

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Disertační práce

srpen, 2018

Ondřej Barkman

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



Nové opticky aktivní struktury
realizované na vlnovodu s gradientním
profilem indexu lomu

Disertační práce

Ing. Ondřej Barkman

Praha, srpen, 2018

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronika

Školitel: Doc. Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS



New optically active structures with graded refractive index profile

Doctoral thesis

Ing. Ondřej Barkman

Prague, August, 2018

Ph.D Programme: Electrical Engineering and Information Technology

Branch of study: Electronics

Supervisor: Doc. Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a v předložené práci důsledně citoval použitou literaturu.

V Praze dne 31.8.2018

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému školiteli, doc. Ing. Vítězslavu Jeřábkovi, CSc., za podporu během celého doktorandského studia a připomínky a korekci a motivaci k sepsání disertační práce. Dále bych na tomto místě rád vyjádřil své poděkování:

doc. Ing. Pavle Nekvindové, Ph.D. za dlouholetou spolupráci při vývoji a výzkumu technologie iontové výměny, cenné konzultace a inspirativní přístup k vědě, Wilhelmu Quittnerovi, který pro většinu provedených experimentů umožnil využívat technologické zázemí firmy SQS Vlákno optika a.s., kolektivu firmy SQS Vlákno optika za všeobecnou podporu při přípravě vzorků a vzniku disertační práce, doc. Ing. Václavu Prajzlerovi Ph.D., za jeho podporu a motivaci v začátcích doktorandského studia a Ing. Matěji Komancovi, Ph.D. za konzultace a korekce publikační činnosti.

Největší poděkování však patří mé rodině, především manželce Anetě za nesmírnou osobní podporu, bez které by tato práce nemohla být realizována.

Abstrakt

Tato disertační práce je zaměřená na studium optických struktur zhotovených technologií iontové výměny do substrátů silikátových skel. Cílem práce je návrh a realizace nových struktur s gradientním indexem lomu na substrátu dopovaném prvky vzácných zemin a zinkem a prokázání jejich optické aktivity.

První část práce je zaměřena na návrh a realizaci pasivních struktur optických kanálkových vlnodů realizovaných jednostupňovou a dvoustupňovou iontovou výměnou. Nejprve byly vytvořeny planární vrstevné vlnovody s gradientním indexem lomu. K přípravě vzorků byla použita jednostupňová iontová výměna $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$. Z výsledů studia těchto vlnodů byly odvozeny materiálové konstanty a stanoven profil indexu lomu nezanořeného a zanořeného kanálkového vlnovodu. Při simulacích šíření optického svazku byla využita metoda BPM.

Práce se dále zabývá návrhem a realizací pasivních optických výkonových rozbočnic s Y-větvením a rozbočnic pracujících na principu mnohavidové interference. Při numerických simulacích šíření optického signálu strukturami rozbočnic byly použity modely kanálkových vlnodů vytvořené v předchozí části práce. Navržené struktury rozbočnic byly realizovány a dosažené experimentální výsledky porovnány s výsledky simulací.

V druhé části práce je výzkum zaměřen na opticky aktivní kanálkové vlnovody zhotovené na nových typech silikátových sklovin dopovaných prvky vzácných zemin a zinkem. Nejprve byla studována silikátová skla GZ4 s obsahem erbia a ytterbia a stanoven nejvýhodnější vzájemný poměr těchto prvků s ohledem na jejich luminiscenční vlastnosti. Následně byly provedeny tři tavby skloviny GZ4 s podílem 0,25 at. % erbia 5at. % ytterbia a podíly zinku 4,0 at. %, 4,8 at. % a 5,6 at. % zinku. Tyto tři skloviny byly vyhodnoceny jako nejvhodnější materiály pro konstrukci integrovaných zesilovačů v oblasti telekomunikačního pásma 1530nm – 1565nm. Následně byly připraveny vzorky aktivních kanálkových vlnodů a aktivní optické planární rozbočnice s dělicím poměrem 1x2. Difuzní profily realizovaných vzorků byly analyzovány mikrosondou EMA a porovnány s výsledky měření rozložení vidového pole. Následně byly měřeny zesilovací vlastnosti navržených struktur a vyhodnocen jejich diferenciální zisk.

V disertační práci byl úspěšně prokázán zisk u aktivní kanálkových vlnodů a především pak ve struktuře optické rozbočnice 1x2. Po optimalizaci difuzního profilu může koncept aktivní optické rozbočnice zcela eliminovat její vložený útlum.

Klíčová slova: Iontová výměna, difuzní kanálkový vlnod, optická aktivní rozbočnice, integrovaný optický zesilovač, erbiem dopovaný vlnodný zesilovač

Abstract

This dissertation thesis is focused on the study of optical structures formed by the ion-exchange technology into silicate glass substrates. The aim of the thesis is the design and realization of novel structures with graded-index profile in a substrate doped by rare-earth ions and Zinc and verification of their optical activity.

First part of the thesis focuses on the design and formation of passive optical channel waveguide structures realized by one- and two-step ion-exchange. At first planar graded-index waveguides were formed. For their preparation one-step ion-exchange of $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ and $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ was used. Based on the study of abovementioned waveguides, material constants were derived and refractive index profile was estimated for an unburied and buried channel waveguide. For simulations of optical beam propagation the BPM method was implemented.

Waveguide properties were measured by optical mode spectroscopy. Obtained data were used for further design and modeling of single mode channel waveguide and subsequently for the design of 1 to 3 multimode interference power splitter in order to improve simulation accuracy. Designs were developed by utilizing finite difference beam propagation method.

The thesis then focuses on the design and realization of passive optical power splitters with Y-branching and splitters working on the multimode interference principle. For numerical simulation of optical signal propagation in splitter structures, channel models, created in the previous part of the thesis, were exploited. Proposed splitter structures were realized and achieved experimental results were compared to simulation outputs.

In the second part of the thesis the research aims at active channel waveguides formed in novel types of silicate glasses doped with rare-earth elements and Zinc. First the silicate glass GZ4 with Erbium and Ytterbium content was studied and the best doping ratio was estimated with regard to luminescent properties. Afterwards three glass melting were carried out, GZ4 with content of 0,25 at. % Erbium 5 at. % Ytterbium and Zinc 4,0 at. %, 4,8 at. % a 5,6 at. % Zinc. These three glasses were evaluated as the most suitable materials for integrated amplifiers in the telecommunication band of 1530 – 1565 nm. Next, samples were prepared with active channel waveguides and also active planar optical power splitter with splitting ratio of 1x2. Diffusion profiles of created samples were analyzed with the EMA microscope and compared to the results of mode-field distribution measurement. Afterwards amplification properties of designed structures were studied and the differential gain was evaluated.

The dissertation thesis achieved to verify gain of active channel waveguides and especially in the structure of an optical 1x2 power splitter. Further optimization of

the diffusion profile can lead to the concept of an active optical power splitter with no insertion losses.

Keywords: Ion exchange, gradient refractive index waveguide, active optical splitter, integrated optical amplifier, erbium doped waveguide amplifier

Obsah

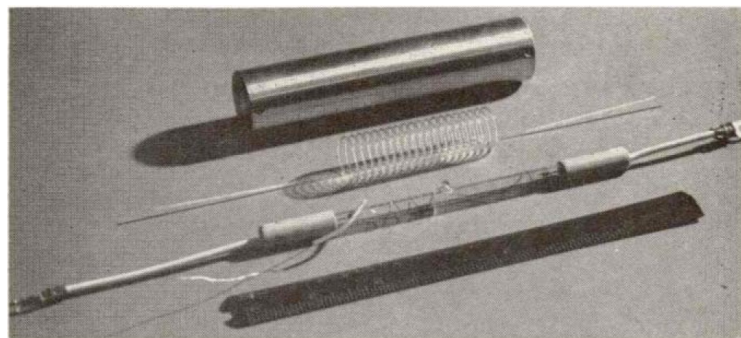
1.Současný stav studované problematiky	- 1 -
1.1. Úvod.....	- 1 -
1.2.Optické integrované vlnovody.....	- 2 -
1.3. Substráty pro iontovou výměnu	- 4 -
1.4. Optická fotolitografie.....	- 6 -
1.5. Iontová výměna.....	- 8 -
1.6. Optické integrované zesilovače	- 11 -
1.7. Aktivní optická rozbočnice s Y – větvením	- 14 -
2.Metody charakterizace vlnovodných struktur	- 16 -
2.1. Měření indexu lomu a vlnovodných vrstev	- 16 -
2.2. Elektronová mikrosonda	- 17 -
2.3. Měření blízkého pole kanálkových vlnovodů.....	- 18 -
2.4. Zajištění optické vazby a měření přenosových vlastností vlnovodů	- 19 -
2.5. Měření optické aktivity.....	- 21 -
3.Cíle disertační práce	- 23 -
4.Dosažené výsledky	- 24 -
4.1. Realizace pasivních planárních a kanálkových vlnovodů termální iontovou výměnou	- 24 -
4.1.1. Návrh a realizace planárních vrstevových vlnovodů.....	- 25 -
4.1.2. Návrh modelu nezanořeného kanálkového vlnovodu s gradientním indexem lomu	- 28 -
4.2. Návrh a vytvoření modelu pasivní optické výkonové rozbočnice	- 32 -
4.3. Návrh a simulace optické výkonové rozbočnice pracující na principu interference v mnohavidovém vlnovodu.....	- 36 -
4.3.1. Návrh a simulace optické MMI rozbočnice 1x3.....	- 38 -
4.3.2. Realizace interferenční rozbočnic 1x2.....	- 40 -
4.4. Studium erbito – ytterbitého silikátového skla s příměsí zinku pro struktury aktivních vlnovodů	- 44 -
4.4.1. Požité materiály substrátů silikátových skel	- 44 -
4.5. Realizace aktivních vlnovodů jednostupňovou iontovou výměnou.....	- 49 -
4.5.1. Analýza vzorků aktivních nezanořených vlnovodů elektronovou mikrosondou EMA.....	- 51 -
4.5.2. Analýza vidového pole aktivních nezanořených vlnovodů.....	- 54 -
4.6. Realizace vzorků aktivních kanálkových vlnovodů pomocí dvoustupňové iontové výměny	- 57 -
4.6.1. Realizace funkčních vzorků aktivních vlnovodů.....	- 57 -
4.6.2. Analýza zanořených aktivních vlnovodů elektronovou mikrosondou. -	59 -

4.6.3.	Analýza vidového pole aktivních zanořených vlnovodů	- 60 -
4.6.4.	Měření zesílení aktivních zanořených kanálkových vlnovodů	- 62 -
4.7.	Realizace aktivní optické rozbočnice 1x2 pomocí dvoustupňové iontové výměny	- 68 -
4.7.1.	Struktury realizovaných aktivních rozbočnic 1x2	- 69 -
4.7.2.	Měření optické aktivity výkonových rozbočnic 1x2	- 69 -
5.	Výsledky a diskuze	- 74 -
	Seznam použité literatury	- 78 -
	Seznam publikační činnosti	- 84 -
	Další výzkumné aktivity	- 85 -
	Seznam použitých symbolů a zkratek	- 86 -
	Seznam obrázků	- 88 -
	Seznam tabulek	- 91 -
	Příloha A	I
	Dokumentace masky: SGS-2012-OHK3-05/12	I

1. Současný stav studované problematiky

1.1. Úvod

Globální datové přenosy by nebylo možné realizovat bez optických vláken, která tvoří páteřní přenosové trasy. Na pozadí stále se zvyšující potřeby navýšení přenosových rychlostí neztrácí, svoji naléhavost výkonová bilance optické sítě. Přesto, že moderní optická vlákna disponují útlumem v řádech desetin decibelu na kilometr, dochází na dlouhých přenosových trasách k nezanedbatelnému útlumu. Dalším aspektem optického útlumu přenosové trasy, je rozdělení optického výkonu ke koncovým uživatelům. Uvážíme-li rozdělení optického signálu do např. 32 bytových jednotek panelového domu, navýšíme útlumovou bilanci sítě o přibližně 20 dB. Souběžně s vývojem optických přenosových sítí dochází také k vývoji zesilovačů. První zmínky o optickém vláknovém zesilovači byly publikovány Eliasem Snitzerem již v roce 1964 [1] (Obr. 1.)



Obr. 1 První optický zesilovač publikovaný v roce 1964 Eliasem Snitzerem

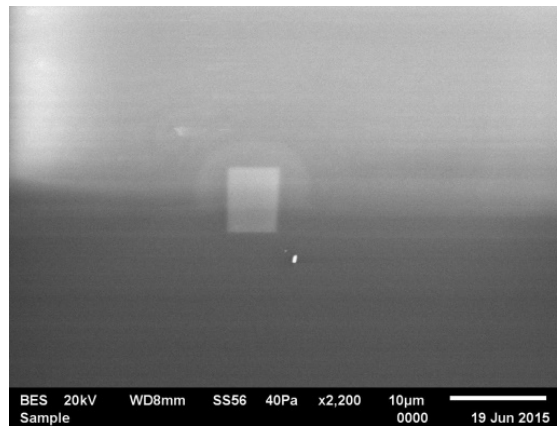
Tento zesilovač byl určen pro laboratorní účely, nicméně ho můžeme považovat za základní stavební kámen výzkumu a vývoje zesilovačů pro optické komunikace.

Z pohledu optických telekomunikací můžeme považovat za zásadní objev Ramanových zesilovačů, ke kterému došlo v roce 1973 [2]. Paralelně s vývojem optických zesilovačů docházelo k vývoji opto-elektronických alternativ. Ty se ovšem se ovšem v 80. letech minulého století začali dostávat na samou hranici možného zesílení [3]. Zásadní posun přinesly erbiem dopované vláknové zesilovače (EDFA). Demonstrace jejich praktického využití v optických sítích byla publikována v roce 1987 v práci R.J.Mearse [4]. Jejich nasazení v optických přenosových sítích je zcela zásadní i v současnosti.

Netrvalo dlouho a v roce 1990 byly publikovány první výzkumné zprávy o erbiem dopovaných strukturách planárních vlnovodů [5][6], které nabídly možnosti realizace integrovaných struktur laserů a zesilovačů.

1.2. Optické integrované vlnovody

Stejně jako ve vláknové optice, nejběžnější skupinou integrovaných optických vlnovodů jsou struktury se skokovou změnou indexu lomu. V případě výroby vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu, je nejvíce využívanou technologií Flame Hydrolysis Deposition (FHD). Při přípravě vlnovodů je na substrátu křemenného skla vytvořena planární vlnovodná vrstva oxidu křemičitého s příměsí dopačnicích materiálů, zvyšujících index lomu (typicky germanium). Tato vrstva je následně selektivně odstraněna tak, aby na substrátu zůstaly pouze struktury optických vlnovodů. Následně je povrch deponován čistým oxidem křemičitým. Ten funguje jako vrstva pláště obklopující vlnovodnou vrstvu. Na závěr je vlnovodná vrstva překryta krycím sklem a zafixována lepidlem s indexem lomu přizpůsobeným krycí vrstvě vlnovodu. Profil takového vlnovodu je na Obr. 2.



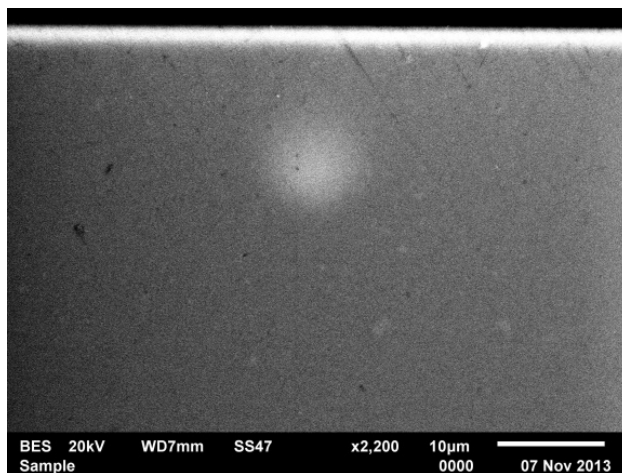
Obr. 2. Profil kanálového vlnovodu vyrobeného technologií FHD.

Fotografie SEM. Archiv SQS Vláknová optika.

Výhodou výroby vlnovodů technologií FHD je přesné vymezení vlnovodné oblasti, využití konvenčních technologií a z toho vyplývající nízká cena vyrobených struktur. Nevýhodou je především pravoúhlý tvar vlnovodu, neboť drtivá většina standardních vláknových vlnovodů disponuje kruhovým jádrem. Toto tvarové nepřizpůsobení se projevuje zejména v aplikacích kde je zapotřebí vést vlnovodem polarizovaný signál v rovině jiné než 90° vůči straně vlnovodu.[46]

Druhým typem vlnovodů použitých v integrované optice jsou vlnovody s gradientním indexem lomu vyrobené difuzní technologií, případně implantací. Difuzní procesy jsou s velmi dobrými výsledky využívány pro vytváření jednovidových i vícevidových vlnovodů v amorfních podložkách (iontová výměna $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$, $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$) případně v optických krystalech (protonová výměna Ti:LiNbO). [44]

V případě integrovaných struktur pro optické telekomunikace je nejběžnější technologií výroby dvoustupňová iontová výměna do silikátových substrátů. Vlnovodná vrstva je tvořena prvky dopantu obsaženého v tavenině. V průběhu procesu výroby, je vytvořen vlnovod s gradientním indexem lomu zanořený až několik desítek mikrometrů pod povrch (Obr. 3).



Obr. 3. Profil zanořeného kanálového vlnovodu vyrobeného dvoustupňovou iontovou výměnou. Fotografie SEM. Archiv SQS Vláknová optika.

Technologie iontové výměny umožňuje adaptovat tvar, rozměry a index lomu použitému typu vlákna. Především však lze vyrobit vlnovod s kruhovým profilem vlnovodné vrstvy a docílit tak ideálních vazebních podmínek s optickými vlákny. Díky tomu lze využít vlnovod pro aplikace, kde je třeba libovolně natočit polarizační rovinu optického signálu. Zásadní výhodou technologie iontové výměny je možnost vytvoření vlnovodů do mnoha typů podložek dopovaných prvky vzácných zemin a docílit tak optické aktivity vlnovodů[9] – [11].

1.3.Substráty pro iontovou výměnu

Substráty vhodné pro výrobu optických vlnodů technologií iontové výměny musí vyhovět mnoha kritériím. Jedním z nejdůležitějších požadavků na tyto substráty je vysoké množství modifikátorů, které umožní vznik dostatečně velké změny indexu lomu, tak aby bylo dosaženo vlnodných vlastností. Teplota, při které je prováděna iontová výměna, musí být pod teplotou skelného přechodu skloviny (T_g), aby nedocházelo k poškození substrátu, ale zároveň musí být dostatečně vysoká, aby bylo dosaženo potřebné mobility difundujících iontů. Velmi důležitá je také chemická odolnost vůči alkalickému prostředí, neboť silná zásaditost je základní vlastností používaných tavenin. Neméně důležité jsou mechanické vlastnosti při procesech řezání broušení a leštění skloviny.

Mezi nejznámější skloviny, optimalizované pro iontovou výměnu, patří skla s označením IOT BGG31 a Schott IOG-10, která prokázala své skvělé vlastnosti v mnoha významných publikacích [13],[12], [49]. Bohužel dnes již nejsou tato skla u výrobců v komerčně dostupná.

