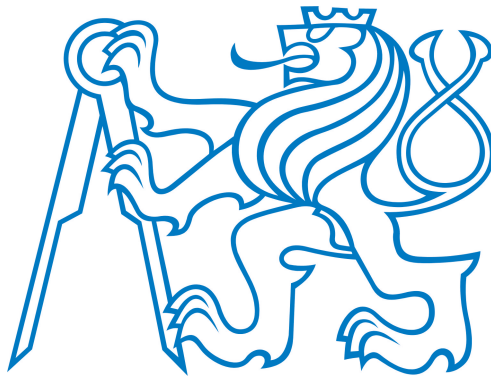


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE**

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optické planární vlnovody

Praha, 2016

Autor: Miloš Neruda

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. N E R U D A Miloš, DiS.**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Optické planární vlnovody**

Pokyny pro vypracování:

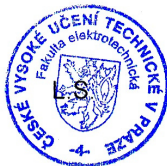
1. Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v planárních optických vlnovodech.
2. Navrhněte optické planární vlnovod s jednostupňovou iontovou výměnou.
3. Navrhněte optické planární vlnovod s dvoustupňovou iontovou výměnou.
4. Navrhněte optický planární vlnovod se skokovou změnou indexu lomu.
5. Navrhněte optickou výkonovou rozbočnici.
6. Podílejte se na výrobě navržených struktur.
7. Diagnostikujte vyrobené planární optické vlnovody.

Seznam odborné literatury:

- [1] K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
- [2] P.N. Kien: Návrh planárního mnohavidového polymerního optického vlnovodu, Bakalářská práce ČVUT 2010.
- [3] G. Yang, G. Zhao, et al. Multimode-waveguide-based optical power splitters in glass, Chinese Physics Letters. vol. 25, no. 8, pp. 2912-2914, 2008.
- [4] Z. Zhou, X. Duan: Integrated waveguide splitter fabricated by Cs⁺ – Na⁺ ion-exchange, Optics Communications, vol. 266, pp. 129–131, 2006.

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

Platnost zadání: 28. 2. 2017



prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
děkan

V Praze dne 30. 9. 2015

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury. Nemám důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 11.1. 2016

Miloš Neruda

Rád bych poděkoval především doc.Ing. Václavu Prajzlerovi Ph.D. za vedení diplomové práce, za cenné rady a podnětné připomínky a za čas, který mi věnoval při konzultacích, výrobě vzorků i měřeních. Další poděkování patří také doc.RNDr. Petru Mikulíkovi a Ing. Milanu Kučerovi z Masarykovy univerzity v Brně za pomoc při výrobě hřebenových planárních vlnodů v Laboratoři polovodičů, Ing. Pavle Nektivkové Ph.D. z VŠCHT v Praze za umožnění měření na přístroji jednohranové vidové spektroskopie, Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové Ph.D. z Katedry elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze a Mgr. Oleksiy Lyutakovovi Ph.D. z VŠCHT v Praze za umožnění měření na profilometru talystep.

Název práce: Optické planární vlnovody

Autor: Bc. Miloš Neruda

Katedra: Katedra mikroelektroniky

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

Email vedoucího: xprajzlv@fel.cvut.cz

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá návrhem optických planárních a hřebenových vlnovodů a optických mnohavidových rozbočnic se skokovou změnou indexu lomu jak na pevných substrátech, tak i na flexibilních podložkách. V první části diplomové práce je popsána teorie vedení světla ve vlnovodech se skokovou změnou indexu lomu. Dále je v práci uveden teoretický návrh hřebenových vlnovodů a optických rozbočnic na podložkách Si/SiO₂, FR4, TOPAS a Piralux za použití polymeru EpoClad, EpoCore a SU8-50. V práci jsou také popsány provedené deponiční testy pro výrobu navržených planárních struktur pomocí metody rotačního lití a optické litografie. Na závěr jsou uvedeny metody pro diagnostiku vyrobených vzorků a shrnuty dosažené výsledky. Podařilo se vyrobit planární optické vlnovody s optickým útlumem nižším než 0,5 dB/cm na vlnové délce 632,8 nm. Nejlepší planární vlnovod TOPAS/EpoClad/EpoCore měl útlum 0,14 dB/cm na vlnové délce 964 nm. Nejnižšího útlumu u hřebenového vlnovodu bylo dosaženo 0,24 dB/cm na vlnové délce 1310 nm.

Klíčová slova: optická litografie, optické planární vlnovody, optické mnohavidové rozbočnice, polymery.

Title: Optical planar waveguides

Author: Bc. Miloš Neruda

Department: Department of Microelectronics

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

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

Abstract: The thesis deals with the design of planar optical waveguides and rib waveguides and step index multimode optical splitters on solid substrates, and also on flexible substrates. The first part is dedicated to the theory of light propagation in a step index waveguides. In the study there is also shown the theoretical design of rib waveguides and optical splitters on to Si/SiO₂ substrates, FR4, TOPAS and Pyralux using polymers EpoClad, EpoCore and SU8-50. The thesis also describes the fabrication of deposition tests proposed for the production of planar structures using spin coating procedure and optical lithography. Finally, there is a list of methods used for diagnosing manufactured samples and there is also a summary of the results that have been achieved. In the study, it was managed to produce a planar optical waveguides with optical attenuation below 0.5 dB/cm at a wavelength of 632.8 nm . The best planar waveguides of TOPAS/EpoClad/EpoCore had attenuation 0.14 dB/cm . The lowest attenuation was achieved at the rib waveguide 0.24 dB/cm .

Key words: optical lithography, optical planar waveguides, optical multimode splitters, polymers.

Zkratka/Symbol	význam/veličina	jednotka
IP _{Tv}	Internet Protocol Television	
VoIP	Voice over Internet Protocol	
FTTx	Fiber To The x	
ESR	Extra Short Reach	
USR	Ultra Short Reach	
ENR	Epoxy Novolak Resin	
PMMA	PolyMethylMethacrylat	
SMT	Surface Mount Technology	
BPM	Beam Propagation Method	
<i>Int</i>	funkce vracející celé číslo	
∇	gradient	-
ω	úhlová rychlost	s^{-1}
μ	permeabilita prostředí	-
μ_0	permeabilita vakua	-
ε	permitivita prostředí	-
ε_0	permitivita vakua	
E	intenzita elektrického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
D	elektrická indukce	C/m^2
B	magnetická indukce	T
ρ	objemová hustota náboje	C/m^3
k	vlnový vektor	m^{-1}
β	fázová konstanta	m^{-1}
<i>n</i>	index lomu	-
n_f, n_{co}	index lomu jádra vlnovodu	-
n_s	index lomu substrátu	-
n_c, n_{cl}	index lomu obklopujícího prostředí	-
n_p	index lomu hranolu	-
n_{ef}	efektivní index lomu	-
ϑ_c, Θ_c	kritický úhel	°
Θ_p	úhel dopadu paprsku na hranol	°
Φ	fázový posuv při totálním odrazu	rad
p_{12}, p_{13}	parametr orientace vlny	-
λ	vlnová délka	nm
λ_0	vlnová délka ve vakuu	nm
Ω	úhel větvení ramen optické rozbočnice	°
P_1, P_2	optický výkon	μW
l_1, l_2	délka kanálku vlnovodu	cm
α	optický útlum	dB/cm

Obsah

1	Úvod	9
2	Teorie šíření světla v optickém vlnovodu	10
2.1	Světlo jako elektromagnetické vlnění	10
2.2	Princip šíření světla na základě geometrické optiky	12
2.3	Vlnovody se skokovou změnou indexu lomu	14
3	Návrh optických multivodových vlnodů	16
4	Návrh optické mnohavidové rozbočnice	22
4.1	Rozbočnice s taperovaným vlnovodem	22
4.2	Rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem	24
4.3	Návrh litografické masky	28
5	Výroba optických vlnodů	30
5.1	Výroba planárních vlnodů se skokovou změnou indexu lomu	30
5.2	Výroba hřebenových vlnodů se skokovou změnou indexu lomu	32
6	Měřicí metody	34
6.1	Kontrola optické kvality	34
6.2	Měření geometrických rozměrů	35
6.3	Měření transmisních spekter	35
6.4	Jednohranolová vidová spektroskopie	36
6.5	Měření optického útlumu metodou dvou délek	39
7	Dosažené výsledky	41
7.1	Kontrola optické kvality vlnodů	41
7.2	Měření geometrických rozměrů	43
7.3	Transmisní spektra	45
7.4	Index lomu	46
7.5	Optický útlum vlnodů	48
8	Závěr	52
A	Kontrola optické kvality	55
B	Přehled postupů výroby	60
C	Seznam všech vyrobených vzorků	67

Kapitola 1

Úvod

V minulosti probíhal přenos dat výhradně po metalickém vedení nebo pomocí bezdrátového spojení. V důsledku stále vyšších nároků na množství a rychlost přenášených dat bylo metalické vedení v páteřních sítích nahrazeno vedením z optických vláken, ale koncoví uživatelé jsou dnes stále nejčastěji připojeni pomocí metalického nebo bezdrátového připojení. S rozvojem internetu a nabízených služeb využívajících internetové připojení (např. IPTV - Internet Protocol Television, VoIP - Voice over Internet Protocol) rostou i nároky na objem přenášených dat. Stávající metalické přípojky již nejsou schopny plnit požadavek vysokorychlostního datového připojení, a proto jsou postupně i koncoví uživatelé připojováni pomocí optických vláken. Příkladem může být současný systém FTTx (Fiber To The ..., kde x označuje uzlový bod kam až je přiveden optický signál a může to být N – node, uzlový bod vzdálený i několik kilometrů od koncového uživatele, C – cabin, signál je přiveden do rozvodné skříně vzdálené několik set metrů od koncového uživatele, B – building, vlákno je přivedeno k hranici budovy uživatele a konečně H – home, kdy je optický signál přiveden až do obytného prostoru koncového uživatele). Další velkou výhodou použití optických vlnovodů je odolnost vůči elektromagnetickému rušení, odolnost vůči vibracím a nižší provozní náklady.

V poslední době je zaměřen vývoj a výzkum na optické vlnovody které mezi sebou vzájemně propojují desky plošných spojů, jednotlivé funkční bloky, anebo čipy mezi sebou. Jedná se přitom o planární vlnovody na pevných nebo flexibilních podložkách o délce v řádu jednotek až stovek milimetrů. Podle dosahu přenášeného optického záření se začalo nově rozlišovat spojení ESR (Extra short reach) do 5 cm a USR (Ultra Short Reach) do 1cm. Při výrobě těchto optických vlnovodů se s výhodou používají polymerní materiály. Jejich snadné zpracování i cena je předurčuje k masovému využití ve výše zmíněných sítích i technologiích ESR a USR.

V této diplomové práci jsem se zaměřil na návrh, výrobu a následnou diagnostiku planárních optických vlnovodů na pevných podložkách (Si, Si/SiO₂, FR4 o tloušťce 0,5 a 1 mm), ale také na flexibilní podložce TOPAS 8007X4 (tloušťka 135 a 300 μm), Pyralux a FR4 (tloušťka 0,1 mm). Pro vlnovodné vrstvy jsem použil materiály EpoCore a Su8 (Epoxy Novolak Resin) a jako podkladovou vrstvu EpoClad.

Dále jsem se zaměřil na návrh dvou typů optických rozbočnic s taperovanou střední částí vlnovodu a rozbočnici s dvojitým modovým skramblerem. Tyto mé návrhy vedly k podání žádosti o zápis užitného vzoru a vynálezu na Úřad průmyslového vlastnictví (užitný vzor byl zapsán 26.5.2014 pod označením 26976) a patent vynálezu byl zapsán pod číslem 305196 (datum udělení 22.04.2015).

Také jsem prováděl depoziční testy, které vedly k výrobě jak planárních, tak hřebenových optických vlnovodů. U těchto vyrobených struktur jsem na závěr provedl měření, která ukázala dobré optické vlastnosti. Nejmenší hodnota optického útlumu u planárního vlnovodu s polymery EpoClad/EpoCore byla 0,30 dB/cm na vlnové délce 632,8 nm a 0,14 dB/cm na vlnové délce 964 nm. U hřebenových vlnovodů byl změřen optický útlum u vzorku s vlnovodnou vrstvou EpoCore 0,39 dB/cm na vlnové délce 850 nm.

Kapitola 2

Teorie šíření světla v optickém vlnovodu

Pro popis šíření světla ve vlnovodu můžeme vycházet ze dvou přístupů. První z nich, matematicky jednodušší, vychází ze zákonů geometrické optiky a to především ze zákona odrazu paprsku a Snellova zákona lomu na rozhraní dvou prostředí. Tento pohled nám dovolu je ta skutečnost, že vlnová délka záření je ve srovnání s rozměry prostředí zanedbatelná. Druhý přístup je dán z historického pohledu na světlo, jako formu elektromagnetického vlnění, jehož princip popsal J.C. Maxwell ve svých známých rovnicích již v předminulém století [1]. Tento přístup je velmi přesný, ale matematicky náročný. V praxi se proto pro zjednodušení používá kombinace obou přístupů.

2.1 Světlo jako elektromagnetické vlnění

Světlo můžeme také chápat jako elektromagnetické vlnění, které je popsáno Maxwellovými rovnicemi stejně jako vlny v jiné oblasti frekvenčního spektra. Zjištění, že se elektromagnetická vlna šíří ve vakuu rychlostí světla, vedla Maxwella k závěru, že světlo je elektromagnetický fenomén a má vlnovou povahu.

Tento "elektromagnetický" přístup je nezastupitelný při hlubším zkoumání takových jevů jako je šíření vln ve vlnovodu, odraz a difrakce, disperze, útlum, vazba vidů aj. Pomocí maxwellovské teorie světla můžeme stanovit například rozložení energie ve vedené vlně, mezní vlnové délky, podmínky jednovidového režimu a mnoho dalších závislostí a parametrů nezbytných pro analýzu šíření signálu [1].

Předpokládáme-li pouze harmonické průběhy vektorů pole lze je popsat fázory. Vzájemné přiřazení časoprostorové funkce např. $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ a odpovídajícího fázoru $\mathbf{E}(x,y,z)$, který je funkcí prostorovou budeme uvažovat ve tvaru:

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

Omezíme se také pouze na dielektrická prostředí, v nichž budeme šíření optických vln analyzovat.

Maxwellovy rovnice při uvedených vymezeních pak mají tvar:

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

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

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

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

K těmto rovnicím je nutno přiřadit tzv. materiálové vztahy

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

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

U komponent optických komunikačních systémů se setkáme takřka výhradně s materiály, jejichž permeabilita se rovná permeabilitě vakua $\mu = \mu_0$.

Šíření vedených vln lze nejlépe analyzovat řešením vlnové rovnice při splnění okrajových podmínek. Budeme nejprve uvažovat homogenní prostředí (ε a μ není funkcí polohy).

Z rovnic (2.2) a (2.3) je

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\nabla \times \mathbf{H} = \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{E} \quad (2.8)$$

Použitím vektorové identity:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2\mathbf{E} \quad (2.9)$$

a za předpokladu homogenního, izotropního prostředí bez náboje ($\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$) je

$$\nabla^2\mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = 0 \quad (2.10)$$

analogicky:

$$\nabla^2\mathbf{H} + k^2\mathbf{H} = 0 \quad (2.11)$$

Rovnice (2.10) je vlnová rovnice pro harmonickou vlnu.

k je konstanta šíření:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (2.12)$$

V ideálním (bezeztrátovém) dielektriku je konstanta šíření reálná:

$$k = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0\varepsilon_r} = \frac{\omega}{c_0}\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_r} = k_0\sqrt{\varepsilon_r} = k_0n \quad (2.13)$$

V obecném prostředí je konstanta šíření komplexní:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_k} = \beta - j\alpha \quad (2.14)$$

β je fázová konstanta, α je měrný útlum.

Stejným způsobem lze odvodit rovnici pro další vektory pole.

Vlnová rovnice může být rozepsána do tří skalárních rovnic. Kupříkladu v kartézské soustavě je pro složku E_x :

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (2.15)$$

analogicky pro E_y a E_z .

Nejjednodušším řešením vlnové rovnice a zároveň stavebním kamenem ve složitějších je rovinná uniformní vlna. Je to vlna pro níž platí, že vektory \mathbf{E} a \mathbf{H} leží v rovině kolmé na směr šíření a jsou v ní co do velikosti i směru konstantní. Budeme uvažovat bezeztrátové prostředí. Vlnoplocha, která je definovaná jako plocha konstantní fáze vlny je tedy v tomto případě rovina [1].

2.2 Princip šíření světla na základě geometrické optiky

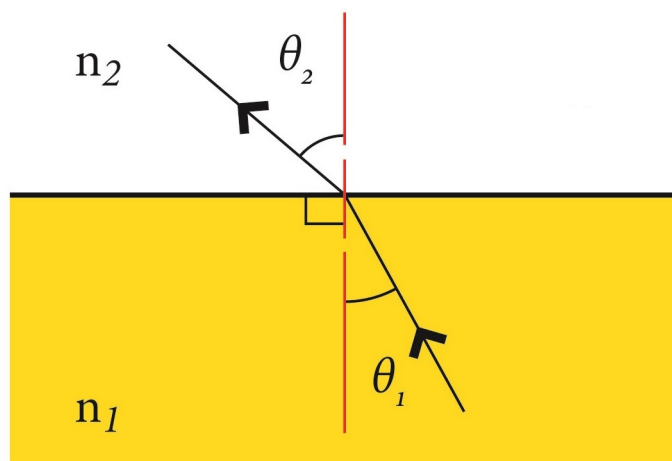
Princip šíření světla na základě geometrické optiky vychází ze dvou základních zákonů, první z nich je zákon odrazu, který říká, že úhel dopadu paprsku na dokonale hladké rozhraní se rovná úhlu odrazu, druhý zákon (Snellův zákon) popisuje chování paprsku, resp. velikost úhlu pod kterým se láme z jednoho optického prostředí do jiného. Tento úhel závisí na optické hustotě obou prostředí. Snellův zákon, jehož princip je znázorněn na obrázku 2.1 lze vyjádřit vztahem:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (2.16)$$

kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu jednotlivých prostředí a θ_1 a θ_2 jsou úhel dopadajícího a prostupujícího paprsku vzhledem ke kolmici k rozhraní. Index lomu vyjadřuje v optice vlastnosti prostředí a je dán vztahem:

$$n = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0}, \quad (2.17)$$

kde ε a ε_0 je permitivita daného prostředí a vakua. Aby se paprsek ve vlnovodu šířil, musí být



Obrázek 2.1: Snellův zákon lomu.

index lomu střední vrstvy n_f vyšší než index lomu substrátu n_s i krycí vrstvy n_c , tedy musí být splněna podmínka, že index lomu vlnovodné vrstvy musí být větší než index lomu okolního prostředí. Dále musí být pro totální odraz paprsku na obou rozhráních splněna podmínka, že úhel dopadajícího paprsku na rozhraní musí být menší než tzv. úhel kritický ϑ_c , který je pro odraz na rozhraní se substrátem dán vztahem:

$$\vartheta_c = \arccos \frac{n_s}{n_f} \quad (2.18)$$

resp. pro odraz na rozhraní s vrchní krycí vrstvou:

$$\vartheta_c = \arccos \frac{n_c}{n_f} \quad (2.19)$$

Avšak ani při splnění všech výše uvedených podmínek ještě není zaručeno, že bude paprsek strukturou veden. Při odrazech na rozhraní se fáze mění skokem o hodnotu ϕ^{TE} nebo ϕ^{TM} podle polarizace vlny. Aby mohl vzniknout vedený vid, musí mít vlnoplocha, která dosáhne určitého bodu na rozhraní po přímé dráze stejnou fází, nebo fází lišící se o hodnotu 2π , jako vlnoplocha vlny, která se do téhož bodu dostane po složitější cestě několikanásobnými odrazy. Kdyby tomu tak nebylo vlny by interferovaly a zanikly. Celková změna fáze při postupu napříč vlnovodnou strukturou a zpět do výchozího bodu při respektování posuvu fáze na rozhraní se rovná celočíselnému násobku 2π . Tomuto závěru říkáme princip příčné rezonance a lze tuto závislost vyjádřit vztahem:

$$k_f \frac{h}{\sin(\vartheta)} + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = k_f \cos(\vartheta) \left[\frac{h}{\tan(\vartheta)} - h \cdot \tan(\vartheta) \right] + 2m\pi \quad (2.20)$$

kde k_f je vlnový vektor postupujícího paprsku, úhel ϑ svírá paprsek a rozhraní substrátu, h je výška vlnovodné vrstvy, m je celé číslo. Φ_{fs} a Φ_{fc} lze vyjádřit vztahy pro kolmou polarizaci TE:

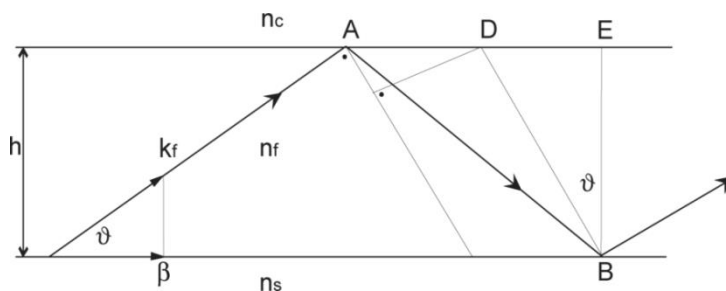
$$\Phi_{fs} = -2 \arctan \frac{\sqrt{n_{ef}^2 - n_s^2}}{\sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2}} \quad (2.21)$$

$$\Phi_{fc} = -2 \arctan \frac{\sqrt{n_{ef}^2 - n_c^2}}{\sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2}} \quad (2.22)$$

kde efektivní index lomu n_{ef} vyjádříme jako

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.23)$$

kde β je podélná složka vlnového vektoru a k_0 je konstanta šíření ve volném prostoru. Efektivní index lomu vyjadřuje, jaký by musel být index lomu volného prostředí, aby se jim šířila vlna stejnou (fázovou) rychlostí jako ve vlnovodu. Princip příčné rezonance je znázorněn na obrázku 2.2.



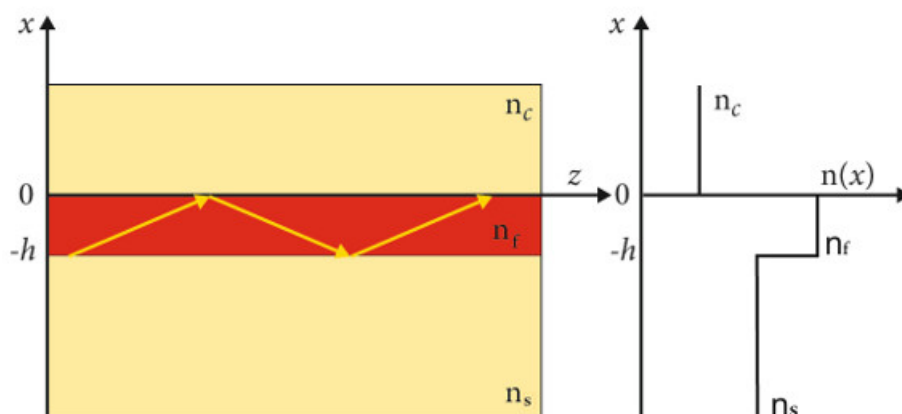
Obrázek 2.2: Princip šíření paprsku v optickém vlnovodu.

2.3 Vlnovody se skokovou změnou indexu lomu

Vlnovody se skokovou změnou indexu lomu mají v příčném řezu jednoznačně definovanou hranici mezi vlnovodnou vrstvou a vrchní či podkladovou vrstvou. Přechod mezi těmito vrstvami je skokový. Paprsky na rozhraní se chovají podle výše zmíněného prvního zákona o dopadu a odrazu paprsku, tedy se odráží zpět do jádra. Jak u vlnovodů difúzních tak i vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu se energie nešíří pouze jádrem vlnovodu, ale také částečně pláštěm ve formě evanescentní vlny. Tato forma šíření energie má pro přenos však mnohem menší podíl než uvnitř vlnovodné vrstvy a její velikost klesá exponenciálně ve směru kolmém na podélnou osu vlnovodu.

Pokud budeme uvažovat, že jeden z příčných rozměrů vlnovodu je nekonečný mluvíme o tzv. 2D modelu vlnovodu, který je pochopitelně v praxi nerealizovatelný nám však v nejjednodušších případech popisu chování paprsku ve vlnovodné struktuře dostačuje. U tohoto 2D modelu se energie šíří jak v podélném, tak i v příčném směru, neboli záření se rozptyluje v celé rovině desky bez omezení.

Daleko častěji uvažujeme 3D model vlnovodu, kdy jsou oba příčné rozměry omezeny a konkrétně definovány. Jedná se zpravidla o vlnovody páskové nebo kanálkové. V této práci se budu zabývat především těmito typy vlnovodů. Na obrázku 2.3 je znázorněn mechanismus šíření paprsku ve vlnovodné struktuře se skokovou změnou indexu lomu.



Obrázek 2.3: Mechanismus šíření záření ve vlnovodu se skokovou změnou indexu lomu a průběh indexu lomu.

Kromě vlnodů se skokovou změnou indexu lomu existují ještě vlnovody gradientní, které se vyznačují pozvolným (gradientním) přechodem mezi jádrem a obklopující vrstvou. Hranice mezi těmito vrstvami není tedy ostře definována jako tomu je u vlnodů se skokovou změnou indexu lomu. Mechanismus šíření záření je popisován také odlišným způsobem. Nedochozí zde k typickým totálním odrazům na přechodu jádra a pláště, ale paprsky šířící se jádrem se na difúzním přechodu mezi vlnodnou vrstvou a okolím ohýbají zpět do jádra vlnodu. Vzhledem k tomu, že jsem se v této práci zabýval výhradně vlnovody se skokovou změnou indexu lomu, tak zde další podrobnosti o gradientních vlnovodech neuvádím. Případné další informace lze nalézt například v literatuře [1], [2].

