 nm, hodnota útlmu bola 9,7 dB. Najlepšiu symetriu vykazovala vzorka typu C s módovým skramblerom (č. 32), a to 49:51 (650 nm), resp. 50:50 (532 nm).

V tab. 7.5 sú uvedené výsledky merania rozbočníc 1x2Y s POF vláknami bez FC konektorov a s vlnovodnou vrstvou NOA73.

Tab. 7.5: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm **1x2Y** rozbočníc typu A, B a C s **POF** vláknami **bez FC konektorov** pri použití vlnovodného materiálu **NOA73**.

vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)	poznámka
14	B	14,0	650	14,3	14,1	50:50	7,5	1. meranie
			532	68,3	68,2	50:50	8,9	
14	B	14,0	650	15,5	15,4	50:50	7,2	kontrolné meranie
			532	72,8	70,9	51:49	8,6	
42	C	21,0	650	6,8	4,5	60:40	9,0	1. meranie
			532	111,4	77,8	59:41	10,4	
42	C	21,0	650	7,10	4,70	60:40	8,8	kontrolné meranie
			532	117,5	78,3	60:40	10,2	
51	A	32,0	650	11,6	9,4	55:45	5,9	1. meranie
			532	122,3	99,5	55:45	6,5	
51	A	32,0	650	10,0	8,1	55:45	5,6	kontrolné meranie
			532	112,9	92,4	55:45	6,0	
52	A	32,0	650	28,7	32,3	48:52	3,3	1. meranie
			532	245,9	266,7	48:52	4,8	
52	A	32,0	650	28,1	30,3	48:52	3,5	kontrolné meranie
			532	221,5	243,5	48:52	5,3	
65	C	34,0	650	32,1	6,1	84:16	7,6	1. meranie
			532	163,7	32,6	83:17	7,9	
65	C	34,0	650	30,2	5,9	84:16	7,6	kontrolné meranie
			532	175,7	33,5	84:16	7,8	
146B	*		650	47,1	49,7	49:51	3,8	
			532	280,3	311,4	47:53	5,5	
* rozbočnica navrhnutá R. Mašterom [2]								

Najnižší vložný optický útlm na štruktúru z rozbočníc s POF vláknami bez FC konektorov bol dosiahnutý v prípade vzorky základného typu A (vzorka č. 52) na vlnovej dĺžke 650 nm, hodnota útlmu bola 3,3 dB resp. 3,5 dB. Na vlnovej dĺžke 532 nm bol najnižší útlm zistený tiež u tejto vzorky. Vložný optický útlm bol v tomto prípade 4,8 dB resp. 5,3 dB.

Najlepšiu symetriu výstupných výkonov (50:50) vykazovala vzorka typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera (vzorka č. 14).

Z porovnania hodnôt útlmov vzoriek s POF vláknami s FC konektormi a bez FC konektorov vyplýva, že vzorky s FC konektormi mali celkovo vyššie hodnoty vložného

optického útlmu ako vzorky bez FC konektorov, čo mohlo byť spôsobené poškodením čela konektorov.

Druhým použitým vlnovodným materiálom pri výrobe rozbočníc bol OG113. V prípade rozbočníc s týmto materiálom boli dosiahnuté útlmy vyššie v porovnaní s najlepšimi hodnotami u rozbočníc PMMA/NOA73. Výsledky merania jednej rozbočnice typu B a jednej typu C s týmto vlnovodným materiálom sú uvedené v tab. 7.6.

Tab. 7.6: Výsledky merania a vypočítaný optický útlm **1x2Y** rozbočníc typu B a C s **POF** vláknami **bez FC konektorov** pri použití vlnovodného materiálu **OG113**.

vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	$P_1:P_2$ (%)	α (dB)
13	B	14,0	650	18,6	18,9	50:50	6,6
			532	102,7	103,0	50:50	9,0
33	C	18,5	650	19,9	15,2	57:43	6,9
			532	85,1	64,1	57:43	10,4

Najnižší vložný útlm bol dosiahnutý u vzorky typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera (vzorka č. 13), útlm dosahoval hodnotu 6,6 dB na 650 nm. Rovnako mala táto vzorka aj najlepší pomer $P_1:P_2$ (50:50).

V tav. 7.7 sú uvedené výsledky merania výstupných výkonov a vypočítané vložné optické útlmy dvoch rozbočníc 1x4Y typu D s módovými skramblermi, u ktorých bola použitá vlnovodná vrstva NOA73.

Tab. 7.7: Výsledky merania a vypočítaný útlm **1x4Y** rozbočníc typu D s **POF** vláknami **bez FC konektorov** pri použití vlnovodného materiálu **NOA73**.

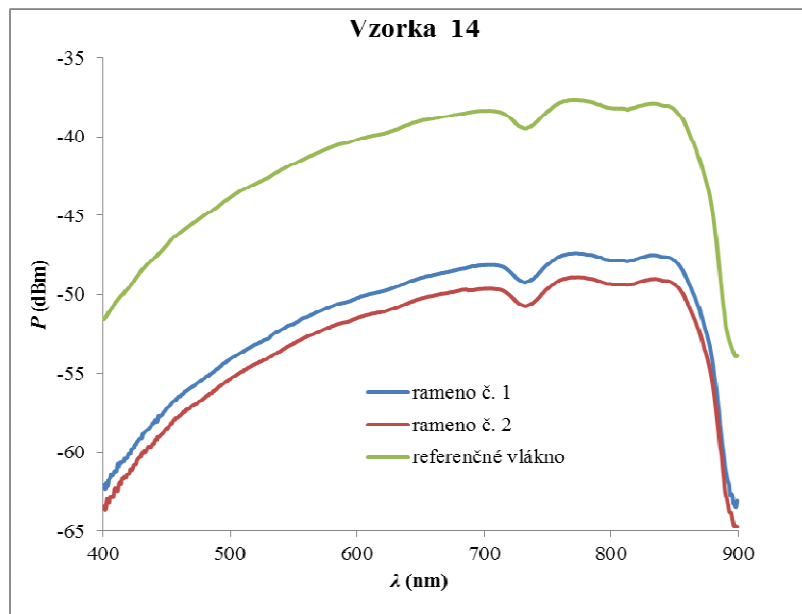
vzorka	typ	L_c (mm)	λ (nm)	P_1 (μ W)	P_2 (μ W)	P_3 (μ W)	P_4 (μ W)	$P_1:P_2:P_3:P_4$ (%)	α (dB)
71	D	60,0	650	1,0	1,7	0,7	1,0	23:38:16:23	16,9
			532	6,4	10,9	4,5	6,4	23:38:16:23	16,5
72	D	60,0	650	0,8	0,7	0,5	0,9	28:24:17:31	18,8
			532	4,6	4,1	3,0	5,2	27:24:18:31	18,5

Najnižší vložný optický útlm bol dosiahnutý v prípade vzorky typu D č. 71 na vlnovej dĺžke 532 nm, útlm dosahoval 16,5 dB. Namerané hodnoty výstupných výkonov boli nesymetrické u oboch rozbočníc 1x4Y.