Pro výzkum pasivních struktur optických vlnodů v této práci, byly použity dvě skloviny vyvinuté ve spolupráci Ústavu skla a keramiky VŠCHT a firmy SQS Vlákno optika a.s. Skloviny nesou označení B1T1 a I1T1. Vlastnosti těchto sklovin jsou detailně rozebírány v pracích [14],[15]. Jejich složení v porovnání se sklovinou IAG-10 je uvedeno v tabulce Tab. 1.

Tab. 1 Složení optických skel s označením B1T1 a I1T1 a IAG1 [hm. %]

	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	MgO	K ₂ O	ZnO
B1T1	11,65	12,59	19,20	0,00	56,56	-	-	-
I1T1	14,37	14,99	17,58	1,76	51,30	-	-	-
IAG-10	9,2	1,0	3,0	0,6	63,6	2,8	6,8	12,6

Dostupnost sklovin pro přípravu aktivních vlnodů je ve srovnání s výše zmiňovanými substráty ještě složitější. V literatuře je citována nejčastěji sklovina Schott IOG-01 [16], [17], která taktéž není běžně dostupná. Pro většinu výzkumných projektů jsou připravovány malé navážky taveb umožňující modifikovat skelnou matici a dosáhnout speciálních vlastností sklovin, potřebných pro návrh nových optických struktur.

Vývoji aktivních skel se po mnoho let věnují v již zmiňovaném Ústavu skla keramiky a Ústavu anorganické chemie VŠCHT v Praze, kde disponují potřebnými technologiemi a zkušenostmi z dlouholetého úspěšného výzkumu [18], [19], [21],[22]. V současné době na těchto pracovištích probíhá intenzivní výzkum zaměřený na

silikátová skla s modifikátory erbiem ytterbiem a zinkem. Výhoda těchto skel spočívá především ve variabilitě chemického složení, které umožňuje snadno měnit jeho optické vlastnosti. Pro aplikaci v odvětví optických zesilovačů je ovšem zásadní vhodně zvolený poměr zmiňovaných modifikátorů, který umožňuje dosáhnout luminiscence v oblasti 1530 nm – 1560 nm. Zmiňované vědecké skupiny provedly rozsáhlý výzkum, ve kterém se zabývaly stanovením optimálního poměru těchto laserově aktivních prvků [24]-[31]. Ve své práci se zaměřili na vliv koncentrace zinku ve skelné matici, neboť zinek, dle publikovaných výsledků, velmi příznivě ovlivňuje luminiscenční vlastnosti. Základ těchto skel tvoří sklovina s označením GZ4 jejíž složení je uvedeno v následující tabulce (Tab. 2).

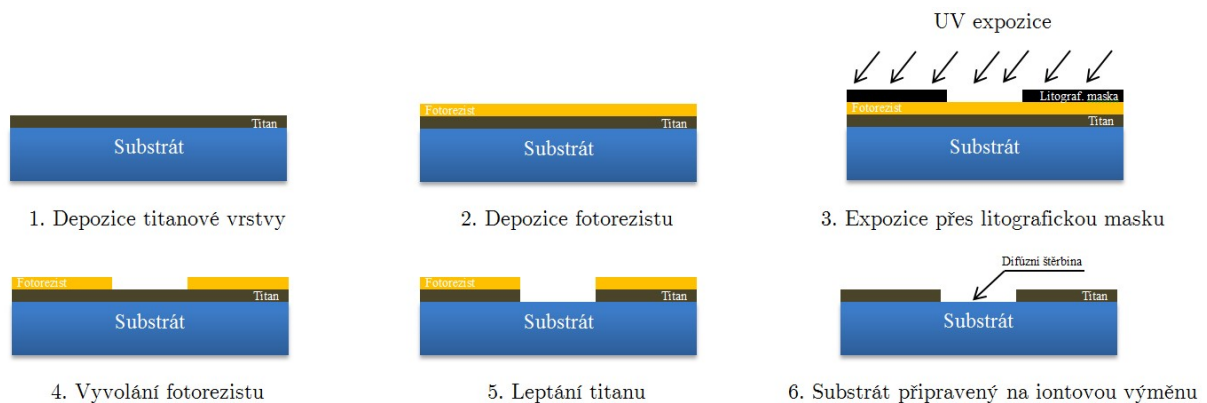
Tab. 2. Složení základní skloviny GZ4 [hm. %]

	Na ₂ O	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	ZnO
GZ4	14,00	68,96	-	1,04	16,00
IAG-1	24,00	0	60,00	13,00	-

Výzkum zaměřený na studium absorpčních a luminiscenčních vlastností skloviny GZ4 modifikované různým poměrovým množstvím erbia a ytterbia a následně i zinku je součástí této práce a je detailně popsán v kapitole 4.4.1.

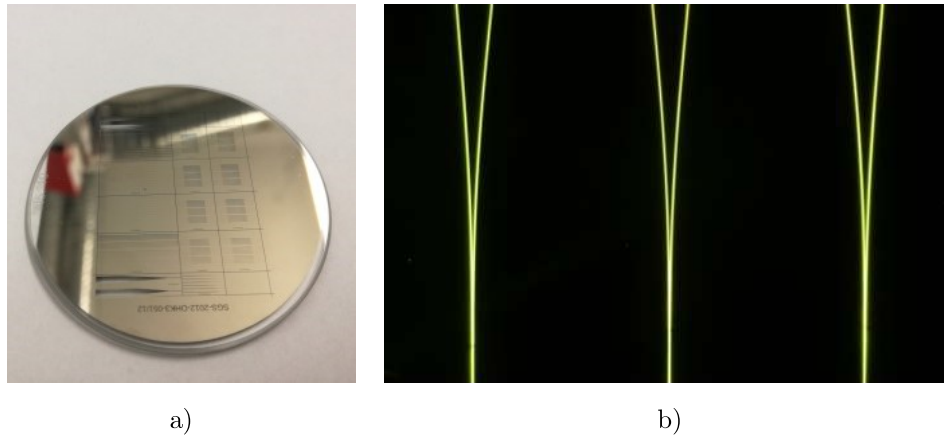
1.4. Optická fotolitografie

Depozice fotolitografické masky na skleněné waferu určené pro proces iontové výměny je do značné míry specifická a fotolitografický proces musí být oproti konvenčním postupům modifikován. Pro depozici litografické masky na povrch waferů existují dvě základní techniky metoda lift – off a metoda leptání. Obě depoziční techniky, jsou detailně popsány v pracích [14],[15]. Pro depozici litografických masek, zmiňovaných v této práci, byly využity laboratoře firmy SQS Vlákno optika, která disponuje čistými prostory a dlouhodobě se procesy fotolitografie zabývá. Depozice litografické masky zde probíhá metodou leptání. Jednotlivé výrobní operace jsou schematicky znázorněny v Obr. 4.



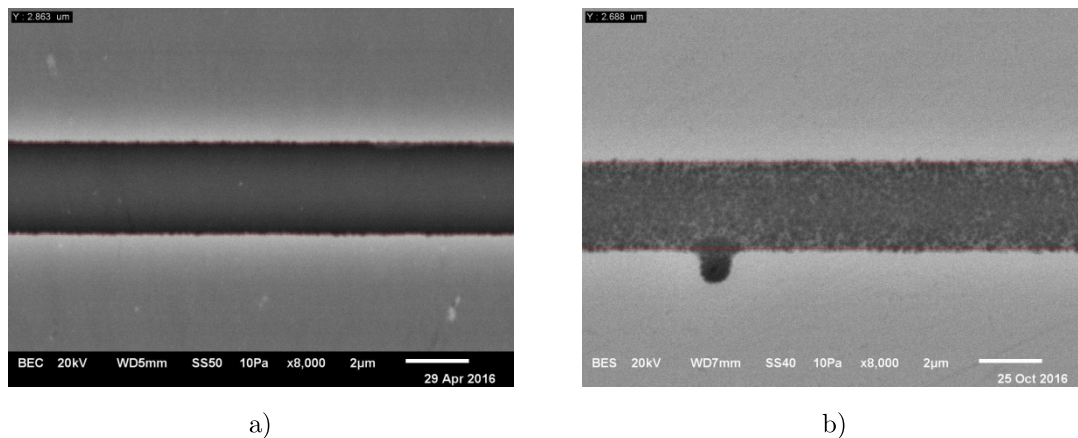
Obr. 4. Schéma litografického procesu

V prvním kroku je na povrch zbavený nečistot deponována tenká vrstva titanu tloušťky přibližně 150 nm (1). V dalším kroku je na povrch metodou rotačního lití (spincoating) nanášena vrstva pozitivního fotorezistu AZ1518S (2). Po zarovnání litografické masky a expozici povrchu waferu zdrojem UV záření na litografickém zařízení JUB 2104 (3) prochází wafer vývojkou AZ-D300S (4). V tomto kroku je odstraněna exponovaná oblast fotorezistu. Fotorezist, který na povrchu waferu setrval, vymezení oblast titanové vrstvy, která je v následujícím kroku vyleptána v roztoku NaOH (5). V poslední fázi depozičního procesu litografické masky je odstraněna vrstva fotorezistu v rozpouštědle AZ-Rem1165 (6) a po očištění je wafer podroben optické inspekci na elektronovém mikroskopu. Fotografie deponované masky na povrchu substrátu a detail šterbin optických rozbočnic je uveden na Obr. 5.



Obr. 5. Procesy optické fotolitografie a) Deponovaná maska na povrch waferu určeného pro iontovou výměnu, b) Detail štěrbin optických rozbočnic

V litografickém procesu dochází vlivem výrobních tolerancí k rozměrové diferencí mezi motivem na litografické masce a motivem přeneseným na wafer. Tento efekt je způsoben expozicí fotorezistu na rozhraní štěrbin litografické masky. Jeho vlivem dochází k rozšíření přeneseného motivu typicky $0,05 \mu\text{m}$. Konkrétní zkreslení je do značné míry závislé na přítlaku litografické masky. K dalšímu rozšíření výsledného motivu, o cca $0,05 \mu\text{m}$ vůči motivu masky, může dojít při procesu vyvolání fotorezistu a následnému leptání titanové vrstvy. Rozšíření šířky štěrbin a defektní štěrbina jsou ukázány na Obr. 6. V případě dodržení technologického postupu a použití standardního substrátu, lze tyto efekty prakticky eliminovat.



Obr. 6. Kontrola litografické masky a) Rozšíření šířky štěrbin z $2,80\mu\text{m}$ (na předloze) na $2,86\mu\text{m}$ (výsledný motiv), b) Nedokonale vyleptaná oblast štěrbin kanálku.

1.5. Iontová výměna

Procesy iontové jsou používány pro výrobu integrovaných optických vlnodů již po mnoho let. První publikované práce o vlnovodech vzniklých difuzí byly uveřejněny již v roce 1972 [33]. Je zajímavé, že tato práce studuje iontovou výměnu iontů stříbra a sodíku, která nachází největší úspěch také v dnešní době. Od té doby bylo publikováno velké množství prací zabývajících se nejrůznějšími typy iontové výměny, převážně do skleněných substrátových skel [49][63][57][66].

Iontová výměna nabízí v porovnání s ostatními technologiemi řadu výhod, které lze shrnout v několika bodech.

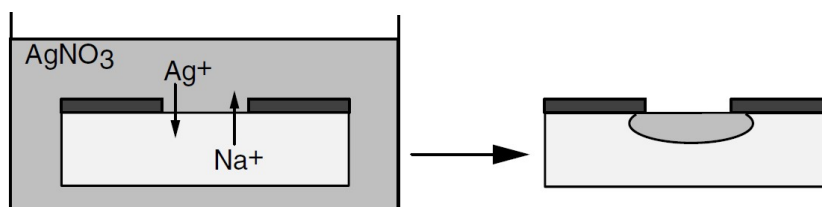
- Materiály substrátu lze poměrně snadno modifikovat.
- Iontová výměna umožňuje nastavit index lomu v rozsahu 0,001 0,2.
- Proces Iontové výměny je jednoduchý a ekonomicky výhodný.
- Iontová výměna umožňuje výrobu jednovidových i mnohavidových vlnodů na jednom substrátu.
- Zanořené vlnovody s kruhovým profilem mají ideální vazební účinnost a polarizační nezávislost.
- Zanořené i nezanořené vlnovody jsou součástí objemu substrátu.

Proces výroby vlnodů iontovou výměnou má potenciál zůstat na technologické špičce výroby optických integrovaných obvodů pro nejmodernější aplikace optické telekomunikační a senzorové techniky. [63], [68]

Jednostupňová iontová výměna

Vlnovod vyrobený jednostupňovou iontovou výměnou $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$ vzniká následujícím způsobem. Substrát obsahující ionty Na^+ je vložen do taveniny obsahující chemicky podobné prvky, v tomto případě Ag^+ . Na rozhraní substrátu a taveniny dochází ke skokovému snížení koncentrací obou typů iontů účastnících se iontové výměny. Tento fakt vede ke vzniku nerovnovážného stavu a vzniku koncentračního gradientu. Díky vysoké teplotě dochází k náhodným srážkám, které vedou k pronikání iontů Ag^+ z taveniny do substrátu, kde nahrazují ionty Na^+ vyrovnávající koncentrační gradient opačným směrem. Intenzita difuze resp. koncentračního gradientu klesá do hloubky substrátu a vytváří tak difuzní profil, který je funkcí prostorových souřadnic. V tomto případě můžeme hovořit o difuzi z nekonečného zdroje příměsí. Parametry procesu formování vlnodů lze řídit teplotou taveniny, koncentrací iontů v tavenině a dobou trvání procesu.

V případě výroby kanálkového vlnovodu je třeba selektivně definovat oblast, kde může k výměně docházet. Difuzní oblast je definovaná štěrbinou šířky w v litografické masce deponované na povrch substrátu. Schéma procesu termální iontové výměny je na Obr. 7.

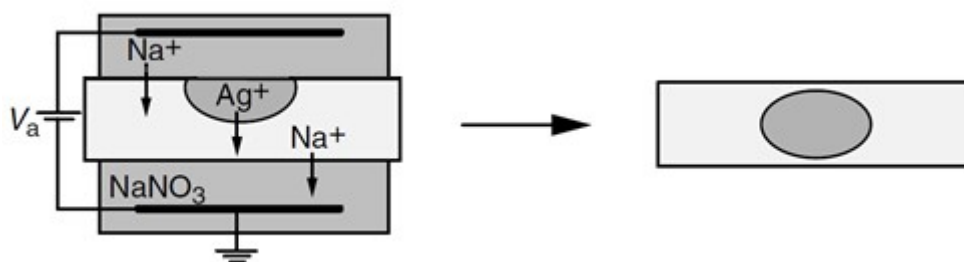


Obr. 7. Schéma procesu termální iontové výměny (Převzato z [54])

Takto vytvořený kanálkový vlnovod je vzhledem k povrchu substrátu v kontaktu s okolním prostředím. V této oblasti dochází ke vzniku silné evanescentní vlny, které může být s výhodou využita např. při konstrukci optických senzorů s Braggovou mřížkou [95]. V běžných aplikacích je tento jev potlačován překrytím povrchu substrátu indexově přizpůsobeným krycím sklem, případně je vlnovod dále zpracován. Vlastnosti takto vytvořeného vlnovodu lze optimalizovat jeho zanořením v elektrickém poli do hloubky substrátu.

Dvoustupňová iontová výměna

Dvoustupňová výměna umožňuje vytvořit optický vlnovod, který je celým svým objemem zanořen pod povrch substrátu. V první fázi je třeba vytvořit povrchový vlnovod procesem termální iontové výměny, jak je uvedeno v předchozím textu. V druhém stupni iontové výměny je třeba zajistit rovnoměrné rozložení elektrického pole na obou površích substrátu. Povrchy substrátu jsou zalaty taveninou tvořící vodivý kontakt, tak aby nedošlo k jejich propojení. Samotná tavenina zajišťuje kromě elektrického kontaktu také, přenos tepla a především pak je zdrojem iontů sodíku, které vstupují do substrátu. Na rozdíl od termální iontové výměny zde nedochází k obousměrné výměně iontů, ale všechny ionty účastníci se iontové výměny, se pohybují ve směru od anody ke katodě. Schéma procesu je na Obr. 8.



Obr. 8. Schéma procesu iontové výměny v elektrickém poli. (Převzato z [54])

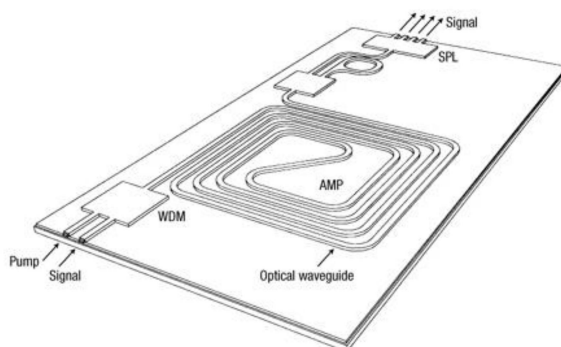
V procesu zanořování tedy dochází k driftu iontu stříbra ve směru elektrického pole a zanoření vlnovodné vrstvy několik mikrometrů pod povrch substrátu. Zároveň však probíhá proces difuze, která je větší měrou zodpovědná za formování tvaru kanálku. V tomto případě se jedná o difuzi z omezeného zdroje příměsí, neboť množství stříbra v kanálkovém vlnovodu je stanoveno procesy předešlé termální iontové výměny. V závislosti na teplotě, čase a aplikované intenzitě elektrického pole dochází změně tvaru vlnovodu, jeho velikosti, změně indexu lomu vlnovodu a jeho lokalizaci. Řízení tohoto procesu má zásadní vliv na parametry vlastního difuzního profilu a lze jím do značné míry přizpůsobit parametry vlnovodu celé řadě typů optických vláken.

1.6. Optické integrované zesilovače

V současné době jsou v optických telekomunikacích často používanými zesilovači polovodičové prvky označované SOA (semiconductor optical amplifier). Tyto polovodičové struktury realizované v systémech GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs, InP/InGaAsP a InP/InAlGaAs., vynikají svými kompaktními rozměry [43]. Zesílení je dosaženo, stejně jako u čistě optických zesilovačů, principem stimulované emise. K čerpání je však využito elektrické signálu. Další významnou skupinou optických zesilovačů v telekomunikacích jsou struktury pracující na principu stimulovaného Ramanova rozptylu. V případě Ramanových zesilovačů může silný čerpací výkon při rozptylu aktivním médiu, předávat energii signálu na větší vlnové délce.[54]

Nejběžnějšími a nejefektivnějšími zesilovači v optických komunikacích jsou však optické erbiem dopované zesilovače (EDFA). Jejich značnou nevýhodou je nízká míra integrace, která však může být omezena jejich integrovanou variantou. Optický erbiem dopovaný vlnovodný zesilovač (EDWA) funguje na obdobném principu jako EDFA [3],[34]. Pro výrobu integrovaných struktur EDWA existuje několik vhodných technik [7] – [11], [35]. Z pohledu zesílení vykazují nejvhodnější vlastnosti difuzní techniky, neboť umožňují vytvoření vlnovodu přímo v substrátu dopovaném prvky vzácných zemin [36][38]. Mezi typické technologie patří protonová výměna do substrátů optických krystalů a iontová výměna do optických skel.