Kapitola 3

Návrh optických multivídrových vlnovodů

Hlavním kritériem při návrhu optických vlnovodů jsou geometrické rozměry jádra vlnovodu. Volba rozměrů spolu s volbou indexu lomu použitých materiálů určují počet vidů, které se budou vlnovodem šířit. K dosažení jednovídrovosti je přitom potřeba navrhnout menší struktury v řádech jednotek několika mikrometrů. Počet vedených vidů lze určit z řešení disperzní rovnice dosazením mezní podmínky vedení vlny. Disperzní rovnici lze matematicky interpretovat následovně [1]:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \arctg[p_{12} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}}] - \arctg[p_{13} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}}] = m\pi \quad (3.1)$$

Pro počet vedených vidů m , (což musí být celé číslo) platí rovnice:

$$m = \text{Int}[\frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctan(p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}})], \quad (3.2)$$

kde λ_0 je vlnová délka v vakuu, h je výška jádra vlnovodu a n_s , n_f a n_c jsou indexy lomu substrátu, vlnovodné a krycí vrstvy vlnovodu a n_{ef} je efektivní index lomu definovaný v předchozí kapitole. Parametry p_{12} a p_{13} závisí na orientaci vln vzhledem ke směru šíření a pro TE polarizaci jsou rovny jedné. Lze je definovat vztahy:

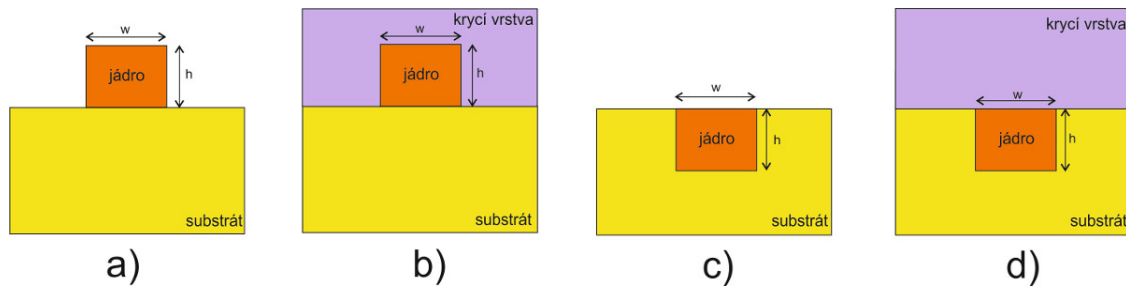
$$p_{12} = (\frac{n_f}{n_s})^2 \quad (3.3)$$

$$p_{13} = (\frac{n_f}{n_c})^2 \quad (3.4)$$

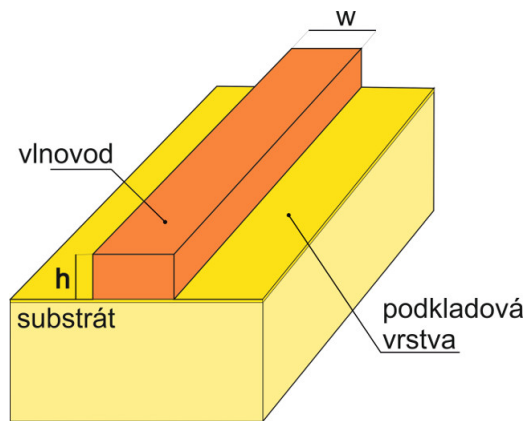
Návrh hřebenového optického vlnovodu se skokovou změnou indexu lomu

Vlnovody se skokovou změnou indexu lomu se dělí na několik druhů podle tvarového uspořádání jádra a okolní obklopující vrstvy. Rozlišujeme vlnovody hřebenové, se zapuštěným kanálkem a jejich kombinace s vrchní krycí vrstvou nebo bez krycí vrstvy (viz obrázek 3.1). Na obrázku 3.2 je pak znázorněn trojrozměrný vlnovod se skokovou změnou indexu lomu bez vrchní krycí vrstvy. Jako substrát zde může sloužit například křemíková nebo skleněná destička, ale také ho může tvořit některá z flexibilních podložek uvedené dále v této práci. Podkladovou

vrstvu může tvořit oxid křemičitý SiO_2 nebo některý z polymerních materiálů. Jádru vlnovodu je také tvořeno některým z polymerů uvedených dále. Výška jádra vlnovodu h se zpravidla volí stejná jako jeho šířka w .



Obrázek 3.1: Vlnovody se skokovou změnou indexu lomu: a) hřebenový, b) hřebenový s vrchní krycí vrstvou, c) se zapuštěným kanálkem, d) se zapuštěným kanálkem s vrchní krycí vrstvou.



Obrázek 3.2: Vlnovod se skokovou změnou indexu lomu bez vrchní krycí vrstvy.

Při návrhu vycházíme z předpokladu počtu vedených vidů a velikosti numerické apertury, tedy rozdílu indexu lomu substrátu a vlnovodné vrstvy. Velikost numerické apertury stanovuje jaké maximální poloměry křivosti vlnovodu můžeme případně realizovat, při zachování co nejmenších ztrát energie. Podmínka počtu vedených vidů vlnovodem nám předurčuje geometrické rozměry vlnovodu dle rovnice [1]:

$$h = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ m\pi + \arctan \left[p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (3.5)$$

Tato rovnice, která nám předurčuje výšku jádra vlnovodů pro požadovaný počet vedených vidů je modifikací předchozí disperzní rovnice 3.1, tedy v ní vystupují stejné parametry uvedené výše. Nutno poznamenat, že tato rovnice platí pouze pro vlnovody se skokovou změnou indexu lomu.

V této práci jsem prováděl návrhy vlnovodů s výškou i šířkou jader 50 nebo 62,5 μm z důvodu kompatibility se standardními komerčně dostupnými optickými vlákny s rozměry 50/125 a 62,5/125 μm . Návrh a volbu materiálu pro jádra vlnovodů jsem prováděl pro skokovou změnu indexu lomu a pro vlnové délky 850 a 1310 nm . Z tohoto důvodu byly také zvoleny materiály

pro výrobu planárních vlnodů - EpoClad a EpoCore, které vykazují nejlepší optické vlastnosti na vlnové délce 850 nm a dále materiál Su8, který je určen pro vlnovou délku 1310 nm.

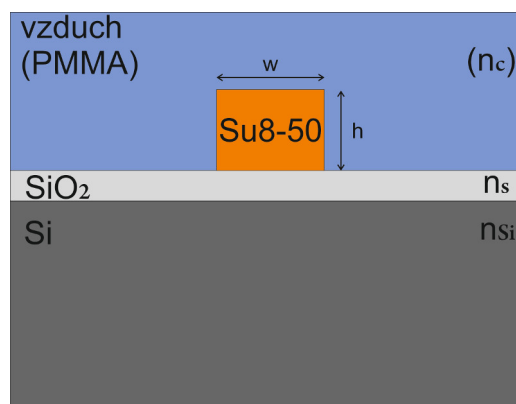
Cílem je navrhnout a následně vyrobit vlnodvy, případně jiné vlnodvodné struktury, s použitím výše zmíněných materiálů nejen na pevných podložkách jako například křemík nebo FR4 (tloušťka 0,5; 1 mm), tak i flexibilních foliích jako je FR4 (tloušťka 0,1 mm), Pyralux (tloušťka 0,1 mm nebo Topas 8007X4 (tloušťka 0,135; 0,3 mm).

Návrh vlnodvodu Si/SiO₂/Su8-50

Základem pro výrobu je substrát z křemíkové desky. Zpravidla se jedná o desky z průmyslově vyrobeného nařezaného monokrystalu křemíku o tloušťce 0,5 mm. Na povrchu těchto desek je vytvořena za vysoké teploty a přítomnosti kyslíku vrstva oxidu křemičitého - SiO₂ tlustá několik mikrometrů. Tato povrchová úprava se provádí především z důvodu snížení indexu lomu podkladové vrstvy. Index lomu SiO₂ je obecně nižší než index lomu vlastního křemíku (například pro vlnovou délku 850 nm je index lomu Si 3,44 a index lomu SiO₂ 1,45)[3]. Na tento substrát je dále nanášena vlnodvodná vrstva.

Vlnodvodnou vrstvu tvoří materiál ENR, který je produktem společnosti Microresist Technology GmbH a je nabízen pod obchodním označením Su8. Jedná se o polymerní transparentní materiál, jež je vytvrditelný pod UV světlem. Tento negativní fotoresist je nanášen na podkladovou vrstvu oxidu křemíku a vytvrzen. Tvoří tedy jádro vlnodvodu.

Vrchní krycí vrstvu může tvořit některý z transparentních polymerních materiálů, jako například PMMA (Polymethylmethakrylát), nebo je bez vrchní krycí vrstvy a obklopující prostředí tvoří vzduch. Příčný řez tímto optickým vlnodvodem je zobrazen na obrázku 3.3.

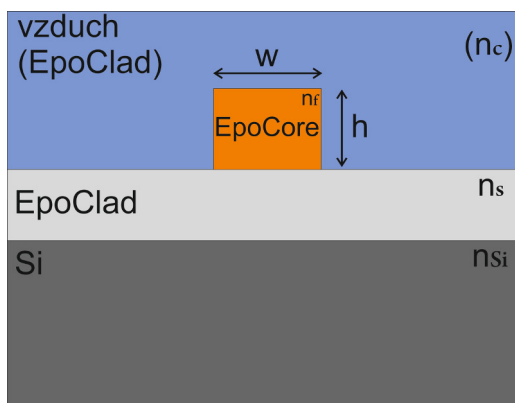


Obrázek 3.3: Příčný řez vlnodvodu Si/SiO₂/Su8-50.

Návrh vlnodvodu Si/EpoClad/EpoCore

Nosný substrát tohoto vlnodvodu tvoří opět křemíková deska. V tomto případě není nutné vytvářet na desce vrstvu SiO₂, neboť podkladovou vrstvu tvoří materiál EpoClad, na který je nanášena vrstva materiálu EpoCore, jež tvoří vlnodvodnou vrstvu vlnodvodu. Tyto materiály jsou komerčně dostupné produkty německé společnosti Microresist Technology GmbH. Jedná se o transparentní negativní fotoresisty s dobrými optickými i mechanickými vlastnostmi určené pro vlnovou délku 850 nm. Vykazují odolnost vůči vysokým tlakům a teplotám. Výrobce uvádí vložný útlum 0,2 dB/cm na vlnové délce 850 nm (index lomu EpoClad - 1,57, EpoCore - 1,58

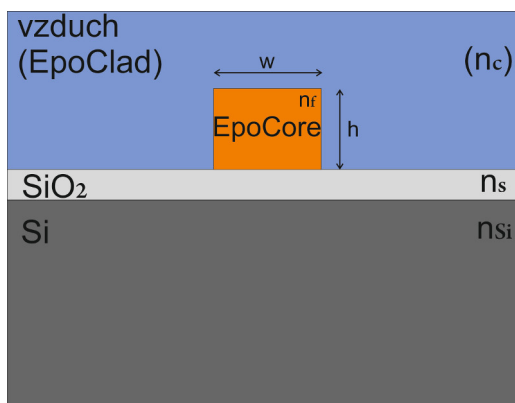
pro vlnovou délku 830 nm)[4]. Vrchní krycí vrstva vlnovodu může být opět tvořena materiálem EpoClad nebo ji může tvořit okolní vzduch. Struktura tohoto vlnovodu v příčném řezu je uvedena na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Návrh vlnovodu Si/EpoClad/EpoCore.

Návrh vlnovodu Si/SiO₂/EpoCore

Návrh tohoto vlnovodu se odvíjel ze zjištění tabulkových hodnot indexu lomu pro SiO₂ [3] a hodnot udávaných výrobcem materiálu EpoCore [4]. Kombinace obou materiálů splňovala podmínky pro šíření záření jádrem vlnovodu tvořeným materiálem EpoCore naneseným na substrátový křemík s povrchovou vrstvou SiO₂. Vrchní krycí vrstva této vlnovodné struktury může být opět tvořena materiálem EpoClad, nebo může být ponechána bez krycí vrstvy. Struktura tohoto typu vlnovodu je znázorněna na obrázku 3.5.



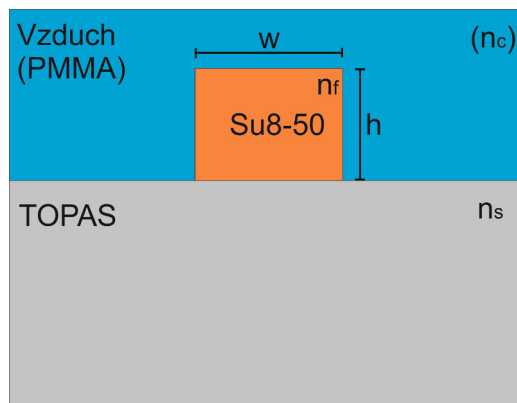
Obrázek 3.5: Návrh vlnovodu Si/SiO₂/EpoCore.

Návrh vlnovodu TOPAS/Su8-50

Základní nosný substrát tohoto vlnovodu tvoří flexibilní polymerová folie TOPAS 8007X4 od společnosti TOPAS Advanced Polymers GmbH. (Měl jsem k dispozici folie o dvou tloušťkách a to 135 a $300 \mu\text{m}$). Výrobce tento materiál používá k výrobě levných optických prvků do mobilních aplikací, ale také k výrobě nádob a obalů v potravinářském průmyslu a lékařství.

Tato folie se vyznačuje vysokou optickou čistotou, mechanickou i tepelnou odolností a proto je vhodná pro výrobu flexibilních vlnovodných struktur.

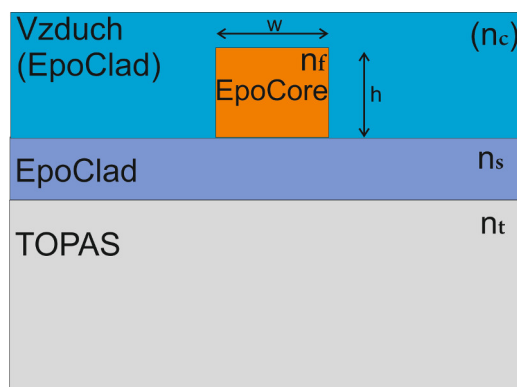
Na povrch této folie je nanášena vlnovodná vrstva materiálu Su8-50, která tvoří jádro vlnovodu. Vrchní krycí vrstva může být tvořena buď materiálem PMMA nebo může být bez krycí obklopena vzduchem. Struktura tohoto vlnovodu je uvedena na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Návrh vlnovodu TOPAS/Su8-50.

Návrh vlnovodu TOPAS/EpoClad/EpoCore

Dalším typ vlnovodné struktury navržené na folii TOPAS 8007X4 tvoří materiály EpoClad a EpoCore. Folie TOPAS 8007X4 v tomto případě plní funkci nosného substrátu, na kterém je nanášena podkladová vrstva EpoCladu a na ní je nanášena vrstva EpoCore tvořící jádro vlnovodu. Návrh tohoto typu vlnovodu je uveden na obrázku 3.7.

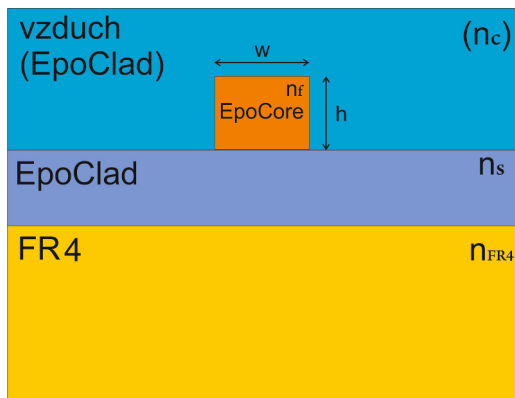


Obrázek 3.7: Návrh vlnovodu TOPAS/EpoClad/EpoCore.

Návrh vlnovodu FR4/EpoClad/EpoCore

Laminátový materiál FR4 (glass-reinforced epoxy laminate sheets) se běžně používá při výrobě desek plošných spojů elektronických obvodů. Pokud obvodové řešení využívá optoelektronické prvky nebo moduly, je výhodné je mezi sebou propojovat optickými planárními vlnovody z důvodu rychlejšího přenosu dat. Proto následující typ vlnovodu tvoří substrát z desky FR4, na

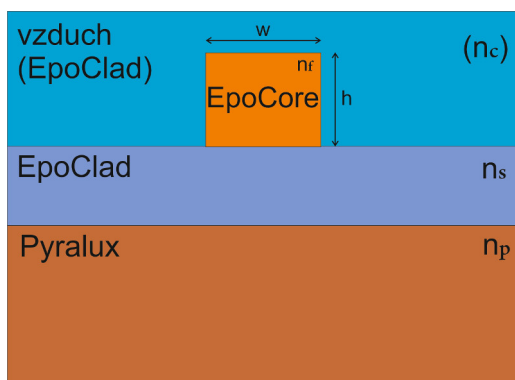
kterém je nanese na podkladová vrstva vlnovodu EpoClad a na ní je opět nanese na vrstva materiálu EpoCore, která tvoří jádro vlnovodu. FR4 může mít různé tloušťky (0,5; 1 mm) a může být i ve formě flexibilní folie o tloušťce 0,1 mm. Použil jsem desky FR4 dodané firmou Printed s.r.o.. Struktura optického hřebenového vlnovodu na substrátu FR4 je uvedena na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Návrh vlnovodu FR4/EpoClad/EpoCore.

Návrh vlnovodu Pyralux/EpoClad/EpoCore

Dalším často používaným materiálem v elektrotechnice je flexibilní folie Pyralux. Používá se pro galvanické propojení elektronických obvodů mezi sebou, nebo na něm může být vytvořen samotný obvod technologií SMT. Výrobce této flexibilní folie je americká společnost DuPont. Ze stejných důvodů jako u předchozího materiálu FR4 je výhodné využít Pyralux jako nosnou podložku pro výrobu planárních vlnovodů. Návrh této vlnovodné struktury počítá s použitím křemíkové destičky, na které je folie při výrobě nalepena. Bez ní by nebylo možné nanášet vrstvy technikou rotačního lití. Na folii Pyralux je nanese na podkladová vrstva polymeru EpoClad, na které je nanese na vrstva polymeru EpoCore tvořící jádro vlnovodu.



Obrázek 3.9: Návrh vlnovodu Pyralux/EpoClad/EpoCore.

Kapitola 4

Návrh optické mnohavidové rozbočnice

Návrh optické mnohavidové rozbočnice jsem provedl v programu BeamProp™ od společnosti RSoft Design™. Program BeamProp™ využívá pro výpočet šíření energie v navržené struktuře metodu BPM (Beam Propagation Method). Jedná se o výpočetní metodu pro šíření světelného svazku uvnitř pasivních optických struktur, využívající metodu konečných diferencí pro řešení Helmholtzovy vlnové rovnice v parabolickém nebo paraxiálním přiblížení [5].

Standard pro multivídné vlnovody jsou vlákna 62,5/125 μm a 50/125 μm . Tato vlákna mohou být využívána od Ethernetu (10 Mbit/s) do Gigabit Ethernetu (1 Gbit/s) a díky jejich relativně velkému jádru jsou ideální k využití LED diodových vysílačů. Nověji se často používají vícevídná optická vlákna 50/125 μm optimalizovaná pro laser [6]. Z důvodu kompatibility jsem proto veškeré návrhy prováděl se šířkou a výškou vlnovodu 50 a 62,5 μm .

V této práci jsem se zabýval návrhem rozbočnic 1x2Y s jedním vstupním a dvěma výstupními symetrickými kanálky. V prvním kroku návrhu jsem sestavil vlastní tvar rozbočnice, jež se skládá obvykle ze tří nebo čtyř komponent. Jedná se o vstupní a výstupní vlnovody, rozšiřující střední taperovanou část a rozvětvení obou větví, které mohou mít kosinový nebo lineární tvar. Dále jsem provedl simulaci šíření energie strukturou a následně optimalizaci geometrických rozměrů, jejímž smyslem je modifikace tvaru a rozměru struktury takovým způsobem, kdy dosáhneme maximálního možného přenosu energie strukturou, při zachování uniformity obou výstupních větví.

4.1 Rozbočnice s taperovaným vlnovodem

Nejdříve jsem provedl základní návrh optických rozbočnic dle práce D. R. Beltramiho, zabývající se návrhem rozbočnic se skokovou změnou indexu lomu pro multivídné vlnovody [7]. Struktura rozbočnice je uvedena na obrázku 4.1. Autor zde odvodil obecné vztahy pro požadovanou minimální délku d střední části rozbočnice (tzv. taperu) a maximální velikost úhlu Ω , který svírají výstupní ramena v závislosti na hodnotách indexu lomu jádra a substrátu.

$$\Omega \leq \frac{\Theta_c D}{D + 1} \quad (4.1)$$

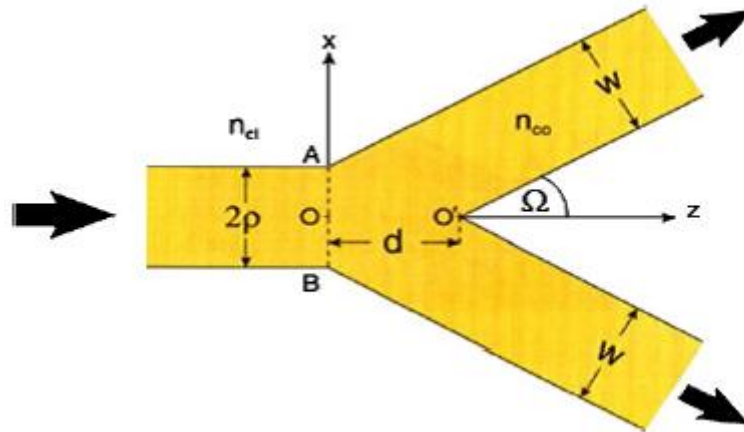
kde Θ_c je kritický úhel, který je dán rovnicí:

$$\Theta_c = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)}}{n_{co}^2} \right\} \quad (4.2)$$

kde n_{co} je index lomu vlnovodu a n_{cl} je index lomu okolního prostředí. D je normalizovaná hodnota rozměru d a je daná rovnicí:

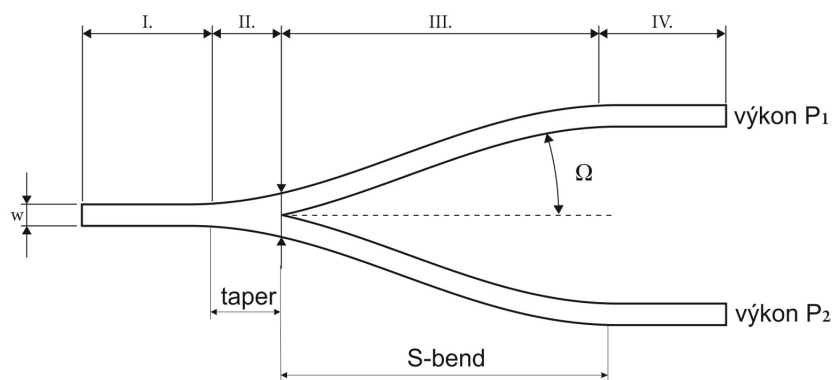
$$D = \frac{d \cdot \sin(\Omega)}{\rho(2 - \cos(\Omega))} \quad (4.3)$$

Nákres rozbočnice s vyznačenými parametry a rozměry je uveden na obrázku 4.1.

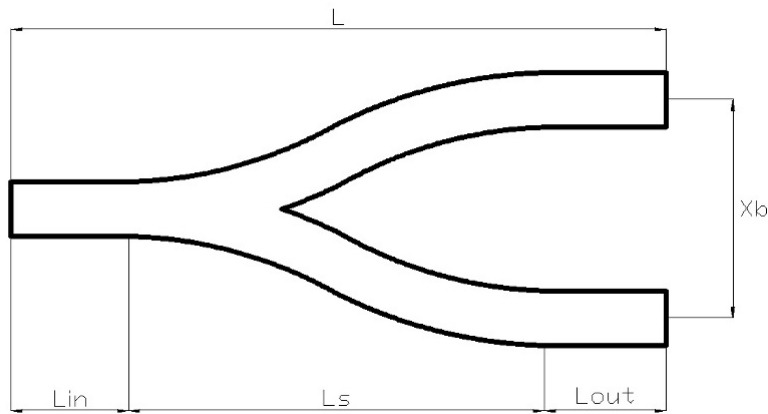


Obrázek 4.1: Rozbočnice s vyznačenými rozměry podle návrhu pana Beltramiho [7].

Na základě výše uvedeného článku jsem provedl vlastní návrh rozbočnice. Tvar rozbočnice se skládá ze základních čtyř částí, na obrázku označených římskými číslicemi. Část I. je vstupní vlnovod, II. je rozšiřující taperová část, která přechází do dvou větví s označením III. Tyto větve mohou mít charakter průběhu funkce kosinus, anebo lineární (ve svých návrzích jsem použil oba typy tvarů). Na obě větve, pak navazují výstupní vlnovody IV. sloužící k navázání energie do vlákna (obr.4.2). Pro vlastní simulace v návrhovém softwaru jsem vycházel z optimalizace tří základních komponent rozbočnice, které jsou uvedeny na obrázku 4.3. Vstupní vlnovod označený *Lin*, rozvětřující část označená jako *Ls* a výstupní vlnovody *Lout*.



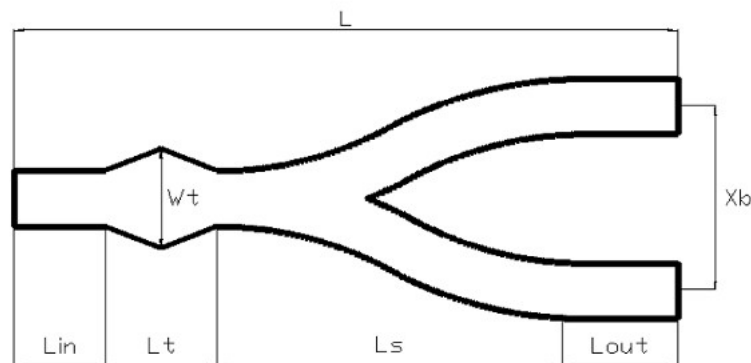
Obrázek 4.2: Návrh tvaru rozbočnice s taperovaným vlnovodem.



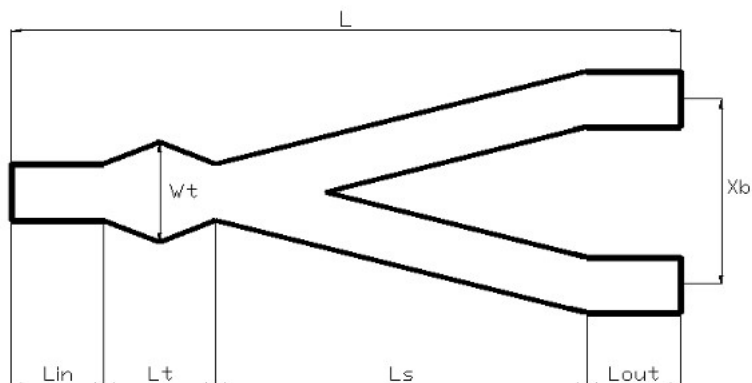
Obrázek 4.3: Tvar rozbočnice s vyznačenými optimalizovanými částmi v návrhovém programu R Soft.

4.2 Rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem

Tvar rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem vychází z publikovaného článku autora Gao Yanga a kolektivu z Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University z roku 2008 [8]. Autoři zde přišli s novým přizpůsobeným tvarem střední části gradientní rozbočnice, jež se skládá ze dvou jednotlivých jehlanovitých taperů zrcadlově na sebe navázaných. Tato střední část vytváří určitý multivodový skrambler, který zlepšuje navázání energie do výstupních vlnodůů a také její uniformitu. Tvar tohoto skrambleru může mít přitom lineární, parabolický nebo exponenciální charakter. Ve své práci jsem se zaměřil na optimalizaci rozměrů lineárního tvaru skrambleru. Dále jsem navrhl dva typy rozvětvení obou ramen rozbočnice. První z nich, který vycházel z kosinového tvaru rozvětvení, je zobrazen na obrázku 4.4 a druhý pak odpovídá lineárnímu rozvětvení ramen rozbočnice (obr. 4.5). Struktury rozbočnice s modovým skramblerem a s lineárním rozvětvením ramen vycházely s menšími rozměry v porovnání s ostatními typy rozbočnic, při srovnatelné uniformitě rozdělení energie.



Obrázek 4.4: Návrh tvaru rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem a kosinovým tvarem rozvětvení.



Obrázek 4.5: Návrh tvaru rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem a lineárním tvarem rozvětvení.

Rozbočnice s polymerem EpoClad/EpoCore

Návrhy pro materiály EpoClad/EpoCore vycházely z tvarů rozbočnic uvedených v této kapitole. Provedl jsem optimalizaci tvarů rozbočnic pro vlnové délky 650, 850, 1310 a 1550 nm a dvě různé šířky vlnovodu 50 a 62,5 μm . V návrhovém systému Beam PROPTM jsem optimalizoval jednotlivé části rozbočnic pro dané indexy lomu za pomoci optimalizačního balíku MOST. Jejich výsledné optimalizované rozměry jsou zahrnuty v tabulce 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4.