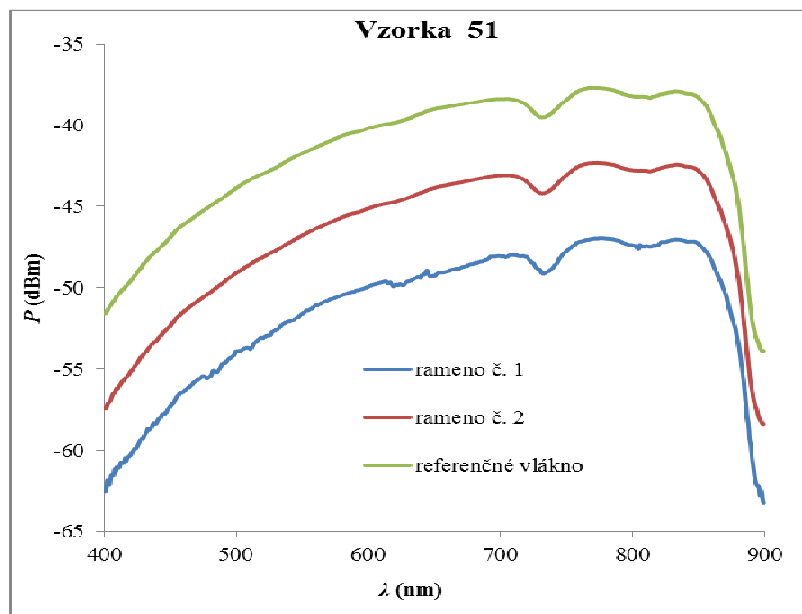
Zmerané hodnoty útlmov rozbočníc 1x4Y je možné porovnať s rozbočnicou, ktorá bola popísaná M. Nerudom v jeho bak. práci *Návrh optické planárny mnohavidové rozbočnice* [15]. Pre realizáciu tejto rozbočnice bol použitý vlnovodný materiál NOA1625. Hodnota útlmu bola na vlnovej dĺžke 532 nm 14,7 dB a na 650 nm bol útlm 17,6 dB. Z toho vyplýva, že v prípade vlnovej dĺžky 532 nm vykazovala nižší útlm rozbočnica vyrobená M. Nerudom a na vlnovej dĺžke 650 nm mala nižší útlm mnou realizovaná rozbočnica typu D č. 71, celkovo však boli hodnoty útlmov oboch rozbočníc porovnateľné.

Výstupné výkony vybraných vzoriek boli zmerané aj pomocou spektrometra ANDO v Ústave fotoniky a elektroniky AV ČR v Prahe. Vzorky 14 a 51 s POF vláknami boli merané na vlnových dĺžkach od 400 nm do 900 nm, vzorka 55 so širokopásmovými

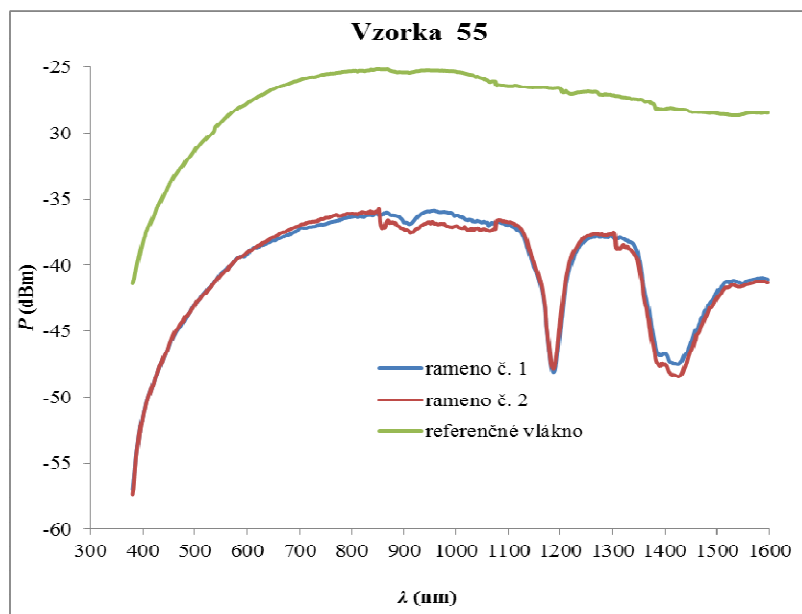
vláknami na vlnových dĺžkach od 380 nm do 1600 nm. Grafy nameraných hodnôt sú uvedené na obr. 7.14 až 7.16.



Obr. 7.14: Závislosť výstupného výkonu na vlnovej dĺžke, rozbočnica 1x2Y typu B, PMMA/NOA73 (vzorka č. 14).



Obr. 7.15: Závislosť výstupného výkonu na vlnovej dĺžke, rozbočnica 1x2Y typu A, PMMA/NOA73 (vzorka č. 51).

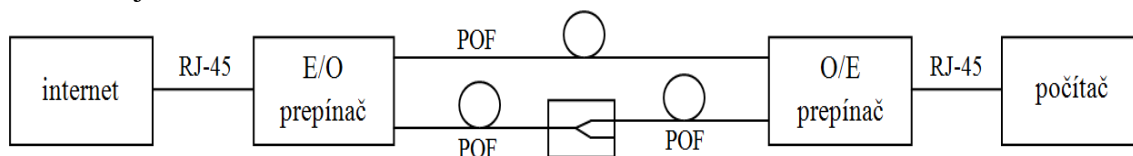


Obr. 7.16: Závislosť výstupného výkonu na vlnovej dĺžke, rozbočnica 1x2Y typu A, PMMA/NOA73 (vzorka č. 55).

Najlepšiu symetriu výstupných výkonov má na základe analýzy grafov vzorka základného typu A (vzorka č. 55) so širokopásmovými vláknami. Rozbočnicu s najnižším útlmom možno určiť na základe rozdielu veľkosti výstupného výkonu referenčného vlákna a súčtu výstupných výkonov ramien rozbočnice. Čím menší je tento rozdiel, tým je nižší optický útlm vypočítaný podľa vzťahu 7.1. Najmenší rozdiel je v prípade vzorky základného typu A (vzorka č. 51), to znamená, že má najnižší vložný optický útlm z meraných rozbočníc.

7.5 Meranie prenosovej rýchlosti

V prípade dvoch vybraných rozbočníc 1x2Y bola zmeraná prenosová rýchlosť dát pri pripojení k internetu. Pri tomto meraní boli použité dva optoelektrické prepínače KCD-303P-A2 od firmy KTI Networks. Do jedného z prepínačov bol pripojený kábel RJ45, ktorým bol privádzaný elektrický signál zo siete. Tento signál bol v prepínači prevedený na optický signál, ktorý bol vysielaný do vstupného vlákna rozbočnice. Výstupné vlákno bolo pripojené do druhého prepínača, v ktorom bol optický signál, ktorý prešiel rozbočnicou, prevedený späť na elektrický a ďalším RJ45 káblom privedený do počítača. Meranie prebiehalo zvlášť pre každé výstupné vlákno. Schéma meracieho pracoviska je uvedená na obr. 7.17.



Obr. 7.17: Meracie pracovisko pre meranie prenosovej rýchlosti rozbočníc.

Prenosová rýchlosť bola testovaná pomocou aplikácií dostupných na adresách: www.speedtest.net a speedtest.cesnet.cz. Zmerané prenosové rýchlosti v_p sú uvedené v tab. 7.8.

Tab. 7.8: Zmerané prenosové rýchlosti vyrobených rozbočníc 1x2Y.

vzorka	typ	v_p (Mbit/s) rameno č. 1	v_p (Mbit/s) rameno č. 2
14	B	94,67	89,92
52	A	94,79	90,95
<i>Referenčná rýchlosť: 94,85 Mbit/s</i>			

Vyššia prenosová rýchlosť bola nameraná v prípade rozbočnice základného typu A s vlnovodnou vrstvou NOA73 (vzorka č. 52), ktorá má nižší optický útlm v porovnaní s druhou testovanou rozbočnicou typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera, ktorá mala vlnovodnú vrstvu tiež NOA73 (vzorka č. 14). U oboch rozbočníc sa však v_p blíži k hodnote rýchlosti, ktorá bola zmeraná pri použití referenčného vlákna, to znamená, že zaradenie daných štruktúr do trasy nemalo výrazný vplyv na prenos dát.