Aktivní kanálkové vlnovody nemohou, vzhledem k délkovému omezení, dosáhnout maximálního zesílení jako je možné docílit aktivními optickými vlákny. Výhoda aktivních optických kanálkových vlnovodů spočívá především v možnosti vytvářet jejich prostřednictvím složitější vlnovodné struktury, kterými mohou být například optické výkonové rozbočnice, multiplexory a demultiplexory, či jejich kombinace [11].



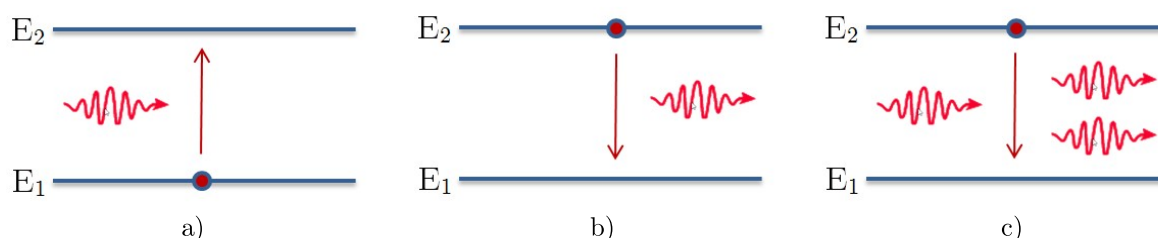
Obr. 9. Příklad optického integrovaného obvodu s multiplexorem a zesilovačem EDWA.[42]

Z pohledu optických telekomunikací je nejvýznamnější oblast spektra ležící v rozsahu vlnových délek 1500 nm – 1600 nm (tzv. třetí telekomunikační okno). V tomto pásmu dosahují křemenná optická vlákna nejnižšího útlumu. [44]. Aktivním prvkem pro zesilující média zesilovačů v uvedeném pásmu vlnových délek, je v současné době nejvíce používáno erbia. [40]

V moderních přenosových systémech jsou optické zesilovače umísťovány do optické sítě typicky ve třech umístěních. Zařazením zesilovače za signálovým zdrojem je (booster amplifier) je docíleno maximálního zesílení signálu při vstupu optického signálu do přenosové sítě. Tento typ zesilovače se používá zejména v sítích s vlnovým multiplexem. Zesilovače v optické trase (in – line amplifier) mají za úkol kompenzovat výkonovou bilanci sítě, která je kritická především u dlouhých páteřních sítí. Třetím typem je zesilovač, zařazený těsně před přijímač (pre-amplifier), který má za úkol signál zesílit před jeho konečným zpracováním.[3]. Optické integrované zesilovače mohou nalézt své uplatnění právě v případech koncových zařízení, kde se mohou stát jejich integrovanou součástí.

Princip optického zesilovače dopovaného prvky erbia a ytterbia

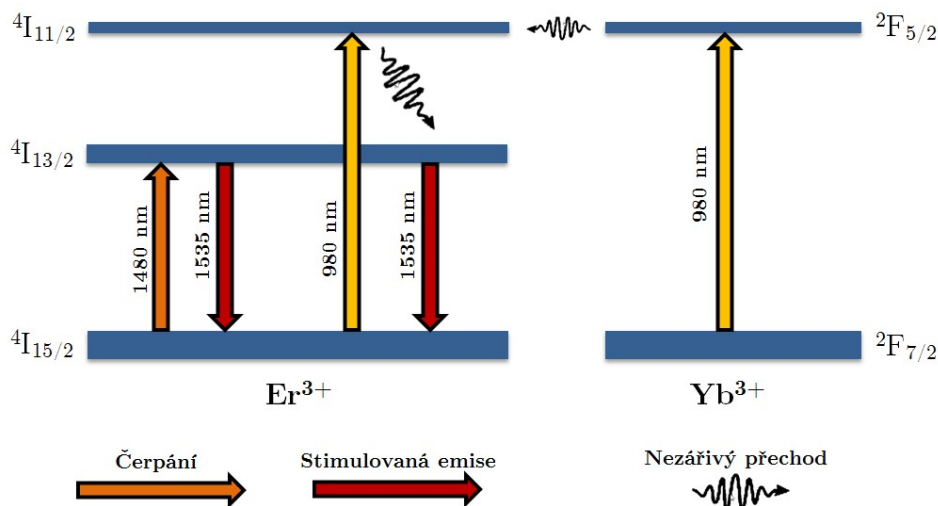
Optické záření procházející kanálovým vlnovodem obsahujícím prvky vzácných zemin je zesilováno mechanismem stimulované emise záření. Optické záření určité vlnové délky, procházející aktivním médiem, je absorbováno na energetických hladinách odpovídajících zvolenému aktivátoru. V důsledku toho dochází k excitaci elektronu z nižší energetické hladiny E_1 na vyšší energetickou hladinu E_2 (Obr. 10a). Pokud je tímto mechanismem excitováno dostatečné množství elektronů, dochází k vytvoření tzv. inverzní populace, která je nutnou podmínkou funkce optického zesilovače. Průchodem dalších fotonů vhodné energie aktivním médiem dochází k přechodu elektronů z vyšší energetické hladiny E_2 na nižší energetickou hladinu E_1 a vyzáření fotonu stejné frekvence, fáze, polarizace a směru (Obr. 10c).



Obr. 10. Přechody elektronu mezi hladinami a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulovaná emise

Kromě stimulované emise záření dochází k přechodu spontánnímu (Obr. 10b), jehož důsledkem je foton mající náhodnou fázi a směr. Dále může dojít k přechodu, při kterém je konvertována energie elektronu do vibrační energie matrice. Tyto jevy jsou

v optických zesilovačích potlačovány, neboť jsou zdrojem nežádoucího šumu a zahřívání zesilovače. Na obrázku Obr. 11. je znázorněn princip optického zesilovače, jehož médium je tvořeno erbiem a ytterbiem. Tento systém využívá tzv. kvazi – dvou hladinového a tří hladinového modelu excitace elektronů v Er^{3+} a Yb^{3+} na vyšší hladiny.



Obr. 11. Princip zesilovače dopovaného erbiem a ytterbiem

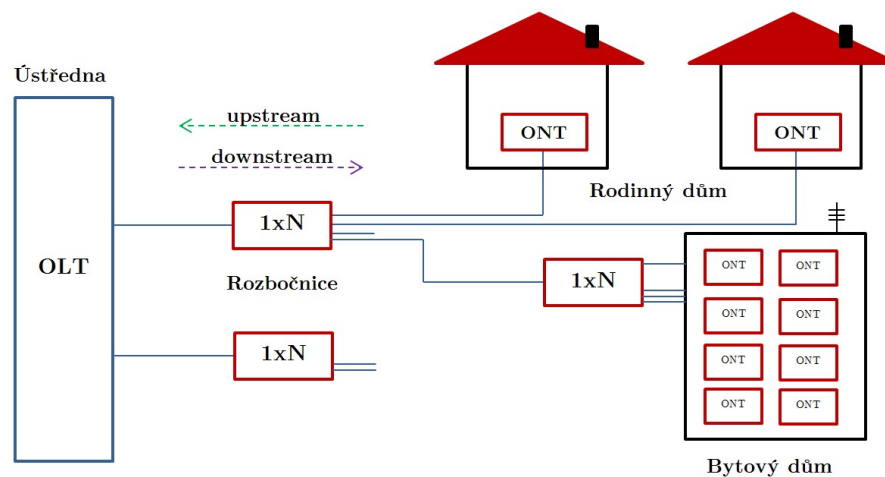
V případě kvazi – dvou hladinového systému, čerpací záření vlnové délky 1480 nm excituje elektrony v Er^{3+} z energetické hladiny $^4\text{I}_{15/2}$ do vyšší energetické hladiny $^4\text{I}_{13/2}$. Fotony signálového záření vlnové délky 1535 nm spustí stimulovanou emisi a tedy deexcitaci elektronů na základní energetickou hladinu a současně vyzáří foton koherentního charakteru.

Tří hladinový systém čerpání využívá k excitaci elektronů v iontů Er^{3+} na základní hladině $^4\text{I}_{15/2}$ čerpací záření vlnové délky 980 nm, které excituje elektrony na hladinu $^4\text{I}_{11/2}$. Doba života excitovaných elektronů na této hladině se pohybuje v řádu μs . Dochází tak k nezářivému přechodu na hladinu $^4\text{I}_{13/2}$, kde je vytvořena silná populační inverze. Signálové záření vlnové délky 1535 nm pak spouští stimulovanou emisi koherentního záření.

Významným způsobem jak zvýšit účinnost čerpání iontů Er^{3+} je kodopace substrátu ionty Yb^{3+} . Ytterbium je pro erbiem známým senzitivujícím prvkem, který má čerpací vlnovou délku stejně jako erbiem 980 nm. Oproti erbiu má však na této vlnové délce výrazně větší efektivitu čerpání. Vlivem čerpacího záření dochází k excitaci elektronů ze základní energetické hladiny $^2\text{F}_{7/2}$ na vyšší energetickou hladinu $^2\text{F}_{5/2}$. Následně dochází k nezářivému přechodu mezi hladinami $\text{Yb}^{3+} \ ^2\text{F}_{5/2}$ na hladinu $\text{Er}^{3+} \ ^4\text{I}_{11/2}$. Mechanismy přenosu energie jsou detailně popsány v [41].

1.7. Aktivní optická rozbočnice s Y – větvením

Pasivní optické rozbočnice jsou běžnou komponentou optických přenosových sítí. V současnosti budované optické sítě jsou koncipovány tak, že jsou optickými vlákny připojeni až koncoví uživatelé, kterým je běžně dostupná přenosová rychlost 1~Mbit/s – 10 Gbit/s. Takto vysoké přenosové rychlosti umožňují provozovat na jednom optickém vlákne, telefonní, datové a televizní připojení a to tak, že jsou jejich signály multiplexovány pomocí vlnového dělení. Architektura optické sítě je na Obr. 12.



Obr. 12. Architektura sítě PON

Z uvedeného obrázku je zřejmé, že v takto koncipované přenosové síti dochází k významným přenosovým ztrátám dělením signálu k jednotlivým uživatelům. Základní struktura optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x2 může vnést dle standardu ITU-T G.671 do optické trasy maximální vložný útlum 4,0 dB. Struktura optické rozbočnice s dělicím poměrem 1x64 pak vnáší do optické trasy maximální vložný útlum 22,3 dB [69].

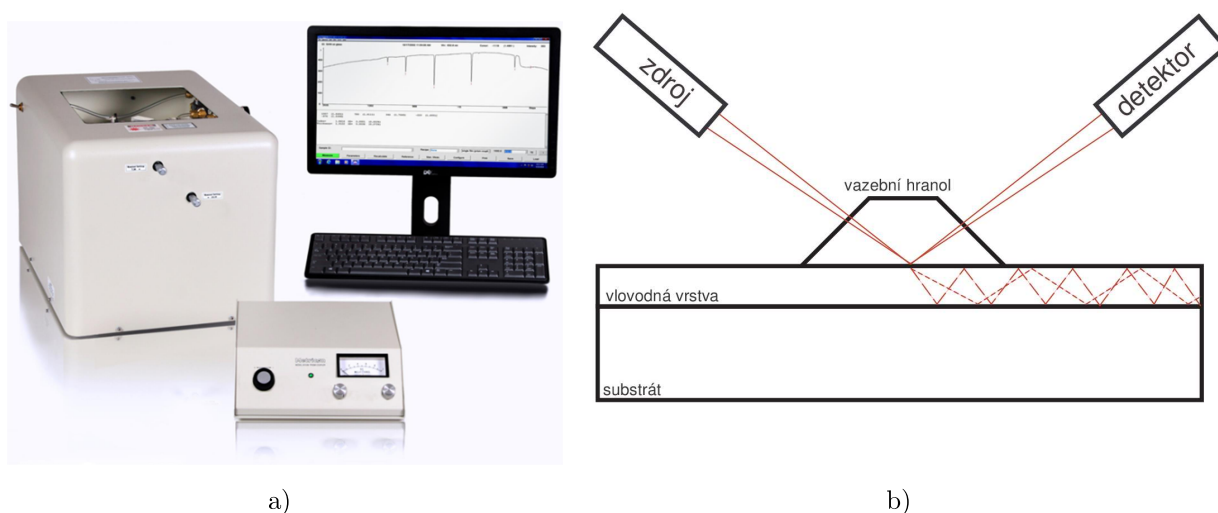
Řešením zlepšení výkonové bilance v síti může být aktivní optická rozbočnice, kompenzující vlastní ztráty způsobené rozdělením optického signálu z N do N přenosových tras. Cílem výzkumu aktivních optických výkonových rozbočnic je tedy dosáhnout přinejmenším takové úrovně zesílení struktury, které odpovídá ztrátám způsobeným dělicím poměrem a vložným útlumem součástky jako takové. V současné době je možné, pomocí integrovaných optických zesilovačů vyrobených vrstvodými technologiemi, takového zisku dosáhnout [37]. Výzkum v oblasti integrovaných optických struktur je soustředěn na dosažení maximálního zesílení EDWA a studiu materiálů, které umožní tohoto cíle dosáhnout. V oblasti komplexních struktur, kterými jsou právě optické rozbočnice, multiplexory apod., je mnoho prostoru pro

další výzkum. Dle provedené rešerše dané problematiky není realizace struktury optické aktivní rozbočnice s gradientním profilem indexem lomu dosud popsána.

2. Metody charakterizace vlnovodných struktur

2.1. Měření indexu lomu a vlnovodných vrstev

Vyrobené vlnovody byly měřeny metodou tmavé vidové spektroskopie na měřicím přístroji Metricon Prism Coupler na pracovišti Ústavu anorganické chemie VŠCHT v Praze. Princip měření je založený na navázání monochromatického vstupního svazku záření do vlnovodu pomocí vazebního hranolu (Obr. 13). Předpokladem pro umožnění vazby je vyšší index lomu hranolu než index lomu měřeného vlnovodu.



Obr. 13. Měřicí systém Metricon Prism Coupler a) měřicí sestava b) princip měření

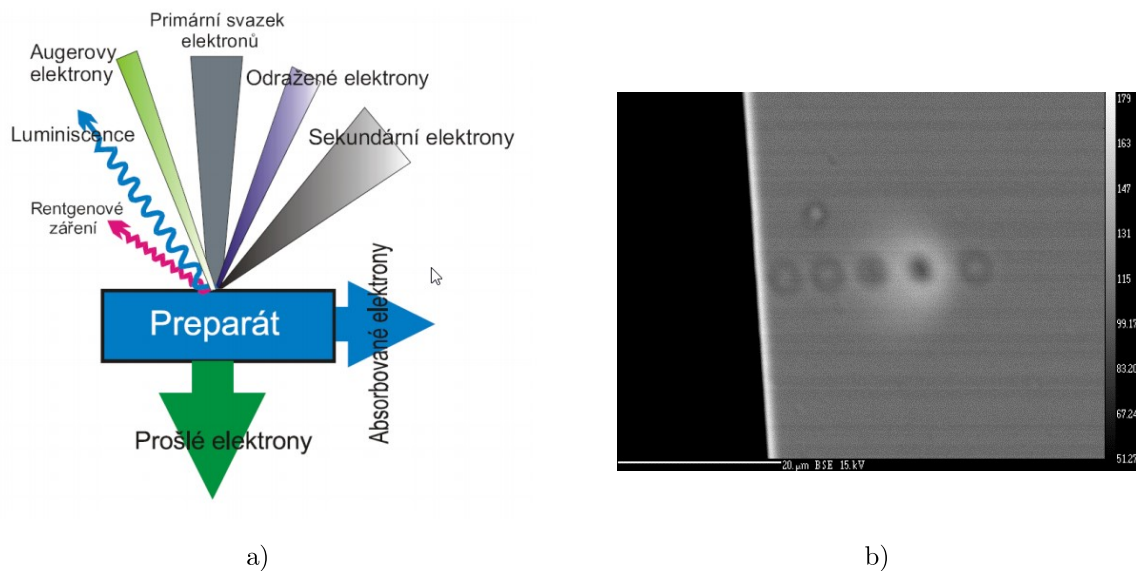
Vstupní svazek laserového záření ($632,8 \sim \text{nm}$, $1310 \sim \text{nm}$, a $1550 \sim \text{nm}$) je fokusován na jeho základnu, pod určitým intervalem úhlů, pod kterými se opět odráží a dopadá na stínítko resp. detektor, kde vytváří světelnou stopu s tmavými čarami. Právě tyto čáry odpovídají vlnovodem vedeným vidům, které jsou charakteristické synchronními vidovými úhly dopadajícího záření.

V závislosti na geometrických rozměrech vlnovodu a jeho vlastnostech se jím začne šířit odpovídající množství vidů, vstupujících do vlnovodu pod tzv. synchronním vidovým úhlem. Velice přesným změřením tohoto úhlu, za předpokladu znalosti indexu lomu hranolu a jeho lámavého úhlu, je možné pomocí principů geometrické optiky určit efektivní index lomu jednotlivých vidů a hloubkového profilu indexu lomu.

2.2. Elektronová mikrosonda

Analýza elektronové mikrosondy (EMA) spojuje přednosti klasické elektronové mikroskopie s výhodami lokální elektronové analýzy.

Před samotnou analýzou je nutné vzorek deponovat vrstvou uhlíku, aby nedocházelo k nabíjení povrchu vzorku. Urychlený elektronový svazek je fokusovaný ve vysokém vakuu do průměru 1-2 μm a následně dopadá na povrch vzorku s energií 3 – 50keV, kde způsobuje kromě emise sekundárních a odražených elektronů, také vznik charakteristického rentgenového záření. (Obr. 14a). Tato emise způsobuje na povrchu vzorku charakteristické fragmenty, které jsou dobře zřetelné na (Obr. 14b). Z vyhodnocení spektra rentgenového záření a jeho porovnání se známými standardy, je následně vyhodnoceno složení prvků vybrané oblasti. [50]

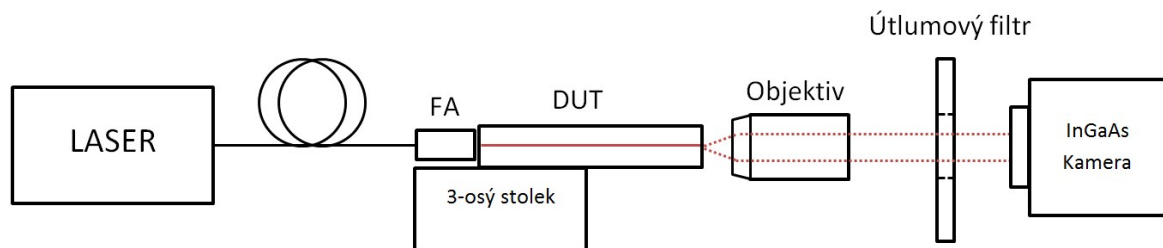


Obr. 14. Elektronová mikrosonda EMA a) Interakce primárního elektronového svazku s hmotou vzorku (převzato z [72]) b) Zanořený kanálový vlnovod s typickými fragmenty po analýze EMA

2.3. Měření blízkého pole kanálkových vlnodů

Měření vidového pole umožňuje získat velmi důležité informace o vlastnostech optického signálu procházejícího optickým vlnovodem. Vidové pole může být popsáno dvěma způsoby. Pozorováním v tzv. blízkém (near – field) nebo vzdáleném (far – field) poli. Metoda tzv. vzdáleného pole umožňuje měřit prostorové vlastnosti svazku. S výhodou se využívá u měření kolimovaných svazků v závislosti na vzdálenosti od čela čočky, případně pro změření úhlové vyzařovací charakteristiky záření vystupujícího z optického vlákna. Naproti tomu metoda měření v tzv. blízkém poli charakterizuje parametry svazku přímo na rozhraní čela vlnovodu a okolního prostředí, kterým je obvykle vzduch. Nejčastěji sledovanou veličinou je samotný rozměr vidového pole a jeho geometrie. Obzvlášť v případě vlnodů s gradientním indexem lomu může být geometrie difuzního profilu netypická. Kromě korelace difuzního profilu a geometrie vidového pole je možné měřit také rozložení intenzity energie a případně analyzovat vidovost vlnovodu [67].