Tabulka 4.1: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu 62,5 μm a materiál EpoCore/EpoClad podle obrázku 4.3 - rozbočnice s taperovanou střední částí vlnovodu.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	X_b (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,582	1,587	1,582	500	6900	500	250	7900	47,65	51,89
2	850	1,557	1,579	1,557	500	6400	500	250	7400	49,03	48,88
3	1310	1,565	1,569	1,565	700	7800	700	250	9200	49,51	49,49
4	1550	1,564	1,567	1,564	500	7300	500	250	8300	47,98	47,62

Tabulka 4.2: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu 50 μm a materiál EpoCore/EpoClad podle obrázku 4.3 - rozbočnice s taperovanou střední částí.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	X_b (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,582	1,587	1,582	400	6200	300	250	6900	51,04	48,00
2	850	1,575	1,579	1,575	300	4550	300	250	5150	44,26	45,97
3	1310	1,565	1,569	1,565	500	5500	500	250	6500	48,77	48,32

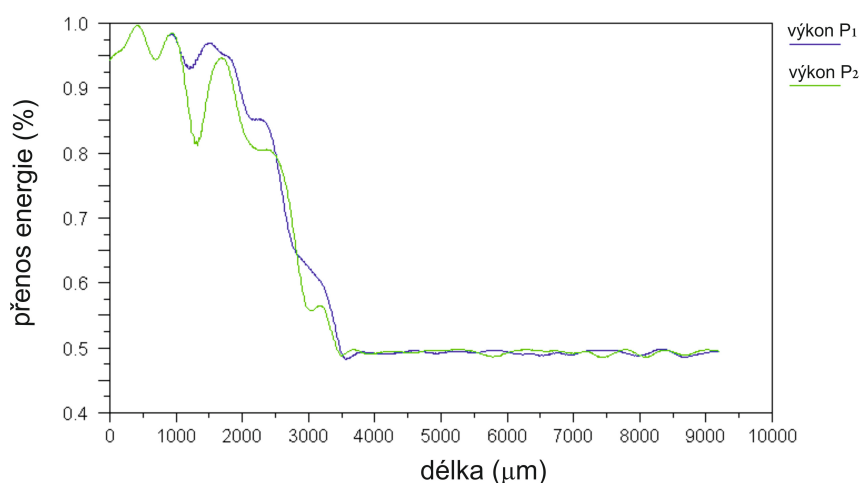
Tabulka 4.3: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu $62,5 \mu m$ a materiál Epo-Core/EpoClad podle obrázku 4.5 - rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_t (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,582	1,587	1,582	700	100	3000	300	4100	48,80	47,57
2	850	1,575	1,579	1,575	300	150	4000	300	4900	46,93	46,36

Tabulka 4.4: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu $50 \mu m$ a materiál Epo-Core/EpoClad podle obrázku 4.5 - rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_t (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,582	1,587	1,582	500	140	2800	300	3740	45,03	44,82
2	850	1,575	1,579	1,575	400	100	5000	500	6000	48,05	48,35
3	1310	1,565	1,569	1,565	700	180	8000	300	9180	47,59	47,59

Nejlepšího optimalizovaného výsledku u rozbočnic s polymerem EpoClad/EpoCore bylo dosaženo u typu rozbočnice s taperovanou střední částí vlnovodu pro vlnovou délku $1310 nm$. Rozdělení energie do obou větví bylo v tomto případě v poměru 49,51:49,49 (viz Tab. 4.1, motiv 3). Výsledek simulace rozdělení energie do obou ramen rozbočnice je uveden na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Výsledek optimalizované rozbočnice s taperovaným rozšířením vlnovodu pro polymer EpoClad/EpoCore a vlnovou délku $1310 nm$ a šířkou vlnovodu $50 \mu m$.

Rozbočnice s polymerem Su8-50

Výsledky simulací pro rozbočnice s vlnodivnou vrstvou Su8-50 jsou shrnuty v tabulce 4.5 a 4.6. Provedl jsem optimalizace rozbočnic s taperovým rozšířením vlnovodu a rozbočnic s dvojitým modovým skramblerem a šířku vlnovodu 50 a 62,5 μm .

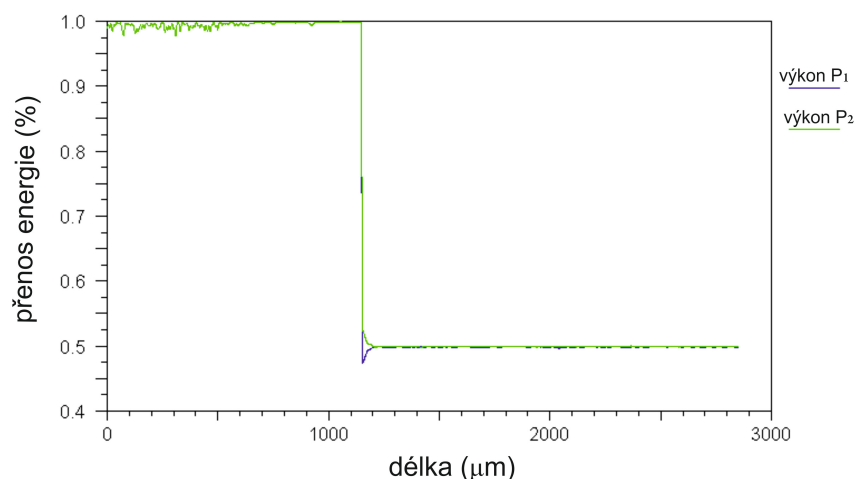
Tabulka 4.5: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu 50 μm a materiál Su8-50 dle obr. 4.3 - rozbočnice s taperovanou střední částí.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_t (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,458	1,570	1,458	500	365	1500	500	2865	50,17	49,73
2	850	1,454	1,562	1,454	500	650	1200	500	2850	49,84	49,98
3	1310	1,446	1,552	1,446	500	650	2250	500	3900	50,05	49,49

Tabulka 4.6: Motivy návrhů rozbočnic se šířkou vlnovodu 50 μm a materiál Su8-50 dle obr.4.4 - rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem.

Motiv č.	λ (nm)	n_s (-)	n_f (-)	n_c (-)	L_{in} (μm)	L_t (μm)	L_s (μm)	L_{out} (μm)	L (μm)	P_1 (%)	P_2 (%)
1	650	1,458	1,570	1,458	500	1100	4400	500	6500	47,60	47,03
2	850	1,454	1,562	1,454	500	1100	4000	500	6100	47,31	48,05
3	1310	1,446	1,552	1,446	500	1820	6800	500	9600	47,97	47,04

Nejlepšího optimalizovaného výsledku u rozbočnic s polymerem Su8-50 bylo dosaženo u typu rozbočnice s taperovanou střední částí vlnovodu pro vlnovou délku 850 nm. Rozdělení energie do obou větví bylo v tomto případě v poměru 49,84:49,98 (viz Tab. 4.5, motiv 2). Výsledek simulace rozdělení energie do obou ramen rozbočnice je uveden na obrázku 4.7.

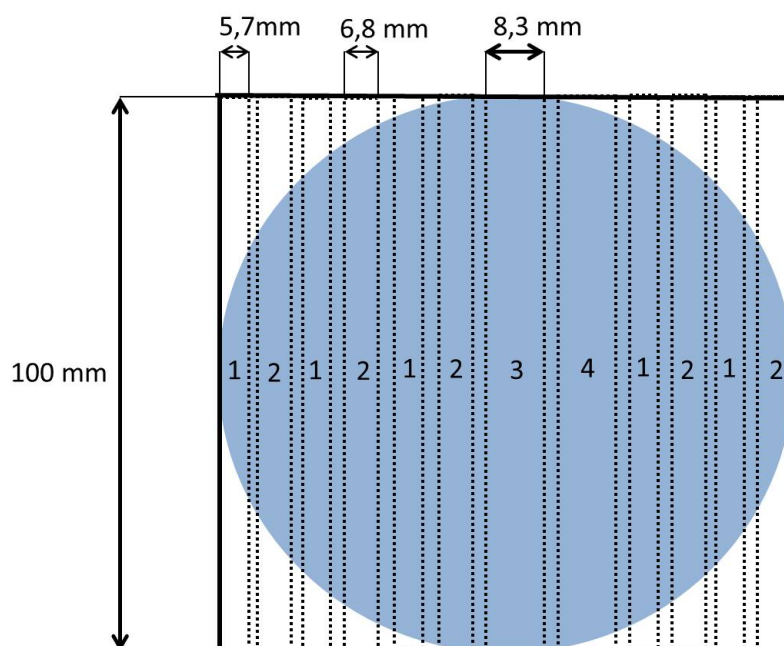


Obrázek 4.7: Výsledek optimalizované rozbočnice s taperovaným rozšířením vlnovodu pro polymer Su8-50 a vlnovou délku 850 nm a šířkou vlnovodu 50 μm .

4.3 Návrh litografické masky

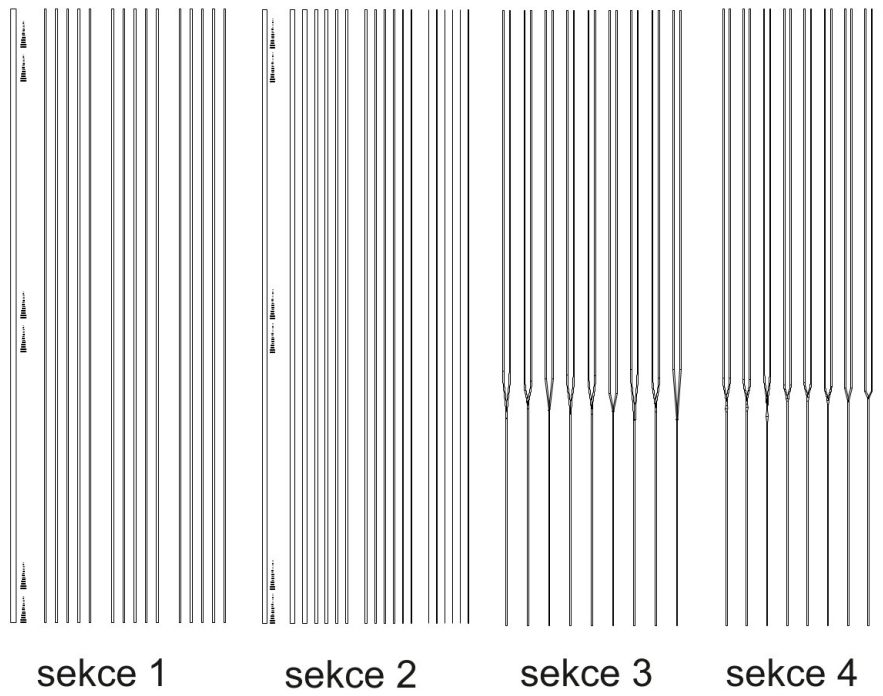
Výroba vlnovodných struktur se provádí pomocí fotolitografického procesu osvětlením foto-rezistivního materiálu UV zářením v litografu přes chromovou masku, která propouští světlo pouze v definovaných plochách. Na této masce mohou být navrženy motivy vlnovodů, rozbočnic, difrakčních mřížek či jiných optických struktur.

Pro výrobu vlnovodů a rozbočnic jsem navrhl masku o rozměrech 10 x 10 cm, jenž vychází z velikosti čtyřpalcových křemíkových desek. Masku jsem rozdělil do základních čtyř typů sekcí, které jsem označil číslicemi 1 až 4. Rozmístění sekcí na masce je znázorněno na obrázku 4.8.

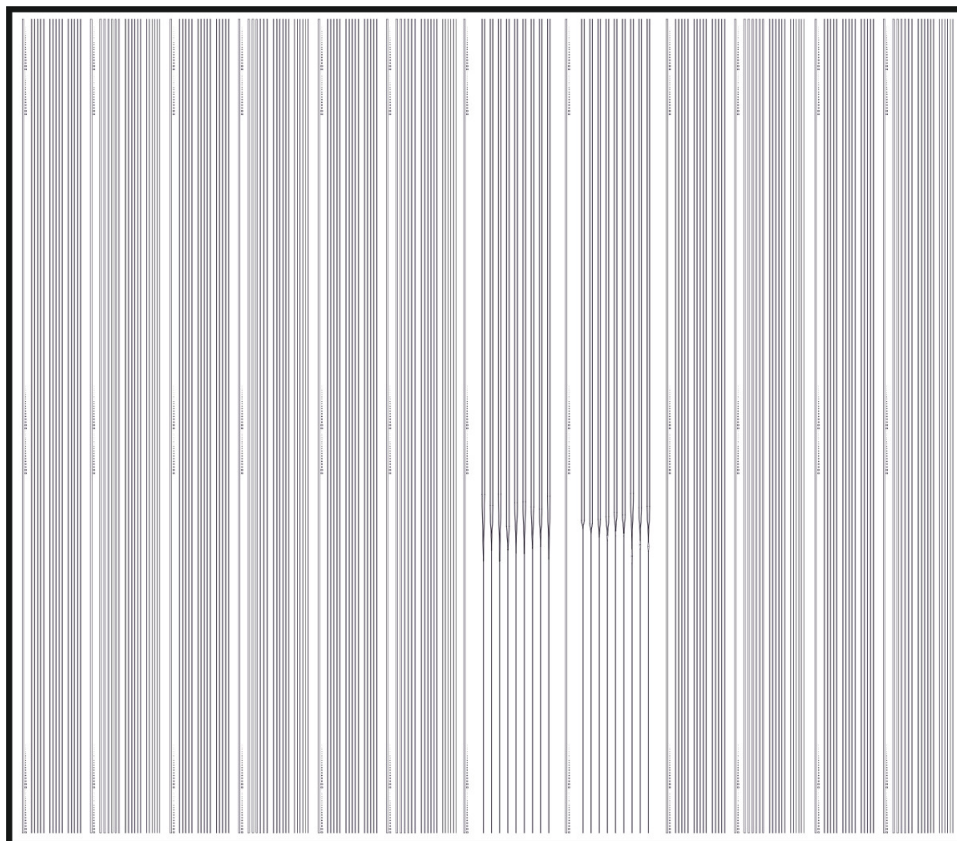


Obrázek 4.8: Rozmístění sekcí na masce.

Sekce označená 1 obsahovala tři skupiny vlnovodů o šířce $50 \mu m$ a v každé skupině bylo 5 vlnovodů vzdálených od sebe $250 \mu m$. V sekci 2 byly vlnovody různých šířek - 150; 100; 80; 62,5; 50; 30; 20; 10 a $5 \mu m$ vždy po dvojicích. V sekci 3 byly optimalizované návrhy rozbočnic pro materiály EpoClad/EpoCore a v sekci 4 byly návrhy rozbočnic pro podkladový substrát Si/SiO₂ a vlnovodný materiál SU8-50. Jednotlivé sekce jsou znázorněny na obrázku 4.9 a celková maska je pak na obrázku 4.10. Masku byla podle tohoto návrhu vyrobena na Masarykově univerzitě v Brně pomocí laserového litografu Heidelberg Instruments DWL66FS.



Obrázek 4.9: Navržené motivy na jednotlivých sekcích.



Obrázek 4.10: Návrh celé masky.

Kapitola 5

Výroba optických vlnovodů

Vlastní výrobě rozbočnic předcházela nejdříve výroba planárních vlnovodů pro účely měření optických vlastností (měření vidové spektroskopie, měření transmisních spekter aj.).

Dále jsem vyrobil žebrové vlnovody o různých šířkách a na různých podkladových substrátech s různými vlnovodnými materiály. Tato výroba byla provedena v rámci depozičních testů, jejichž smyslem bylo ověřit doporučení výrobců materiálů pro jejich zpracování, případně postupy modifikovat pro dosažení požadovaných parametrů. Depoziční testy jsem provedl v Laboratoři nanolitografie na Katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze a v laboratoři čistých prostor Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně.

5.1 Výroba planárních vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu

Veškeré depoziční testy, které jsem prováděl, byly pouze pro vlnovody se skokovou změnou indexu lomu. Vyrobil jsem planární vlnovody na nosných podkladech z různých materiálů. Jednalo se především o Si, SiO₂ FR4 tloušťky 0,5; 1 a 0,1 mm, TOPAS 8007X4 tloušťky 135 a 300 μm a některé jiné druhy flexibilních materiálů jako například Pyralux tloušťky 0,1 mm. Některé nosné materiály tvořily zároveň základní podkladovou vrstvu vlnovodu. Jednalo se především o ty materiály, které splňovaly podmínku nižší hodnoty indexu lomu, oproti nanášené vlnovodné vrstvě - jádru vlnovodu. Jako vlnovodnou vrstvu jsem použil materiály EpoCore a Su8-50 a jako mezivrstvu EpoClad.

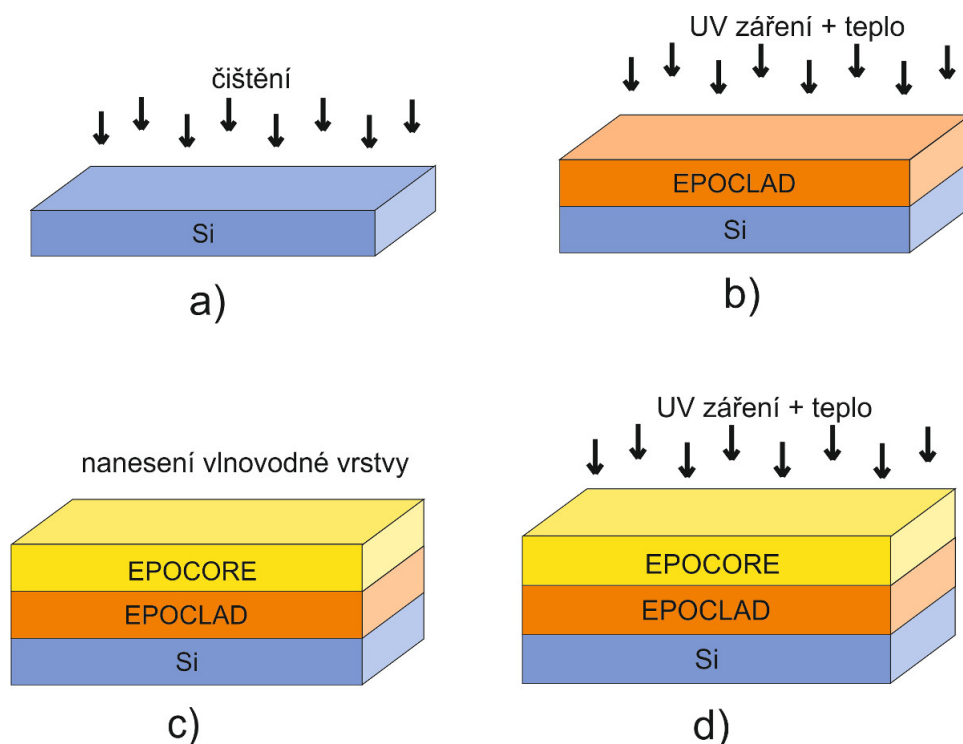
Nejdříve bylo nutné provést čištění nosných podkladů. Čištění bylo provedeno ve dvou fázích. Jako první proběhlo chemické čištění oplachem, postupně acetonem, isopropylalkoholem a poté opět acetonem. Chemické čištění bylo provedeno pouze u materiálů odolných proti naleptání povrchu vlivem působení acetonu, tj. u křemíku a FR4. Zbytky chemikálií byly odstraněny na odstředivé rotačce a po té byly dány substráty ještě na plotnu zahřátou na 200 °C po dobu 5 minut.

Ve druhé fázi jsem provedl čištění v plazmě. Plazma byla nastavena na režim stripování. Po optimalizaci bylo nastavení plazmové leptačky na průtoku kyslíku do komory na 20 ml/min. a výkon generátoru byl nastaven na 200 W. Substráty odolné vysokým teplotám (křemík) byly ponechány v plazmě po dobu 20 minut. Ostatní materiály u kterých hrozilo mechanické poškození vlivem vyšší teploty (TOPAS 8007X4, Pyralux a FR4 tloušťky 0,1 mm) byly ponechány v plazmě 2 až 4 minuty. Tímto čištěním bylo zajištěno, že byly z povrchu odstraněny veškeré mechanické i případné organické nečistoty a zároveň se zvýšila adheze povrchu s nanášenými materiály.

Planární vlnovod EpoClad/EpoCore

Podkladovou vrstvu tohoto vlnovodu EpoClad jsem nanесl na podložku substrátu křemíku, dále pak na sklo, TOPAS, FR4 a folii Pyralux. Vrstva byla nanесena na suchý očištěný podklad metodou rotačního lití rychlostí otáčení 1000 ot./min. po dobu 5 minut. Flexibilní materiály byly nejdříve upevněny na pevnou podložku (křemíková deska) pomocí oboustranné lepicí pásky. Po nanесení byla vrstva EpoCladu vystavena teplotě 50°C na plotně po dobu 10 minut. Po té byla teplota pozvolna zvyšována vždy o 10 °C/min. až na teplotu 90°C, kde byla opět ponechána 10 minut. Dále byla vrstva vytvrzena pod UV zářením po dobu 2 minuty a následně vystavena opět teplotě 50°C po dobu 10 minut až do 90°C na 10 minut s rampováním teploty 10°C/min.

Po vytvrzení podkladové vrstvy EpoCladu byla rotačním litím nanесena vlnovodná vrstva EpoCore při 1500 ot./min. Tato vrstva byla opět vytvrzena stejným způsobem jako podkladová vrstva EpoCladu. Tímto způsobem byl připraven planární vlnovod pro další měření. Celý postup výroby je znázorněn na obrázku 5.1.

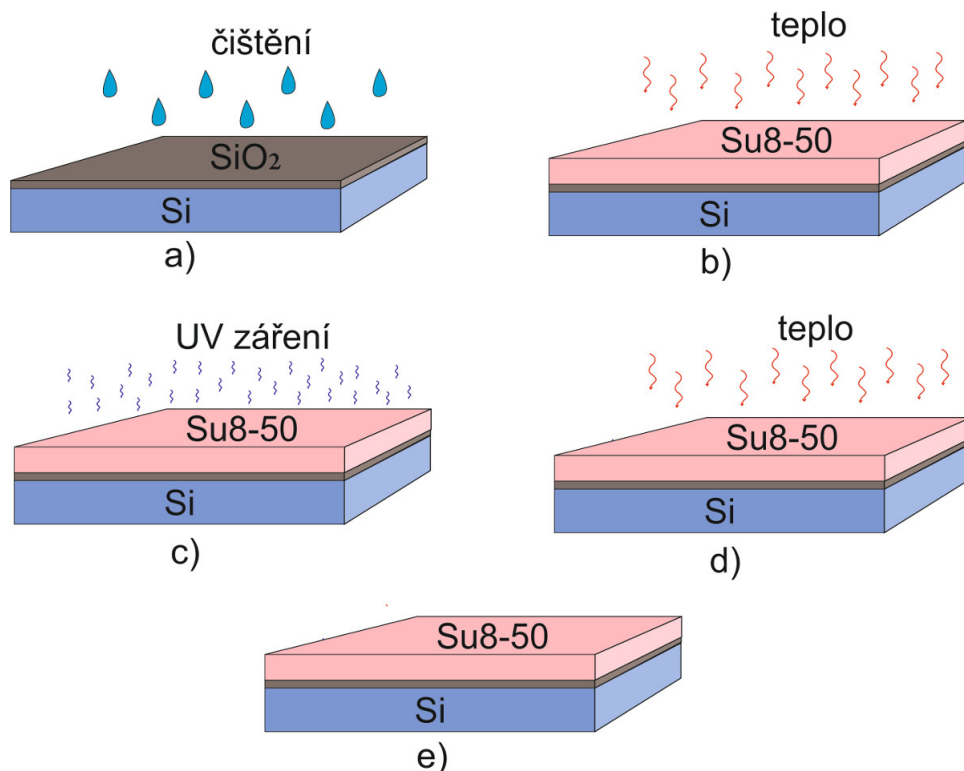


Obrázek 5.1: Postup výroby planárního vlnovodu EpoClad/EpoCore: a) čištění, b) nanесení a vytvrzení podkladové vrstvy, c) nanесení vlnovodné vrstvy d) vytvrzení vlnovodné vrstvy.

Planární vlnovod Si/SiO₂/Su8-50

Nosný substrát tohoto vlnovodu tvoří křemíková deska, na které je vytvořena vrstva SiO₂. K dispozici jsem měl desky s vrstvou SiO₂ vyrobené ve společnostech ABB a ON Semiconductor. Na tuto vrstvu jsem po čištění nanесl vlnovodnou vrstvu materiálu Su8-50. Rotační lití bylo nastaveno na rychlost otáček 1800 ot./min. po dobu 5 minut. Po té jsem dal vrstvu vypéct na

plotnu zahřátou na 65 °C na dobu 5 minut a dále jsem zvýšil teplotu na 95 °C a vrstvu na této teplotě ponechal dalších 20 minut. Následovalo vytvrzení UV zářením po dobu 2 minut a opětovné vložení na plotnu zahřátou na 65 °C na 1 minutu a na 95 °C po dobu 5 minut. Celý postup výroby je uveden na obrázku 5.2 [4].



Obrázek 5.2: Postup výroby planárního vlnovodu Si/SiO₂/Su8-50: a) čištění, b) teplotní vytvrzení, c) vytvrzení UV zářením, d) plotna, e) vytvrzený planární vlnovod.

5.2 Výroba hřebenových vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu

Kromě planárních vlnovodů jsem mimo jiné vyrobil i hřebenové vlnovody. Jako nosný substrát jsem použil 4" křemíkové desky, laminovanou podložku FR4 (tloušťka 0,5 a 1 mm) a folii TOPAS 8007X4 o (tloušťka 135 a 300 μm). Vyrobil jsem dva typy hřebenových vlnovodů. První z nich byl vyroben za použití polymerů EpoClad a EpoCore na nosném substrátu z křemíkové desky, TOPASu 8007X4 a FR4. Druhý z nich byl vyroben za použití polymeru Su8-50 a jako nosný substrát pro tento druh polymeru jsem použil křemíkovou desku s vrstvou SiO₂ na povrchu a dále pak folii TOPAS 8007X4.