8. Záver

V rámci bakalárskej práce som sa zaoberal výpočtami teoretických parametrov rozbočníc 1x2Y podľa práce D. Beltramiho [19] a priepustnosti a odrazivosti na rozhraní dvoch prostredí - jadra vlákna a vlnovodnej vrstvy. Podieľal som sa na depozičných testoch za účelom zistenia materiálových konštánt rôznych vlnovodných materiálov. Oboznámil som sa so simulačným programom BeamPROPTM vhodným na simulácie planárnych štruktúr a postupne som v ňom navrhol desať motívov 1x2Y a 1x4Y optických rozbočníc pre POF vlákna. Vybrané navrhnuté štruktúry boli následne vyrobené. Drážky pre vlnovodné vrstvy boli vytvorené pomocou CNC gravírovania do substrátu PMMA. Po vytvorení kanálikov v substráte som sa zaoberal výrobou rozbočníc v podobe pripevnenia optických vláken, naniesenia vlnovodnej vrstvy, jej vytvrdenia pod UV lampou a pripevnením krycej vrstvy na substrát. Pre realizáciu štruktúr boli použité vlnovodné materiály NOA73, OG113 a jedenkrát NOA1625.

Nasledovalo meranie výstupných výkonov a vyhodnotenie optického útlmu rozbočníc pri použití dvoch druhov vláken – štandardných POF vláken určených pre vlnovú dĺžku 532 nm a 650 nm bez konektorov a s FC konektormi a špeciálnych širokopásmových vláken (FG910LEC) s FC konektormi od firmy Thorlabs s geometrickými rozmermi kompatibilnými so štandardnými POF vláknami. Štruktúry so širokopásmovými vstupnými a výstupnými vláknami boli merané na vlnových dĺžkach 532 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm.

Vyrobené motívy boli rozdelené na 4 typy označené písmenami A, B, C, D. Typ A zodpovedal rozbočnici 1x2Y s výstupnými vlnovodmi tvaru S a s rovnakou šírkou kanálikov pozdĺž celej štruktúry, typ B zodpovedal topológii rozbočnice 1x2Y, ktorá bola publikovaná v článku p. T. Klotzbüchera [11], typu C prislúchala rozbočnica 1x2Y, ktorá obsahovala dvojité módový skrambler a jej výstupné ramená boli lomeného tvaru a typ D predstavovala rozbočnica s jedným vstupným a štyrmi výstupnými POF vláknami 1x4Y, ktorá obsahovala tri dvojité módové skramblery.

Najnižšiu hodnotu vložného optického útlmu spomedzi rozbočníc 1x2Y s POF vláknami vykazovala rozbočnica s vlnovodnou vrstvou tvorenou polymérom NOA73 základného typu A (vzorka č. 52), kde na vlnovej dĺžke 650 nm dosahoval útlm priemernú hodnotu 3,4 dB na celú štruktúru. Zároveň táto vzorka dosahovala aj najnižšie hodnoty útlmu na vlnovej dĺžke 532 nm, priemerná hodnota vložného optického útlmu bola v tomto prípade 5,1 dB. Pomer výstupných výkonov bol 48:52.

Jedna rozbočnica základného typu A s vlnovodným materiálom NOA73 (vzorka č. 55) bola vyrobená s použitím širokopásmových vláken FG910LEC. Najnižšiu hodnotu vložného optického útlmu vykazovala táto rozbočnica na vlnovej dĺžke 532 nm, útlm dosahoval v tomto prípade 5,0 dB. Hodnoty útlmu na ďalších vlnových dĺžkach boli nasledovné: 5,9 dB (650 nm), 6,6 dB (850 nm), 6,2 dB (1310 nm) a 7,3 dB (1550 nm). Pomer výstupných výkonov vzorky bol 54:46. Pre porovnanie boli zmerané aj dve ďalšie rozbočnice s vláknami FG910LEC s použitými vlnovodnými vrstvami NOA72 a NOA1625, ktoré boli navrhnuté a vyrobené R. Mašterom v rámci jeho bakalárskej práce [2]. Vzorka s vlnovodnou vrstvou NOA1625 (vzorka č. 144B) mala najnižší vložný

optický útlm 5,0 dB na vlnovej dĺžke 1310 nm. Ďalšie zmerané hodnoty útlmu tejto vzorky boli nasledovné: 5,2 dB (532 nm), 7,6 dB (650 nm), 6,0 dB (850 nm) a 8,6 dB (1550 nm). Pomer výstupných výkonov bol 41:59. Vzorka s vlnovodnou vrstvou NOA72 (vzorka č. 146A) dosahovala najnižší vložný optický útlm 5,8 dB na vlnovej dĺžke 532 nm. Na ostatných vlnových dĺžkach boli zmerané tieto hodnoty: 6,3 dB (650 nm), 8,2 dB (850 nm), 6,1 dB (1310 nm) a 6,2 dB (1550 nm). Pomer výstupných výkonov štruktúry bol 52:48.

Zmerané hodnoty útlmov mojej rozbočnice s vláknami FG910LEC boli porovnateľné s hodnotami útlmov, ktoré som nameral v prípade rozbočníc realizovaných R. Mašterom.

Najnižšia hodnota útlmu u vzoriek s POF vláknami a s vlnovodnou vrstvou tvorenou OG113 bola zistená v prípade vzorky typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera (vzorka č. 13) na vlnovej dĺžke 650 nm. Hodnota vložného optického útlmu dosahovala 6,6 dB. Na vlnovej dĺžke 532 nm mala táto rozbočnica útlm 9,0 dB. Pomer výstupných výkonov bol 50:50.

V prípade rozbočníc 1x2Y s POF vláknami opatrenými FC konektormi boli zistené vyššie hodnoty vložných optických útlmov ako u rozbočníc s POF vláknami bez FC konektorov. Najnižšia hodnota vložného optického útlmu bola v prípade rozbočníc s FC konektormi zistená u vzorky typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera s vlnovodnou vrstvou NOA73. Na vlnovej dĺžke 650 nm dosahoval útlm 9,7 dB a na 532 nm bol útlm 9,9 dB, pomer výstupných výkonov rozbočnice bol 61:39. Príčinou vyšších útlmov mohlo byť poškodenie čela FC konektorov.

Spomedzi vyrobených 1x4Y POF rozbočníc s módovými skramblermi, u ktorých bol použitý výlučne materiál NOA73, vykazovala najnižší vložný optický útlm, 16,5 dB, vzorka typu D č. 71 na vlnovej dĺžke 532 nm. Hodnota útlmu tejto rozbočnice na vlnovej dĺžke 650 nm bola 16,9 dB. Pomer výstupných výkonov bol v tomto prípade 23:38:16:23. Veľkosti útlmov mnou navrhutej rozbočnice 1x4Y boli porovnateľné s útlmami rozbočnice s vlnovodnou vrstvou NOA1625, navrhutej M. Nerudom v rámci jeho bakalárskej práce [15], v prípade ktorej boli hodnoty vložného optického útlmu 14,7 dB (532 nm) a 17,6 dB (650 nm) a pomer výstupných výkonov bol 26:27:23:24.