Pro měření blízkého pole bylo v této práci použito zařízení Spiricon BeamGage, které je k dispozici v laboratořích firmy SQS Vláknová optika a.s. Schématické uspořádání pracoviště je uvedeno na Obr. 15. Sestavu tvoří budící laser, 3-osý mikromanipulátor umožňující nastavení optimální pozice čipu (DUT) a vláknového pole (FA) vůči mikroskopovému objektivu, útlumový filtr eliminující saturaci kamery a vhodná kamera dostatečným rozlišením a citlivostí vzhledem k analyzované oblasti spektra.



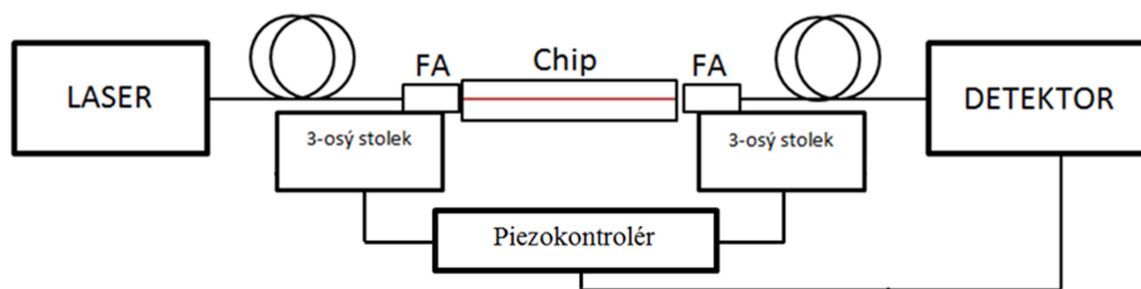
Obr. 15. Schéma měřicího pracoviště pro měření vidového pole

Po zajištění vazby optického vlákna a čipu je navázán optický signál do kanálkového vlnovodu. Zaostřením objektivu s dostatečným zvětšením na čelo čipu, je možné sledovat rozložení energie kanálkového vlnovodu a změřit jeho rozměry. Pro vyhodnocení velikosti vidového pole kanálkových vlnodů byl použit parametr $D4\sigma$, který je normovaný dle standardu ISO 11146 [69]. Velikost svazku vyhodnoceného dle této normy odpovídá šířce pasu svazku v oblasti poklesu maximální intenzity výkonu na 13,5% [67].

2.4. Zajištění optické vazby a měření přenosových vlastností vlnovodů

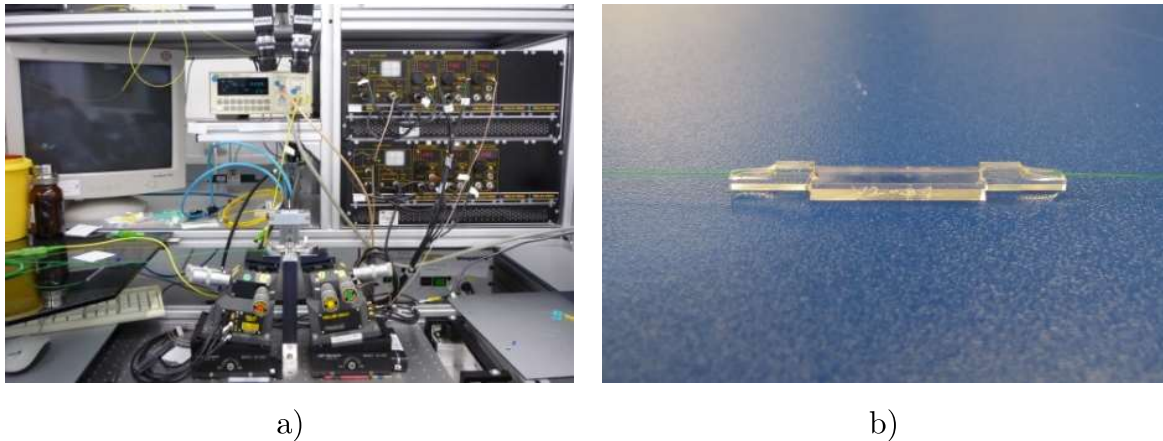
Vytvoření optimální optické vazby vláknového vlnovodu a kanálkového vlnovodu je možné díky speciálnímu zařízení – mikromanipulátoru. Toto zařízení využívá ke své funkci piezokrystalové aktuátory, které jsou řízeny napětím v závislosti na zpětné vazbě. Zpětnou vazbu tvoří signál z měřicího přístroje. Blokové schéma zařízení pro zajištění optické vazby vláknových a kanálkových vlnovodů je uvedeno na Obr. 16.

Vzorky studované v této práci byly tzv. justovány ve firmě SQS Vláknová optika, která těmito velice precizními zařízeními disponuje. (Obr. 17) Poté, co je nalezena optimální signálová vazba, je čip zafixován vůči vláknu drženém v tzv. vláknovém poli (FA) pomocí UV tvrditelného lepidla. Lepidlo je velmi důležitou součástí integrované soustavy, neboť jím prochází optický signál. Je tu nutné zvolit lepidlo s přizpůsobeným indexem lomu použitým materiálům substrátu a vlnovodu.



Obr. 16 Blokové schéma zařízení pro zajištění optické vazby vláknových a kanálkových vlnovodů

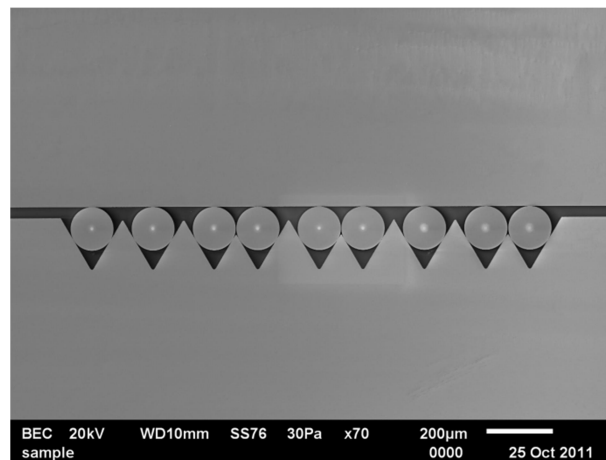
Vložný útlum měřené součástky je tvořen několika příspěvky. V první řadě se jedná o překryv vidového pole kanálkového vlnovodu a jádra vlákna optického vlákna a také o index lomu těchto vlnovodných prostředí na vstupní i výstupní vazbě. Kanálkový vlnovod musí být svými rozměry přizpůsobený rozměrům jádra optického vlákna ale také indexu lomu vlnovodné vrstvy.



Obr. 17 Zajištění optické vazby vlnovodu a optického vlákna.

a) Sestava s mikromanipulátory b) integrovaný čip s vstupním a výstupním vláknovým polem

Při zajištění mnohonásobné vazby mezi kanálkovými vlnovody a jádry optických vláken není možné zajistit ideální polohu všech vláken vůči čipu. Odchylka od ideální pozice vlákna, způsobující zhoršení překryvu vidových polí, je zapříčiněna několika faktory. Těmi jsou především výrobní tolerance průměru pláště vlákna, tolerance průměru jádra vlákna a výrobní tolerance držáku vláknových polí tzv. V-drážky (Obr. 18.).

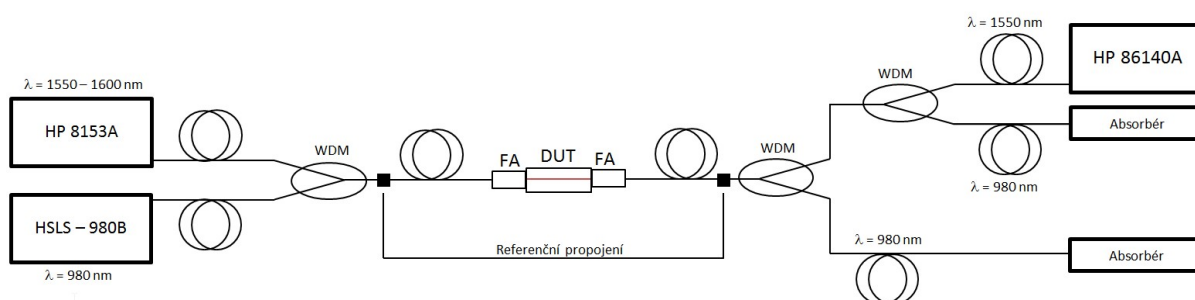


Obr. 18. Fixace optických vláken ve vláknovém poli. Foto SEM. [Archiv SQS Vláknová optika]

V případě jednovidových vláken by se reálná pozice jádra kanálkového vlnovodu neměla lišit od ideální pozice jádra optického vlákna více než o $1 \mu\text{m}$. Vlivem vazebních ztrát dochází ke vzniku útlumu $0,1 - 0,2 \text{ dB}$ na každé z vazebních oblastí. Posledním jmenovaným mechanismem vzniku optických ztrát je samotná jakost kanálkového vlnovodu. Kvalita vazební účinnosti je tedy závislá i na kvalitě provedené fotolitografie a tvaru kanálkového vlnovodu.

2.5. Měření optické aktivity

Sestava pro měření optické aktivity byla realizována v laboratořích firmy SQS Vlákenná optika. Jádrem sestavy tvoří zdroj signálu v rozsahu 1500nm – 1600nm, čerpací zdroj záření, schopný navýšení čerpacího výkonu až na 600mW a spektrální analyzátor umožňující spektrální měření v rozsahu 900 nm – 1700nm. Dále jsou v sestavě vazební členy pro slučování resp. oddělení signálového a čerpacího výkonu a absorpční členy pro zachycení čerpacího záření. Schématické uspořádání měřicí sestavy je na Obr. 19.



Obr. 19. Schéma zapojení sestavy pro měření optické aktivity kanálových vlnovodů.

Detailní přehled komponent měřicího pracoviště je uveden v Tab. 3. Specifikem této sestavy je dvojitá izolace před spektrálním analyzátozem zajišťující bezpečné oddělení signálového a čerpacího výkonu.

Tab. 3 Komponenty pracoviště pro měření optické aktivity

Zřízení	Typ
Zdroj signálu	Hawlett Packard 8153A - HP 815539M
Čerpací zdroj	HSL5 – 980B
Spektrální analyzátor	Hawlett – Packard 86140A
Vlnová rozbočnice G&H	G&H-980-1550
Bezodrazové zakončení – absorbér	HST-980
Propojovací patchcordy	SMF-E2000/APC-E2000/APC

V první fázi měření je provedeno referenční propojení a nastavena referenční úroveň signálu. Dále je změřena a zaznamenána spektrální charakteristika součástky, při průchodu signálového záření. Po provedení tohoto měření je signálový zdroj opět deaktivován. V následujícím kroku je aktivován zdroj čerpacího záření. V důsledku průchodu čerpacího signálu aktivním médiem bez přítomnosti signálového záření můžeme měřit míru spontánní emise (ASE). V dalších krocích je aktivován signálový zdroj a změřena míra zesílení aktivních integrovaných struktur v závislosti na

velikosti výkonu čerpacího zdroje. Výsledky jsou zaznamenány a vyhodnoceny tak, aby byl vyloučen příspěvek spontánní emise k signálové složce. Po zreferování měřicí sestavy je připojena měřená struktura optické rozbočnice a zaznamnán její vložný útlum. Optická struktura je excitována laserovým čerpacím zdrojem na vlnové délce 980 nm. Následně po aktivaci zdroje signálového záření změřen diferenciální zisk struktury.

3. Cíle disertační práce

Hlavní cíle disertační práce

- Návrh a realizace aktivního optického vlnovodu na substrátu aktivního skla dotovaného prvky vzácných zemin se zinkem jako modifikátorem.
- Návrh a realizace aktivní optické výkonové rozbočnice s Y-větvením na skle dotovaném prvky vzácných zemin a zinkem jako modifikátorem pomocí technologie iontové výměny.

Dílčí cíle disertační práce

- Vytvoření modelu pasivního kanálkového vlnovodu umožňujícího návrh složitějších struktur.
- Návrh a realizace optického vlnovodu realizovaného dvoustupňovou iontovou výměnou.
- Návrh a realizace pasivních optických rozbočnic realizovaných dvoustupňovou iontovou výměnou.

4. Dosažené výsledky

4.1. Realizace pasivních planárních a kanálkových vlnovodů termální iontovou výměnou

Klíčovou částí tvorby modelu kanálkového vlnovodu je vytvoření odpovídajícího profilu indexu lomu v závislosti na použitých materiálech a technologickém procesu. K tomu je zapotřebí provést sadu experimentů a z nich extrahovat konstanty, které budou použity jako vstupní parametry. Procesy realizace pasivních vrstevových a kanálkových struktur optických vlnovodů vedoucích k vytvoření modelu profilu indexu lomu jsou uvedeny v následující kapitole.

Pro realizaci struktur pasivních optických vlnovodů byly použity speciální podložky tzv. substráty, vyvinuté ve spolupráci VŠCHT v Praze a firmou SQS Vlákno optika a.s. Tyto substráty jsou navrženy tak aby umožňovali výměnu iontů sodíku přítomných ve skelné matici za ionty stříbra obsažené v tavenině dusičnanu stříbrného. Podíl iontů sodíku ve skle dostatečně vysoký, aby umožňoval rychlou výměnu iontů a vznik vlnovodné vrstvy požadovaných vlastností, ovšem na druhou stranu nesmí být jeho podíl příliš vysoký, aby mohlo být dosaženo dobré reprodukovatelnosti výrobního procesu. Pro realizaci pasivních optických struktur v této práci byly použity substráty s označením GIL49 , I1T1 a B1T1. Složení skelných matic těchto skel je uvedeno v Tab. 4.

Tab. 4. Chemické složení skel použitých pro realizaci pasivních optických struktur

	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	BaO
GIL49	73,28	6,10	4,10	1,20	14,87	0,45	<0,01
	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	SO ₃	
B1T1	11,65	12,59	19,20	0,00	56,56	0,30	
I1T1	14,37	14,99	17,58	1,76	51,30	0,30	

4.1.1. Návrh a realizace planárních vrstevových vlnovodů

Za účelem získání co nejpřesnějších vstupních dat pro návrh kanálkového vlnovodu bylo vyrobeno několik sad vzorků planárních vrstevových vlnovodů. V prvním kroku byly vyrobeny tři sady planárních optických vlnovodů požitím difuze iontů stříbra ($\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$) do třech druhů skleněných substrátů při zachování podmínek iontové výměny. Nejvýraznější vzájemnou odlišností uvedených substrátů je různý obsah iontů sodíku, který má nejvýraznější vliv na vlastnosti vytvořené vlnovodné vrstvy. Čtvrtá sada vzorků byla připravena difuzí iontů draslíku ($\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$) do substrátu skla GIL49. Díky menšímu obsahu sodíku ve skle GIL49, v porovnání s ostatními skly, a fyzikální povaze iontu draslíku by vedla aplikace tohoto typu iontové výměny u ostatních skel na velmi dlouhé výrobní časy. Podmínky iontové výměny aplikované na jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tab. 5. Podmínky aplikované iontové výměna na použité substráty

Vzorek	Substrát	Iontová výměna	Tavenina	Teplota [°C]	Čas [min.]
1587	I1T1	$\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$	Tavenina E	280	20
1588	B1T1	$\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$	Tavenina E	280	20
1923	GIL49	$\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$	Tavenina E	280	20
1924	GIL49	$\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$	Tavenina E	400	180

Všechny vyrobené vzorky byly analyzovány pomocí jednohranolové vidové spektroskopie na měřicím přístroji Metricon Prism Coupler na vlnových délkách 632,8 nm, 1311 nm a 1552 nm. Výsledky měření na nejnižší použité vlnové délce prokázali přítomnost vyšších vidů, které byly vzhledem k výrobním parametrům očekávané a navíc také žádoucí, neboť právě díky jejich přítomnosti je možné poměrně přesně určit hloubku vlnovodné vrstvy, kontrast indexu lomu vlnovodné vrstvy a substrátu a taktéž přibližný geometrický profil indexu lomu vlnovodné vrstvy. Seznam vyrobených vzorků planárních vlnovodů a jejich změřené vlastnosti jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 6.

Tab. 6. Souhrn změřených parametrů vyrobených vzorků planárních vrstevových vlnovodů

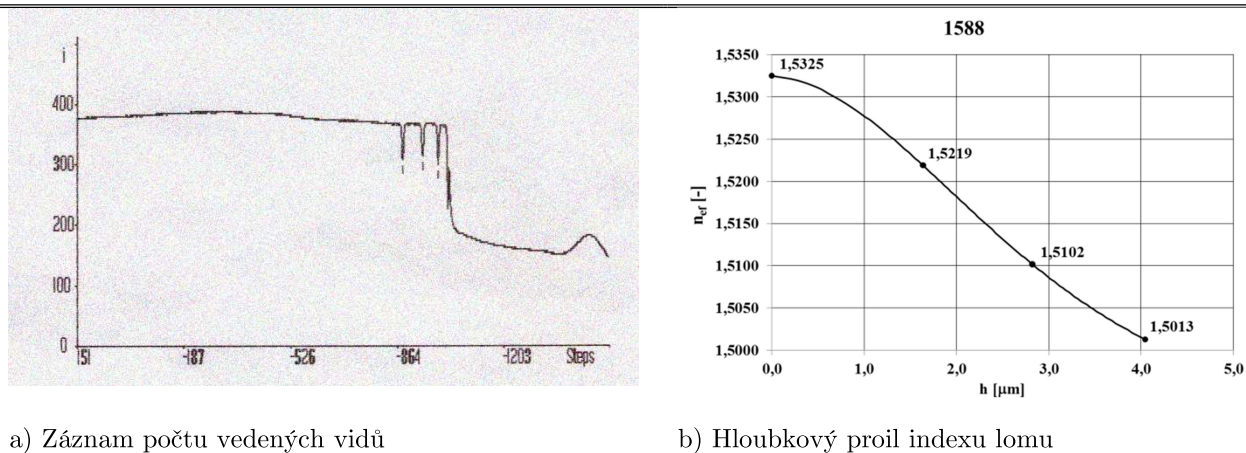
Vzorek	n_s	Δn	h [μm]	Vídy
1587	1.5146	0.06	4.3	4
1588	1.5013	0.03	4.0	3
1923	1.5204	0.06	2.4	3
1924	1.5091	0.002	7.8	3

V případě vzorků 1587 a 1588 byly na vlnové délce 632,8 nm změřeny čtyři vidy z nich nejnižší vid se šíří v hloubce 4,3 μm , resp. 4,0 μm . Počty vedených vidů zaznamenaných přístrojem Metricon Prism Coupler a z nich určený hloubkový profil indexu lomu je uvedený v Tab. 7, Tab. 8. Navzdory nastavení stejných parametrů iontové výměny je v případě obou vzorků patrný významný rozdíl parametru rozdílu indexu lomu, který je způsobený především různým obsahem kationtů sodíku přítomných v daném typu substrátu.