Postup výroby hřebenových vlnovodů se prakticky neliší od výroby planárních vlnovodů EpoClad/EpoCore a Si-SiO₂/Su8-50 popsány v předchozím textu a to až do bodu vypékání vlnovodné vrstvy na plotně, tj. u prvního typu vypékání EpoCoru a druhého typu vypékání Su8-50. Po tomto kroku následovalo exponování desek UV zářením přes litografickou masku s motivy kanálků a rozbočnic v litografu (typ Pericin Elmer 300MT Microalign). Expozice

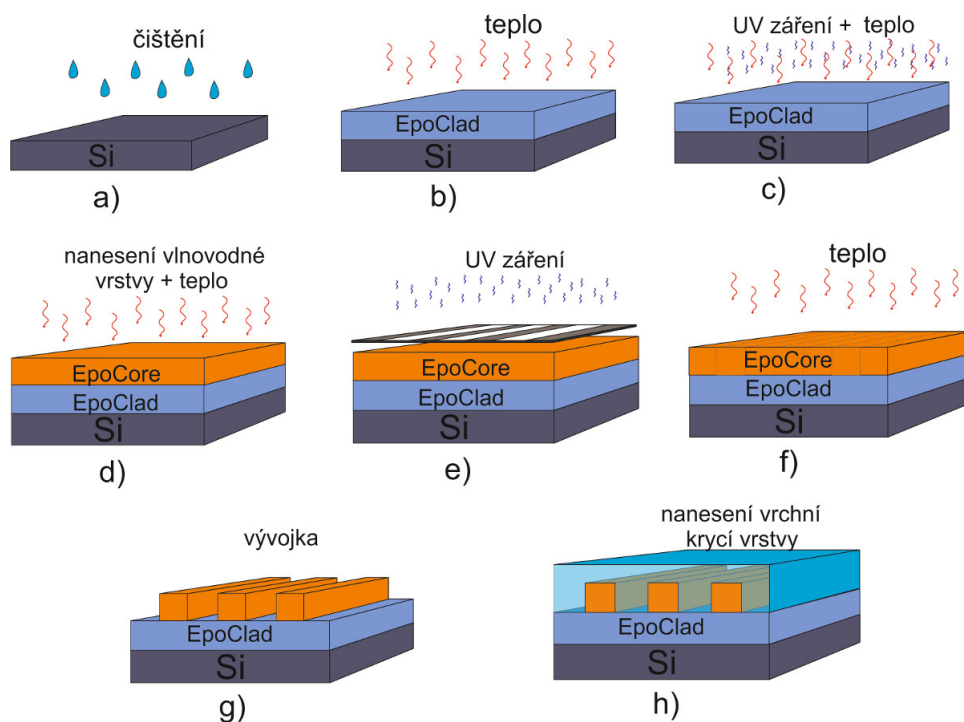
trvala od pěti až do dvanácti minut. Tyto časy se lišily od doporučení výrobců a bylo nutné je experimentálně modifikovat. Důvodem je, že výkon optického litografu závisí na jeho typu, ale také například na stáří a kvalitě zdroje UV záření. Časy expozice u jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze B této práce.

Po expozici byly desky znovu vypékány na plotně. Polymer EpoCore byl vystaven teplotě 50 °C po dobu deseti minut a pak byla teplota pomalu zvyšována až do 90 °C při které byla exponovaná vrstva vypékána dalších deset minut.

Polymer Su8-50 byl po expozici v litografu vystaven teplotě na plotně 65 °C po dobu jedné minuty a následně byla teplota zvýšena na 95 °C na dobu pěti minut.

Následovalo odstranění neosvíceného polymeru ve vývojce Ancillaries. Časy ponechání ve vývojce se pohybovaly od dvou do šesti minut. Výrobce doporučoval 2 minuty vývojky u materiálu EpoClad/EpoCore. Tyto časy byly ale většinou nedostatečné a během této doby se nedařilo odstranit všechny přebytky polymeru. Přesné hodnoty časů vývojky u jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze B této práce.

Působení vývojky bylo zastaveno oplachem v isopropylalkoholu a následně v demineralizované vodě. Desky byly pak vysušeny na centrifuze. Takto byly vzorky připraveny pro měření. Na obrázku 5.3 je zobrazen celý postup výroby hřebenových vlnodů s polymery EpoClad/EpoCore.



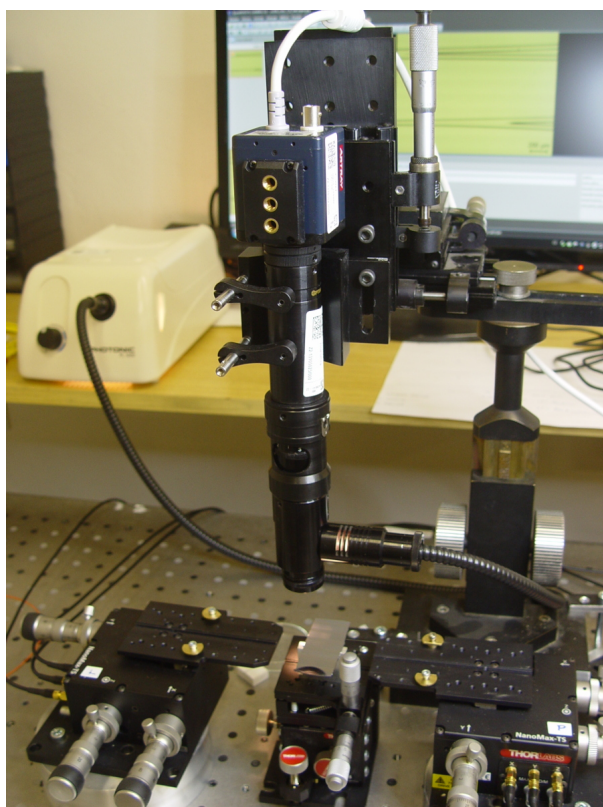
Obrázek 5.3: Výroba hřebenových vlnodů s polymery EpoClad/EpoCore: a) čištění substrátu, b) nanesení a tepelné vytvrzování podkladové vrstvy EpoClad, c) vytvrzení podkladové vrstvy EpoClad UV zářením a následně teplem, d) nanesení vlnodné vrstvy EpoCore a částečné vytvrzení teplem, e) exponování přes masku v litografu, f) vytvrzení teplem, g) odstranění neexponovaného materiálu ve vývojce, h) nanesení vrchní krycí vrstvy EpoClad.

Kapitola 6

Měřicí metody

6.1 Kontrola optické kvality

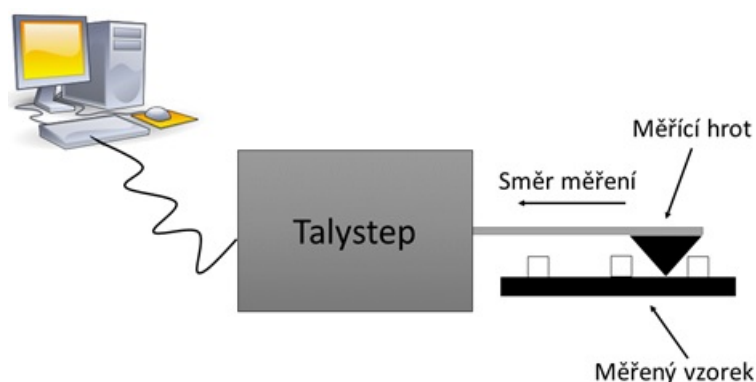
Vizuální kontrola optické kvality slouží k orientačnímu zjištění rozměrů vyrobených struktur a případnému odhalení poruch vzniklých při výrobě. U struktur, jejichž šířka dosahuje pouhých několik desítek mikrometrů, lze provést kontrolu pouze optickým mikroskopem. U žebrových vlnodů je nutné provést kontrolu v podélném směru celé délky vlnodů a také čela vlnodů v příčném řezu, u kterých lze odhalit případnou deformaci čtvercového průřezu způsobenou například podleptáním struktury vývojkou. Na obrázku je pracoviště kontroly vizuální kvality vybavené digitální kamerou Artcami s optikou Olympus C-mount Zoom optics 7x, E61MSE001 v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze.



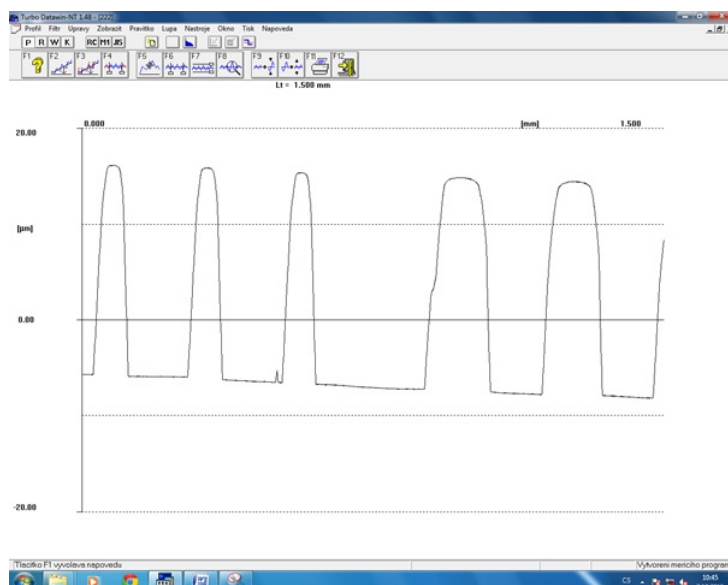
Obrázek 6.1: Pracoviště vizuální kontroly optické kvality s kamerou ARTCAMI.

6.2 Měření geometrických rozměrů

Měření geometrických rozměrů jsem provedl pomocí dvou profilometrů Talystep Hommel Tester 1000 a Taylor Hobson Ltd., FTSI-411. Profilometr slouží k měření přesných rozměrů vyrobených vlnovodů. Princip spočívá v tom, že se po vzorku pohybuje hrot, který přesně kopíruje profil daného vzorku a výsledek zobrazuje na monitoru. Takto se změří výška i šířka výrobních vlnovodů. Princip metody je uveden na obrázku 6.2. Příklad změřeného profilu je pak na obrázku 6.3 [9].



Obrázek 6.2: Princip měření rozměrů vlnovodů profilometrem Talystep Hommel Tester 1000 [9].



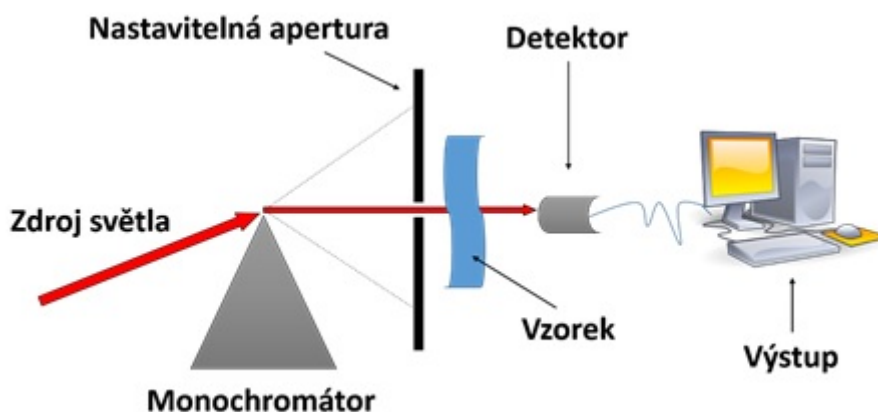
Obrázek 6.3: Typický výstup průběhu měřeného vzorku hřebenového vlnovodu.

6.3 Měření transmisních spekter

Měření transmisních spekter zvolených vlnovodných materiálů slouží k vyhodnocení toho, zda je zvolený materiál vhodný pro návrh optických planárních vlnovodů. Měření transmisních spekter bylo provedeno pomocí přístroje UV-VIS-NIR Shimadzu UV3600. Vzorky pro toto

měření byly vytvořeny metodou rotačního lití, tedy nanesením vlnovodného materiálu na křemenné sklo.

Metoda spočívá v tom, že světlo vycházející ze širokopásmového zdroje prochází přes Czerného - Turnerův monochromátor a průchodem přes vzorek dopadá na detektor. Měření bylo provedeno na vlnových délkách od 300 nm do 1600 nm. Při UV a viditelném záření byl použit jako detektor R - 28 fotonásobič, pro IR záření InGaAs fotodioda. Princip měření je zobrazen na obrázku 6.4. Fotografie přístroje je zobrazena na obrázku 6.5 [9].



Obrázek 6.4: Princip měření transmisních spekter [9].



Obrázek 6.5: Přístroj pro měření transmisních spekter UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600 [9].

6.4 Jednohranolvá vidová spektroskopie

Jednohranolvá vidová spektroskopie byla použita pro měření vlnovodných vlastností, k určení indexu lomu a pro měření optického útlumu planárních vlnovodů.

Měření indexu lomu

Princip metody vidové spektroskopie spočívá v navázání monochromatického světelného svazku do vlnovodu pomocí vazebního hranolu. Zařízení Metricon slouží k měření synchronních úhlů, ze kterých lze určit závislost průběhu indexu lomu na tloušťce vlnovodné vrstvy nebo lze určit index lomu objemových vzorků. Laserový svazek je zaostřen na základnu hranolu do oblasti optického kontaktu. Dopadající svazek se od základny hranolu odráží a vytváří na detektoru světelnou stopu s tmavými čarami. Tento jev je způsoben tím, že část světla, která dopadá na

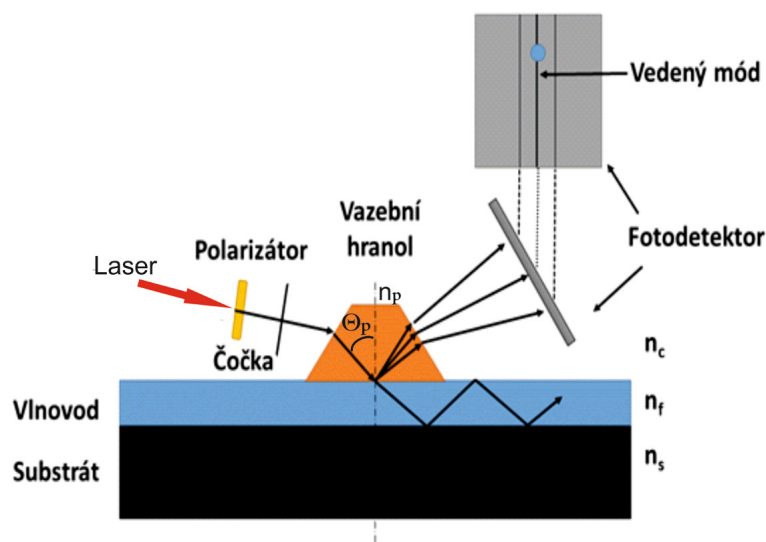
základnu hranolu pod synchronními úhly, se naváže do vlnovodu a na detektoru se nezobrazí, což se projeví tmavou čarou. Vazební oblast musí být co nejmenší, jinak by docházelo k okamžitému vyvazování světla z vlnovodu [10].

K výhodám této metody patří zejména to, že se světlo navazuje do úzkého místa optického kontaktu a na detektoru je tak možné pozorovat všechny vidové čáry najednou. Odpadají tak problémy dvouhranolové spektroskopie s nastavením vhodného místa hranolu do osy rotace. Toho je možné využít pro rychlé určování parametrů mnohavidových planárních vlnovodů. Nevýhodou této metody je, že pro přesné měření je nutno použít optický detektor, neboť minimum výkonu je bez detektoru na osvětleném pozadí špatně rozeznatelné. Měření indexu lomů bylo měřeno na pěti vlnových délkách: 473 nm; 632,8 nm; 964 nm; 1311 nm a 1552 nm. Jako vazební hranol byl použit typ #200-P-2 ($n(\text{rozsah vlnových délek})=1055-2,45 \lambda=633 \text{ nm}$).

Index lomu určíme dle vztahu:

$$\Theta_p = \arcsin\left(\frac{n}{n_p}\right) \quad (6.1)$$

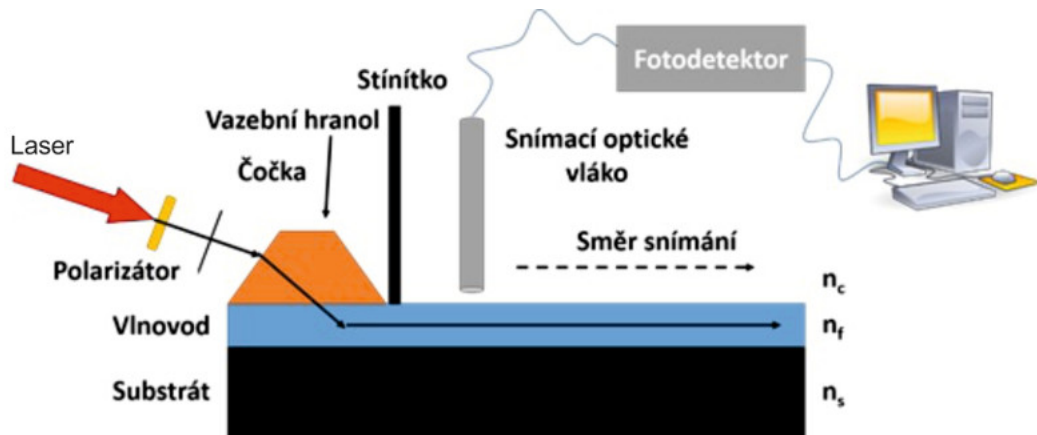
kde n_p je známý index lomu hranolu, Θ_p je odečtený dopadající úhel od osy hranolu a n je hledaný index lomu. Princip měření je uveden na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Princip měření indexu lomu pomocí jednohranolové vidové spektroskopie [9].

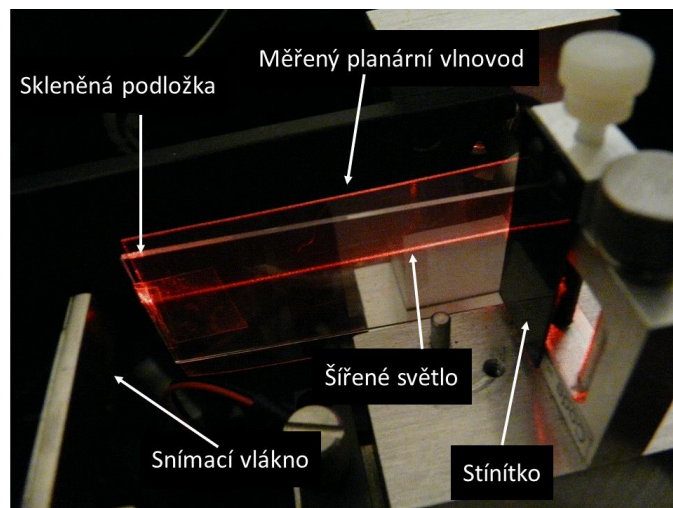
Měření optického útlumu planárních vlnovodů

Do měření zařízením Metricom spadá také měření optického útlumu planárních vlnovodů. Tato metoda slouží k měření optického útlumu planárních vlnovodů pomocí skenování povrchu vlnovodu optickým vláknem a fotodetektozem. Měří se intenzita světla rozptýlená z povrchu vlnovodu. Předpokládá se, že tato intenzita je v každém bodě na povrchu úměrná světlu, které zůstane ve vlnovodu. Princip měření je znázorněn na obrázku 6.7. Na obrázku 6.8 je znázorněn měřicí stůl při měření. Samotné měření probíhá tak, že se vzorek uchytí a přes vazební hranol se posvítí do vlnovodu. Optické vlákno poté v těsné blízkosti vlnovodu skenuje jeho povrch a přes fotodetektor je výsledek zobrazen na počítači. Uživatel si poté vybere část vzorku, kde nejsou viditelné chyby a program pomocí metody nejmenších čtverců vypočítá útlum v dB/cm.



Obrázek 6.7: Princip měření útlumu planárních vlnovodů na zařízení Metricon [9].

V případě měření flexibilních planárních optických vlnovodů fixován na křemíkovou destičku, aby došlo k vytvoření optického kontaktu, protože samotný vzorek je velmi tenký. Stínítko zabraňuje tomu, aby nedocházelo k ovlivnění měření. Měření bylo provedeno na viditelné vlnové délce $632,8 \text{ nm}$ a na vlnové délce 964 nm [9].



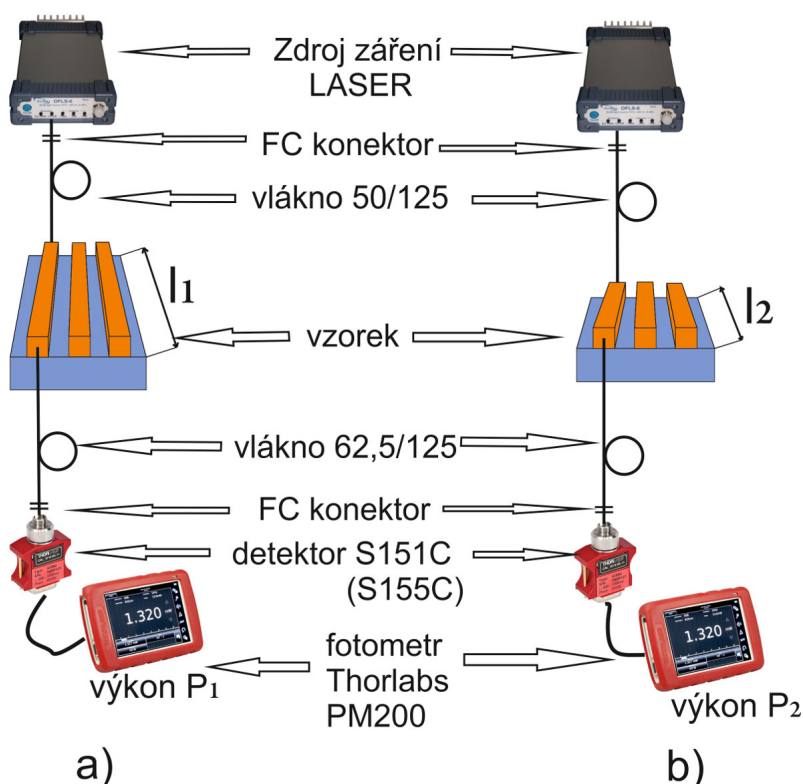
Obrázek 6.8: Pracoviště pro měření útlumu planárních vlnovodů [9].

6.5 Měření optického útlumu metodou dvou délek

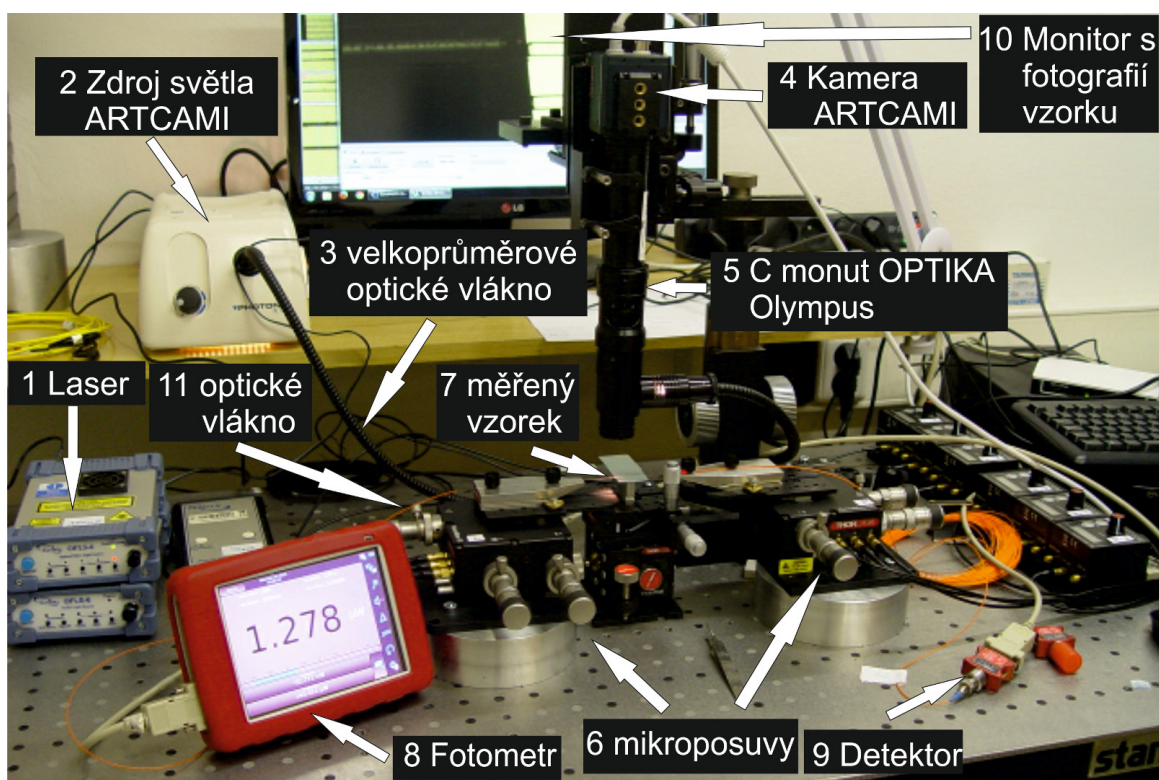
Metoda měření pomocí dvou délek je poměrně přesná, ale destruktivní metoda měření. Postup měření je takový, že se nejprve změří vstupní výkon signálu P_1 po průchodu planárním hřebenovým vlnovodem o délce l_1 . V dalším kroku se hřebenový planární vlnovod zkrátí a poté se opět změří výstupní výkon P_2 pokud možno bez toho, aby se změnila vstupní vazba. Opakovaným kontaktním navázáním a vyvázáním záření do a z kanálků vzniká chyba, kterou lze eliminovat větším počtem měřených kanálků stejného typu a rozměrů. Princip metody je znázorněn na obr. 6.9 a výsledný optický útlum lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2} \quad (6.2)$$

kde α je měrný útlum v dB/cm , P_1 a P_2 je výstupní výkon původního a zkráceného vlnovodu v dB a l_1, l_2 je délka původního a zkráceného vlnovodu v cm . Měření jsem prováděl na třech vlnových délkách 650, 850 a 1300 nm . Jako zdroj záření byly použity zdroje laseru Safibra OFLS-5-FP-650, Safibra OFLS-6-LD-850 a Safibra OFLS-6CH SLED-1310. Pro vyhodnocení útlumu jsem použil fotometr Thorlabs PM200, k němuž byl připojen Si detektor (S151C) určený pro měření v rozsahu 400 - 1100 nm a InGaAs detektor (S155C) určený pro měření v rozsahu 800 - 1700 nm . Fotografie pracoviště je uvedena na obrázku 6.10.



Obrázek 6.9: Princip metody měření optického útlumu metodou dvou délek: a) měření optického výkonu P_1 o délce vzorku l_1 , b) měření optického výkonu P_2 na zkráceném vzorku délky l_2 .



Obrázek 6.10: Pracoviště pro měření optického útlumu metodou dvou délek.

Kapitola 7

Dosažené výsledky

7.1 Kontrola optické kvality vlnovodů

Jako první diagnostickou metodu vyrobených vlnovodů jsem provedl vizuální kontrolu optické kvality. Pro kontrolu optické kvality hřebenových vlnovodů a rozbočnic jsem použil kameru ARTCAMI s optikou Olympus. Pracoviště vizuální kontroly optické kvality je popsáno v kapitole 6.1.

V případě planárních vlnovodů byla provedena pouze kontrola okem viditelných poruch. Vzorky byly opticky kvalitní s malým množstvím poruch. Tyto poruchy byly ale v přijatelné míře, takže neohrožily další případná měření na zařízení Metricon.

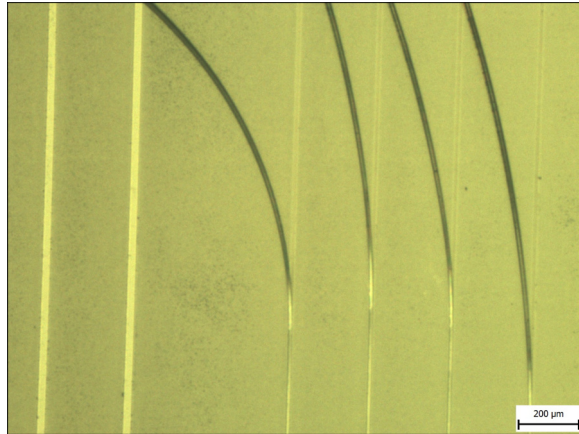
Hřebenové vlnovody se skokovou změnou indexu lomu

Úkolem vizuální kontroly optické kvality u hřebenových vlnovodů bylo odhalit případné poruchy a deformace vyrobených struktur. Provedl jsem kontrolu vlnovodů po celé jejich délce v podélném směru (obr. 7.1) ale i v řezu v příčném směru (obr. 7.3). V podélném směru se ukázalo, že u materiálů EpoCore/EpoClad se vlnovody, které měly velmi malé rozměry menší než $50 \mu m$, v některých případech při vyvolávání ve vývojce utrhly od podkladové vrstvy a odplavily se, viz obr. 7.2. Tento problém se podařilo uspokojivě vyřešit upravením technologie výrobního procesu, kdy byl zařazen mezistupeň stripování v plazmové leptáčce po dobu několika minut před nanášením vlnovodné vrstvy EpoCore na podkladovou vrstvu EpoClad.