Ak porovnáme jednotlivé typy rozbočníc z hľadiska vložného optického útlmu, najnižší útlm bol dosiahnutý v prípade rozbočníc 1x2Y základného typu A, nasledujú rozbočnice 1x2Y typu C s módovým skramblerom a rozbočnice 1x2Y typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera. Najvyššie hodnoty boli z dôvodu zložitosti štruktúr zistené u 1x4Y rozbočníc typu D s módovými skramblermi.

Z uvedeného vyplýva, že z hľadiska celkovej dĺžky L_c najnižšie hodnoty vložného optického útlmu dosahovala dlhšia vzorka základného typu A (s dĺžkou 32 mm). Nižšie hodnoty útlmu v porovnaní s menšími štruktúrami možno vysvetliť tým, že dlhšie rozbočnice majú vyžarovací uhol, ktorý zvierajú výstupné ramená, menší ako kratšie rozbočnice.

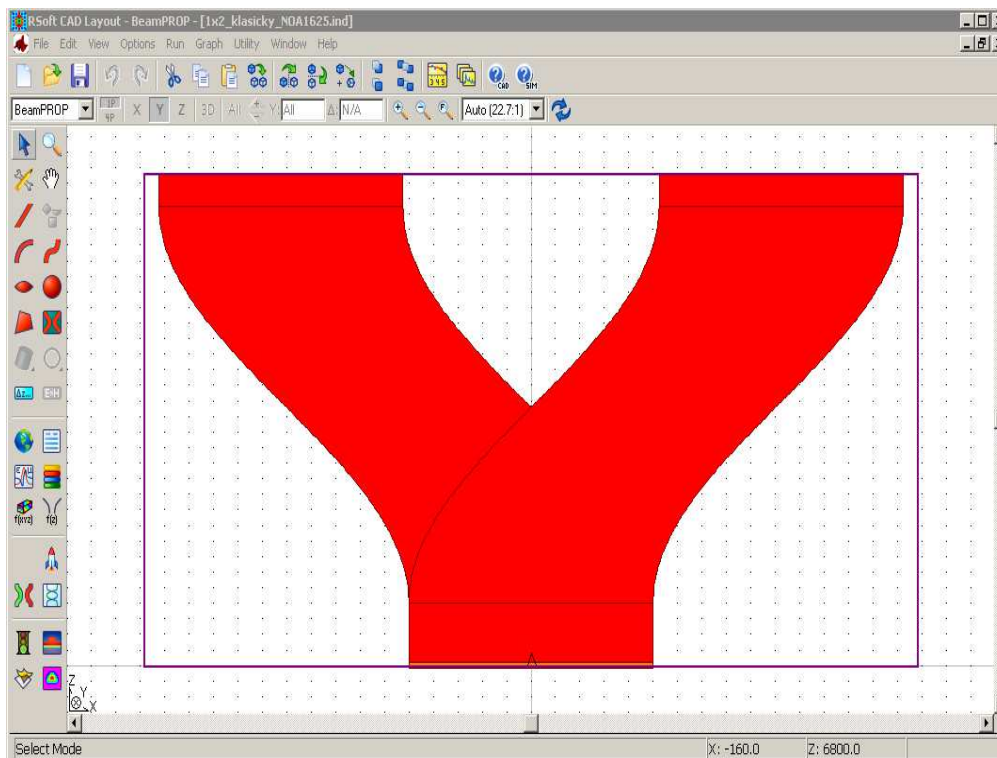
9. Použitá literatura

- [1] Filka, M: *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*, Brno 2009, 369 s.
- [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] Ngoc Kien, Pham: *Návrh mnohavidové optické rozbočnice pomocí metody Ray Tracing*, Praha: ČVUT 2012. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 83 s.
- [4] Novotný, K.: *Optická komunikační technika*, Praha: ČVUT 1998. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 165 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] Boháč L., Lucki, M.: *Optické komunikační systémy*, Praha: ČVUT 2010. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 165 s.
- [9] Nekvidová, P. a kol.: *Návody pro laboratoře oboru anorganická chemie*, VŠCHT. [online]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/ach/pub/navlab-Planarni_opticke_vlnovody.pdf>.
- [10] Tůma, H.: *Návrh 1x3 optické polymerní rozbočnice*. Praha: ČVUT 2011. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 76 s.
- [11] 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, s. 121-132.
- [12] 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, s. 2912-2914.
- [13] Mizuno, H., Sugihara, O., Jordan, S., Okamoto, N., Ohama, M., Kaino, T.: *Replicated polymeric optical waveguide devices with large core connectable to plastic optical fiber using thermo-plastic and thermo-curable resins*, Journal of Lightwave Technology, 2006. Vol. 24, No. 2., s. 919 – 926.
- [14] 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, s. 2307-2312.
- [15] Neruda, M.: *Návrh optické planární mnohavidové rozbočnice*. Praha: ČVUT 2012, Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 45 s.

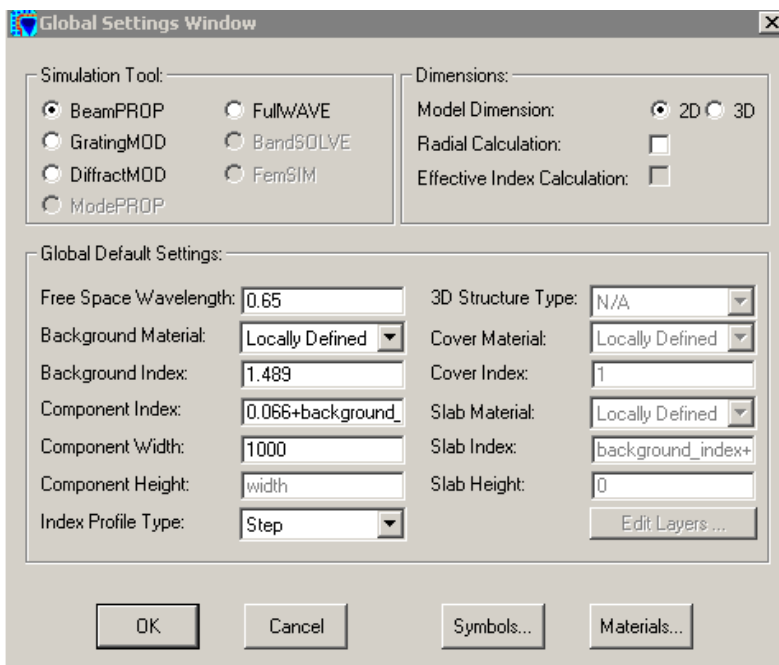
- [16] Waynant M.N, Ediger, R.W.: *Electro-Optics Handbook (2nd Edition)*. McGraw-Hill, 2000.
- [17] Norland Products, UV adhesives, Norland Optical Adhesive 73, [online]. [cit.2015-04-01]. Dostupné z: <<https://www.norlandprod.com/adhesives/NOA%2073adhesives/NOA%2073.html>>.
- [18] EPO-TEK[®] UV Cure Selector Guide, [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/uv_cure_brochure_webready.pdf>.
- [19] Beltrami, D.: *Planar multimode waveguides and devices*, Optical and Quantum Electronics, Vol. 31, 1999, s. 307 – 326.
- [20] V. Prajzler, M. Neruda, J. Špirková: *Planar Large Core Polymer Optical 1x2 and 1x4 Splitters Connectable to Plastic Optical Fiber*, Radioengineering, Vol. 22, No. 3, 2013, ISSN 1210-2512, s. 751-757.
- [21] Vrbová, M. a kol.: *Lasery a moderní optika*, Praha: Prometheus 2012, 474 s.
- [22] Toray Datasheet, POF katalog, [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/toray/pof-katalog.pdf&no_cache=1>.
- [23] 0.22 NA Step-Index MM Fibers, TEQS[™] Coated Silica/Silica [online].[cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <<https://www.thorlabschina.cn/catalogpages/V21/1058.PDF>>.
- [24] Barkman, O.: *Návrh optických kanálkových difúzních rozbočnic na skleněných podložkách*. Praha: ČVUT 2011. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 85 s.
- [25] RSoft design group, BeamPROP 8.1 User Guide, 2008.
- [26] POF Tool Kit, Industrial Fiber Optics, [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://i-fiberoptics.com/pdf/12_0256-if_tk4.pdf>.
- [27] Grexa, J.: *Teoretický návrh optické odbočnice*. Praha: ČVUT 2011. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 78 s.
- [28] Metricon Corporation, [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <<http://www.metricon.com>>.
- [29] UV-3600 UV-VIS-NIR Spectrophotometer, [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <<http://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/eng/UV/UV3600.php>>.