U vzorku s označením 1923 je za totožných podmínek iontové výměny patrný vznik tenčí vlnovodné vrstvy způsobený rozdílným složením materiálu substrátu v porovnání s předchozími vzorky V tomto případě se jedná o důsledek nižšího podílu prvku Al_2O_3 ve sklovině, který se výrazně podílí na pohyblivosti iontů stříbra.

V případě vzorku 1924 došlo díky vyšší aplikované teplotě a výrazně delšímu času iontové výměny k difuzi iontů sodíku až do hloubky 7,8 μm pod povrch substrátu Došlo tak k vytvoření vlnovodu vykazujícího řádově nižší rozdíl indexu lomu vlnovodné vrstvy a substrátu. Počty vedených vidů a hloubkové profily indexu lomu vzorků 1923 a 1524 jsou uvedeny v Tab. 9 a Tab. 10.

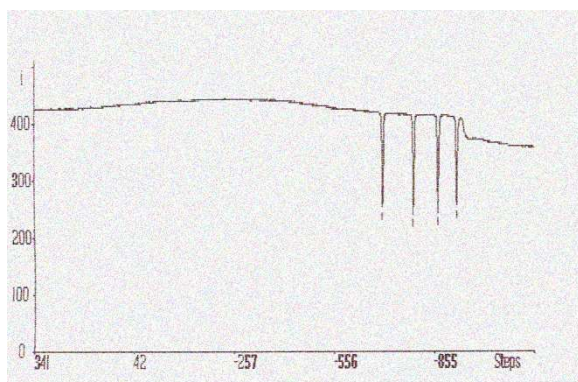
Tab. 7. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1588 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$.



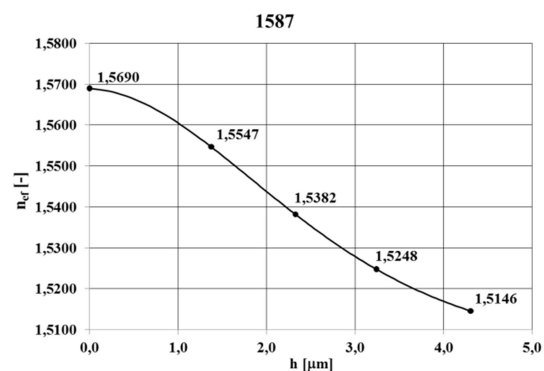
a) Záznam počtu vedených vidů

b) Hloubkový profil indexu lomu

Tab. 8. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1587 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$.

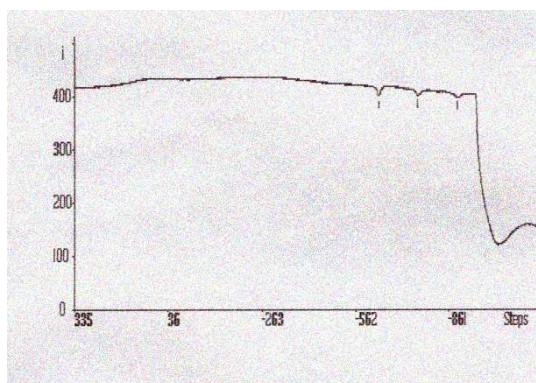


a) Záznam počtu vedených vidů

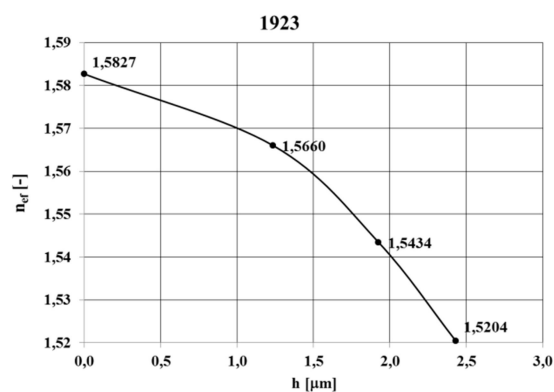


b) Hloubkový profil indexu lomu

Tab. 9. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1923 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$.

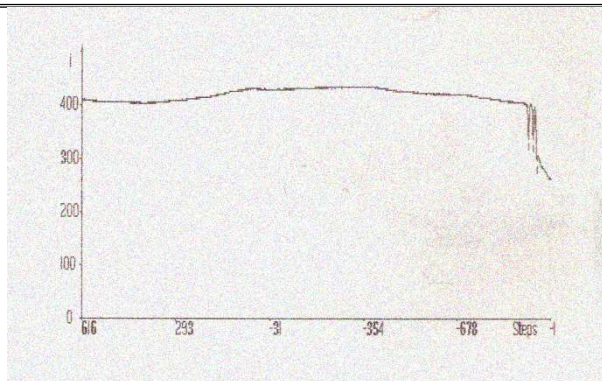


a) Záznam počtu vedených vidů

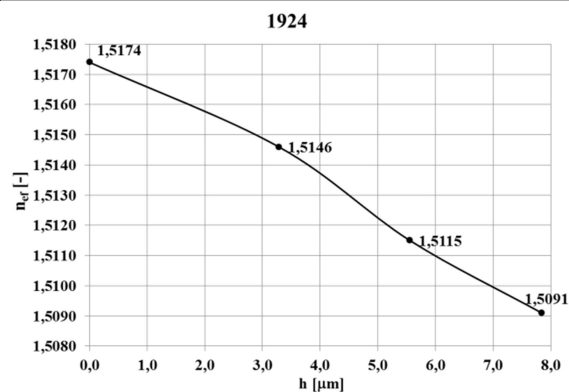


b) Hloubkový profil indexu lomu

Tab. 10. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku vzorku 1524 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$.



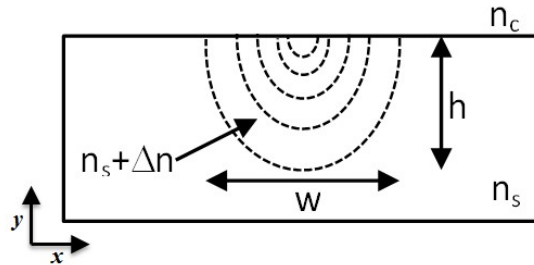
a) Záznam počtu vedených vidů



b) Hloubkový profil indexu lomu

4.1.2. Návrh modelu nezanořeného kanálkového vlnovodu s gradientním indexem lomu

Analytické řešení šíření elektromagnetických vln je uvnitř dvourozměrného vlnovodu s gradientním indexem lomu velmi obtížné a exaktně jej lze řešit jen některé profily indexu lomu. Těmi jsou například profily exponenciální a parabolický. V případě trojrozměrného difuzního kanálku, kde je profil indexu lomu funkcí prostorových souřadnic (Obr. 20), je analytické vyloučené.



Obr. 20 Schématické znázornění profilu indexu lomu nezanořeného kanálkového vlnovodu

Za účelem získání vstupních dat pro návrh jednovidového nezanořeného kanálkového vlnovodu byly vyrobeny vzorky planárních vrstevových vlnovodů, detailně popsanych v předchozí kapitole. Z provedené analýzy byl jako nejvhodnější pro návrh vybrán vlnovod na substrátu sodnovápeného skla s označením I1T1 (1588). Na tomto vzorku byl vytvořen pomocí jednostupňové iontové výměny $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$, planární vrstevový vlnovod hloubky přibližně 4 μm . Na základě získaných dat byl navržen jednovidový kanálkový vlnovod, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11. Parametry navrženého kanálkového vlnovodu

n_s , ($\lambda = 1311 \text{ nm}$), [-]	1.4951
n_s , ($\lambda = 1552 \text{ nm}$), [-]	1.4923
Δn [-]	0.03
n_c [-]	1
w [μm]	4
h [μm]	4

Návrh a simulace jsou provedeny pro kanálek vytvořený na povrchu substrátu, jehož tvar by se měl podobat vlnovodu vytvořenému technologií jednostupňové iontové výměny. Prvním a velice důležitým krokem před zahájením simulací je definování parametrů difuzního profilu, který program používá při výpočtu šíření optického svazku strukturou. Difuzní profil je v programu definován vztahem [48]

$$n(x, y) = n_s + [\Delta n g(x) f(y)] \quad (4.3.1)$$

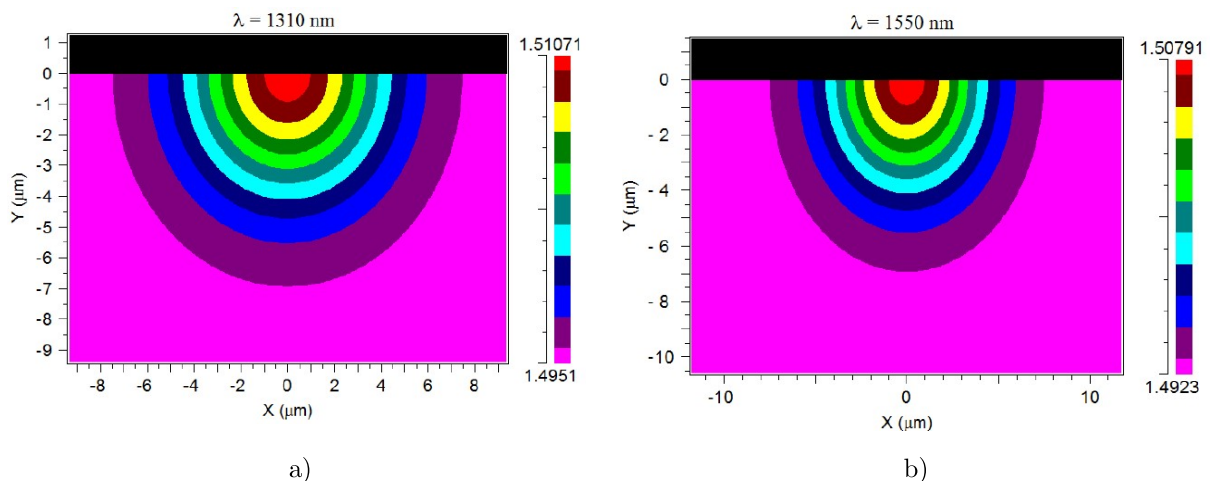
kde n_s je index lomu substrátu a Δn je maximální změna indexu lomu vlnovodné vrstvy a substrátu v kanálkovém vlnovodu. Funkce $G(x)$ je zde definována vztahem

$$g(x) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\left(\frac{w}{2} + x \right) / h_x \right] + \operatorname{erf} \left[\left(\frac{w}{2} - x \right) / h_x \right] \right\} \quad (4.3.2)$$

kde h_x , h_y jsou difuzní hloubky v obou příčných směrech a w šířka kanálku. Funkce $f(y)$ definuje tvar difuzního profilu, v tomto případě Gaussovského tvaru,

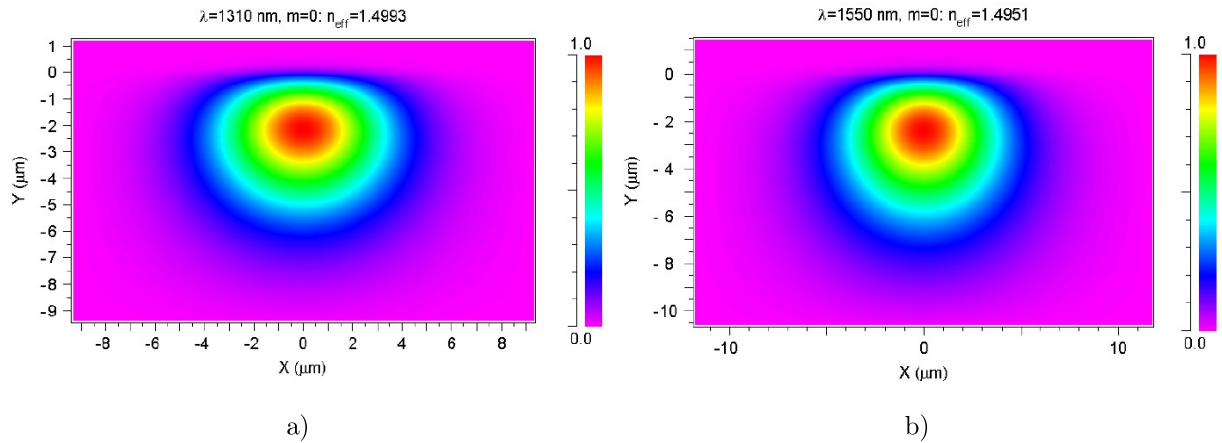
$$f(y) = \exp \left[\frac{-y^2}{h_y^2} \right] \quad (4.3.3)$$

Dosažením parametrů navrženého kanálkového vlnovodu uvedených v Tab. 11. je získán profil indexu lomu. Je třeba brát v úvahu závislost indexu lomu na vlnové délce, proto musí být pro každou pracovní vlnovou délku známy odpovídající indexy lomu materiálu. Výsledky simulace profilu indexu lomu pro vlnové délky 1310nm a 1550nm jsou uvedeny na Obr. 21.



Obr. 21 Model profilu indexu lomu navrženého kanálkového vlnovodu v rovině kolmé na směr šíření v $z=0$ pro vlnové délky a) $\lambda = 1310 \text{ nm}$ a b) $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Dále byla provedena simulace počtu vedených vidů a intenzity elektrického pole. Zdroj vstupního signálu je definován jako Gaussovský svazek, svými parametry odpovídající kanálkovému vlnovodu. Navržený vlnovod vykazuje jednovidový pracovní režim v pásmu vlnových délek 1310nm až 1550nm. Výsledky simulace profilu rozložení energie základního vedeného vidu jsou uvedena na Obr. 22



Obr. 22. Výsledky simulace profilu rozložení energie základního vedeného vidu pro vlnové délky a) $\lambda = 1310$ nm a b) $\lambda = 1550$ nm

Efektivní indexy lomu jednotlivých vidů získané z modelování navrženého kanálkového vlnovodu v porovnání s efektivními indexy lomu změřenými v planárním vrstevném vlnovodu uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12. Porovnání změřených a vypočítaných hodnot efektivního indexu lomu

m	$\lambda = 632.8$ nm	$\lambda = 1310$ nm	$\lambda = 1550$ nm
0	1.5219/1,5093	1,4973/1,4993	1,5923/1,5951
1	1.5102/1,5066	- / -	- / -
2	1.5013/1,5031	- / -	- / -

$n_{\text{eff}}[-]$, změřený/ vypočítaný

Získaná rozložení vidů pro vlnové délky 1310nm a 1550 nm mohou být použity u simulací složitějších struktur jako rozložení profilu vstupního zdroje signálu.

Shrnutí a diskuze

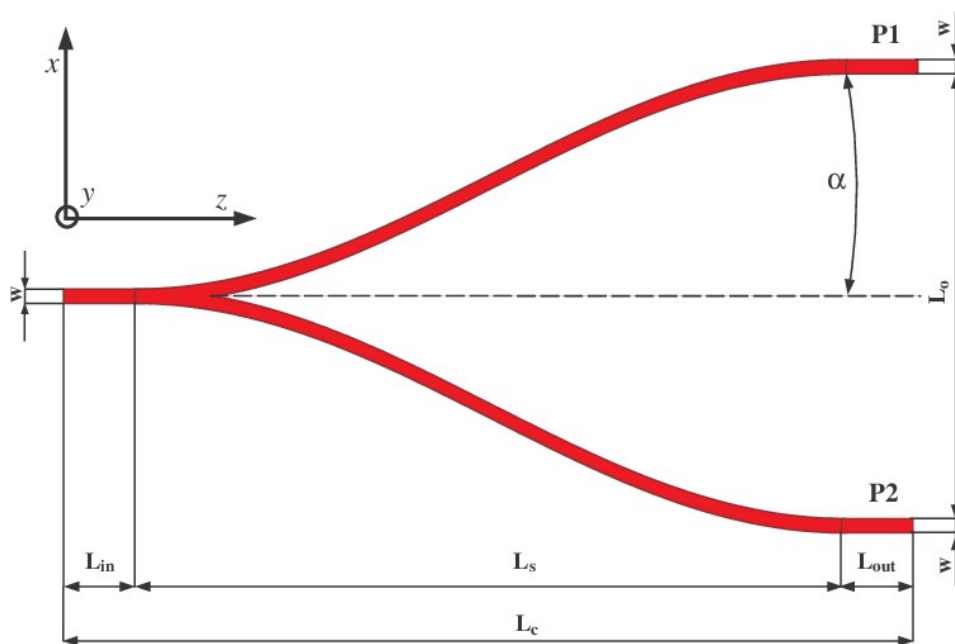
V literatuře je mnoho prací zabývajících se vytvořením numerického modelu řešením difuzní rovnice. [51][52][53]. Všechny výpočetní metody vyžadují pro svoje řešení znalost materiálových konstant, které se liší pro každý typ použitého materiálu. V současné době není komerčně dostupné sklo vhodné pro iontovou výměnu, pro nějž by výrobce uváděl potřebné materiálové konstanty pro výpočet vlastností optických vlnovodů.

Cílem provedeného výzkumu bylo získat kvalitní vstupní informace pro numerické modelování složitějších struktur vyrobených na unikátních základních materiálech, které mohou být na základě provedeného výzkumu optimalizovány. Základním pilířem práce uvedené v této kapitole je charakterizace základního materiálu skloviny, která díky modifikacím složení umožňuje variabilitu parametrů kanálkového vlnovodu. Neméně důležitou roli sehrává definování podmínek iontové výměny, kterými lze kromě velikosti vlnovodu modifikovat také profil indexu lomu a koncentrační gradient.

Dosažení relevantních vstupních hodnot pro uvedené simulace je klíčové pro provádění dalšího výzkumu složitějších struktur v této oblasti. Výsledky výzkumu v této kapitole byly publikovány v [89]. Dále byly výsledky výzkumu využity v roce 2013 při řešení grantového projektu [99] a při zavedení poloprovozu teplotního senzoru s vlnovodnou polymerovou Braggovskou mřížkou [101].