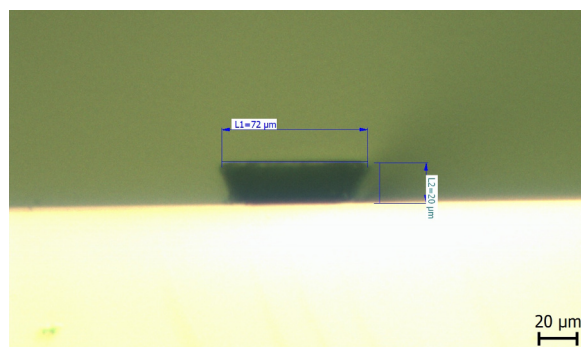


Obrázek 7.1: Kvalitně vyrobené kanálky EpoClad/EpoCore se šířkou $50 \mu m$.

Při kontrole kanálků vlnovodu v příčném řezu pak bylo pozorováno u obou materiálů (EpoCore/EpoClad, Su8-50) podleptání kanálků vývojkou u jejich paty. Tyto kanálky mají v příčném řezu tvar obráceného rovnoramenného lichoběžníku. Tento problém bude nadále řešen modifikací výrobních postupů, konkrétně změnou teplotního a UV vytvrzení vlnovodné vrstvy, případně změnou doby ponechání ve vývojce. Na obrázku 7.3 je čelo kanálku polymeru EpoCore



Obrázek 7.2: Utržené kanálky vlnovodu EpoClad/EpoCore.

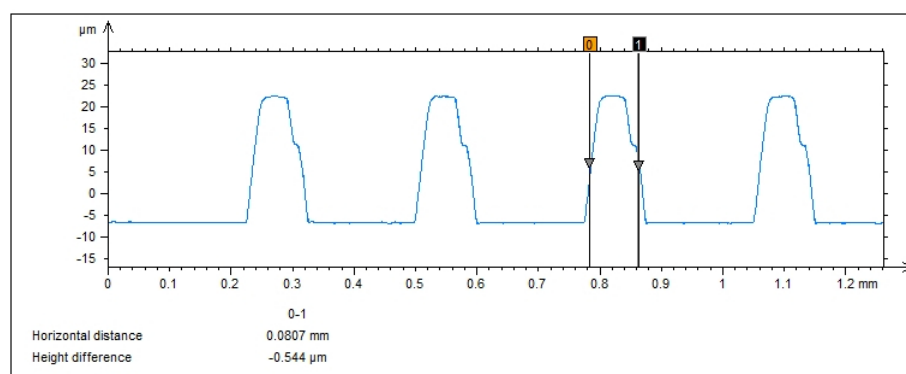


Obrázek 7.3: Kanálek polymeru EpoCore nanesený na křemíkovém substrátu.

na podkladovém substrátu Si, kde je patrné podleptání vývojkou u paty kanálku.

7.2 Měření geometrických rozměrů

Měření geometrických rozměrů jsem prováděl na profilometru Talystep Hommel Tester 1000 na VŠCHT v Praze a na profilometru Taylor Hobson na Katedře elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze. Změřil jsem profily kanálků žebrových vlnovodů v příčném směru. Měření bylo provedeno na vzorcích s polymery EpoCore/EpoClad a také polymerem Su8-50. Hlavním cílem tohoto měření bylo zjistit výšku vlnovodů, která byla experimentálně optimalizovaná při výrobě tím, že vlnovodná vrstva byla nanášena při různých rychlostech otáček rotačního lití. Při doporučených otáčkách výrobců materiálů se nepodařilo dosáhnout požadované výšky kanálků $50 \mu\text{m}$, a proto byly otáčky při nanášení vlnovodných materiálů postupně modifikovány. Výsledky naměřených výšek kanálků pro různé otáčky nanášení u obou typů polymerů jsou v tabulce 7.1. U každého měřeného kanálku je rovněž jako doplňující informace uvedena i jeho šířka. Na obrázku 7.4 je pak grafický výstup průběhu měření z profilometru u vzorku 616 (Si/SiO₂/EpoCore).



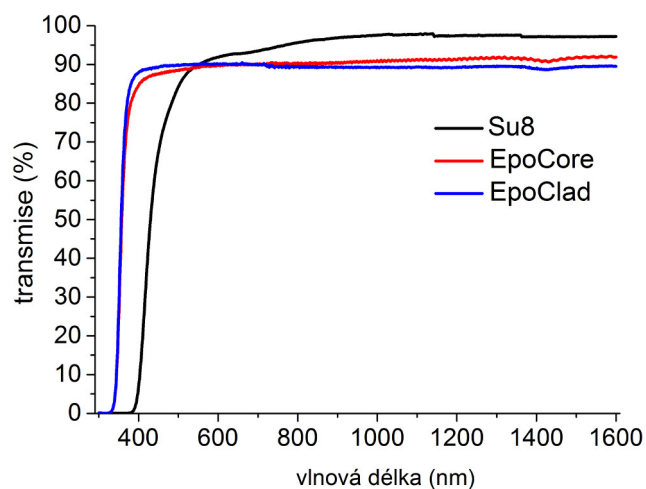
Obrázek 7.4: Grafický výstup měření vzorku 616 (Si/SiO₂/EpoCore) z profilometru Talystep.

Tabulka 7.1: Naměřené výšky kanálků hřebenových vlnovodů.

Vzorek č.	Substrát	Typ vlnovodu	Rychlost otáček ot./min.	Výška μm	Šířka μm
567	FR4	EpoClad/EpoCore	1500	21	100
572	FR4	EpoClad/EpoCore	1500	21	32
581B	Si	EpoClad/EpoCore	1500	25	64
582B	Si/SiO ₂	EpoClad/EpoCore	1500	26	124
583	Si	EpoCore	1500	31	64
584	Si/SiO ₂	EpoCore	1500	22	126
585	Si	EpoCore	1500	22	60
586	Si/SiO ₂	EpoCore	1500	22	63
587	Si	EpoClad	1500	20	80
588	Si	EpoClad	1500	21	146
589	Si/SiO ₂	EpoCore	1500	20	95
590	Si/SiO ₂	EpoCore	1500	21	130
591	Si	EpoClad/EpoCore	1500	18	40
592	Si	EpoCore	1500	20	130
599	Si	EpoCore	900	36	75
600	Si	EpoCore	600	27	118
601	Si	EpoClad/EpoCore	1100	29	81
602	Si	Su8-50	2000	23	50
605	Si/SiO ₂	Su8-50	2000	23	50
607	Si/SiO ₂	Su8-50	2000	20	150
608	Si	Su8-50	1800	23	65
610	Si/SiO ₂	Su8-50	2000	21	100
611	Si/SiO ₂	Su-8	2200	18	50
614	TOPAS	EpoCore	1000	33	112
615	TOPAS	EpoClad/EpoCore	1000	31	110
616	Si/SiO ₂	EpoCore	800	41	86
617	Si/SiO ₂	Su8-50	1800	25	110
629	Si/SiO ₂	Su8-50	1000	42	100
630	TOPAS	Su8-50	1200	32	80
631	TOPAS	Su8-50	1500	27	36
632	Si/SiO ₂	EpoCore	400	73	62
633	Si	EpoClad/EpoCore	500	55	62
634	Si	EpoClad/EpoCore	500	60	36
635	TOPAS	EpoClad/EpoCore	400	76	40
636	TOPAS	EpoClad/EpoCore	500	65	60

7.3 Transmisní spektra

Měření transmisních spekter proběhlo na pracovišti FJFI ČVUT v Praze na přístroji UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600. Měření byly podrobeny optické materiály použité při výrobě výše uvedených struktur. Jednotlivé vrstvy těchto materiálů byly nanесeny na křemenné sklo. Proběhlo měření jak podkladového materiálu EpoClad, tak i materiálů určených pro vlnovodné vrstvy EpoCore a Su8-50. Při společném porovnání všech tří polymerů v grafu na obrázku 7.5 je patrné, že nejvyšší transmise dosahující i více jak 95 % v měřeném pásmu vlnové délky 500 - 1550 nm vykazoval materiál Su8-50. Při porovnání polymerů EpoClad a EpoCore vykazuje od 700 do 1600 nm nepatrně vyšší transmise materiál EpoCore. Z měření vyplývá, že použité polymery jsou vhodné pro danou aplikaci.



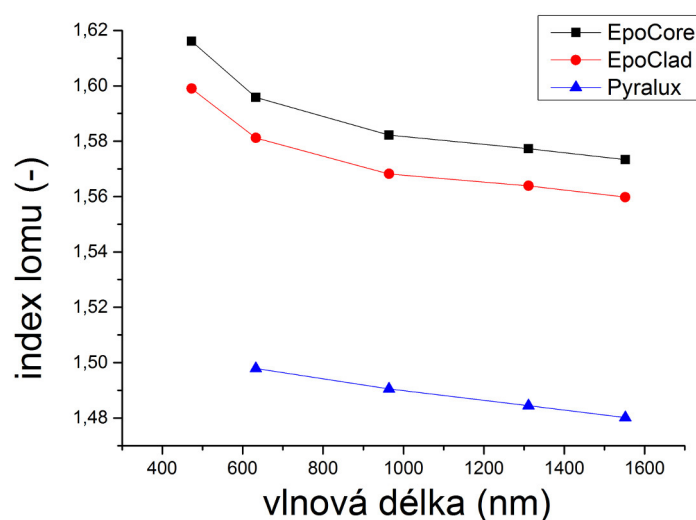
Obrázek 7.5: Naměřená transmisní spektra pro polymery Su8-50, EpoCore a EpoClad.

7.4 Index lomu

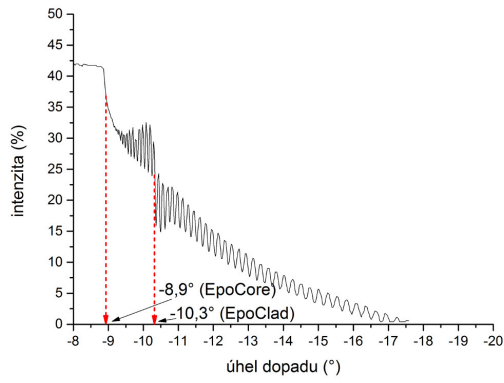
Měření indexu lomu bylo provedeno na zařízení Metricon. Byly změřeny vzorky planárních vlnodů s nanesenými vrstvami materiálů EpoCore a Su8-50. Tyto materiály byly nanесeny na křemíkové destičky, nebo flexibilní podložky Pyralux a Topas. Výsledky těchto měření byly dále porovnávány s katalogovými hodnotami výrobce těchto materiálů.

Na obrázku 7.6 jsou hodnoty indexu lomu změřené zařízením Metricon. Jsou zde naměřené hodnoty indexu lomu u vzorku 574, který tvořil substrát Pyralux, na němž byla nanесena podkladová vrstva EpoClad a na ní vlnodná vrstva EpoCore.

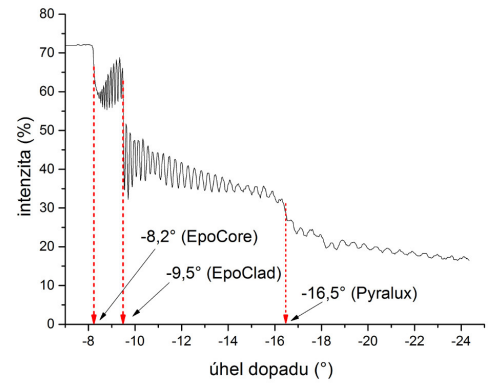
Na grafech v obrázku 7.7 jsou uvedeny typické výstupní průběhy z měření na zařízení Metricon. Jedná se o tentýž vzorek 574 (Pyralux/EpoClad/EpoCore). Grafy znázorňují průběh dopadající intenzity záření na detektor měřicího zařízení v závislosti na úhlu paprsku Θ_p dopadajícího na vazební hranol (viz kapitola 6.4). Měření bylo provedeno pro pět různých vlnových délek 473; 632,8; 964; 1311 a 1552 nm. Z průběhů lze odečíst hodnoty dopadajícího úhlu Θ_p v místech skokových poklesů intenzity záření dopadajícího na detektor (vyznačeny jsou červenou přerušovanou čarou). Tyto hodnoty odpovídají fyzickým přechodům mezi jednotlivými vrstvami v příčném řezu vlnodné struktury a na základě vztahu 6.1 z nich zařízení Metricon vyhodnocuje index lomu pro jednotlivé materiály při daných vlnových délkách.



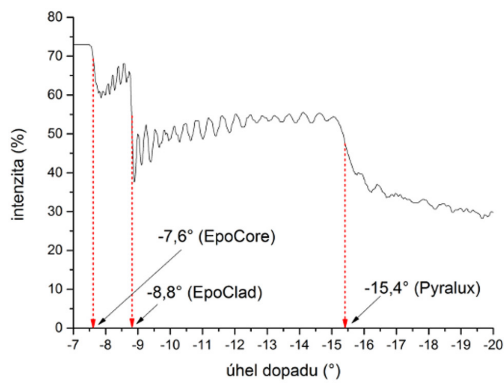
Obrázek 7.6: Průběhy indexu lomu materiálů EpoCore, EpoClad a Pyralux v závislosti na vlnové délce u vzorku 574.



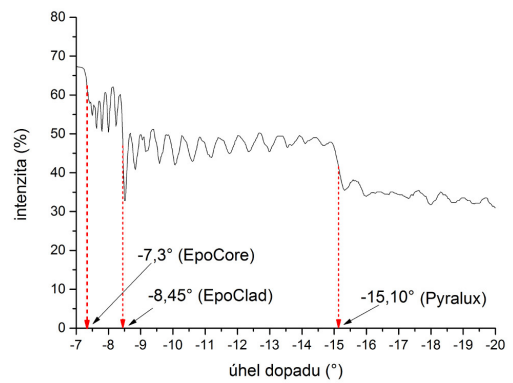
(a) vlnová délka 473 nm



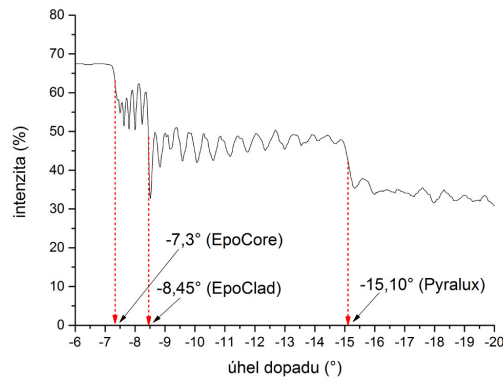
(b) vlnová délka 632,8 nm



(c) vlnová délka 964 nm



(d) vlnová délka 1311 nm



(e) vlnová délka 1552 nm

Obrázek 7.7: Závislost intenzity na velikosti úhlu dopadu Θ_p paprsku na vazební hranol pro polymery EpoCore/EpoClad na folii Pyralux u vzorku 574.

7.5 Optický útlum vlnovodů

Planární vlnovody

Další z velmi podstatných měření planárních vlnovodů, které nám zařízení Metricon umožňuje, je měření optického útlumu. Princip tohoto měření je popsán v podkapitole 6.4. Měření optického útlumu jsem provedl u polymerů EpoCore a Su8-50. Polymer EpoCore byl měřen na podkladové vrstvě EpoClad a nosný substrát tvořily flexibilní materiály Pyralux, FR4 a TOPAS, které byly pro potřeby měření připevněny na třípalcových křemíkových deskách. Měření bylo provedeno pro vlnové délky 632,8 a 964 nm.

Na obrázku 7.8 jsou grafy závislosti rozptýlené energie, kterou zaznamenal detektor při pohybu po dráze navázaného laserového paprsku do vlnovodu v závislosti na vzdálenosti od zdroje záření. Ze sklonu tohoto průběhu a velikosti vzorku dokáže zařízení vypočítat měrný útlum planárního vlnovodu.

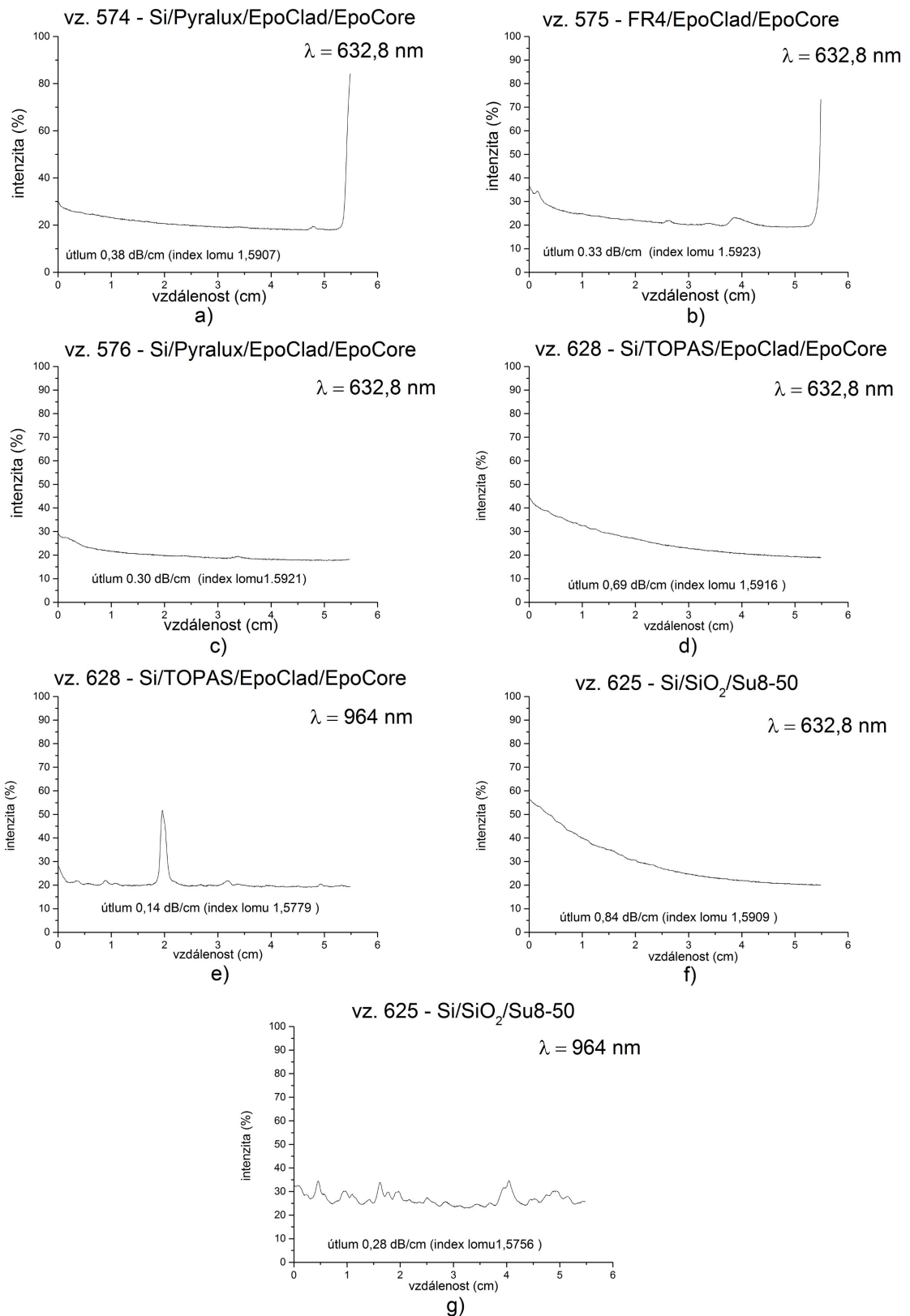
Nejnižší hodnota optického útlumu 0,14 dB/cm pro vlnovou délku 964 nm byla změřena u vzorku, jehož nosný substrát tvořil TOPAS, podkladovou vrstvu EpoClad a vlnovodnou vrstvu EpoCore. Výrobce polymeru EpoCore přitom udává útlum 0,2 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. U tohoto vzorku 628 tedy bylo dosaženo velmi dobrého výsledku.

U polymeru Su8-50 byl naměřen nejmenší měrný útlum 0,28 dB/cm pro vlnovou délku 964 nm u vzorku s podkladovou křemíkovou deskou s povrchovou úpravou oxidu křemičitého, na které byla nanесena vlnovodná vrstva Su8-50. Výrobce u tohoto materiálu udává měrný útlum....zjistit.

V tabulce 7.2 je přehled měřených vzorků planárních vlnovodů a výsledky změřených hodnot útlumu.

Tabulka 7.2: Hodnoty naměřených optických útlumů planárních vlnovodů.

Vzorek č.	Substrát	Typ	Vlnová délka (nm)	Útlum dB/cm
574	Pyralux	EpoClad/EpoCore	632,8	0,38
575	FR4	EpoClad/EpoCore	632,8	0,33
576	Pyralux	EpoClad/EpoCore	632,8	0,30
628	Topas	EpoClad/EpoCore	632,8	0,69
			964	0,14
625	Si/SiO ₂	Su8-50	632,8	0,84
			964	0,28



Obrázek 7.8: Optický útlum planárních vlnovodů - vzorky 574, 575, 576, 625 a 628 pro vlnovou délku 632,8 a 964 nm.

Hřebenové vlnovody

Měření optického útlumu pro hřebenové vlnovody metodou měření dvou délek byla popsána v kapitole 6.5. Provedl jsem měření útlumu vzorku, jehož nosný substrát tvořila 4" křemíková deska, na které byla nanесena vrstva EpoCladu a vlnovodnou vrstvou tvořil materiál EpoCore (vzorek 587). Hřebenové vlnovody na ní byly vytvořeny pomocí fotolitografického procesu. Druhý vzorek 611, na kterém bylo provedeno měření optického útlumu metodou dvou délek tvořila křemíková deska s vrstvou oxidu křemičitého, jež zároveň tvořila podkladovou vrstvu vlnovodů. Vlnovodnou vrstvou tvořil materiál Su8-50.

Nejdříve jsem musel připravit čela kanálků na měření. Nařezal jsem zadní stranu křemíkové desky diamantovým rotujícím kotoučem na několikacentimetrové proužky. Osvědčilo se desku pouze částečně naříznout a provést lom. Čela vlnovodů tak nebyla poškozena vysokou teplotou při řezání. Takto připravené vzorky jsem připevnil na stolek s mikroposuvy a na vstup vlnovodu jsem přivedl multivídné vlákno o průměru jádra $50 \mu m$, které jsem připojil na zdroj laseru. Tímto vláknem bylo navázáno záření do čela kanálku hřebenového vlnovodu. Na výstup hřebenového vlnovodu jsem přivedl podobně vlákno s průměrem jádra $62,5 \mu m$. Toto multivídné vlákno sloužilo k vyvázání záření z vlnovodu a bylo dále připojeno na fotodetektor a dále na fotometr Thorlabs PM200, který zobrazoval přijímaný výkon.

Měření jsem provedl pro tři vlnové délky 650; 850 a 1310 nm a vždy pro stejnou skupinu motivů kanálků o stejné šířce $50 \mu m$. Detail měřeného vzorku na stolku s mikroposuvy je na obrázku 7.9. V tabulce 7.3 jsou výsledky měření měrného útlumu vlnovodů u materiálů EpoCore/EpoClad na vzorku 587 a v tabulce 7.4 jsou výsledky měření měrného útlumu vlnovodů u materiálů Su8-50 na podkladu SiO_2 na vzorku 611.

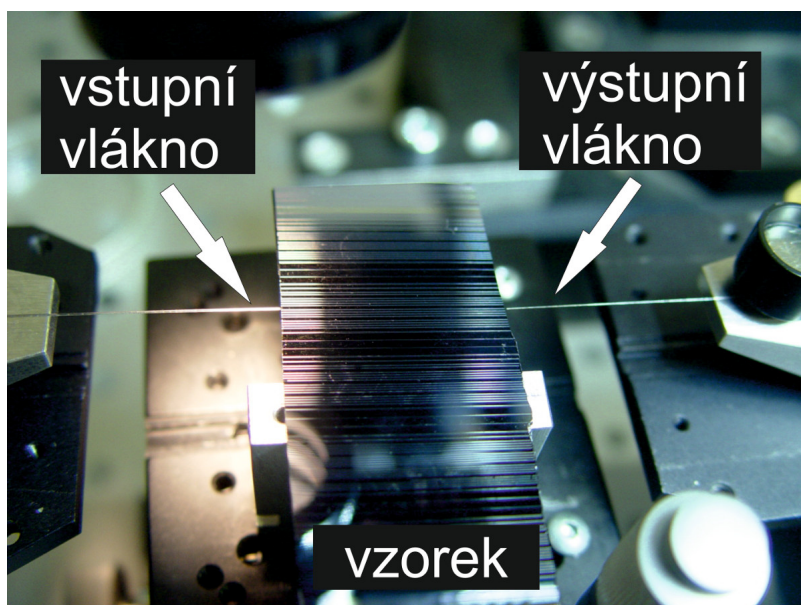
Nejmenší optický útlum $0,24 \text{ dB/cm}$ se mi podařilo změřit u kanálku č. 5 na vzorku 587 (Si/EpoClad/EpoCore) pro vlnovou délku 1310 nm. U vzorku 611 (Si/SiO₂/Su8-50) se mi podařilo změřit nejmenší útlum $2,86 \text{ dB/cm}$ u kanálku č.2 pro vlnovou délku 850 nm. U vzorku 611 (Si/SiO₂/Su8-50) byly výsledky měření negativně ovlivněny špatně provedenou technikou lomů substrátu, kdy nebylo možné provést kvalitní navázání záření do čela vlnovodů.

Tabulka 7.3: Optický útlum pro vzorek 587 (Si/EpoClad/EpoCore).

Kanálek č.	šířka (μm)	Útlum (dB/cm)		
		650 (nm)	850 (nm)	1300 (nm)
1	50	4,27	1,45	2,17
2	50	1,76	1,30	2,26
3	50	3,96	3,08	3,95
4	50	0,97	0,39	0,65
5	50	0,7	0,48	0,24

Tabulka 7.4: Optický útlum pro vzorek 611 (Si/SiO₂/Su8-50).

Kanálék č.	šířka (μm)	Útlum (dB/cm)		
		650 (nm)	850 (nm)	1300 (nm)
1	50	5,50	3,18	5,21
2	50	4,85	2,86	4,00
3	50	5,71	3,60	4,32
4	50	3,79	3,54	3,00
5	50	5,07	3,93	4,57



Obrázek 7.9: Detail měřeného vzorku s optickými vlákny pro navázání a vyvázání záření z vlnovodu.

Kapitola 8

Závěr

V této diplomové práci jsem provedl návrhy planárních vlnovodných struktur na pevných substrátech z Si (tloušťka 0,525 mm) a FR4 (tloušťka 0,5 a 1 mm) a dále pak na flexibilních foliích TOPAS 8007X4 (tloušťka 0,135 a 0,300 mm), Pyralux (tloušťka 0,1 mm) a FR4 (tloušťka 0,1 mm). Na substrátech Si, FR4, TOPAS a Pyralux jsem pro podkladovou vrstvu použil polymer EpoClad a na tento polymer byla nanášena vlnovodná vrstva polymeru EpoCore. Polymer EpoCore je určen především pro vlnovou délku 850 nm. V případě Si podložky byla použita mezivrstva z SiO₂ a zde nebyla použita podkladová vrstva EpoClad. Dále jsem provedl návrhy planárních vlnovodů s polymerem Su8-50 určeným pro vlnovou délku 1310 nm, který plnil funkci vlnovodné vrstvy. U tohoto polymeru jsem jako substrát použil Si s upraveným povrchem s vrstvou SiO₂ a také flexibilní folii TOPAS.