Príloha A

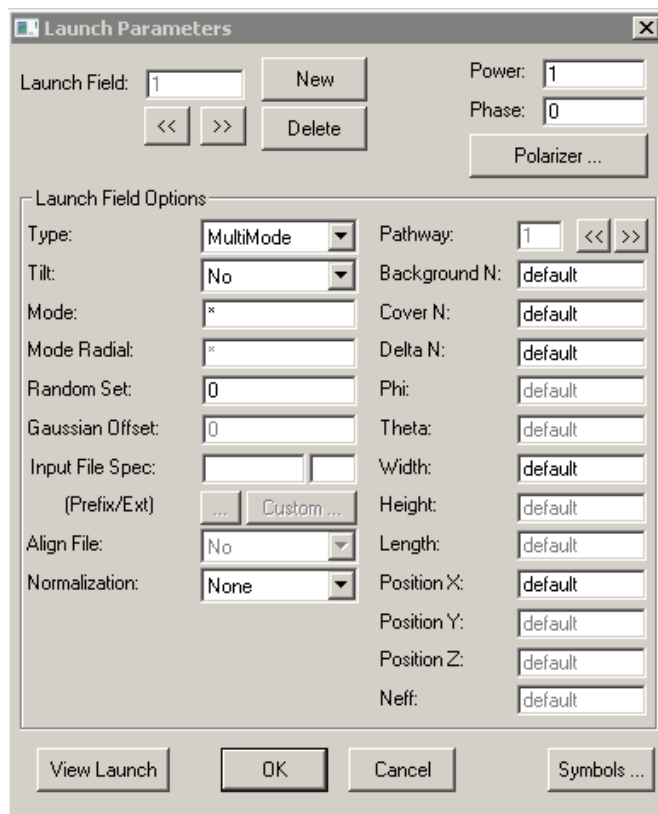
Nastavenia v simulačnom programe BeamPROP™



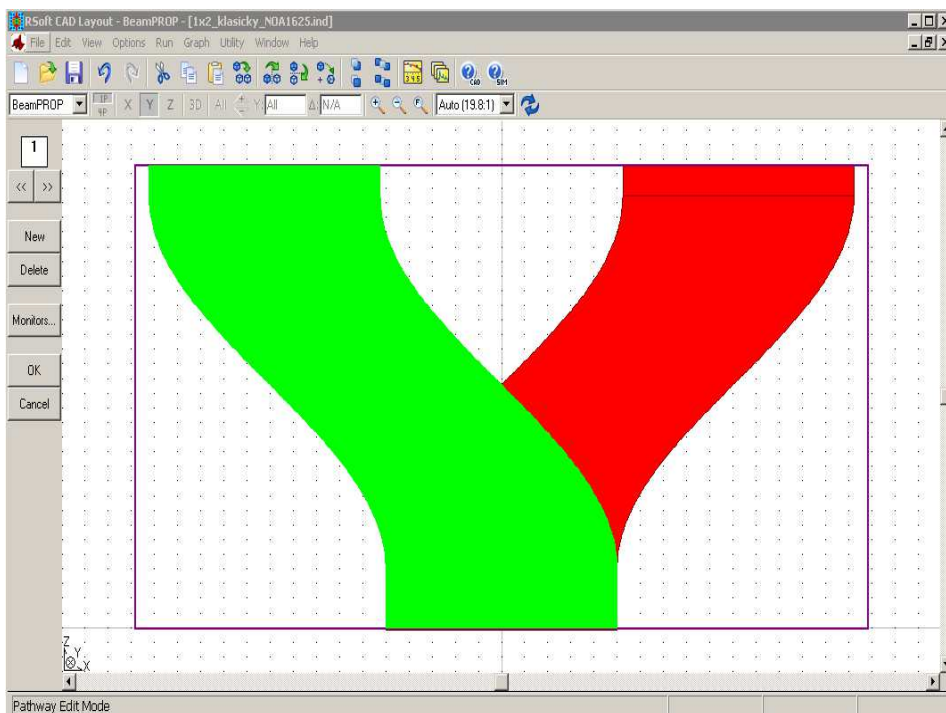
2D rozbočnica 1x2Y základného typu A



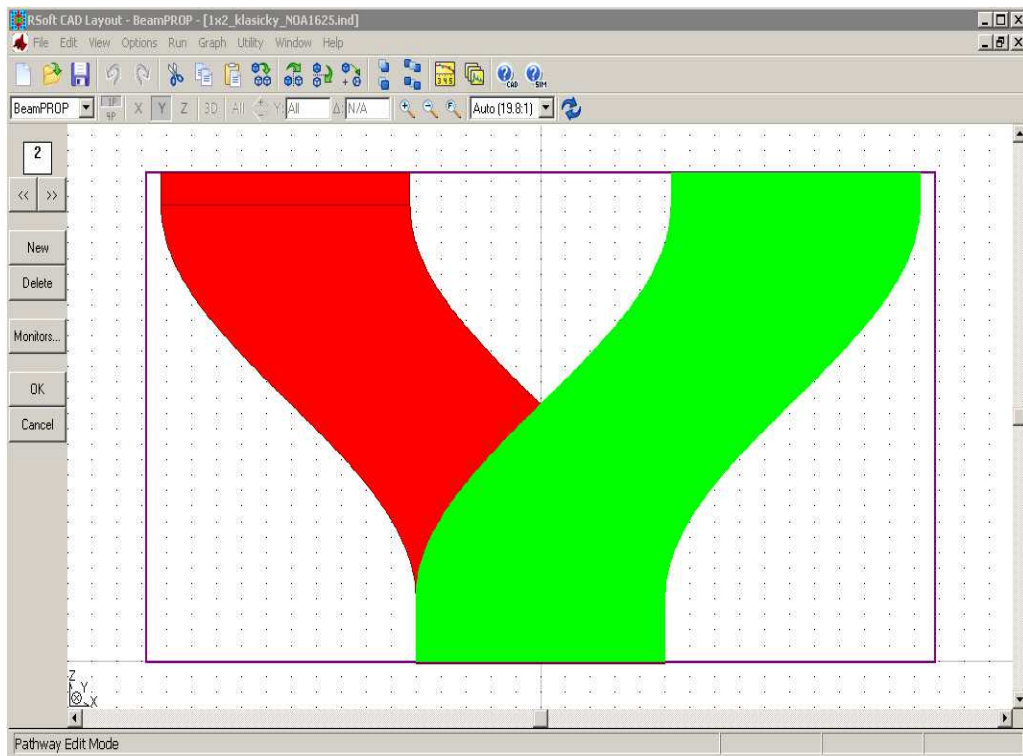
Globálne nastavenie pre 1x2Y rozbočnicu PMMA/NOA73 základného typu A – definícia vlnovej dĺžky, indexov lomu substrátu a vlnovodnej vrstvy, priečných rozmerov vlnovodu.