4.2. Návrh a vytvoření modelu pasivní optické výkonové rozbočnice

Struktura pasivní optické výkonové rozbočnice je základním stavebním kamenem všech optických sítí. Jedná s o strukturu umožňující rozdělení optického signálu z $N \times N$ větví. Základní takovou strukturou je rozbočnice s dělicím poměrem 1x2. Kaskádním uspořádáním této struktury lze dosáhnout složitějších řešení umožňujících rozdělení optického signálu v požadovaném dělicím poměru s případnou výkonovou nesymetrií. S přihlédnutím k nutnosti integrace všech komponent optických sítí je třeba brát zřetel na miniaturizaci řešení, s ohledem na přenosové parametry dané součástky. Cílem výzkumu, uvedeného v této kapitole, je s pomocí výsledků dosažených v kapitole 2.1 optimalizovat rozměry struktury pasivní optické výkonové rozbočnice se symetrickým dělicím poměrem 1x2. Strukturu optické výkonové rozbočnice s dělicím poměrem 1x2 můžeme rozdělit do třech částí (Obr. 23).



Obr. 23. Struktura optické rozbočnice s Y větvením

Vstupní vlnovod tvoří jednovidový difuzní kanálek, navržený v předchozí kapitole, délky L_{in} na který navazuje oblast, ve které dochází k rozdělení optického signálu L_S . Tyto zahnuté segmenty (Cosine S-bend) se stávají ze dvou oblouků, které na sebe plynule přecházejí [48]. Výstupní vlnovody délky L_{out} plynule navazují na segmenty L_S a umožňují vyvázání výkonu do další struktury, případně do optického vlákna. Kritickým elementem struktury rozbočnice je oblast zakřiveného vlnovodu, kde může docházet vlivem překročení mezního úhlu α k ztrátám. Délka vlnovodu L_S je obvykle úměrná počtu výstupních ramen struktury a jejich vzájemné rozteči L_O .

V první fázi návrhu je třeba najít optimální úhel, který svírají ramena výstupních vlnovodů. Budeme-li uvažovat rozteč L_O mezi výstupními vlnovody a úhel α_s v intervalu v intervalu $0,5^\circ - 5^\circ$, získáme dosazením do vzorce (4.2.1)

$$L_S = \sin \left[\frac{L_O / 2}{\alpha_s} \right] \quad (4.2.1)$$

odpovídající délky zakřivených vlnovodů L_S . Konkrétní délky vlnovodů odpovídající různým velikostem úhlu α_s jsou uvedeny v následující tabulce Obr. 19.

Tab. 13. Výsledky výpočtu délky zakřivených vlnovodů v závislosti na úhlu α_s

α_s [°]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
L_S [μm]	14324	7161	4773	3579	2863	2385	2043	1787	1588	1428

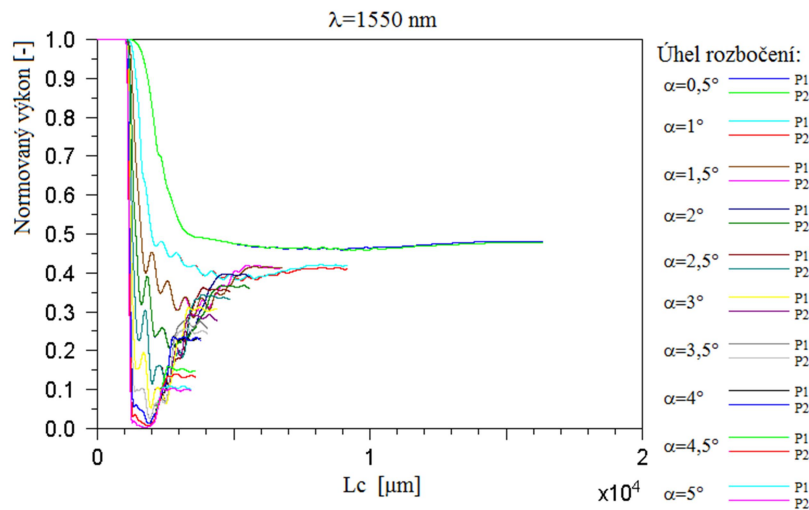
Cílem návrhu je, aby byl podélný rozměr struktury pokud možno co nejmenší. Se zvyšujícím dělicím poměrem hraje délka každého členu kaskády významnou roli, neboť s rostoucí délkou struktury také roste optický útlum. Na druhou stranu, při zkracování struktury resp. při překročení mezního úhlu α_s začne docházet ke ztrátám způsobeným vyvazováním optického záření z vlnovodu. Tento jev je značně závislý na vlnové délce záření. Lépe řečeno na velikosti vidového pole daného kanálkové vlnovodu, které se s rostoucí se vlnovou délkou zvětšuje. Z uvedených důvodů byl pro návrh struktury optické výkonové rozbočnice proveden na vlnové délce 1550nm.

Simulace šíření svazku rozbočnicí byla provedena pro všechny vypočítané délky vlnovodů L_S . Výsledky jsou shrnuty v následujícím obrázku a v Tab. 14.

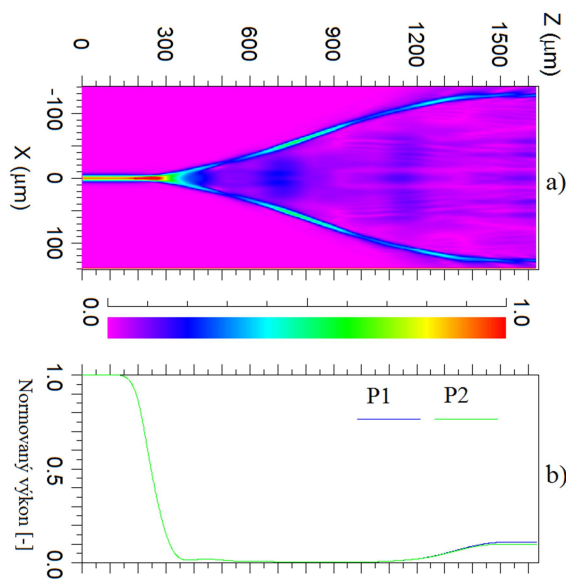
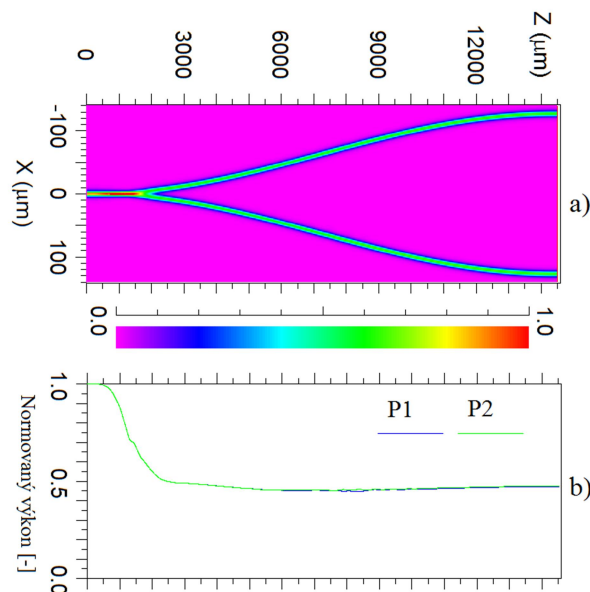
Tab. 14. Výkonová bilance na výstupu rozbočnice 1x2 pro úhel rozbočení $0,5^\circ - 5^\circ$

α_S [°]	L_S [mm]	P1 [dB]	P2 [dB]
0,5	14324	-3,18	-3,18
1,0	7161	-3,78	-3,81
1,5	4773	-3,82	-3,83
2,0	3579	-4,08	-4,47
2,5	2863	-4,50	-4,77
3,0	2385	-5,14	-5,56
3,5	2043	-5,89	-6,14
4,0	1787	-6,37	-6,46
4,5	1588	-8,23	-8,79
5,0	1428	-9,96	-10,07

Z výsledků simulace BPM je patrné, že s klesající délkou vlnovodů L_S vzrůstají ztráty způsobené přílišným zakřivením vlnovodů. Při odečtení normovaného výkonu z výsledku simulace (Obr. 24) můžeme vidět, že přijatelného přenosu je dosaženo pro úhel α_S , v rozsahu $0,5^\circ - 2,0^\circ$. Optimálním úhlem je však dle simulace pouze úhel $0,5^\circ$, kterému odpovídá délka vlnovodů $L_S = 14\,324\mu\text{m}$.



Obr. 24. Výsledky simulace BPM rozbočnice 1x2 pro úhly rozbočení $0,5^\circ - 5^\circ$ a $\lambda = 1550\text{nm}$

Obr. 25 Simulace šíření svazku pro uhel $\alpha_s = 5,0$ Obr. 26. Simulace šíření svazku pro uhel $\alpha_s = 0,5$

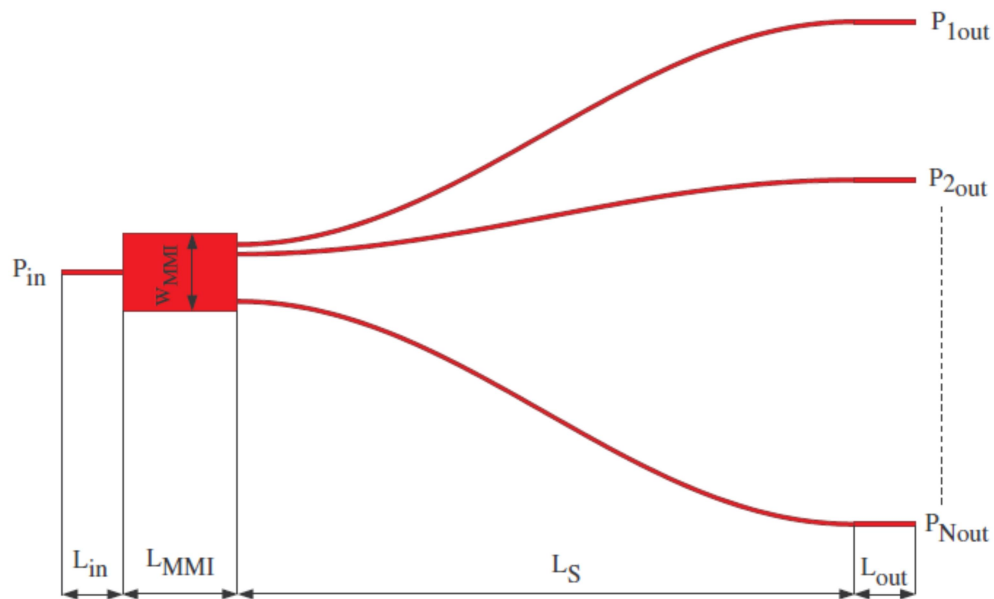
Shrnutí a diskuze

V této kapitole byl popsán návrh optické pasivní rozbočnice s gradientním kanálovým vlnovodem, s dělicím poměrem 1x2. Nejvýraznější výhodou planárních optických rozbočnic vůči rozbočnicím zhotoveným např. fúzní technologií je velmi široké pásmo pracovních délek, pokrývající prakticky celé telekomunikační spektrum. Zároveň byl popsán a vytvořen model struktury s dělicím poměrem 1x2, kde je využit navržený kanálový vlnovod z předchozí kapitoly. Klíčovým aspektem návrhu optické výkonové rozbočnice je optimalizace segmentů, ve kterých dochází k dělení optického signálu. Při návrhu byl kladen důraz na optimalizaci této oblasti a zachování přijatelných přenosových parametrů.

Z výsledků simulace je zřejmé, že minimálních ztrát struktury způsobených překročením kritického úhlu rozbočení, je možné dosáhnout pro úhel $0,5^\circ$, kterému při rozteči mezi výstupními vlnovody $250\mu\text{m}$ odpovídá délka zakřivených segmentů rozbočnice $14\,324\ \mu\text{m}$. Vypočítané parametry navržené optické rozbočnice byly využity pro návrh litografické masky (Příloha A) a přípravu depozičních testů. Tento výzkum probíhal za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT [97]. Výsledky uvedeného výzkumu byly publikovány v článku [90]. Dále byly výsledky uvedeného výzkumu využity při zavedení poloprovozu výroby optických planárních rozbočnic ve firmě SQS Vlákenná optika a.s.[100][102]

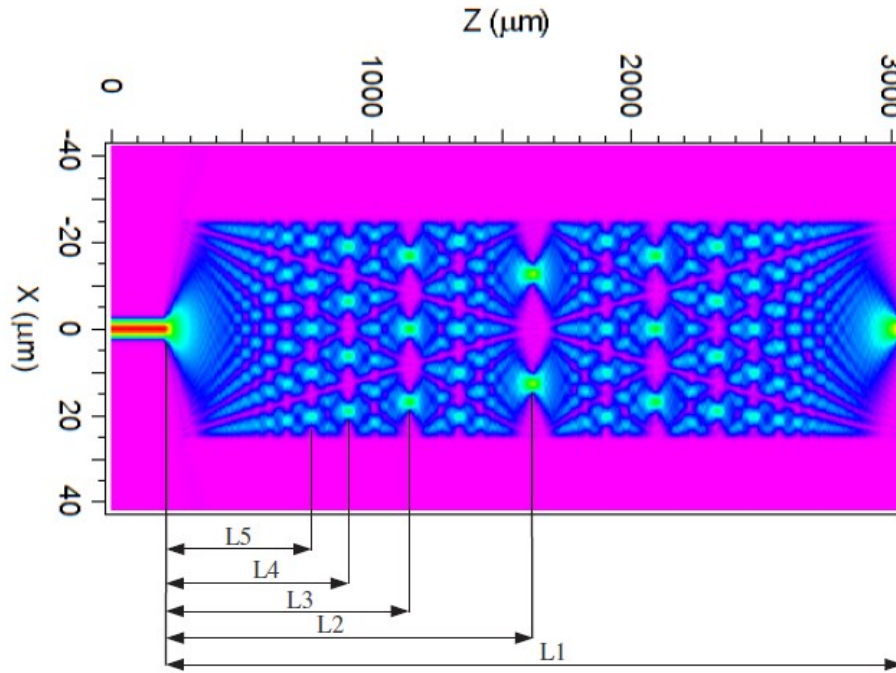
4.3. Návrh a simulace optické výkonové rozbočnice pracující na principu interference v mnohavidovém vlnovodu

Optické rozbočnice pracující na principu interference v mnohavidovém vlnovodu (MMI) jsou zvláštním případem pasivních optických struktur využívajících ke své funkci kombinaci vlastností vlnovodu pracujícího v jednovidovém a mnohavidovém pracovním režimu (Obr. 27).



Obr. 27. Struktura optické interferenční rozbočnice

Návrh interferenční struktury je nutné rozdělit do několika kroků. Podmínkou správné funkce struktury je správně navržený jednovidový vlnovod, který slouží k excitaci interferenční oblasti a vyvázání signálu z interferenční oblasti zpět do vlnovodu. Interferenční oblast musí být navržena tak, aby umožňovala vedení potřebného počtu vidů a její šířka W_{MMI} a délka L_{MMI} dovolila vznik požadované konstruktivní interference. V případě tzv. symetrické interference platí přibližné pravidlo, které říká, že interferenční oblast, v níž má být dosaženo N -násobného interferenčního obrazu by měla umožňovat vedení nejméně $N+1$ symetrických vidů, kde N je stupeň rozbočení. V případě splnění těchto kritérií je možné dosáhnout vzniku tzv. interferenčních obrazů, jak je uvedeno na Obr. 28. [55]



Obr. 28. Detail oblasti mnohavidového vlnovodu excitovaného vstupním jednovidovým vlnovodem a vznik interferenčních obrazů

Velmi důležitou částí návrhu je určení šířky oblasti mnohavidového vlnovodu W_{MMI} , která nemůže být zvolena libovolně. Pro stanovení vzdálenosti zobrazení vstupního pole je třeba určit tzv. záznejovou délku L_z mezi dvěma nejnižšími vidy

$$L_z \cong \frac{4n_{eff}W_{MMI}^2}{3\lambda} \quad (4.3.1)$$

kde n_{eff} je efektivní index lomu, W_{MMI} efektivní šířka mnohavidového vlnovodu a λ pracovní vlnová délka záření. V případě symetrické excitace mnohavidového vlnovodu lze nalézt tzv. interferenční obraz vstupního elektromagnetického pole ve vzdálenosti

$$L_1 \cong \frac{3L\pi}{4} \quad (4.3.2)$$

a násobné interferenční obrazy, odpovídající požadovanému stupni rozbočení ve vzdálenosti

$$L_N \cong L_{MMI} \cong \frac{3L\pi}{4N} \quad (4.5.3)$$

Vzhledem k tomu, že je interferenční oblast excitována symetricky, je taktéž N -násobný obraz vzhledem k topologii struktury symetrický. energii lokalizovanou

v oblastech interferenčních obrazů je třeba navázat do výstupních jednovidových vlnovodů. Aby však nedocházelo k vazbě mezi výstupními vlnovody, měla by být splněna podmínka

$$\frac{W_{MMI}}{N} \geq 2w \quad (4.3.4)$$

Úkolem výstupních vlnovodů je zajistit přenos energie mezi strukturou optické rozbočnice a optickým vláknem. Stejně jako v případě optické rozbočnice s Y-větvením je třeba dbát na rozteč mezi výstupními světlovody s ohledem na rozměry optického vlákna a na zakřivení vlnovodů.

Podélné rozměry celé struktury jsou stanoveny příspěvkem délky vstupního vlnovodu L_{in} interferenční oblasti L_{MMI} a délky výstupních vlnovodů, skládající se ze zakřivených vlnovodů délky L_S a rovného úseku vlnovodu délky L_{out} . Příčné rozměry struktury jsou závislé především na počtu výstupních vlnovodů a jejich vzájemné rozteči.[55][56][63][70]

4.3.1.Návrh a simulace optické MMI rozbočnice 1x3

Návrh optické interferenční rozbočnice byl proveden za pomoci 3D metody šíření svazku BPM, implementované v programovém balíku pro návrh optických integrovaných struktur RSoft BeamPROP. Model rozbočnice je vytvořen pro strukturu s dělicím poměrem 1x3, optimalizovanou pro pracovní délku 1550 nm.

Stejně jako v případě optické výkonové rozbočnice s Y větvením, byl i v tomto případě použit jako základní prvek struktury jednovidový kanálkový vlnovod navržený v kapitole 2.1.

Základní podmínkou uniformního rozdělení výkonu vstupujícího do interferenční oblasti je aby tato oblast umožňovala vedení nejméně $N+1$ laterálních vidů, v tomto případě nejméně čtyř laterálních vidů. Ve směru do hloubky vlnovodné vrstvy by měl být navržená oblast MMI jednovidová.