Náplní této práce byly také návrhy hřebenových vlnovodů a optických mnohavidových rozbočnic. Návrhy rozbočnic jsem provedl v návrhovém programu BeamProp™, ve kterém jsem též provedl optimalizace pro polymerní materiály EpoClad/EpoCore a Su8-50.

Celkem jsem provedl návrh dvou typů rozbočnic. Prvním typem byla rozbočnice s taperovanou střední částí vlnovodu a druhý typ byla rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem. Na řešení rozbočnice s dvojitým modovým skramblerem byla podána přihláška vynálezu a užitého vzoru na Úřad průmyslového vlastnictví. Užité vzor byl zapsán 26.5.2014 pod číslem 26976 a patent byl zapsán pod číslem 305196 dne 22.04.2015. Pro účely výroby těchto optických struktur jsem provedl návrh fotolitografické masky s motivy kanálek se šířkou 5 až 150 μm a s motivy dvou typů rozbočnic. Podle mého návrhu byla tato maska vyrobena na MU v Brně pomocí laserového litografu za podpory výzkumného centra CEITEC.

Všechny výše zmíněné návrhy planárních vlnovodů, hřebenových vlnovodů a optických mnohavidových rozbočnic jsem následně také vyrobil a v případě planárních a hřebenových vlnovodů provedl měření. Nejdříve jsem provedl vizuální optickou kontrolu vyrobených vzorků a struktur. U planárních vlnovodů byla dále provedena měření transmisních spekter, indexu lomu a měření optického útlumu. U hřebenových vlnovodů jsem provedl měření geometrických rozměrů a optického útlumu.

U planárních vlnovodů bylo dosaženo nejnižšího optického útlumu 0,14 dB/cm pro vlnovou délku 964 nm u vzorku na substrátu TOPAS s podkladovou vrstvou EpoClad a vlnovodnou vrstvou EpoCore. U polymeru Su8-50 byl u planárního vlnovodu nejmenší útlum 0,28 dB/cm pro vlnovou délku 964 nm, jehož podkladovou vrstvou tvořila křemíková deska s povrchovou vrstvou oxidu křemičitého. Na vlnové délce 632,8 nm byl pak naměřen nejmenší útlum na vlnovodu s polymerem EpoClad/EpoCore 0,30 dB/cm a u vlnovodu Si/SiO₂/EpoCore byl naměřen útlum 0,84 dB/cm. U polymeru Su8-50 byla na vlnové délce 632,8 nm naměřena hodnota útlumu 0,84 dB/cm.

U hřebenových vlnovodů byl podroben měření útlumu vzorek 587, jehož nosný substrát tvořil křemík s podkladovou vrstvou EpoClad a vlnovodnou vrstvou EpoCore. U tohoto vzorku byla změřena nejnižší hodnota optického útlumu 0,24 dB/cm a průměrné hodnoty optického útlumu pro vlnovou délku 650 nm byly 2,33 dB/cm, pro vlnovou délku 850 nm byla změřená

průměrná hodnota $1,34 \text{ dB/cm}$ a pro vlnovou délku 1310 nm tato hodnota byla $1,85 \text{ dB/cm}$. U vzorku 611, který měl vyrobené kanálky z polymeru Su8-50 na podkladu Si/SiO₂, vycházela zprůměrovaná hodnota útlumu $4,98 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 650 nm , $3,42 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 850 nm a $4,22 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 1310 nm .

Nutno dodat, že vyšší hodnoty optického útlumu s polymerem Su8-50 (vzorek 611) byly značně ovlivněny nepodařeným lomem křemíkové desky a tedy se nepodařilo vyrobit kvalitní čela vlnovodu nutné pro navázání a vyvázání záření do hřebenového vlnovodu. Do budoucna je zapotřebí techniku přípravy definovaných lomů ještě zoptimalizovat. Dále je potřeba vyřešit problém s fixací flexibilních materiálů na křemíkovou desku během výroby.

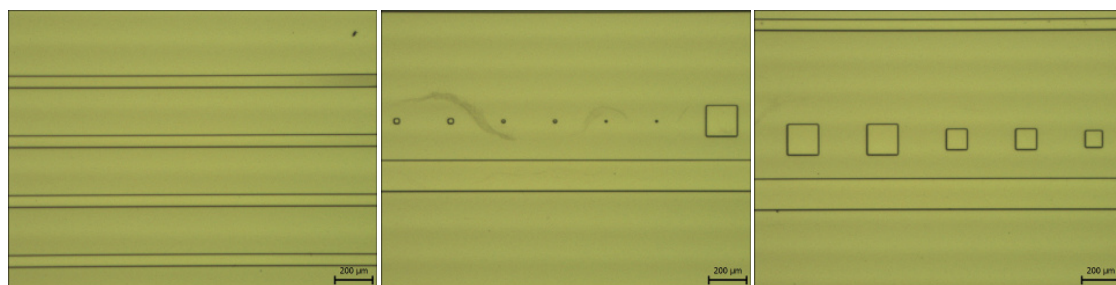
Závěrem lze říci, že pokud porovnáme dosažené hodnoty optického útlumu u vzorků s vlnovodnou vrstvou EpoCore s hodnotou, kterou uvádí výrobce ($0,2 \text{ dB/cm}$ pro vlnovou délku 850 nm), tak se mi podařilo připravit kvalitní hřebenové optické vlnovody.

Použité zdroje

- [1] K. Novotný: Optická telekomunikační technika, Nakladatelství ČVUT, skripta, 2007.
- [2] J. Čtyroký, I. Hüttel, J. Schröfel, L. Šimánková: Integrovaná optika, SNTL Nakladatelství Technické Literatury, Praha 1986.
- [3] [online]: <http://refractiveindex.info/>
- [4] Microresist Technology GmbH, [online]: <http://www.microresist.de/en>
- [5] O. Barkman: Návrh optických kanálkových difuzních rozbočnic na skleněných podložkách, Katedra mikroelektroniky, ČVUT v Praze, Diplomová práce, 2011.
- [6] online: <https://cs.wikipedia.org/>
- [7] D. R. Beltrami, J. D. Love, F. Ladouceur: Multimode Planar Devices, Optical and Quantum Electronics 31, 1999, 307-326.
- [8] G. Yang, G. Zhao, et al. Multimode-waveguide-based optical power splitters in glass, Chinese Physics Letters. vol. 25, no. 8, pp. 2912-2914, 2008.
- [9] P. Hypš: Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly, Katedra měření, ČVUT v Praze, Diplomová práce, 2015.
- [10] Metricon Corporation, [online]: <http://www.metricon.com>

Příloha A

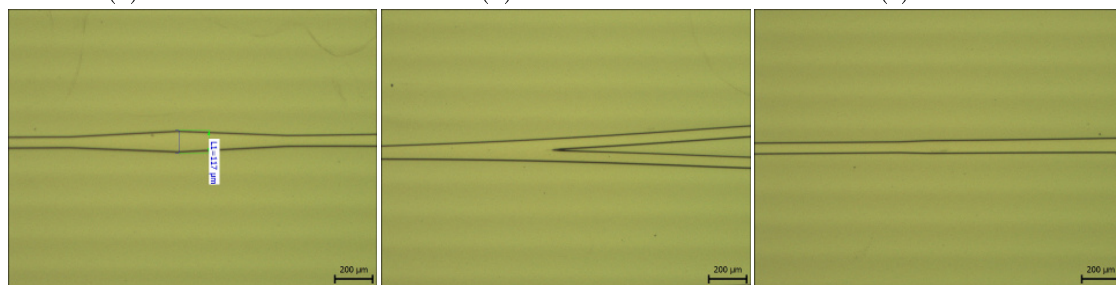
Kontrola optické kvality



(a) vzorek 629

(b) vzorek 629

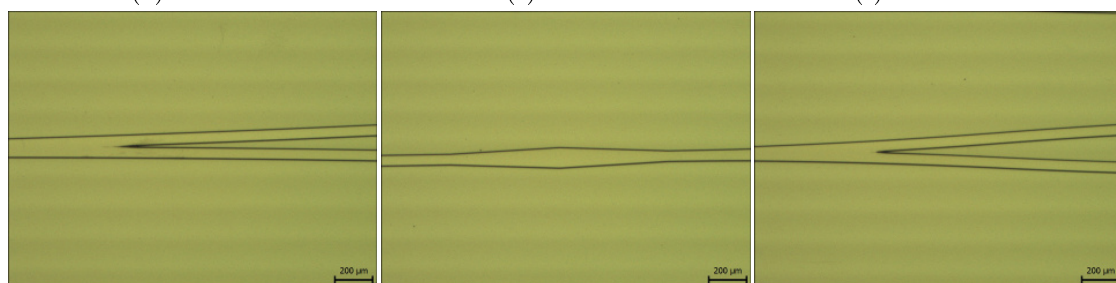
(c) vz 629



(d) vz 629

(e) vz 629

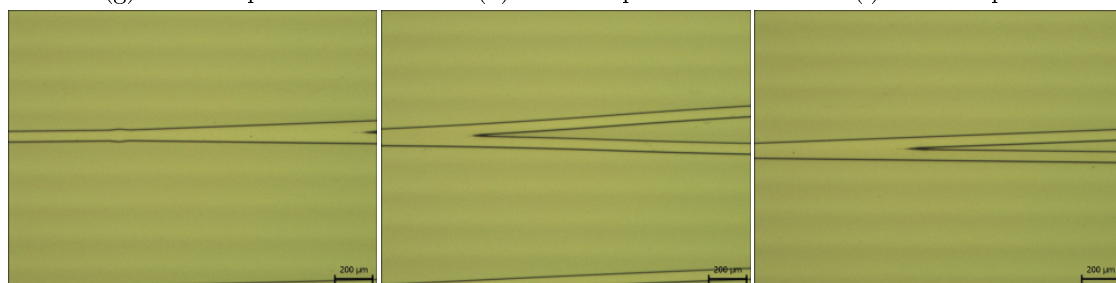
(f) vz 629 Su8



(g) vz 629 Epo

(h) vz 629 Epo

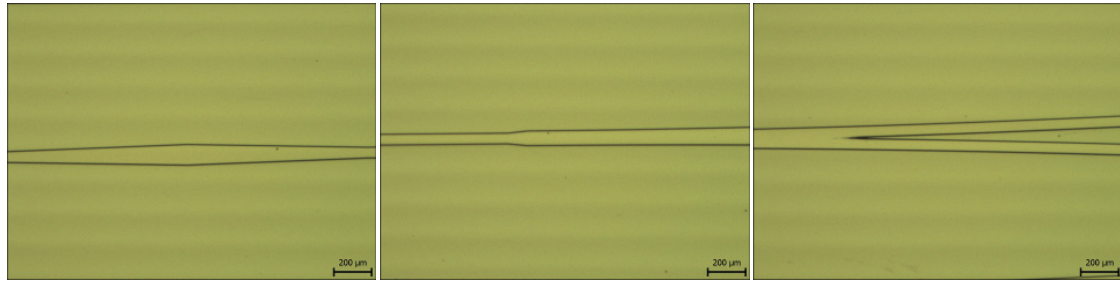
(i) vz 629 Epo



(j) vz 629 Su8

(k) vz 629 Su8

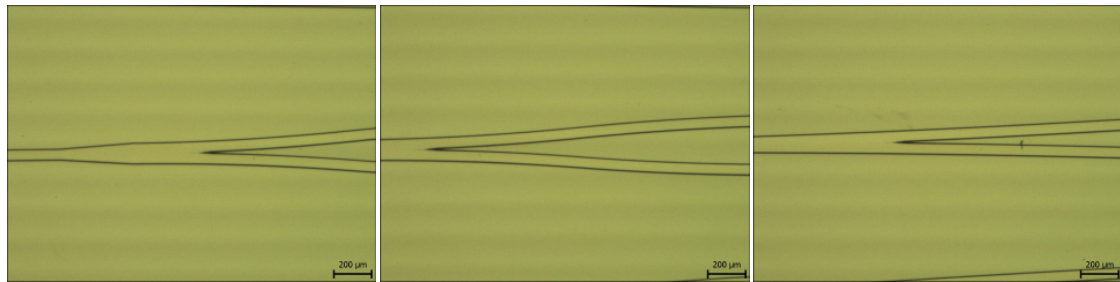
(l) vz 629 Su8



(a) vz 629 Epo

(b) vz 629 Su8

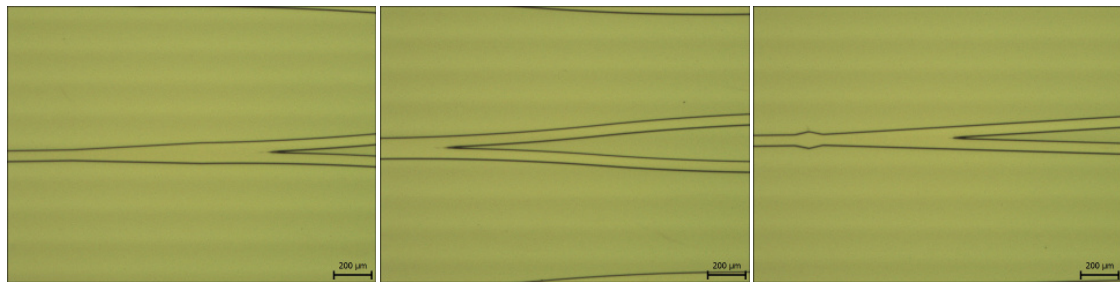
(c) vz 629 Su8



(d) vz 629 Epo

(e) vz 629 Epo

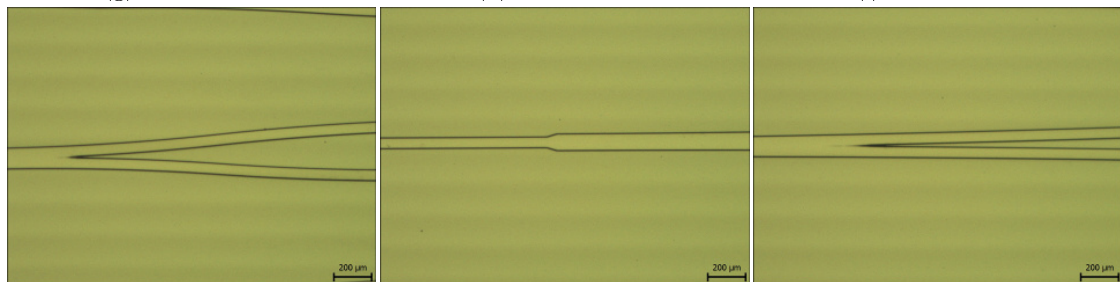
(f) vz 629 Su8



(g) vz 629 Epo

(h) vz 629 Epo

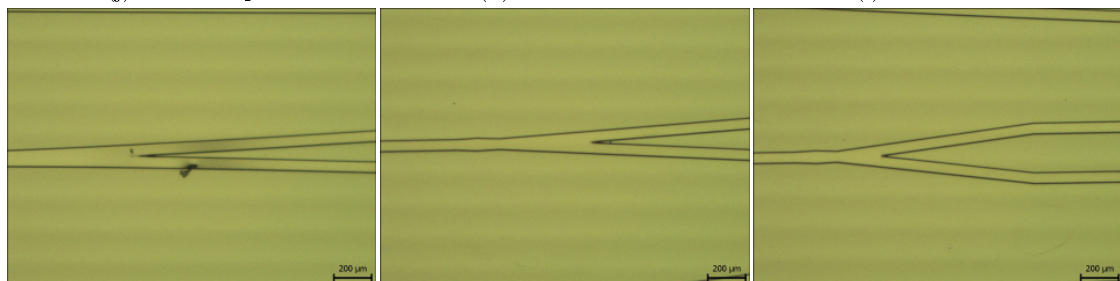
(i) vz 629 Su8



(j) vz 629 Epo

(k) vz 629 Su8

(l) vz 629 Su8



(m) vz 629 Su8

(n) vz 629 Epo

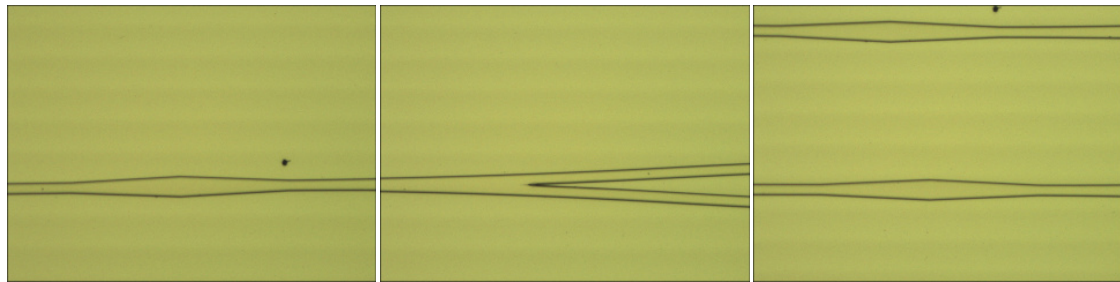
(o) vz 629 Epo



(a) vz 629 Epo

(b) vz 634

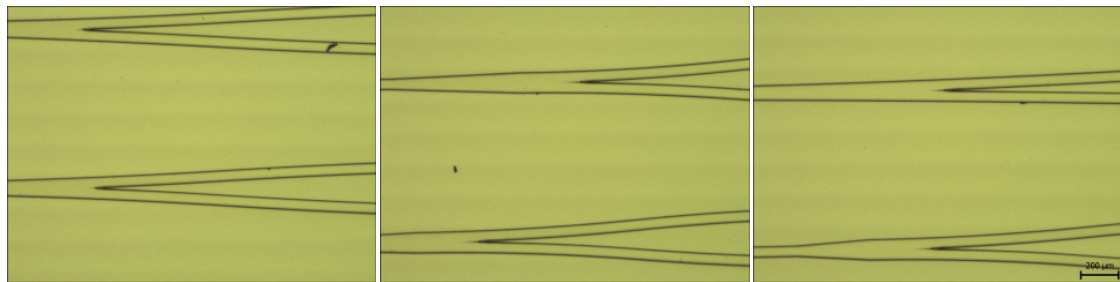
(c) vz 634 Su8



(d) vz 634 Epo

(e) vz 634 Epo

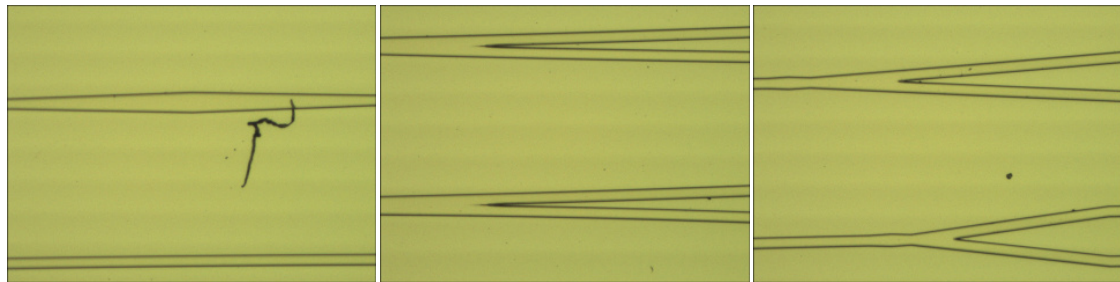
(f) vz 634 Epo



(g) vz 634 Epo

(h) vz 634 Epo

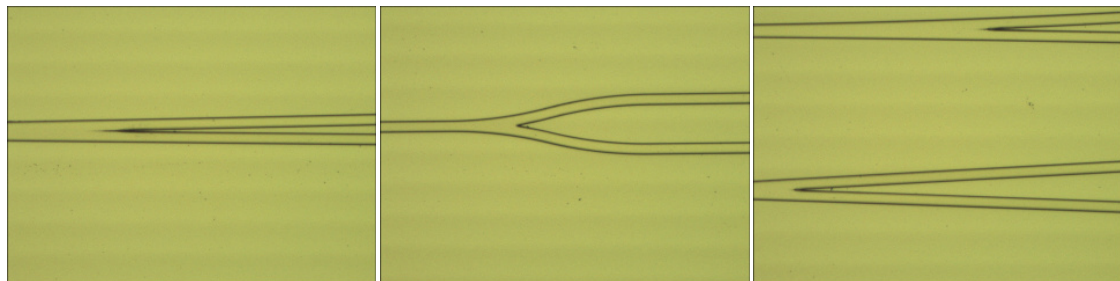
(i) vz 634 Epo



(j) vz 634 Epo

(k) vz 634 Su8

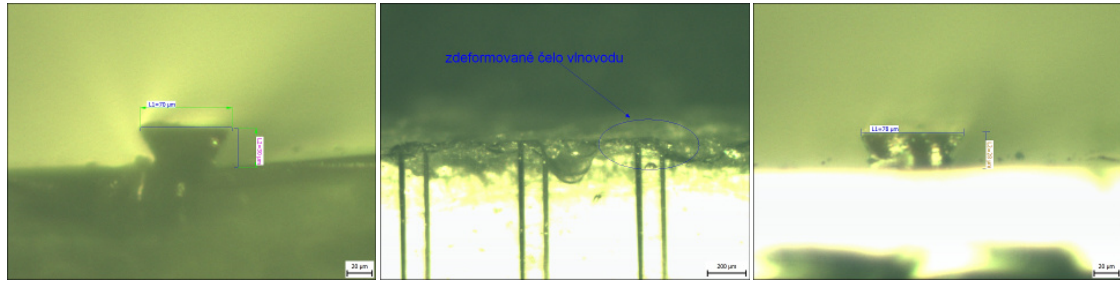
(l) vz 634 Epo



(m) vz 634 Su8

(n) vz 634 Epo

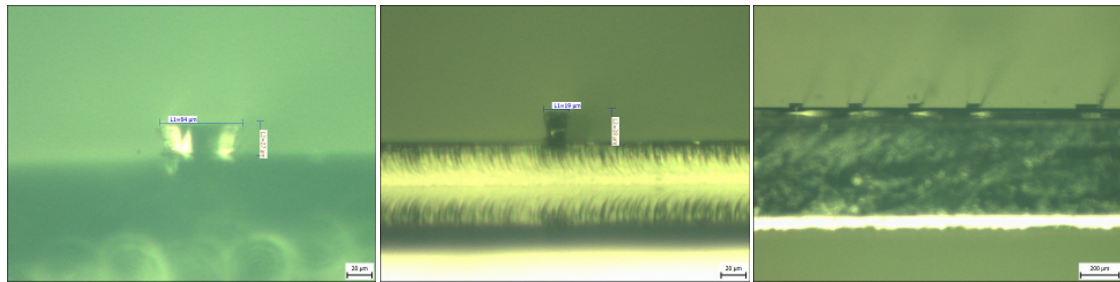
(o) vz 634 Su8



(a) vz 517

(b) vz 525

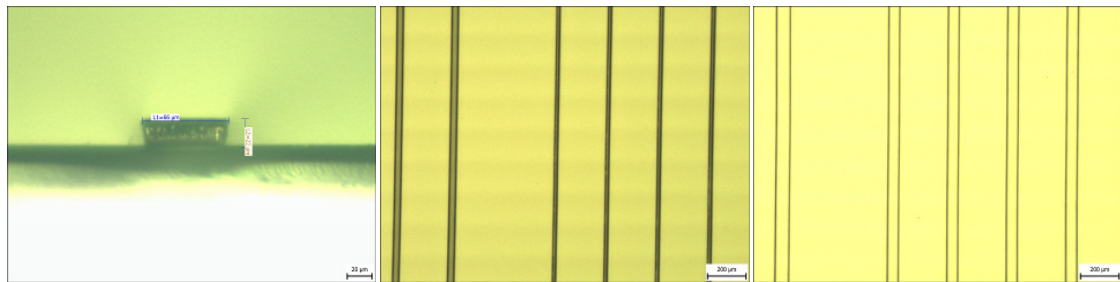
(c) vz 590



(d) vz 590

(e) vz 591

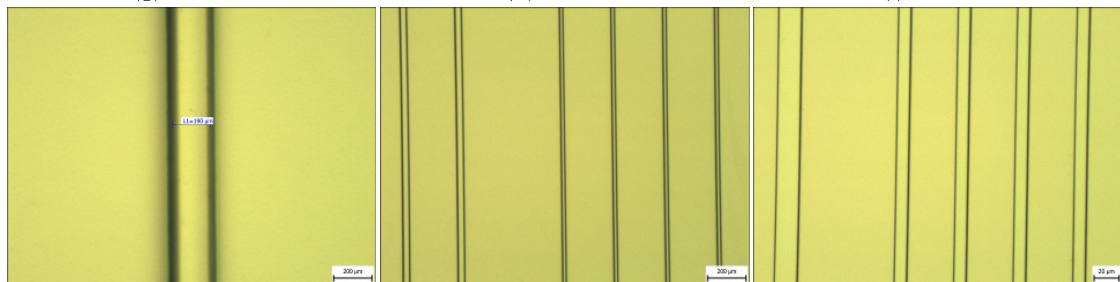
(f) vz 591



(g) vz 591

(h) vz 599

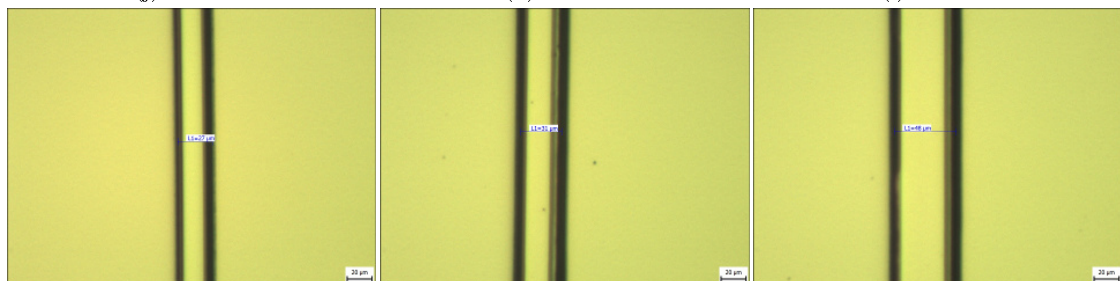
(i) vz 601



(j) vz 601

(k) vz 610

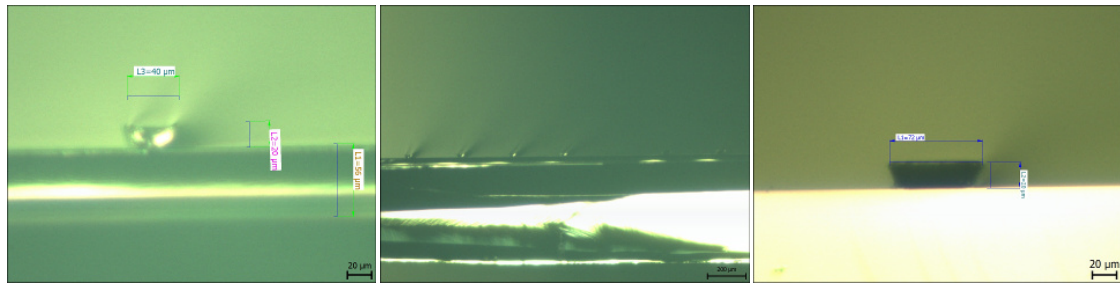
(l) vz 611



(m) vz 611

(n) vz 617

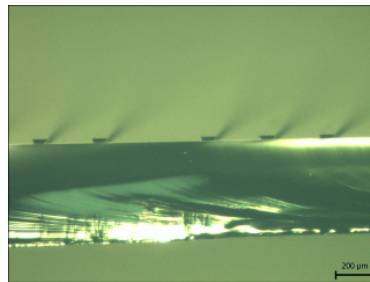
(o) vz 617



(a) vz 587

(b) vz 587

(c) vz 592



(d) vz 592

Příloha B

Přehled postupů výroby

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
567	4"FR4	EpoClad/EpoCore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min 3)plazma 4)EpoClad-1000ot./min.,5min. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)UV 2min.(nehty) 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf nezměřena exp. 11)plotna 50°C-5 min.→85°C-15 min. 12)vývojka 90 s, oplach IPA,DeMi voda
571	Pyralux	EpoClad/EpoCore	1)plazma,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Primer 10 s,4000 ot./min.,30 s, 90°C-5 min. 3)EpoClad-1000ot./min.,5min. 4)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 5)UV 2min.(nehty) 6)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 7)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 8)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 9)litograf 7:18 exp. 10)vývojka 75 s, oplach IPA,DeMi voda
572	4"FR4	EpoClad/EpoCore	1)čištění plazma 2)Primer 10 s,4000 ot./min.,30 s, 90°C-5 min. 3)EpoClad-1000ot./min.,5min. 4)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 5)UV 2min.(nehty) 6)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 7)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 8)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 9)litograf 6:05 exp. 10)vývojka 40 s, oplach IPA,DeMi voda

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
587	4"Si	EpoClad/EpoCore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min 3)plazma 30min.,O ₂ -20ml/min.,200W 4)EpoClad-1000ot./min.,5min. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)UV 2min.(nehty) 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf 7:32s exp. 11)plotna 50°C-5 min.→85°C-15 min. 12)vývojka 2:20s, oplach IPA,DeMi voda
588	4"Si	EpoClad/EpoCore	1) až 9) stejný jako vz. 587 10)litograf 6:13s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 50s, oplach IPA,DeMi voda
589	4"Si/SiO ₂	EpoCore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min 3)plazma 30min.,O ₂ -20ml/min.,200W 4)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf 7:32s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 90s, oplach IPA,DeMi voda
590	4"Si/SiO ₂	EpoCore	1) až 9) stejný jako vz.589 10)litograf 6:30s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 2 min., oplach IPA,DeMi voda 13)plotna 50°C-5 min.→90°C-5 min.
591	4"Si	EpoClad/EpoCore	1)čištění-leptání v plazmě,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)litograf 12:45s exp. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)vývojka 1:15s, oplach IPA,DeMi voda

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
592	4"Si	EpoCore	1)čištění-leptání v plazmě,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoCore-1500ot./min.,5 min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)litograf 7:27s exp. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-30 min. 6)vývojka 2 min., oplach IPA,DeMi voda
599	4"Si	Epocore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min. 3)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 4)EpoCore-900ot./min.,5 min. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)litograf 12 min. exp. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)vývojka 2:30 s, oplach IPA,DeMi voda
600	4"Si	Epocore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min 3)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 4)EpoCore-1250ot./min.,5 min. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)litograf 9:28 s exp. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)vývojka 2:10 s, oplach IPA,DeMi voda
601	4"Si	EpoClad/EpoCore	1)čištění Aceton-IPA-Aceton 2)plotna 200°C, 5 min 3)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 4)EpoClad-1100ot./min.,5min. 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)UV 2min.(nehty) 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 3)plazma 1 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 8)EpoCore-1100ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf 11:58 s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 3 min., oplach IPA,DeMi voda
608	4"Si	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1800 ot./min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 9:57 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 6)vývojka 5:30 s, oplach IPA,DeMi voda 7)plotna 150°C-60 min.