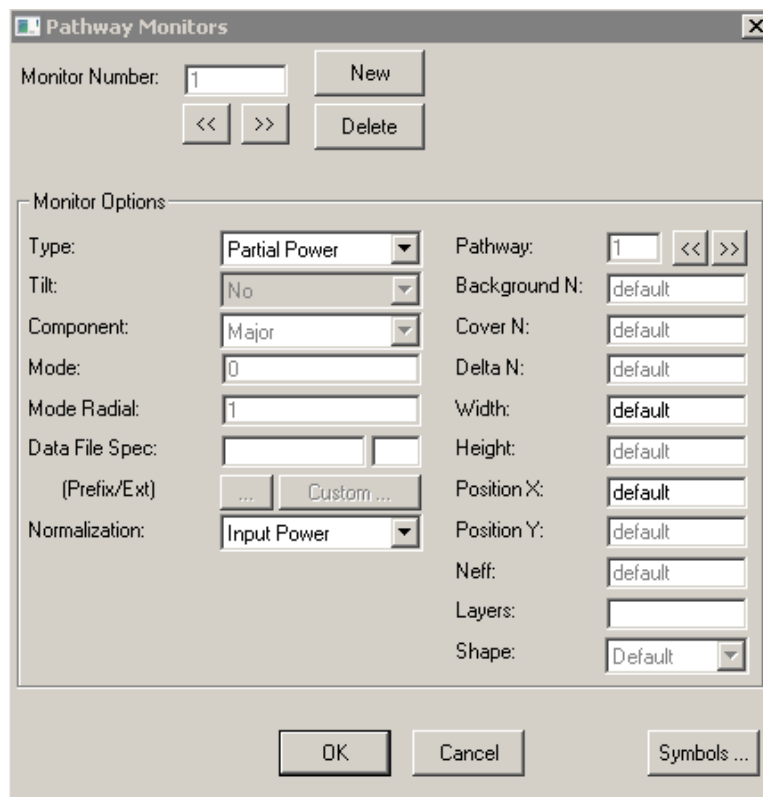
Nastavenie zdroja žiarenia



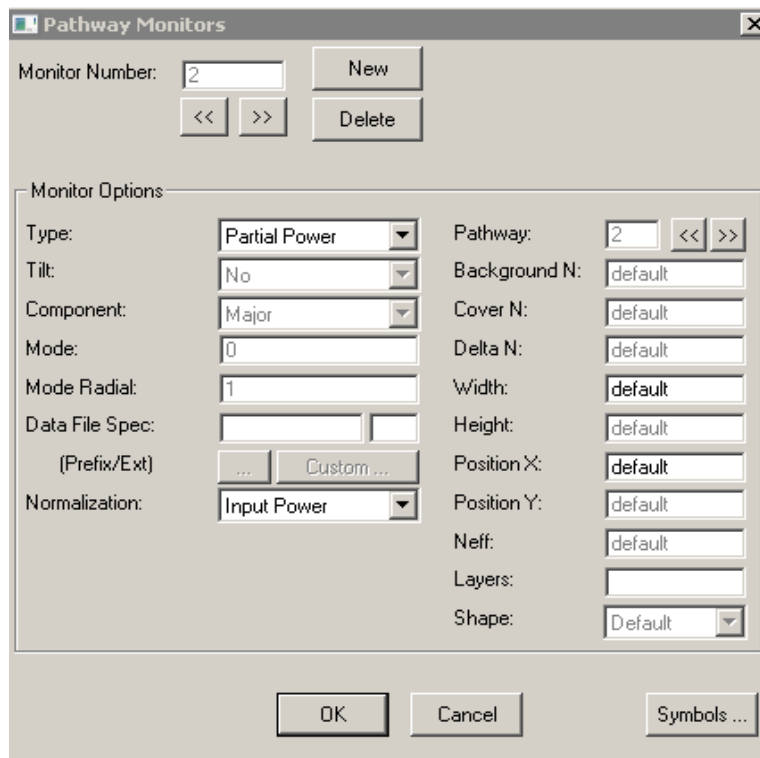
Nastavenie ľavej vetvy, rozbočnica základného typu A



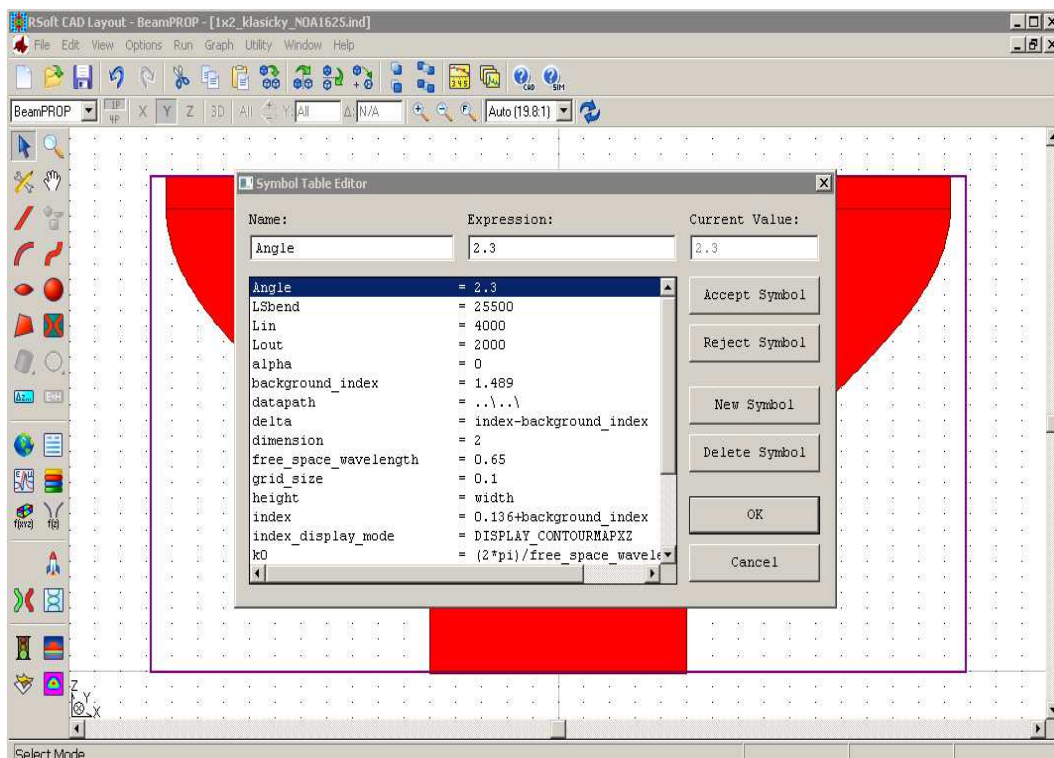
Nastavenie pravej vetvy, rozbočnica základného typu A