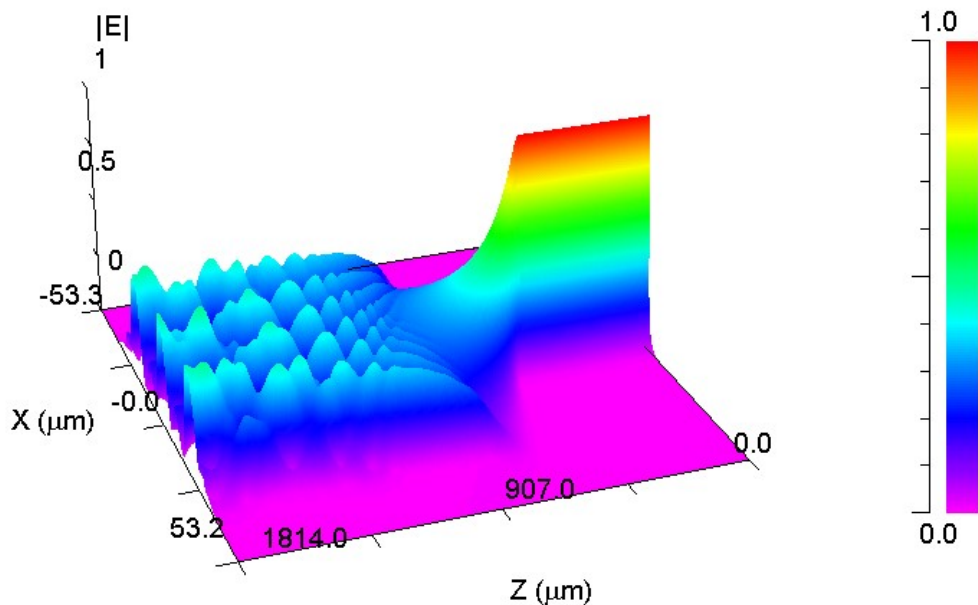
Prvním krokem návrhu je v tomto případě určení šířky interferenční oblasti W_{MMI} . Délka L_{MMI} je prozatím zvolena s dostatečným přídavkem, tak aby hledaný interferenční obraz nebyl zformován za její hranicí. K nalezení parametru W_{MMI} a L_{MMI} byl použit optimalizační nástroj MOST programového balíku RSoft. Spodní limit parametru W_{MMI} byl stanoven dle vztahu (2.5.4) na hodnotu $57\mu\text{m}$. Dostatečná hranice pro nalezení 3-násobného obrazu vstupního pole by měla být $70\mu\text{m}$. Krok, se kterým bude výpočet opakován, byl stanoven na $0,5\mu\text{m}$ a délka L_{MMI} odpovídající horní hranici intervalu W_{MMI} , vypočítaná dle (2.5.3), je $1590\mu\text{m}$. Nejlepších výsledků rozložení interferenčních maxim bylo dosaženo pro $W_{MMI} = 68,5\mu\text{m}$. Výpočtem podle vztahu 2.5.3 získáme délku L_{MMI} , která v pro uvedenou šířku interferenční oblasti

dosahuje 1505 μm . Z výsledků simulace můžeme odečíst, že délka L_{MMI} dosahuje pouze 1495 μm . Rozdíl mezi vypočtenou hodnotou pomocí vztahu (2.5.3) a hodnotou vypočtenou simulací je v tomto případě 10 μm .

Tab. 15. Parametry navržené struktury MMI rozbočnice.

1:N	λ [nm]	W_{MMI} [μm]	L'_{MMI} [μm]	L_{MMI} [μm]	ΔL_{MMI} [μm]
1:3	1550	39	1495	1505	-169

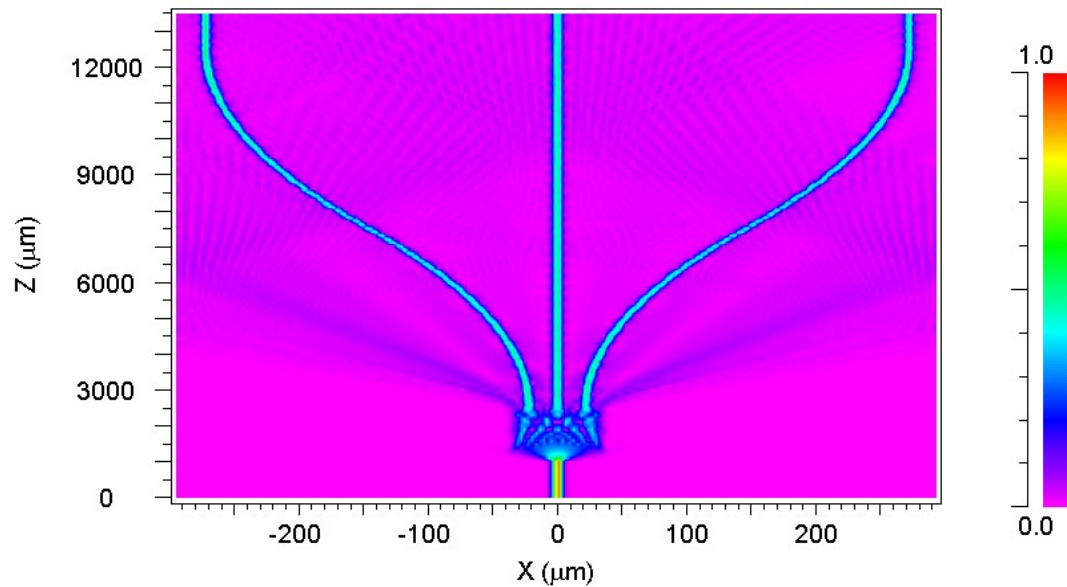
Vlnovodná vrstva s gradientním indexem lomu není v interferenční oblasti ostře ohraničena tak jako u vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu. I přes optimalizaci parametrů zde dochází k disperzi energie mimo oblast interferenčních obrazů. Toto záření pak není možné navázat do výstupních vlnovodů a proniká do substrátu, kde je později utlumen. Zejména však v počátcích přechodu interferenční oblasti do výstupních vlnovodů může způsobovat nežádoucí ovlivňování vedeného záření.



Obr. 29. Rozložení energie v interferenční oblasti MMI rozbočnice pro dělicí poměr 1x3

Závěrečnou fází návrhu je stanovení délky vlnovodů, které umožní navázat výkon z oblasti interferenčních obrazů do výstupních optických vláken. Podobně jako u rozbočnice s Y-větvením je třeba dbát, aby nedocházelo ke ztrátám vlivem ohybu vlnovodů větším než 0,1dB. Dle provedených simulací je pro daný typ výkonové rozbočnice optimální délka krajních výstupních kanálů $L_s = 9\,324$ μm . Budeme-li uvažovat délku vstupního resp. výstupních vlnovodů 300 μm , dosáhneme s dalšími délkovými příspěvky celkové délky struktury 12 000 μm .

Obr. 30 Znáznorňuje BPM simulaci celé struktury navržené interferenční rozbočnice 1x3 kde bylo dosaženo efektivity přenosu při průchodu strukturou 29,8% pro každé z ramen. Výsledek simulace jasně ukazuje výkonovou ztrátu, vlivem nedokonalé vazby signálu do výstupních vlnovodů v oblasti interferenčních obrazů. Tento jev je však způsoben difuzním profilem indexu lomu a může být kompenzován strmějším změnou koncentračního gradientu.



Obr. 30. Simulace šíření signálu navrženou strukturou MMI rozbočnice 1x3

4.3.2. Realizace interferenční rozbočnic 1x2

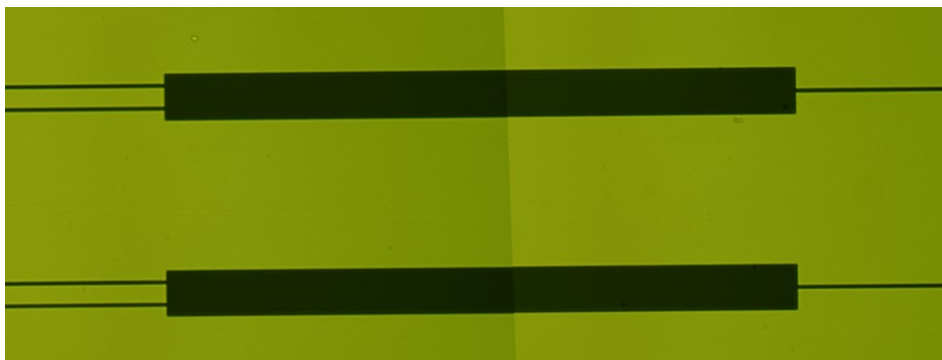
Z výsledků simulací je patrné, že difuzní profil vlnovodu má velmi silný vliv na tvorbu interferenčních obrazů v oblasti MMI. Pro realizaci funkčních vzorků bylo přistoupeno ke zjednodušení topologie struktury, za účelem snížení stupňů volnosti a proveden návrh optické interferenční rozbočnice s dělicím poměrem 1x2. Parametry navržené struktury jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 16. Parametry navržené MMI optické rozbočnice pro výrobu funkčních vzorků

1:N	λ [nm]	W_{MMI} [μm]	L'_{MMI} [μm]	L_{MMI} [μm]	L_s [μm]
1:2	1550	39	577	746	14 324

Dále byla na základě výsledků simulací navržena litografická maska s označením SGS12/072/OHK3/1T/13. Tato maska byla použita pro provedení základních depozičních testů a optimalizaci parametrů iontové výměny pro výrobu struktur MMI rozbočnic.

Litografická maska obsahuje celkem dvě sady 1x2 MMI rozbočnic. Pro první sadu rozbočnic byl zafixován parametr délky $L_{\text{MMI}} = 700 \mu\text{m}$. Jako proměnná byla zvolena šířka interferenční oblasti W_{MMI} v rozsahu $30\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$ s krokem $1 \mu\text{m}$. Pro druhou sadu rozbočnic byl zafixován parametr délky $L_{\text{MMI}} = 1000 \mu\text{m}$ se stejným rozsahem šířky interferenční oblasti. Detail navržených MMI rozbočnic na litografické masce je znázorněn na Obr. 31.



Obr. 31. Struktury MMI rozbočnic 1x2 deponované na substrátu

Litografická maska byla deponována na wafer s označením T7-38, na kterém byla následně provedena jednostupňová iontová výměna za podmínek uvedených v následující tabulce.

Tab. 17. Parametry iontové výměny aplikované při realizaci funkčních vzorků MMI rozbočnic.

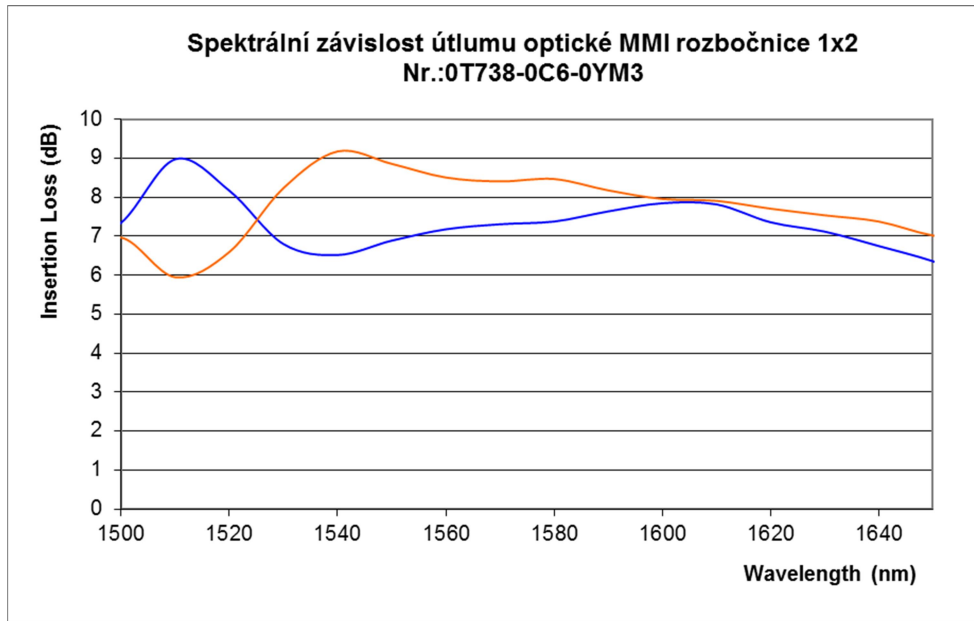
<i>1. Iontová výměna</i>			
Vzorek	Tavenina	Teplota [°C]	Čas [min]
T7-38	14mol% AgNO ₃	280	120

Po rozřezání waferů na jednotlivé čipy a vybroušení čelních ploch byla k čipům vstupní a výstupní vláknová pole umožňující zafixování optických vláken v umístění s nejlepší vazební účinností.

Tato justáž byla provedena na diskretní vlnové délce 1550 nm , se zdrojem laserového EXFO Laser light source SLS – 2100. Následně byla provedena spektrální analýza rozbočnice, za použití spektrálního analyzátoru Photon Kinetics PK2220. Tento přístroj umožňuje širokospektrální měření, aniž by bylo nutné vstupní a výstupní vlákna konektorovat. Výsledná měření zahrnují kromě vlastního vložného útlumu struktury také vazební ztráty mezi čipem optické rozbočnice a vstupním a výstupním

optickým vláknem. Ztráty optického vlákna můžeme vzhledem k jeho délce pouhých několika metrů zanedbat.

Z několika provedených měření můžeme konstatovat, že nejlepších přenosových parametrů bylo dosaženo pro strukturu rozbočnice s interferenční oblastí $W_{\text{MMI}} = 41\mu\text{m}$ a $L_{\text{MMI}} = 1000\mu\text{m}$. Změřená přenosová charakteristika v rozsahu 1500nm – 1650nm uvedené rozbočnice je na Obr. 32.



Obr. 32. Spektrální závislost útlumu realizovaného vzorku optické MMI rozbočnice 1x2

Shrnutí a diskuze

Provedený výzkum se zabývá návrhem, simulacemi a výrobou funkčních vzorků optických rozbočnic pracujících na principu interference v mnohavidovém vlnovodu. V první fázi byla navržena a simulována struktura výkonového děliče s interferenční oblastí s dělicím poměrem 1x3. Z podrobné studie způsobu výpočtu vyplývá, že pro difuzní profil indexu lomu v interferenční oblasti struktury nelze dosáhnout analytickým výpočtem přesného řešení.

Rozdíl délky interferenční oblasti vypočítaný analytickým řešením dle uvedených vztahů a výpočtu provedeného simulačním software pomocí metody BPM je nezanedbatelný. Je korektní tvrdit, že výsledek dosažený numerickým řešením je přesnější, neboť bylo jako vstupních proměnných použito experimentálně získaných dat na konkrétním materiálu a konkrétní technologii. Výsledky uvedené práce byly publikovány v časopise Radioengineering.[91]

V druhé fázi byly provedeny depoziční testy, ze kterých bylo získáno několik funkčních vzorků uvedených rozbočnic. Při depozičních testech byla použita litografická maska, která vznikla za podpory studentské grantové soutěže ČVUT na Katedře mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické. Samotné depoziční testy byly provedeny v laboratořích firmy SQS Vlákenná optika, která se iontovou výměnou dlouhodobě zabývá.

Vzorky byly vytvořeny pomocí jednostupňové iontové výměny. Ze změřené spektrální charakteristiky lze vyčíst posun pracovní oblasti vlnových délek děliče, který je oproti návrhu 50 nm. V této pracovní oblasti je ovšem dosaženo velmi solidní uniformity rozdělení optického výkonu. Ze změřené spektrální charakteristiky je dále patrný vyšší vložný útlum, který je způsobený nepřizpůsobením vidového pole na vstupním a výstupním nezanořenému vlnovodu. Odchytku vypočítaných hodnot od reálně dosažených parametrů struktury lze stejně jako vyšší vložné ztráty možné vztáhnout k výrobním tolerancím procesu iontové výměny a difuznímu profilu povrchového vlnovodu. Obecně lze říci, že před každou opakovatelnou výrobou nového typu struktury pomocí technologie iontové výměny předchází poměrně náročná iterace výrobních parametrů, která vede k dosažení striktních přenosových parametrů, požadovaných v optických komunikacích. Výsledek, kterého bylo dosaženo při realizaci navržené struktury interferenčního děliče 1x3 lze proto považovat za velice pozitivní.

4.4. Studium erbíto – ytterbitého silikátového skla s příměsí zinku pro struktury aktivních vlnovodů

V druhé polovině práce je výzkum zaměřen na návrh a realizaci aktivních kanálkových vlnovodů na substrátech dopovaných prvky vzácných zemin. Pro přípravu aktivních vlnovodů pomocí technologie iontové výměny, byla zvolena specifická sklovina. Jedná se o silikátové sklo dopované lanthanoidy erbiem a ytterbiem s přísadkou oxidu zinečnatého. Na vývoji tohoto materiálu po mnoho let spolupracuje Ústav skla keramiky a Ústav anorganické chemie VŠCHT v Praze. Výhoda silikátových skel spočívá především ve variabilitě chemického složení, které umožňuje snadno měnit jeho optické vlastnosti. Pro aplikaci v odvětví optických zesilovačů je ovšem zásadní vhodně zvolený poměr erbia a ytterbia, který umožňuje dosáhnout luminiscence v oblasti 1535nm. Cílem výzkumu v této kapitole analyzovat optickou aktivitu substrátových materiálů dopovaných prvky vzácných zemin s příměsí zinku a určit vhodné sklo pro realizaci vzorků aktivní kanálkových vlnovodů a aktivní optické rozbočnice kompenzující vlastní vložný útlum.

4.4.1. Požité materiály substrátů silikátových skel

Základ skelného substrátu studovaného v této části práce tvoří silikátová sklovina s označením GZ4. Konkrétní složení skloviny je uvedeno v Tab. 18.

Tab. 18. Základní složení základního skla GZ4

Oxidy	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZnO
Hmotnostní podíl [hm. %]	14,00	68,96	1,04	16,00

Složení skla GZ4 bylo následně modifikováno oxidy vzácných zemin Er₂O₃ a Yb₂O₃ s cílem nalézt vhodný koncentrační poměr těchto dvou oxidů tak, aby byla optimalizována intenzita absorpce v oblasti čerpání (980 nm) a intenzita luminiscence v oblasti zesílení (1535 nm). K tomuto účelu bylo zhotoveno několik experimentálních taveb optických skel s fixním podílem erbia 1 at. % a proměnným množstvím ytterbia v rozsahu 0 at. % až 5 at%. Při studiu těchto taveb se prokázalo, že při překročení podílu 6 at% prvků vzácných zemin začne docházet k tzv. klastrování a další zvyšování koncentrace lanthanoidů je kontraproduktivní. [21][25][29]

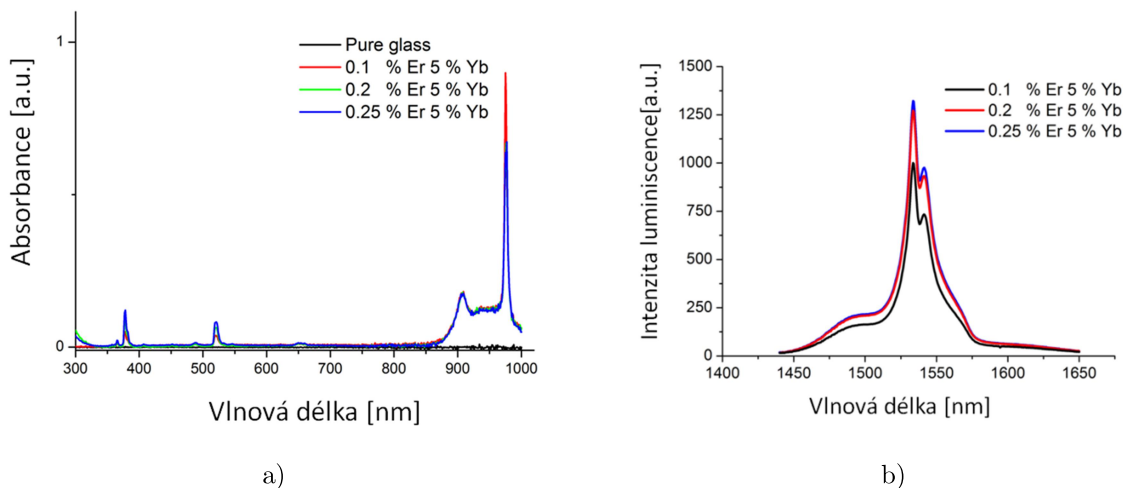
Připravena byla druhá sada, kde bylo zafixováno množství ytterbia ve skelné matici na úrovni 5 at. % a snižováno bylo množství erbia až na hranici 0,1 at. %.