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
609	4"Si	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1800 ot./min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 12:30 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 6)vývojka 6 min., oplach IPA,DeMi voda
610	4"Si/SiO ₂	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-2000 ot./min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 7:04 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 6)vývojka 4 min., oplach IPA,DeMi voda
611	4"Si/SiO ₂	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-2200 ot./min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 9:29 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 6)vývojka 4 min., oplach IPA,DeMi voda
614	4"Si/TOPAS (300 μm)	EpoCore	1)plazma 2 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoCore-1000ot./min.,5 min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)litograf 9:29 s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 3 min., oplach IPA,DeMi voda
615	4"Si/TOPAS (135 μm)	EpoClad/EpoCore	1)plazma 2 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)EpoCore-1000ot./min.,5 min. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)litograf 11:53 s exp. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 3:40 s, oplach IPA,DeMi voda

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
616	4"Si/SiO ₂ (6μm HiPOX)	EpoCore	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoCore-800 ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf 7:47s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 4:30 s, oplach IPA,DeMi voda
617	4"Si/SiO ₂ (6μm HiPOX)	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1000 ot./min.,5 min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 12:05 s exp. 5)vývojka 3 min., oplach IPA,DeMi voda
629	4"Si/SiO ₂ (HiPOX)	Su8-50	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1000 ot./min.,5 min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 12:04 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 5)vývojka 6:30 s, oplach IPA,DeMi voda
630	4"Si/TOPAS (300)μm	Su8-50	1)plazma 4 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1200 ot./min.,5 min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 12 min. exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 5)vývojka 4 min., oplach IPA,DeMi voda
631	4"Si/TOPAS (300)μm	Su8-50	1)plazma 4 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)Su8-50-1500 ot./min.,5 min., ↔500 ot./min. 3)plotna 65°C-5 min., 95°C-20 min. 4)litograf 9:29 s exp. 5)plotna 65°C-1 min., 95°C-5 min. 5)vývojka 3:20 s, oplach IPA,DeMi voda

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
632	4"Si/SiO ₂ (ABB)	EpoCore	1)plazma 20min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoCore-400 ot./min.,5 min. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 10)litograf 11:58s exp. 11)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 8 min., oplach IPA,DeMi voda
633	4"Si	EpoClad/EpoCore	1)čištění plazma 20 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)plazma 3 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 7)EpoCore-500ot./min.,5 min. 8)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 9)litograf 11:53 s exp. 10)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 11)vývojka 7 min., oplach IPA,DeMi voda
634	4"Si	EpoClad/EpoCore	1)čištění plazma 20 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)plazma 2 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 7)EpoCore-500ot./min.,5 min. 8)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 9)litograf 9:25 s exp. 10)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 11)vývojka 9 min., oplach IPA,DeMi voda
635	4"Si/TOPAS (135 μm)	EpoClad/EpoCore	1)plazma 3 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)EpoCore-400 ot./min.,5 min. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)litograf 14:36 s exp. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 9 min. s, oplach IPA,DeMi voda

číslo vzorku	substrát	vlnovodná vrstva	výroba
636	4"Si/TOPAS (135 μm)	EpoClad/EpoCore	1)plazma 3 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)EpoCore-500 ot./min.,5 min. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)litograf 12 min. exp. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 7 min. s, oplach IPA,DeMi voda
637	4"Si/TOPAS (135 μm)	EpoClad/EpoCore	1)plazma 3 min.,O ₂ -20ml/min.,200W 2)EpoClad-1000ot./min.,5min. 3)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 4)UV 2min.(nehty) 5)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 6)EpoCore-600 ot./min.,5 min. 7)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 8)litograf 16:22 s exp. 9)plotna 50°C-10 min.→90°C-10 min. 12)vývojka 7 min. s, oplach IPA,DeMi voda

Příloha C

Seznam všech vyrobených vzorků

Datum	Vzorek	Substrát	Vlnovodná vrstva	Poznámka
16.9.2015	534A	Sklo Kozák	EpoCore	Měření transmise
	534B	Sklo Kozák	EpoCore	Měření transmise
	535	Si/SiO ₂	EpoCore	Měření transmise
	536A	Sklo Kozák	EpoClad	Měření transmise
	536B	Sklo Kozák	EpoClad	Měření transmise
	537	Si/SiO ₂	EpoClad	Měření transmise
23.9.2016	549	Si 4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	550	Sklo Kozák	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	551	Sklo Kozák	EpoClad	Litografie Brno
30.9.2015	554	FR4	EpoClad, Epocore	7.10.2015. EpoCore
	555	FR4	EpoClad	
	556	FR4	EpoClad, Epocore	7.10.2015. EpoCore
	557	FR4	EpoClad	
7.10.2015	564	FR4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	565	FR4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	566	FR4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	567	FR4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
14.10.2015	570	Pyralux (Si/LPCVD)	Primer, Epoclad, Epocore	Litografie Brno
	571	Pyralux Si	Primer, Epoclad, Epocore	Litografie Brno
	572	FR4tl.0.1(Si/LPCVD)	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	573	Pyralux	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	574	Pyralux	EpoClad, Epocore	Metricon
	575	FR4.tl.0.1	EpoClad, Epocore	Metricon
	576	Pyralux Si	Primer, Epoclad, Epocore	Metricon
	577	FR4 Si	Primer, Epoclad, Epocore	Metricon
15.10.2015	578	Sklo Kozák	EpoCore	Metricon
	579	Sklo Kozák	EpoCore	Metricon
	580a, b	Sklo tenké plab	EpoCore	Metricon
4.11.2015	581a, b	Si-2x2cm	EpoClad	Litograf FEL
	582a, b	Si/SiO ₂ 2x2cm	EpoClad	Litograf FEL
	583	Si-2x2cm	EpoCore	Litograf FEL
	584	Si/SiO ₂ 2x2cm	EpoCore	Litograf FEL
	585	Si-2x2cm	EpoCore	Litograf FEL
	586	Si/SiO ₂ 2x2cm	EpoCore	Litograf FEL
5.11.2015	587	Si- 4"	EpoClad	Litografie Brno
	588	Si- 4"	EpoClad	Litografie Brno
	589	Si/SiO ₂ - 4"	EpoCore	Litografie Brno
	590	Si/SiO ₂ - 4"	EpoCore	Litografie Brno
6.11.2015	591	Si- 4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	592	Si- 4"	EpoCore	Litografie Brno
25.11.2015	599	Si- 4"	EpoCore	Litografie Brno
	600	Si- 4"	EpoCore	Litografie Brno
	601	Si- 4"	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
30.11.2015	602	Si-2x2cm	Su8-50	Litograf FEL
	603	Si-2x2cm	Su8-50	Litograf FEL
	604	Si-2x2cm	Su8-50	Litograf FEL
	605	Si/SiO ₂	Su8-50	Litograf FEL

	606	Si/SiO ₂	Su8-50	Litograf FEL
	607	Si/SiO ₂	Su8-50	Litograf FEL
1.12.2015	608	Si- 4"	Su8-50	Litografie Brno
	609	Si- 4"	Su8-50	Litografie Brno
	610	Si/SiO ₂ - 4"	Su8-50	Litografie Brno
	611	Si/SiO ₂ - 4"	Su8-50	Litografie Brno
2.12.2015	612	Si/TOPAS	EpoCore	Meticon
	613	Si/TOPAS	EpoClad, Epocore	Meticon
4.12.2015	614	Si- 4"/TOPAS	EpoCore	Litografie Brno
	615	Si- 4"/TOPAS	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	616	Si/SiO ₂	EpoCore	Litografie Brno
	617	Si/SiO ₂	Su8-50	Litografie Brno
11.12.2015	625	Si/SiO ₂ - 4" (1/2 substrátu)	Su8-50	Meticon
	626	Si -3"/TOPAS	Su8-50	Meticon
	627	Si-3"/TOPAS	EpoCore	Meticon
	628	Si- 4"/TOPAS	EpoClad, Epocore	Meticon
16.12.2015	629	Si/SiO ₂ HIPOX-4"	Su8-50	Litografie Brno
	630	Si/TOPAS (300µm)	Su8-50	Litografie Brno
	631	Si/TOPAS (300µm)	Su8-50	Litografie Brno
	632	Si/SiO ₂ (ABB)	EpoCore	Litografie Brno
	633	Si	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	634	Si	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	635	Si/TOPAS (135µm)	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	636	Si/TOPAS (135µm)	EpoClad, Epocore	Litografie Brno
	637	Si/TOPAS (135µm)	EpoClad, Epocore	Litografie Brno

Užitný vzor

UŽITNÝ VZOR

(19)
ČESKA
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLŮVĚHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2014-29383**
(22) Přihlášeno: **26.03.2014**
(47) Zapsáno: **26.05.2014**

(11) Číslo dokumentu:

26 976

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

G02B 6/125 (2006.01)
G02B 6/14 (2006.01)
G02B 6/00 (2006.01)

- (73) Majitel:
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Praha, CZ
- (72) Původce:
Ing. Václav Prajzler, Ph.D., Praha, CZ
Bc. Miloš Neruda, Rosice, CZ
doc. Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc., Praha, CZ
- (74) Zástupce:
ČVUT v Praze
Rektorát - Patentové středisko, Ing. Hana Dušková,
Na Kočově 180, 281 03 Chotutice

- (54) Název užitného vzoru:
Optická planární mnohavidová rozbočnice

CZ 26976 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitného vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Optická planární mnohavidová rozbočnice

Oblast techniky

Předkládaná topologie optické mnohavidové rozbočnice se skokovou změnou indexu lomu řeší problém rozdělení optického signálu z jednoho vstupního mnohavidového vlnovodu do dvou výstupních mnohavidových vlnovodů.

Dosavadní stav techniky

Pro přenos optického signálu na velké vzdálenosti se používají v páteřních sítích křemenná optická jednovidová vlákna, jejichž geometrický rozměr jádro/plášť je 4/125 μm nebo 9/125 μm , nebo mnohavidová vlákna s geometrickými rozměry 50/125 μm nebo 62,5/125 μm . Telekomunikační optické systémy používají zpravidla pracovní vlnové délky 850 nm, takzvané první telekomunikační okno. Systémy využívající první telekomunikační okno jsou určeny pro méně náročný přenos dat, a to jak po ekonomické, tak i technické stránce, který probíhá na kratší vzdálenosti s nižším objemem přenášených dat. V páteřních sítích se používají vlnové délky 1310 nm, tzv. druhé telekomunikační okno, kdy křemenná vlákna mají nejmenší disperzi, nebo pak vlnové délky 1550 nm, tzv. třetí telekomunikační okno, kdy křemenné vlákna mají nejnižší optický útlum.

Planární vlnovody se používají pro distribuci a zpracování signálů z optických vláken na vzdálenosti maximálně několik centimetrů a základní planární fotonickou strukturou, která je používaná ve všech optických sítích je optická Y rozbočnice, která slouží k rozdělení optických signálů z jednoho vstupního do dvou nebo více výstupních vlnovodů, a to jak pro jednovidové, tak mnohavidové vlnovody.

Jsou známá řešení struktur optických jednovidových planárních rozbočnic s gradientním indexem lomu vyrobených pomocí iontové výměny do skleněných podložek nebo do optických krystalů. Byly také vyrobeny odbočnice na bázi polovodičů nebo z polymerních materiálů. Topologie těchto rozbočnic spočívá v rozdělení optického signálu pomocí vlnovodů ve tvaru Y. Jsou známá také řešení planárních mnohavidových rozbočnic se skokovou změnou indexu lomu, které umožní připojení optického signálu pomocí standardních POF vláken. Plastic Optical Fiber s rozměrem 900/1000 μm . Byly popsány struktury, které používají podložky z polymeru Polymethylmethakrylátu (PMMA) ($n_s = 1,49$ index lomu podložky a horní krycí vrstvy PMMA pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm, vlnová délka) a vlnovodná vrstva je z různých druhů polymeru Norland Optical Adhesive (NOA) ($n_f = 1,51-1,56$ index lomu vlnovodné vrstvy NOA pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm). Dále byla popsána struktura, kdy byla opět použita podložka z polymeru PMMA ($n_s = 1,49$ index lomu podložky PMMA pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm) a vlnovodná vrstva pak byla z polymeru z epoxidové pryskyřice ($n_f = 1,58$ index lomu vlnovodné vrstvy pro vlnovou délku $\lambda = 650$ nm).

Dále je známo řešení rozdělení optického výkonu dle užitého vzoru CZ 25538, kde rozdělení optického výkonu z jednoho vstupního POF vláknového vlnovodu do dvou výstupních vláknových POF vlnovodů je provedeno pomocí vlnovodné struktury se vstupním kanálkovým vlnovodem a taperovaným kanálkovým vlnovodem rozšiřujícím se ve směru šíření optického signálu a vyústěným do levého a pravého kanálkového vlnovodu ve tvaru S. Na konci levého i pravého kanálkového vlnovodu jsou vloženy první a druhý výstupní POF vláknový vlnovod. Je i známo řešení dle užitého vzoru CZ 25535 a vynálezu CZ 304236, kde symetrické rozdělení planární rozbočnice s jedním vstupním a třemi výstupními POF vlákny je dosaženo vložением obdélníkové oblasti do taperované části planární rozbočnice.

Je také známé řešení optické mnohavidové polymerní rozbočnice se skokovou změnou indexu lomu, která byla publikována N. Bamiedakis et al.: IEEE J. of Quant. Elec., vol. 45, no. 4, 2009 a umožní připojení optických vláken s rozměrem 50/125 μm . Tato rozbočnice byla vyrobena z polymeru Siloxane OE-4140 pomocí fotolitografického procesu na skleněném substrátu.

Nevýhodou výše zmíněných rozbočnic je, že neumožňují realizaci optických rozbočnic s menší délkou optické rozbočnice a tedy mají vyšší vložné optické ztráty.

Dále je známá struktura, která byla popsána Y. Gao et al.: Chin. Phys. Lett., vol. 25, no. 8, 2008. Jedná se o strukturu s gradientním indexem lomu, která byla vyrobena jednostupňovou iontovou výměnou do skleněného substrátu pro vlnovody s rozměrem 50/125 μm , kde rozdělení optického signálu bylo realizováno pomocí dvojitého kuželovitého modového scrambleru. Tato realizace, umožňuje symetrické rozdělení optického výkonu, ale účinnost rozdělení optického signálu do výstupních vlnovodů je menší než v případě struktury se skokovou změnou indexu lomu. Toto je způsobeno vzájemným přeléváním energie mezi jednotlivými mody, ze kterých je optický signál složen, kdy dochází k uniknutí energie na rozhraní mezi vlnovodnou vrstvou a vzduchem.

Podstata technického řešení

Výše uvedené nedostatky odstraňuje řešení optické rozbočnice s dojitým kuželovitým modovým scramblerem podle předkládaného řešení. Tato optická planární mnohavidová rozbočnice je tvořena vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem, který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu. Planární vlnovodnou strukturu tvoří vstupní kanálkový vlnovod, který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru, za kterým následuje taperovaný kanálkový vlnovod. Taperovaný kanálkový vlnovod se rozšiřuje ve směru šíření optického signálu a je vyústěn do levého a do pravého kanálkového vlnovodu. Na tuto planární vlnovodnou strukturu je navázán na konci levého kanálkového vlnovodu první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod, a na konci pravého kanálkového vlnovodu druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod. Optická planární mnohavidová rozbočnice je většinou opatřena horní krycí vrstvou, zejména z důvodu, aby nedošlo při manipulaci k poškození planární vlnovodné struktury. Hodnota indexu lomu horní krycí vrstvy i substrátu je vždy nižší než hodnota indexu lomu vrstvy tvořící planární vlnovodnou strukturu. Podstatou nového řešení je, že planární vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

Jako materiál se skokovou změnou indexu lomu pro vlnovodnou strukturu je výhodné použít polymerní epoxidovou pryskyřici Epoxy Novolak Resin, dále jen ENR.

Je výhodné, jsou-li i vláknový vlnovod a první a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

Podstatou nového řešení je, že rozdělení optického signálu je provedeno pomocí dvojitého kuželovitého modového scrambleru se skokovou změnou indexu lomu, který je doplněn o taperovaný rozšiřující se vlnovod ve směru šíření optického signálu.

Geometrické rozměry dvojitého kuželovitého modového scrambleru a taperovaného kanálkového vlnovodu jsou pro danou vlnovodnou strukturu funkcí indexu lomu užitého substrátu SiO_2 , indexu lomu vlnovodné vrstvy z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, indexu lomu krycí vrstvy a použité pracovní vlnové délky. Geometrické rozměry jsou pro tuto vlnovodnou strukturu určeny počítačovou simulací.

Výhodou nového řešení je, že správným zvolením rozměrů dvojitého kuželovitého modového scrambleru a taperovaného vlnovodu lze dosáhnout symetrického rozbočení optického signálu u mnohavidových vlnovodů při použití optické odbočnice s menšími rozměry než u rozbočnice tvaru Y. Toto je způsobeno tím, že dvojitý kuželovitý modový scrambler umožní optimalizovat rozložení elektromagnetického pole jednotlivých módů, pro optimální rozdělení optického signálu do výstupních vlnovodů a díky tomu lze realizovat kvalitní optické planární symetrické rozbočnice s menšími rozměry.

Objasnění výkresů

Nové řešení bude dále popsáno pomocí příložených výkresů. Na Obr. 1 je uvedeno topologické schéma struktury rozbočnice. Příklad řešení optimalizované struktury s vstupními/výstupními

mnohavidovými vlnovody navrženým na SiO_2 substrátu a vlnovodnou vrstvou z polymerní epoxidové pryskyřice ENR je uveden na Obr. 2a a Obr. 2b. Na Obr. 2a je uvedeno rozložení indexu lomu navržené struktury z pohledu shora a na Obr. 2b je pak uvedeno šíření optického signálu strukturou.

5 Příklady uskutečnění technického řešení

Obecně se optické planární vlnovody skládají z planární vlnovodné vrstvy, substrátu a horní krycí vrstvy. Aby optický signál byl veden vlnovodnou vrstvou, tak hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy musí být vyšší než hodnota indexu substrátu i než hodnota indexu lomu krycí vrstvy. V uvedeném příkladu, Obr. 1, je substrát 3 tvořen z SiO_2 a jako planární vlnovodná vrstva je použita polymerní epoxidová pryskyřice ENR. Horní krycí vrstva, která není na výkrese znázorněná, může být tvořena například polymerem PMMA, Polymethylmethakrylát. Tato horní krycí vrstva může být i z jiného materiálu, ale vždy musí mít menší hodnotu indexu lomu než má polymerní epoxidová pryskyřice ENR. Je nutné podotknout, že rozbočnice bude fungovat i když tam nebude krycí vrstva, protože hodnota indexu lomu vzduchu je 1 a to je vždy méně, než je hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy. Horní krycí vrstva má v tomto případě spíše charakter ochranné vrstvy, aby nedošlo k poškození vlnovodné vrstvy při manipulaci. Pro vlnovou délku 1550 nm má vrstva polymerní epoxidové pryskyřice ENR hodnotu indexu lomu $n_f = 1,567$ a hodnota indexu lomu n_s vrstvy SiO_2 je 1,443, a tedy index lomu vlnovodné vrstvy polymerní epoxidové pryskyřice ENR je vyšší než hodnota indexu lomu SiO_2 . To znamená, že požadovaná podmínka pro optický vlnovod je splněna.

Topologické schéma optické planární mnohavidové rozbočnice je uvedeno na přiloženém výkrese na Obr. 1. Tato planární mnohavidová rozbočnice je tvořena vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1, který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu 3, který je v uvedeném příkladu z SiO_2 . Planární vlnovodnou strukturu tvoří vstupní kanálkový vlnovod 2, který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru 4. Za dvojitým kuželovitým modovým scramblerem 4 následuje taperovaný kanálkový vlnovod 5 rozšiřující se ve směru šíření optického signálu, který je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu 6 a do pravého kanálkového vlnovodu 7. Na konci levého kanálkového vlnovodu 6 je umístěn první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8, a na konci pravého kanálkového vlnovodu 7 je druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9. Celá planární vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu, zde vrstvou polymerní epoxidové pryskyřice ENR vytvořenou na substrátu 3 SiO_2 . V uvedeném příkladu byly jako vstupní mnohavidový vláknový vlnovod 1, první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8 a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9 použity standardní vláknové optické vlnovody se skokovou změnou indexu lomu s rozměrem 50/125 μm nebo 62,5/125 μm jádro/plášť. Toto provedení je výhodné, ale bylo by možné vstupní mnohavidový vláknový vlnovod 1, první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8 a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9 realizovat i s gradientní změnou indexu lomu, což by ale vedlo ke zvýšení optického útlumu z důvodu špatnému přizpůsobení elektromagnetického pole na rozhraní optického vlnovodu se skokovou a gradientní změnou indexu lomu.

Rozměry optické planární mnohavidové rozbočnice byly navrženy pomocí specializovaného softwaru. Pro návrh byl použit software BeamPROPTM, který pro výpočet využívá metodu šíření optické svazku. BPM Beam Propagation Method.

Příklad optimalizované struktury převzaté ze simulačního programu BeamPROPTM, je uveden na Obr. 2a a na Obr. 2b. Na Obr. 2a je uveden profil indexu lomu navržené struktury v pohledu shora, kde hodnota 1,443 je index lomu substrátu 3 z materiálu SiO_2 a hodnota 1,567 je index lomu vlnovodné vrstvy polymerní epoxidové pryskyřice ENR pro vlnovou délku 1550 nm. Na Obr. 2b je pak uvedeno šíření optického signálu ve struktuře.

Na Obr. 2b plná čára označená v legendě římskou číslicí I odpovídá optickému signálu, který se šíří vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1 a dále vstupním kanálkovým vlnovodem

2 tvořeným polymerní epoxidovou pryskyřicí ENR na substrátu 3 z SiO₂. Signál se dále šíří přes dvojitý kuželovitý modový scrambler 4 z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, který pokračuje přes rozšiřující se taperovaný vlnovod 5, který je opět z polymerní epoxidové pryskyřice ENR a je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu 6 tvořeného polymerní epoxidovou pryskyřicí ENR. Signál je potom veden do prvního 8 mnohavidového vláknového vlnovodu.

Čárkovaná čára označená v legendě na Obr. 2b římskou číslicí II odpovídá optickému signálu, který se šíří vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1 a dále vstupním kanálkovým vlnovodem 2 tvořeným vrstvou polymerní epoxidové pryskyřice ENR na substrátu 3 SiO₂. Signál se dále šíří přes dojitý kuželovitý modový scrambler 4, do taperovaného kanálkového vlnovodu 5 z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, který se rozšiřuje ve směru šíření optického signálu a je vyústěn do pravého kanálkového vlnovodu 7 tvořeného opět z vlnovodné vrstvy z polymerní epoxidové pryskyřice ENR. Na konci pravého kanálkového vlnovodu 7 je vložen druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9. Z Obr. 2b vyplývá, že signál, který vstupuje do popisované mnohavidové rozbočnice, je po průchodu kuželovitým modovým scramblerem 4 a taperovaným kanálkovým vlnovodem 5 symetricky rozdělen do levého kanálkového vlnovodu 6 a pravého kanálkového vlnovodu 7. Z Obr. 2b také vyplývá, že dojde k rozdělení 50 % energie do levého kanálkového vlnovodu 6 a 50 % energie do pravého kanálkového vlnovodu 7.

Průmyslová využitelnost

Předkládané řešení je využitelné pro rozdělení optického signálu, který přenáší datovou informaci pomocí jednoho mnohavidového optického vlákna se skokovou změnou indexu lomu do dvou výstupních mnohavidových vláken se skokovou změnou indexu lomu. Šířka spektra, které je možno danou strukturou přenést, je dána spektrální charakteristikou použitých vstupně/výstupních optických vláken a použitím materiálu, ze kterého je rozbočnice s dojitým kuželovitým modovým scramblerem realizována. Tohoto může být využito při distribuci optické signálu na kratší vzdálenosti v optických metropolitních sítích.