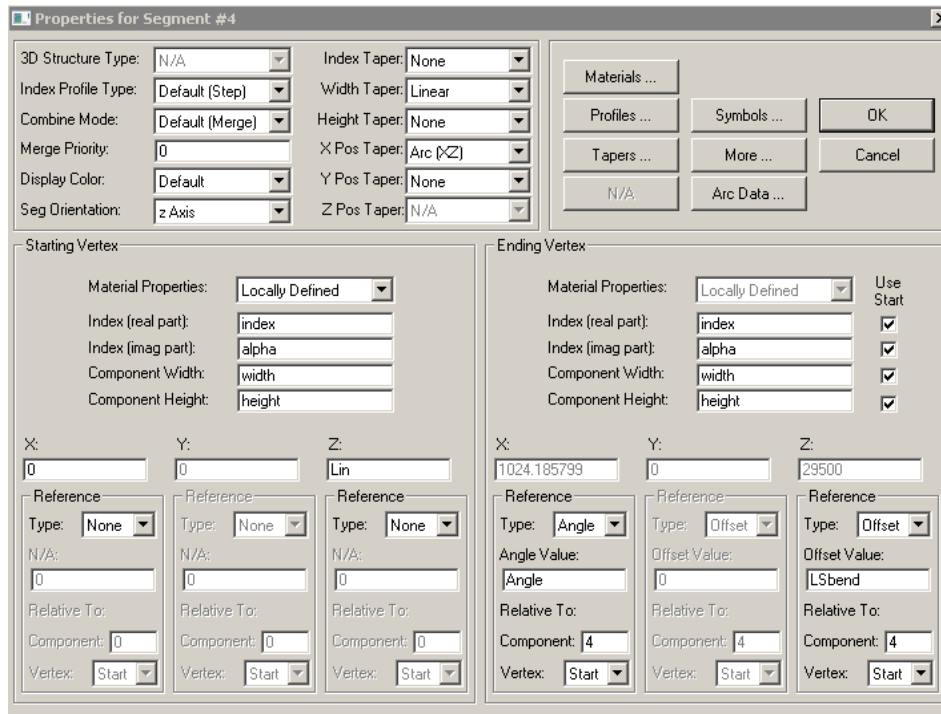
Nastavenie parametrov pre vetvu 1, rozbočnica základného typu A



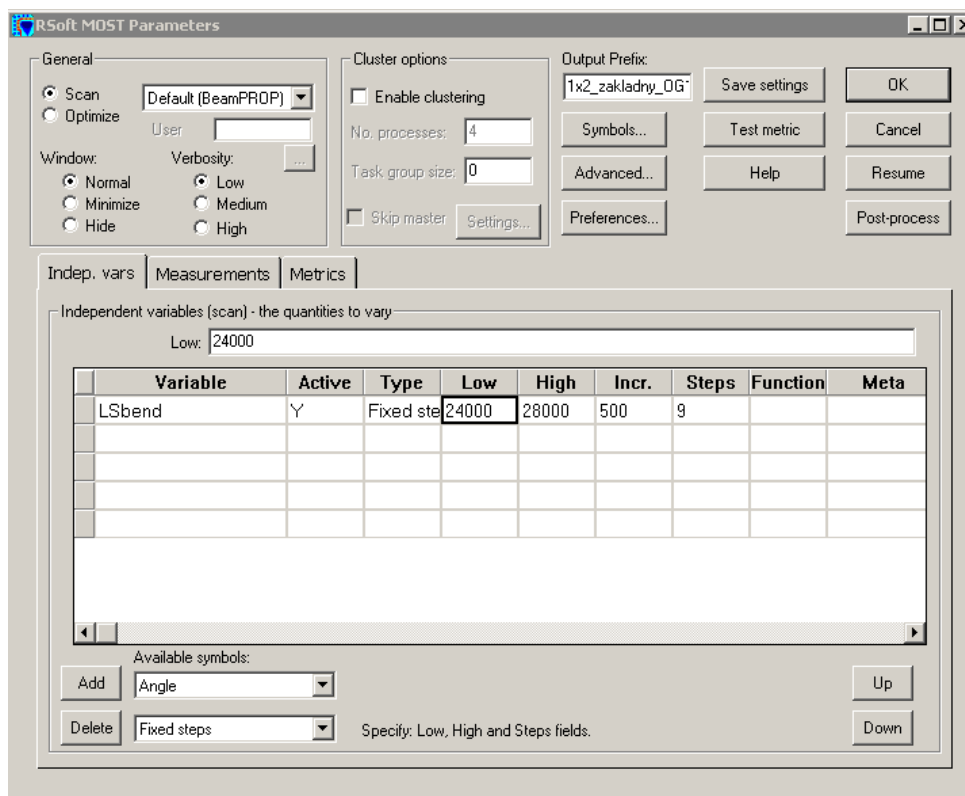
Nastavenie parametrov pre vetvu 2, rozbočnica základného typu A



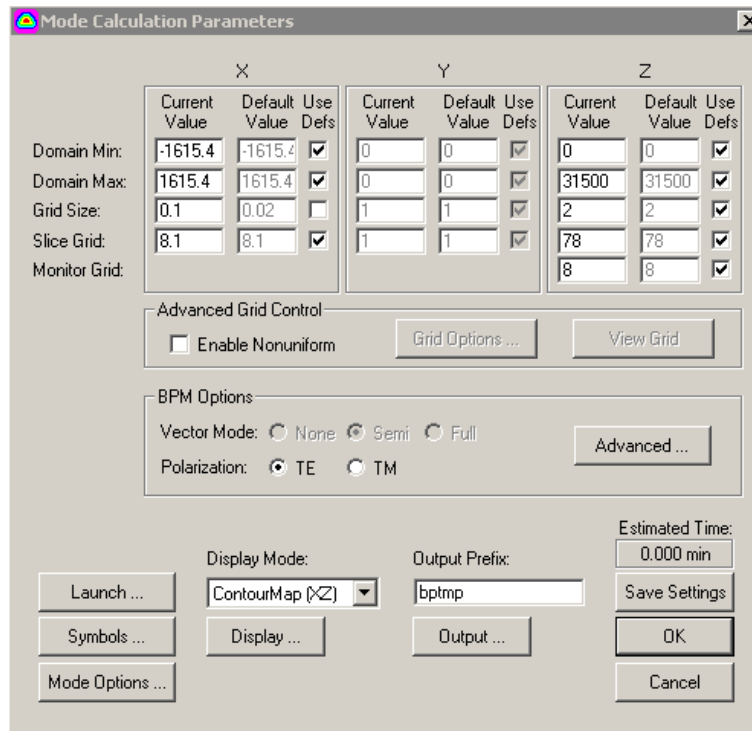
Nastavenie parametrov rozbočnice, rozbočnica základného typu A



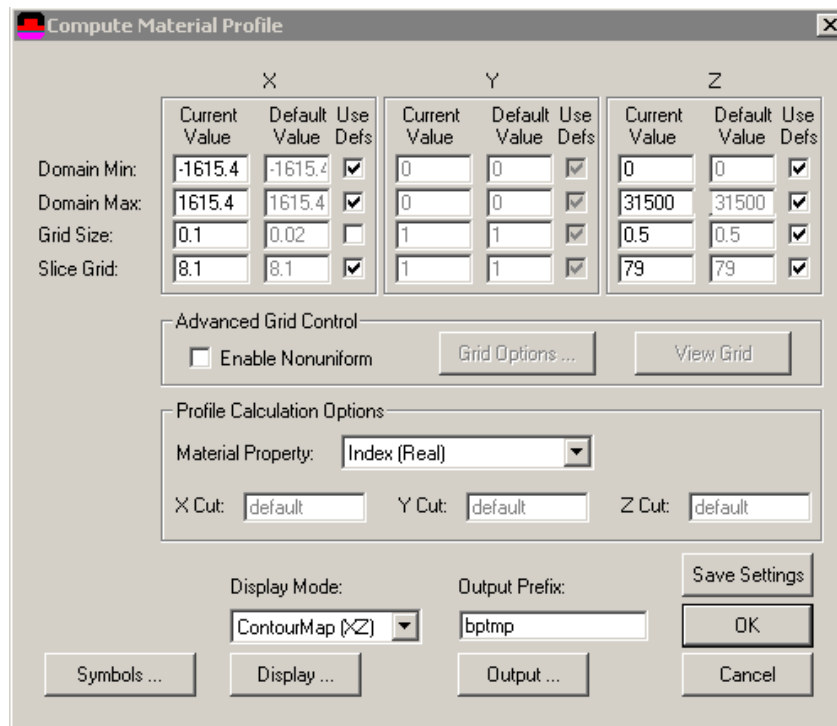
Nastavenie daného komponentu rozbočnice, rozbočnica základného typu A



Nastavenie parametrov pre simuláciu výstupných normovaných výkonov rozbočnice – výber komponentov pre optimalizáciu, rozbočnica základného typu A



Nastavenia vidových parametrov



Nastavenia pre vykreslenie profilu indexu lomu

Príloha B

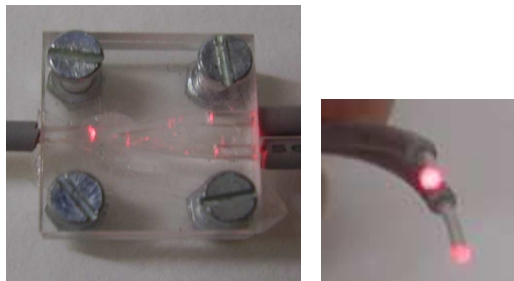
Tab. B1: Prehľad vyrobených vzoriek rozbočníc

č. motívu	označenie vzoriek daného motívu	substrát	použité vlnovodné vrstvy
1	11,12,13,14,15,16,17,18,19	PMMA	8xNOA73 1xOG113
2	21,22		2xNOA73
3	31,32,33,34,35,36		5xNOA73 1xOG113
4	41,42,43,44,45,46,47,48,49		1xOG113 8xNOA73
5	51,52,53,54,55,56		6xNOA73
6	61,62,63,64,65,66		5xNOA73 1xNOA1625
7	71,72,73		3xNOA73

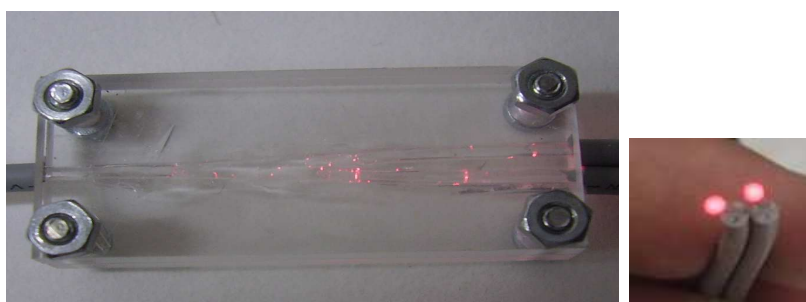
Príloha C

Fotodokumentácia vybraných vyrobených rozbočníc

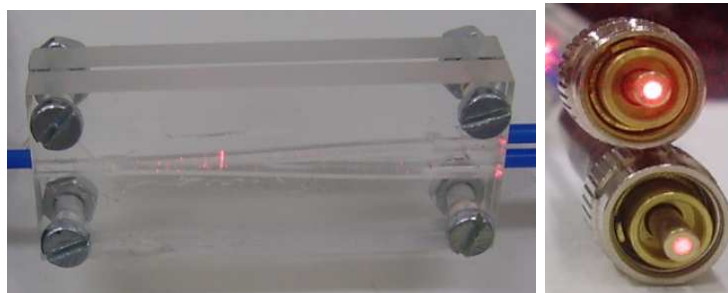
a)



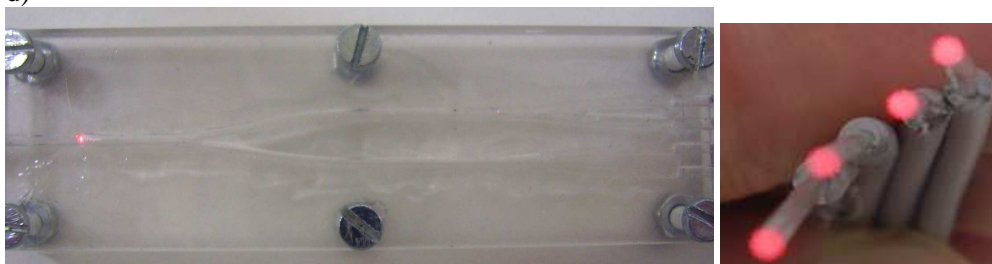
b)



c)



d)



Fotografie vybraných vyrobených rozbočníc,
a) vzorka 14 typu B podľa návrhu T. Klotzbüchera, b) vzorka 51 základného typu A, c) vzorka 55
základného typu A, d) vzorka 71 typu D s módovými skramblermi (všetky s vlnovodným
materiálom NOA73).

Príloha D

Tab. D1: Prehľad vzoriek použitých na depozičné testy

dátum testu	označenie vzorky	substrát	vlnovodná vrstva	čas depoziácie
17.10.2013	170	sklenený substrát	NOA88	15 min
	171	sklenený substrát	NOA164	4 min
	172	sklenený substrát	Photobond 300 (DELO)	20 min
	173	sklenený substrát	Photobond 400 (DELO)	5 min
	174	sklenený substrát	DYMAX 3225-T-SC	5 min
	175	sklenený substrát	DYMAX DY 3221-SC	5 min
	176	sklenený substrát	DYMAX OP-4-20632	15 min
10.10.2013	179	sklenený substrát	Su8-50	5 min
	180	sklenený substrát	Su8-50	5 min
17.10.2013	181	sklenený substrát	EPOTEK 383ND	5 min
	182	sklenený substrát	EPOTEK 383ND	zničený
23.10.2013	183	SiO ₂	NOA88	10 min
	184	SiO ₂	NOA164	45 min
	185	SiO ₂	Photobond 300 (DELO)	30 min
	186	SiO ₂	Photobond 400 (DELO)	2,5 min
	187	SiO ₂	DYMAX 3225-T-SC	40 min
	188	SiO ₂	DYMAX DY 3221-SC	10 min
	189	SiO ₂	DYMAX OP-4-20632	7 min
24.10.2013	190	SiO ₂	NOA72	2 min
	191	SiO ₂	NOA73	4 min
	192	SiO ₂	DYMAX 3225-T-SC	15 min

Tab. D1: Prehľad vzoriek použitých na depozičné testy - pokračovanie

dátum	označenie vzorky	substrát	vlnovodná vrstva	čas depozície
1.11.2013	193	SiO ₂	Photobond 300 (DELO)	3 hodiny
	194	SiO ₂	Photobond 400 (DELO)	1 hodina
	195A	SiO ₂	NOA164	38:21 hod.
	195B	SiO ₂	NOA164	45:56 hod.
	196A	SiO ₂	DYMAX DY 3221-SC	34:34 hod.
	196B	SiO ₂	DYMAX DY 3221-SC	7:35 hod.
	197	SiO ₂	NOA88	5 min
	198	SiO ₂	DYMAX OP-4-20632	25 min
	199	SiO ₂	DYMAX 3225-T-SC	10 min
	200A	SiO ₂	Photobond 400 (DELO)	5 min
	200B	SiO ₂	Photobond 400 (DELO)	2 min
	201	SiO ₂	NOA72	12 min
	202	SiO ₂	NOA73	5 min
	203	SiO ₂	OG113	11 min
	95	PMMA	NOA73	2,5 min
	96	PMMA	NOA73	5 min
	92	PMMA	ENR	25 min