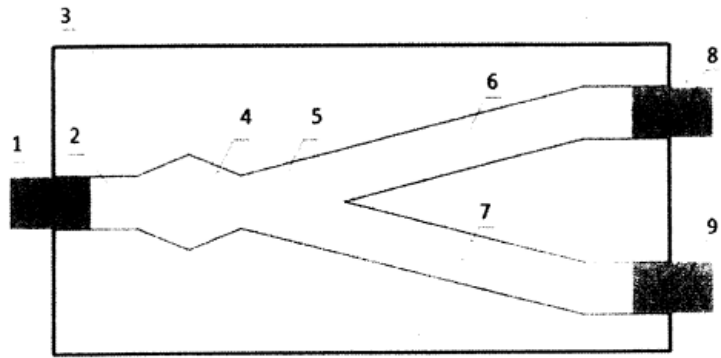
NÁROKY NA OCHRANU

1. Optická planární mnohavidová rozbočnice tvořená vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem (1), který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu (3), která se skládá ze vstupního kanálkového vlnovodu (2), který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru (4), za kterým následuje taperovaný kanálkový vlnovod (5) rozšiřující se ve směru šíření optického signálu, který je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu (6) a do pravého kanálkového vlnovodu (7), kde na tuto planární vlnovodnou strukturu je navázán na konci levého kanálkového vlnovodu (6) první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8), a na konci pravého kanálkového vlnovodu (7) druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9), přičemž tato optická planární mnohavidová rozbočnice je případně opatřena ochrannou horní krycí vrstvou, jejíž hodnota indexu lomu, jakož i hodnota indexu lomu substrátu (3) je nižší než hodnota indexu lomu vrstvy tvořící planární vlnovodnou strukturu, **vyznačující se tím**, že planární vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

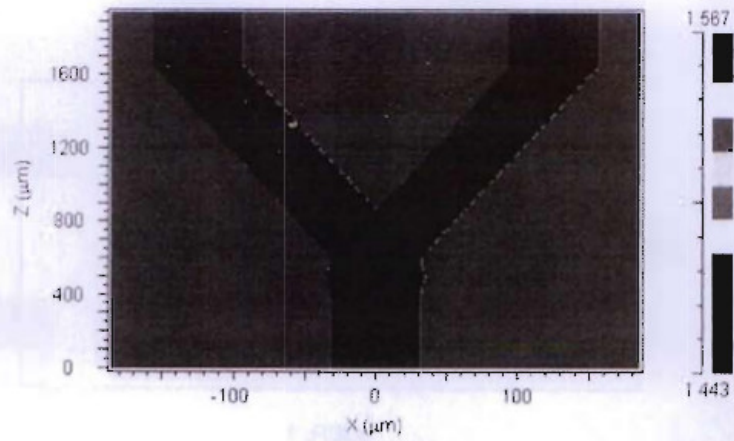
2. Optická planární mnohavidová rozbočnice podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že materiál se skokovou změnou indexu lomu tvořící vlnovodnou strukturu je polymerní epoxidová pryskyřice ENR.

3. Optická planární mnohavidová rozbočnice podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vláknový vlnovod (1), první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8) a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9) jsou z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

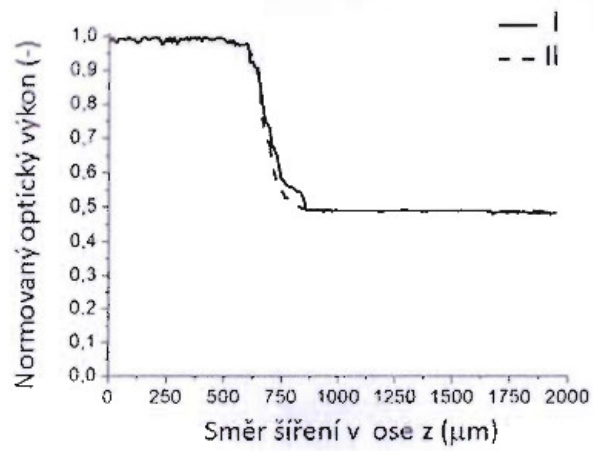
2 výkresy



OBR. 1



OBR. 2a



OBR. 2b

Konec dokumentu

Patentový spis

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

305 196

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

G02B 6/125 (2006.01)

G02B 6/14 (2006.01)

G02B 6/00 (2006.01)



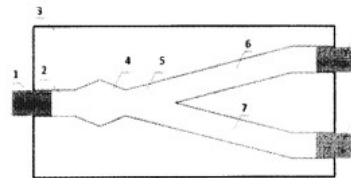
(21) Číslo přihlášky: **2014-189**
(22) Přihlášeno: **26.03.2014**
(40) Zveřejněno: **03.06.2015**
(Věstník č. 22/2015)
(47) Uděleno: **22.04.2015**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **03.06.2015**
(Věstník č. 22/2015)

(56) Relevantní dokumenty:
(Multimode-Waveguide-Based Optical Power Splitters in Glass, Gao Yang et al., Chinese Phys. Lett. vol. 25, no. 8), 19 March 2008; (Optická planární pasivní a aktivní fotonické struktury, Václav Prajzler, Habilitační práce, [on/line] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/18542/habilitace_Prajzler_2013.pdf?sequence=1) 2013.
CZ 25454 U1; CZ 25535 U1; CZ 25538 U1; WO 9732228 A1; WO 2008118177 A1; US 2012288278 A1; JP 2006039080 A.

(73) Majitel patentu:
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Praha 6, CZ

(72) Původce:
Ing. Václav Prajzler, Ph.D., Praha 13, CZ
Bc. Miloš Neruda, Rosice, CZ
doc. Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc., Praha 1, CZ

(74) Zástupce:
Ing. Hana Dušková, Na Kočově 180, 281 03
Chotutice



(54) Název vynálezu:
Optická planární mnohavidová rozbočnice

(57) Anotace:
Optická planární mnohavidová rozbočnice je tvořena vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem (1), který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu (3). Planární vlnovodnou strukturu tvoří vstupní kanálkový vlnovod (2), který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru (4), za kterým následuje taperovaný kanálkový vlnovod (5) rozšiřující se ve směru šíření optického signálu, který je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu (6) a do pravého kanálkového vlnovodu (7). Na planární vlnovodnou strukturu je navázán na konci levého kanálkového vlnovodu (6) první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8), a na konci pravého kanálkového vlnovodu (7) druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9). Optická planární mnohavidová rozbočnice může být opatřena horní krycí vrstvou, jejíž hodnota indexu lomu, jakož i hodnota indexu lomu substrátu (3) je nižší než hodnota indexu lomu vrstvy tvořící planární vlnovodnou strukturu. Vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu, s výhodou z polymerní epoxydové pryskyřice ENR. Je výhodné, jsou-li i vláknový vlnovod (1), první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8) a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9) z materiálu se

CZ 305196 B6

Optická planární mnohavidová rozbočnice

Oblast techniky

5 Předkládaná topologie optické mnohavidové rozbočnice se skokovou změnou indexu lomu řeší problém rozdělení optického signálu z jednoho vstupního mnohavidového vlnovodu do dvou výstupních mnohavidových vlnovodů.

Dosavadní stav techniky

10 Pro přenos optického signálu na velké vzdálenosti se používají v páteřních sítích křemenná optická jednovidová vlákna, jejichž geometrický rozměr jádro/plášť je 4/125 μm nebo 9/125 μm , nebo mnohavidová vlákna s geometrickými rozměry 50/125 μm nebo 62,5/125 μm . Telekomunikační optické systémy používají zpravidla pracovní vlnové délky 850 nm, takzvané první telekomunikační okno. Systémy využívající první telekomunikační okno jsou určeny pro méně náročný přenos dat, a to jak po ekonomické, tak i technické stránce, který probíhá na kratší vzdálenosti s nižším objemem přenášených dat. V páteřních sítích se používají vlnové délky 1310 nm, tzv. druhé telekomunikační okno, kdy křemenná vlákna mají nejmenší disperzi, nebo pak vlnové délky 1550 nm, tzv. třetí telekomunikační okno, kdy křemenné vlákna mají nejnižší optický útlum.

25 Planární vlnovody se používají pro distribuci a zpracování signálů z optických vláken na vzdálenosti maximálně několik centimetrů a základní planární fotonickou strukturou, která je používána ve všech optických sítích je optická Y rozbočnice, která slouží k rozdělení optických signálů z jednoho vstupního do dvou nebo více výstupních vlnovodů, a to jak pro jednovidové, tak mnohavidové vlnovody.

30 Jsou známá řešení struktur optických jednovidových planárních rozbočnic s gradientním indexem lomu vyrobených pomocí iontové výměny do skleněných podložek nebo do optických krystalů. Byly také vyrobeny odbočnice na bázi polovodičů nebo z polymerních materiálů. Topologie těchto rozbočnic spočívá v rozdělení optického signálu pomocí vlnovodů ve tvaru Y. Jsou známá také řešení planárních mnohavidových rozbočnic se skokovou změnou indexu lomu, které umožní připojení optického signálu pomocí standardních POF vláken. Plastic Optical Fiber s rozměrem 900/1000 μm . Byly popsány struktury, které používají podložky z polymeru Polymethylmethakrylátu (PMMA) ($n_s=1,49$ index lomu podložky a horní krycí vrstvy PMMA pro vlnovou délku $\lambda=650$ nm, vlnová délka) a vlnovodná vrstva je z různých druhů polymeru Norland Optical Adhesive (NOA) ($n_f=1,51-1,56$ index lomu vlnovodné vrstvy NOA pro vlnovou délku $\lambda=650$ nm). Dále byla popsána struktura, kdy byla opět použita podložka z polymeru PMMA ($n_s=1,49$ index lomu podložky PMMA pro vlnovou délku $\lambda=650$ nm) a vlnovodná vrstva pak byla z polymeru z epoxidové pryskyřice ($n_f=1,58$ index lomu vlnovodné vrstvy pro vlnovou délku $\lambda=650$ nm).

45 Dále je známo řešení rozdělení optického výkonu dle užitého vzoru CZ 25538, kde rozdělení optického výkonu z jednoho vstupního POF vláknového vlnovodu do dvou výstupních vláknových POF vlnovodů je provedeno pomocí vlnovodné struktury se vstupním kanálkovým vlnovodem a taperovaným kanálkovým vlnovodem rozšiřujícím se ve směru šíření optického signálu a vyústěným do levého a pravého kanálkového vlnovodu ve tvaru S. Na konci levého i pravého kanálkového vlnovodu jsou vloženy první a druhý výstupní POF vláknový vlnovod. Je i známo řešení dle užitého vzoru CZ 25535 a vynálezu CZ 304236, kde symetrické rozdělení planární rozbočnice s jedním vstupním a třemi výstupními POF vlákny je dosaženo vložením obdélníkové oblasti do taperované části planární rozbočnice.

Je také známé řešení optické mnohavidové polymerní rozbočnice se skokovou změnou indexu lomu, která byla publikována N. Bamiedakis et al.: IEEE J. of Quant. Ele., vol. 45, no. 4, 2009 a umožní připojení optických vláken s rozměrem 50/125 μm . Tato rozbočnice byla vyrobena z polymeru Siloxane OE-4140 pomocí fotolitografického procesu na skleněném substrátu.

5

Nevýhodou výše zmíněných rozbočnic je, že neumožňují realizaci optických rozbočnic s menší délkou optické rozbočnice a tedy mají vyšší vložné optické ztráty.

Dále je známá struktura, která byla popsána Y. Gao et al.: Chin. Phys. Lett., vol. 25, no. 8, 2008. Jedná se o strukturu s gradientním indexem lomu, která byla vyrobena jednostupňovou iontovou výměnou do skleněného substrátu pro vlnovody s rozměrem 50/125 μm , kde rozdělení optického signálu bylo realizováno pomocí dvojitého kuželovitého modového scrambleru. Tato realizace, umožňuje symetrické rozdělení optického výkonu, ale účinnost rozdělení optického signálu do výstupních vlnovodů je menší než v případě struktury se skokovou změnou indexu lomu. Toto je způsobeno vzájemným přeléváním energie mezi jednotlivými mody, ze kterých je optický signál složen, kdy dochází k uniku energie na rozhraní mezi vlnovodnou vrstvou a vzduchem.

Podstata vynálezu

20

Výše uvedené nedostatky odstraňuje řešení optické rozbočnice s dvojitým kuželovitým modovým scramblerem podle předkládaného řešení. Tato optická planární mnohavidová rozbočnice je tvořená vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem, který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu. Planární vlnovodnou strukturu tvoří vstupní kanálkový vlnovod, který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru, za kterým následuje taperovaný kanálkový vlnovod. Taperovaný kanálkový vlnovod se rozšiřuje ve směru šíření optického signálu a je vyústěn do levého a do pravého kanálkového vlnovodu. Na tuto planární vlnovodnou strukturu je navázán na konci levého kanálkového vlnovodu první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod, a na konci pravého kanálkového vlnovodu druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod. Optická planární mnohavidová rozbočnice je většinou opatřená horní krycí vrstvou, zejména z důvodu, aby nedošlo při manipulaci k poškození planární vlnovodné struktury. Hodnota indexu lomu horní krycí vrstvy i substrátu je vždy nižší než hodnota indexu lomu vrstvy tvořící planární vlnovodnou strukturu. Podstatou nového řešení je, že planární vlnovodná struktura je vytvořená z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

35

Jako materiál se skokovou změnou indexu lomu pro vlnovodnou strukturu je výhodné použít polymerní epoxidovou pryskyřici Epoxy Novolak Resin, dále jen ENR.

40

Je výhodné, jsou-li i vláknový vlnovod a první a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

Podstatou nového řešení je, že rozdělení optického signálu je provedeno pomocí dvojitého kuželovitého modového scrambleru se skokovou změnou indexu lomu, který je doplněn o taperovaný rozšiřující se vlnovod ve směru šíření optického signálu.

45

Geometrické rozměry dvojitého kuželovitého modového scrambleru a taperovaného kanálkového vlnovodu jsou pro danou vlnovodnou strukturu funkcí indexu lomu užitého substrátu SiO_2 , indexu lomu vlnovodné vrstvy z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, indexu lomu krycí vrstvy a použité pracovní vlnové délky. Geometrické rozměry jsou pro tuto vlnovodnou strukturu určeny počítačovou simulací.

50

Výhodou nového řešení je, že správným zvolením rozměrů dvojitého kuželovitého modového scrambleru a taperovaného vlnovodu lze dosáhnout symetrického rozbočení optického signálu

u mnohavidových vlnovodů při použití optické odbočnice s menšími rozměry než u rozbočnice tvaru Y. Toto je způsobeno tím, že dvojitý kuželovitý modový scrambler umožní optimalizovat rozložení elektromagnetické pole jednotlivých módů, pro optimální rozdělení optického signálu do výstupních vlnovodů a díky tomu lze realizovat kvalitní optické planární symetrické rozbočnice s menšími rozměry.

Objasnění výkresů

Nové řešení bude dále popsáno pomocí přiložených výkresů. Na Obr. 1 je uvedeno topologické schéma struktury rozbočnice. Příklad řešení optimalizované struktury s vstupními/výstupními mnohavidovými vlnovody navrženým na SiO₂ substrátu a vlnovodnou vrstvou z polymerní epoxidové pryskyřice ENR je uveden na Obr. 2a a Obr. 2b. Na Obr. 2a je uvedeno rozložení indexu lomu navržené struktury z pohledu shora a na Obr. 2b je pak uvedeno šíření optického signálu strukturou.

Příklady uskutečnění vynálezu

Obecně se optické planární vlnovody skládají z planární vlnovodné vrstvy, substrátu a horní krycí vrstvy. Aby optický signál byl veden vlnovodnou vrstvou, tak hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy musí být vyšší než hodnota indexu substrátu i než hodnota indexu lomu krycí vrstvy. V uvedeném příkladu, Obr. 1, je substrát 3 tvořen z SiO₂ a jako planární vlnovodná vrstva je použita polymerní epoxidová pryskyřice ENR. Horní krycí vrstva, která není na výkrese znázorněná, může být tvořena například polymerem PMMA, Polymethylmethakrylát. Tato horní krycí vrstva může být i z jiného materiálu, ale vždy musí mít menší hodnotu indexu lomu než má polymerní epoxidová pryskyřice ENR. Je nutné podotknout, že rozbočnice bude fungovat i když tam nebude krycí vrstva, protože hodnota indexu lomu vzduchu je 1 a to je vždy méně, než je hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy. Horní krycí vrstva má v tomto případě spíše charakter ochranné vrstvy, aby nedošlo k poškození vlnovodné vrstvy při manipulaci. Pro vlnovod délku 1550 nm má vrstva polymerní epoxidové pryskyřice ENR hodnotu indexu lomu $n_f = 1,567$ a hodnota indexu lomu n_s vrstvy SiO₂ je 1,443, a tedy index lomu vlnovodné vrstvy polymerní epoxidové pryskyřice ENR je vyšší než hodnota indexu lomu SiO₂. To znamená, že požadovaná podmínka pro optický vlnovod je splněna.

Topologické schéma optické planární mnohavidové rozbočnice je uvedeno na přiloženém výkrese na Obr. 1. Tato planární mnohavidová rozbočnice je tvořena vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1, který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu 3, který je v uvedeném příkladu z SiO₂. Planární vlnovodnou strukturu tvoří vstupní kanálkový vlnovod 2, který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru 4. Za dvojitým kuželovitým modovým scramblerem 4 následuje taperovaný kanálkový vlnovod 5 rozšiřující se ve směru šíření optického signálu, který je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu 6 a do pravého kanálkového vlnovodu 7. Na konci levého kanálkového vlnovodu 6 je umístěn první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8, a na konci pravého kanálkového vlnovodu 7 je druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9. Celá planární vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu, zde vrstvou polymerní epoxidové pryskyřice ENR vytvořenou na substrátu 3 SiO₂. V uvedeném příkladu byly jako vstupní mnohavidový vláknový vlnovod 1, první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8 a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9 použity standardní vláknové optické vlnovody se skokovou změnou indexu lomu s rozměrem 50/125 μm nebo 62,5/125 μm jádro/plášť. Toto provedení je výhodné, ale bylo by možné vstupní mnohavidový vláknový vlnovod 1, první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 8 a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9 realizovat i s gradientní změnou indexu lomu, což by ale vedlo ke zvýšení optického útlumu z důvodu špatnému přizpůsobení

elektromagnetického pole na rozhraní optického vlnovodu se skokovou a gradientní změnou indexu lomu.

5 Rozměry optické planární mnohavidové rozbočnice byly navrženy pomocí specializovaného softwaru. Pro návrh byl použit software BeamPROPTM, který pro výpočet využívá metodu šíření optické svazku. BPM Beam Propagation Method.

Příklad optimalizované struktury převzaté ze simulačního programu BeamPROPTM, je uveden na Obr. 2a a na Obr. 2b. Na Obr. 2a je uveden profil indexu lomu navržené struktury v pohledu shora, kde hodnota 1,443 je index lomu substrátu 3 z materiálu SiO₂ a hodnota 1,567 je index lomu vlnovodné vrstvy polymerní epoxidové pryskyřice ENR pro vlnovou délku 1550 nm. Na Obr. 2b je pak uvedeno šíření optického signálu ve struktuře.

15 Na Obr. 2b plná čára označená v legendě římskou číslicí I odpovídá optickému signálu, který se šíří vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1 a dále vstupním kanálkovým vlnovodem 2 tvořeným polymerní epoxidovou pryskyřicí ENR na substrátu 3 z SiO₂. Signál se dále šíří přes dvojité kuželovité modový scrambler 4 z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, který pokračuje přes rozšiřující se taperovaný vlnovod 5, který je opět z polymerní epoxidové pryskyřice ENR a je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu 6 tvořeného polymerní epoxidovou pryskyřicí ENR. Signál je potom veden do prvního 8 mnohavidového vláknového vlnovodu.

25 Čárkovaná čára označená v legendě na Obr. 2b římskou číslicí II odpovídá optickému signálu, který se šíří vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem 1 a dále vstupním kanálkovým vlnovodem 2 tvořeným vrstvou polymerní epoxidové pryskyřice ENR na substrátu 3 SiO₂. Signál se dále šíří přes dvojité kuželovité modový scrambler 4, do taperovaného kanálkového vlnovodu 5 z polymerní epoxidové pryskyřice ENR, který se rozšiřuje ve směru šíření optického signálu a je vyústěn do pravého kanálkového vlnovodu 7 tvořeného opět z vlnovodné vrstvy z polymerní epoxidové pryskyřice ENR. Na konci pravého kanálkového vlnovodu 7 je vložen druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod 9. Z Obr. 2b vyplývá, že signál, který vstupuje do popisované mnohavidové rozbočnice, je po průchodu kuželovitým modovým scramblerem 4 a taperovaným kanálkovým vlnovodem 5 symetricky rozdělen do levého kanálkového vlnovodu 6 a pravého kanálkového vlnovodu 7. Z Obr. 2b také vyplývá, že dojde k rozdělení 50 % energie do levého kanálkového vlnovodu 6 a 50 % energie do pravého kanálkového vlnovodu 7.

35

Průmyslová využitelnost

Předkládané řešení je využitelné pro rozdělení optického signálu, který přenáší datovou informaci pomocí jednoho mnohavidového optického vlákna se skokovou změnou indexu lomu do dvou výstupních mnohavidových vláken se skokovou změnou indexu lomu. Šířka spektra, které je možno danou strukturou přenést, je dána spektrální charakteristikou použitých vstupně/výstupních optických vláken a použitím materiálu, ze které je rozbočnice s dojitým kuželovitým modovým scramblerem realizována. Tohoto může být využito při distribuci optické signálu na kratší vzdálenosti v optických metropolitních sítích.

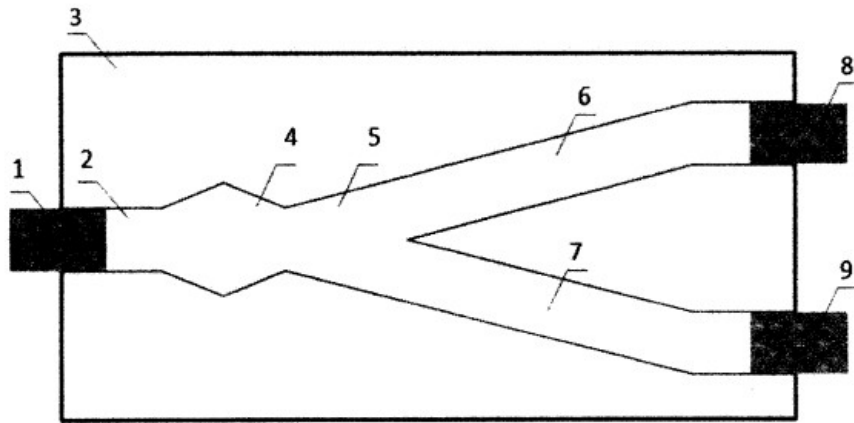
45

PATENTOVÉ NÁROKY

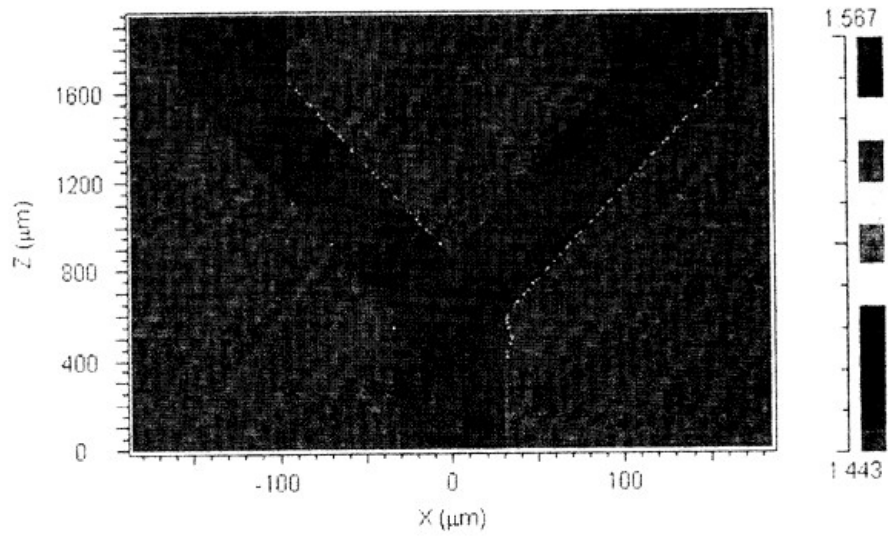
- 5 1. Optická planární mnohavidová rozbočnice tvořená vstupním mnohavidovým vláknovým vlnovodem (1), který je připojený na planární vlnovodnou strukturu vytvořenou na substrátu (3), která se skládá ze vstupního kanálkového vlnovodu (2), který je vyústěn do dvojitého kuželovitého modového scrambleru (4), za kterým následuje taperovaný kanálkový vlnovod (5) rozšiřující se ve směru šíření optického signálu, který je vyústěn do levého kanálkového vlnovodu (6) a do
10 pravého kanálkového vlnovodu (7), kde na tuto planární vlnovodnou strukturu je navázán na konci levého kanálkového vlnovodu (6) první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8), a na konci pravého kanálkového vlnovodu (7) druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9), přičemž tato optická planární mnohavidová rozbočnice je případně opatřena ochrannou horní krycí vrstvou, jejíž hodnota indexu lomu, jakož i hodnota indexu lomu substrátu (3) je nižší než
15 hodnota indexu lomu vrstvy tvořící planární vlnovodnou strukturu, **vyznačující se tím**, že planární vlnovodná struktura je vytvořena z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.
- 20 2. Optická planární mnohavidová rozbočnice podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že materiál se skokovou změnou indexu lomu tvořící vlnovodnou strukturu je polymerní epoxidová pryskyřice ENR.
- 25 3. Optická planární mnohavidová rozbočnice podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vláknový vlnovod (1), první výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (8) a druhý výstupní mnohavidový vláknový vlnovod (9) jsou z materiálu se skokovou změnou indexu lomu.

30

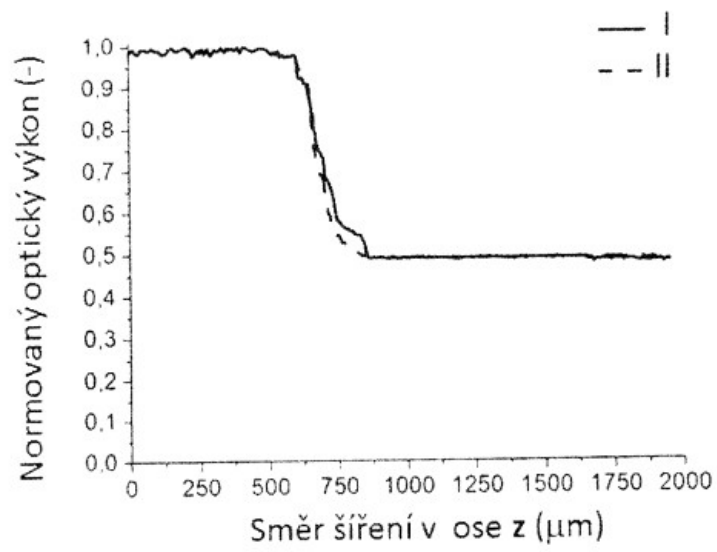
2 výkresy



OBR. 1



OBR. 2a



OBR. 2b

Konec dokumentu