Vzájemné poměry erbia a ytterbia v základní sklovině GZ4 jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19. Vzájemné poměry erbia a ytterbia přidávané do základního skla GZ4

Podíl erbia [at. %]	1	1	1	1	1	1	0,5	0,25	0,2	0,1
Podíl ytterbia [at. %]	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5

Na Obr. 33 je uveden vliv koncentračního poměru erbia a ytterbia na absorpční a luminiscenční spektra skla GZ4.

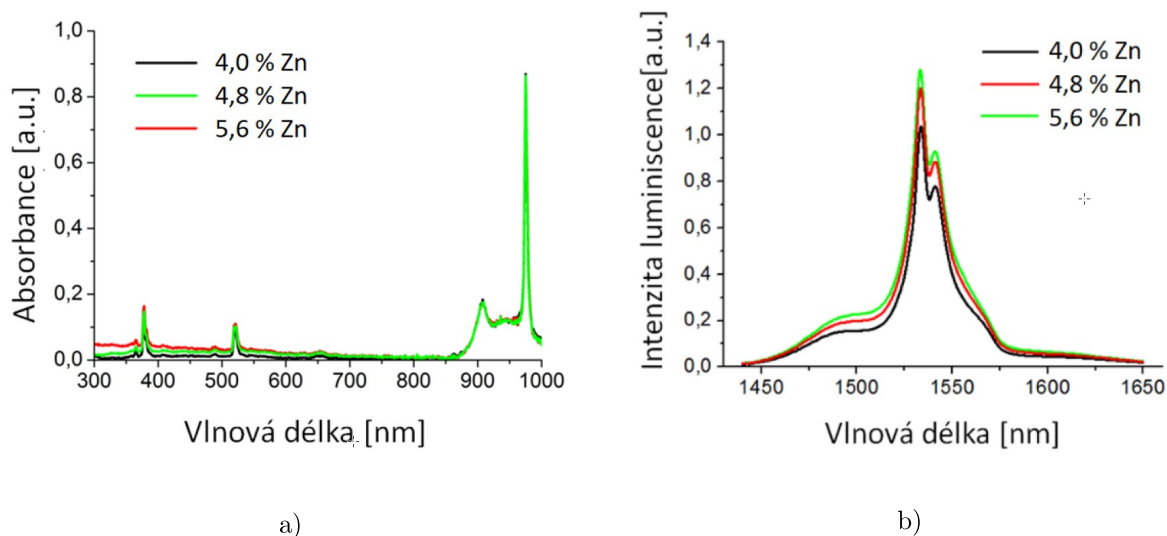


Obr. 33. a) Změřené absorpční spektrum pro skla s 5 at. % Yb a měnícím se množstvím Er. b) Změřené luminiscenční spektrum pro skla s 5 at. % Yb a měnícím se množstvím Er.

Z absorpčního spektra je patrné, že velmi malé změny koncentrace erbia při konstantním objemu Yb 5 at. % vedou k rozdílné míře absorpce. Nejvyšší hodnotu absorpce na vlnové délce 980 nm vykazuje sklovina Er 0,1 at. % a 5 at.% Yb. Stejně tak i v případě luminiscenčního spektra jsou evidentní rozdíly v míře luminiscence v závislosti na koncentraci prvku erbia. V tomto případě vykazuje nejvyšší míru luminiscence sklo s 0,25 at. % erbia a 5 at. % Yb. Srovnatelné hodnoty dosahuje sklo s 0,2 at. % erbia a z této trojice nejnižší hodnoty vykazuje sklovina s 0,1 at. % erbia. Na základě těchto analýz byla stanovena optimální hodnota koncentrace prvků vzácných zemin pro substráty, pro přípravu optických zesilovačů na hodnotu 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb.

Silikátová skla mají v porovnání s např. fosfátovými skly výrazně nižší rozpustnost prvků vzácných zemin ve své struktuře. Tento jev je možné významně ovlivnit přidáním oxidu zinečnatého do skelné matrice. Přítomnost oxidu zinečnatého navíc velmi příznivě ovlivňuje hodnoty luminiscence, což je velmi důležité s ohledem na dosažení co nejvyšší hodnoty zesílení optického zesilovače.[21]

Pro účely výzkumu optických zesilovačů vyrobených technologií iontové výměny byla připravena sada tří silikátových skel 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb, s různým obsahem zinku. Obsah tohoto oxidu se pohyboval v rozmezí od 4,0 at. % do 5,6 at. % Zn.



Obr. 34. a) Změřené absorpční spektrum sklo GZ4 s 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb a měnícím se obsahem zinku, b) Změřené luminescenční spektrum sklo GZ4 s 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb a měnícím se obsahem zinku

V absorpčním spektru (Obr. 34a) je stejně jako v případě skloviny bez přítomnosti zinku patrných pět absorpčních pásů na vlnových délkách 378 nm, 521nm, 655nm a 908nm a 980 nm, které odpovídají energetickým hladinám erbia $^4G_{11/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4I_{9/2}$ a $^4I_{11/2}$, v kombinaci s ytterbiem. Nejvyšší intenzita absorpce je zřetelná na vlnové délce 980nm. Výrazný vliv koncentrace zinku na intenzitu absorpce není ve změřeném absorpčním spektru zřejmý.

V luminescenčních spektrech (Obr. 34b) jsou zřejmá dvě luminescenční maxima na vlnových délkách 1535 a 1541 nm, která odpovídají energetickému přenosu na hladinách $^4I_{13/2}$ na $^4I_{15/2}$. Z výsledků měření je patrné, že příměs zinku má pozitivní vliv způsobující zvýšení intenzity luminescence. Stejně jako pro v případě vzácných zemin není možné neomezeně zvyšovat koncentraci zinku ve skelné matici bez nežádoucích důsledků. Těmi je v tomto případě efekt separace fází způsobující nízkou optickou kvalitu skla, která je pro aplikaci optických vlnovodů nepřijatelná. Doporučená maximální hranice obsahu zinku pro silikátová skla je přibližně 6 at%. [94]. Substrátová sklovina byla tavena v experimentálních podmínkách v navázkách o hmotnosti 150g. (Obr. 35)



Obr. 35. Silikátové sklo GZ4s obsahem erbia, ytterbia a zinku (převzato z [94])

V takto malé navážce tavby je obecně velmi obtížné dosáhnout potřebné optické kvality skla v celém objemu a pro další zpracování je možné použít pouze vnitřní oblast skloviny. Po zpracování skloviny na jednotlivé wafery byla provedena optická inspekce materiálu a jeho charakterizace pomocí velmi přesného měření indexu lomu pomocí přístroje Metricon Prism Coupler a elektronové mikroskopie EMA umožňující stanovení objemu jednotlivých prvků materiálu. Změřené indexy lomu skla GZ4 s různým podílem zinku jsou uvedeny v Tab. 20.

Tab. 20. Změřený index lomu skel GZ4 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb pro různé koncentrace zinku

Zn [at. %]	4,0	4,8	5,6
Index lomu [-]	1,5419	1,5502	1,5561

Značení skel jeho složením je značně nepraktické. Pro skleněné substráty, použité pro realizaci integrovaných optických zesilovačů, bylo zavedeno značení uvedené v Tab. 21.

Tab. 21. Značení substrátů použitých skel

Označení skloviny	Základní sklovina	Podíl Er [at.%]	Podíl Yb [at.%]	Podíl Zn [at.%]
M1-N	GZ4	0,25	5	4,0
M2-N	GZ4	0,25	5	4,8
M3-N	GZ4	0,25	5	5,6

N... pořadové číslo waferu

Shrnutí a diskuze

V této kapitole jsou popsány skloviny dopované prvky erbia, ytterbia a zinku, které byly vyvinuty speciálně pro technologii iontové výměny. Základ těchto sklovin tvoří silikátové sklo s označením GZ4 jenž bylo modifikováno uvedenými prvky vzácných zemin a později také zinkem. Cílem výzkumu bylo vybrat vhodné složení skloviny pro aplikaci realizace integrovaného optického zesilovače. Výsledky výzkumu byly publikovány v impaktovaném časopise [94].

V první fázi výzkumu bylo provedeno několik experimentálních taveb optických skel s fixním podílem erbia 1 at. % a proměnným množstvím ytterbia v rozsahu 0 at. % až 5 at.% s cílem nalézt optimální poměr mezi uvedenými prvky s ohledem na absorpční resp. luminiscenční vlastnosti skloviny. Studium provedených taveb prokázalo vznik nežádoucích klastrů při překročení podílu 6 at.% prvků vzácných zemin ve skelné matici.

V druhé fázi výzkumu byly provedeny další tavby skloviny, kde bylo zafixováno množství ytterbia ve skelné matici na úrovni 5 at. % a snižováno množství erbia až na hranici 0,1 at. %. Bylo prokázáno, že i malé změny koncentrace erbia při konstantním objemu ytterbia 5 at. % vedou k poměrně významnému ovlivnění absorpčních a luminiscenčních spekter. Nejvyšší míru luminiscence vykazuje sklovina GZ4 s obsahující 0,25 at. % erbia a 5 at. % ytterbia.

Dále byly provedeny tavby, kdy byla sklovina GZ4, 0,25 at. % Er a % 5 at. Yb doplněna, za účelem zvýšení míry luminiscence, oxidem zinečnatým. Měřením vlastností připravených sklovin prokázalo, že přítomnost oxidu zinečnatého ve skelné matici silikátového skla zlepšuje rozpustnost vzácných zemin a má tak pozitivní vliv na zvýšení luminiscenčních vlastností skloviny.

Pro realizaci optických integrovaných zesilovačů vyrobených technologií iontové výměny byly připraveny tři skloviny GZ4, 0,25 at. % Er a % 5 at. Yb s obsahem zinku 4,0 at. %, 4,8 at. % a 5,6 at. %.

4.5. Realizace aktivních vlnovodů jednostupňovou iontovou výměnou

První sada kanálkových vlnovodů byla připravena jednostupňovou iontovou výměnou, tedy bez následného zanoření kanálku pod povrch substrátu. Vzhledem k omezenému dostupnému množství substrátového materiálu nemohl být tento experiment proveden na sklech s různým obsahem zinku. Vybrané vzorky jsou připraveny na substrátu M1-01 s obsahem zinku 4,0 at%. Tento substrát nebylo možné pro jeho nedostatečné rozměry použít pro dvoustupňovou iontovou výměnu, která je technologicky optimalizovaná pro wafery velikosti 2“.

Substráty, které splnily požadavky optické kvality na další zpracování, měly atypický tvar (Obr. 36). Důvodem je odstranění záprasků, přítomných v okrajových partiích skloviny. Tyto záprasky se mohou při teplotním namáhání v procesu iontové výměny dále šířit a vést až k destrukci vzorku.



Obr. 36. Wafer silikátového sklo GZ4s obsahem erbia, ytterbia a zinku

Wafery byly, po namaskování rozřezány na jednotlivé čipy, které byly dále zpracovány separátně. Pro depozici litografické masky byla zvolena fotolitografická maska SQS-VIS-01, která kromě sady štěrbin pro testování vlivu parametrů iontové výměny obsahuje také struktury optických rozbočnic. Pro účely našich experimentů byly použity sektory se sadou štěrbin různé šířky, jak je uvedeno v Tab. 22.

Tab. 22. Šířky štěrbin na litografické masce pro depoziční testy

Štěrba	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
Šířka [μm]	1,0	1,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,0	1,4	1,8

Šířka štěrbin na litografické masce se mění v rozsahu 1,0 μm až 1,8 μm . Rozteč mezi jednotlivými štěrbinami je 250 μm , resp. 500 μm . Aby bylo možné jednoznačně rozlišit orientaci čipu po jeho oddělení, jsou jednotlivé štěrbinny uspořádány do skupin dle schématu na Obr. 37.



Obr. 37. Schéma uspořádání šterbin na litografické masce

V případě použitých substrátů aktivních skel nebylo možné vzhledem k jejich atypickým tvarům a rozměrům dosáhnout zmiňovaných výrobních tolerancí šterbin, i přes to, že litografický proces byl maximální měrou optimalizován. Aby nedošlo k ovlivnění výsledků vlivem defektů deponované litografické masky, musela být provedena detailní kontrola přenesených motivů na všech použitých substrátech pomocí elektronové mikroskopie (SEM). Šterbiny, které obsahovaly kritické defekty, byly zaznamenány a struktury vzniklé z těchto šterbin byly následně vyloučeny z dalšího zpracování.

Iontová výměna byla provedena celkem do trojice čipů (C1, C2, C6) z uvedeného waferu s různou dobou trvání iontové výměny. Z těchto vzorků byly pro účely návrhu aktivních kanálkových vlnovodů vybrány vzorky uvedené v Tab. 23.

Tab. 23. Vzorky vyrobené pomocí jednostupňové iontové výměny

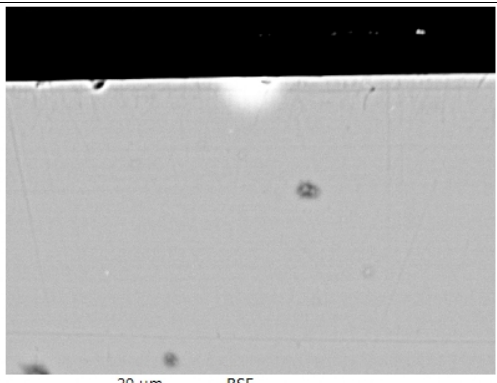
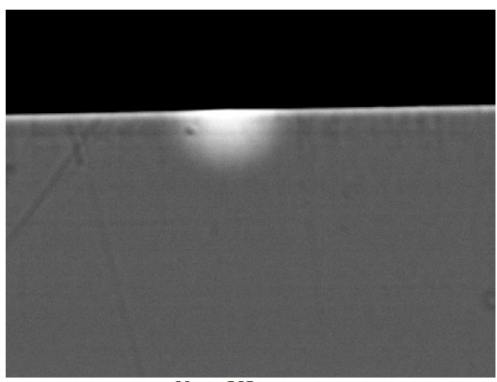
<i>1. Iontová výměna</i>			
Vzorek	Tavenina	Teplota [°C]	Čas [min]
M1-01- C1	14mol% AgNO ₃	280	120
M1-01-C2	14mol% AgNO ₃	280	60
M1-01-C6	14mol% AgNO ₃	280	30

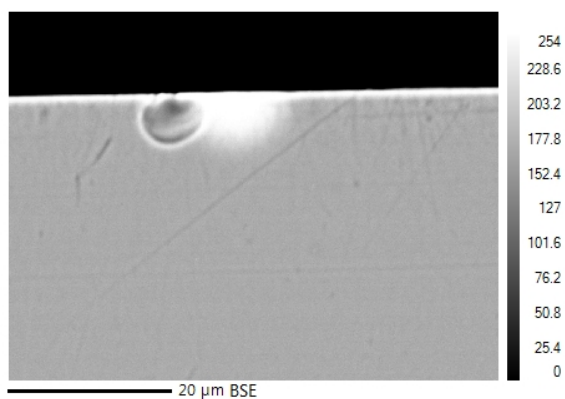
Teplota taveniny při iontové výměně byla zachována pro všechny tři vzorky na hodnotě 280°C. Taveninou tvořila zvolena směs obsahující 27hm% AgNO₃, která nese označení Tavenina E. Po provedení iontové výměny a vybroušení čel čipů byly vzorky připraveny na svojí charakterizaci.

4.5.1. Analýza vzorků aktivních nezanořených vlnodů elektronovou mikrosondou EMA

Jako první byla provedena charakterizace pomocí elektronové mikrosondy EMA, která měla za cíl určit vztah mezi šířkou štěrbiny na masce a maximální koncentrací Ag^+ v kanálkovém vlnovodu. Z předchozích experimentů víme, že se maximální koncentrace Ag^+ v tomto typu kanálkovém vlnovodu vzhledem k délce trvání iontové výměny mění v rámci chyby měření EMA. Pro analýzu byl vybrán vzorek s označením M1-C2 s dobou trvání iontové výměny 120 min. při teplotě 280°C . Vztah mezi příčnými rozměry vlnovodu a hloubkou difuze by měl být nejlépe patrný právě z tohoto vzorku. Výsledky analýzy mikrosondou EMA jsou shrnuty v Tab. 24.

Tab. 24. Analýza rozměrů a koncentrace stříbra kanálkových vlnodů vzorku s označením M1-1-C2 provedená pomocí metody EMA

Vzorek	Rozměr kanálku v ose x [μm]	Rozměr kanálku v ose x [μm]	Koncentrace Ag^+ ve středu kanálku [at. %]
 <p>M1-1-C2-K8 ($w_0=1,0 \mu\text{m}$)</p>	13,5	6,9	3,67
 <p>M1-1-C2-K9 ($w_0=1,2 \mu\text{m}$)</p>	12,4	6,7	4,18

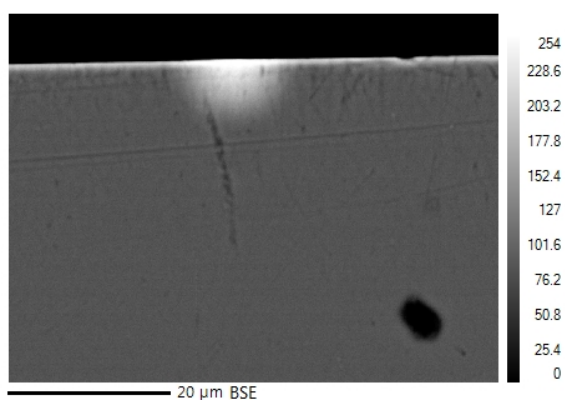


14,5

6,8

3,65

M1-1-C2-K10 ($w_0=1,4 \mu\text{m}$)

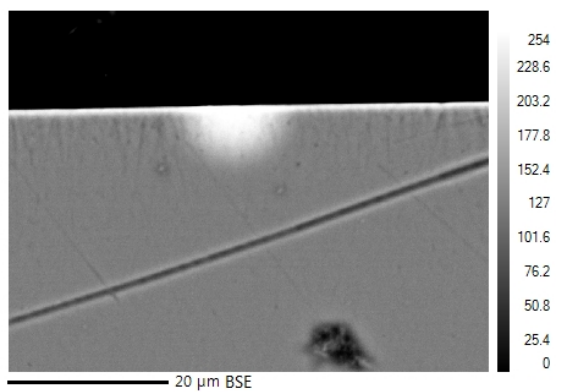


14,5

7,3

3,79

M1-1-C2- K11 ($w_0=1,6 \mu\text{m}$)



14,3

7,3

3,73

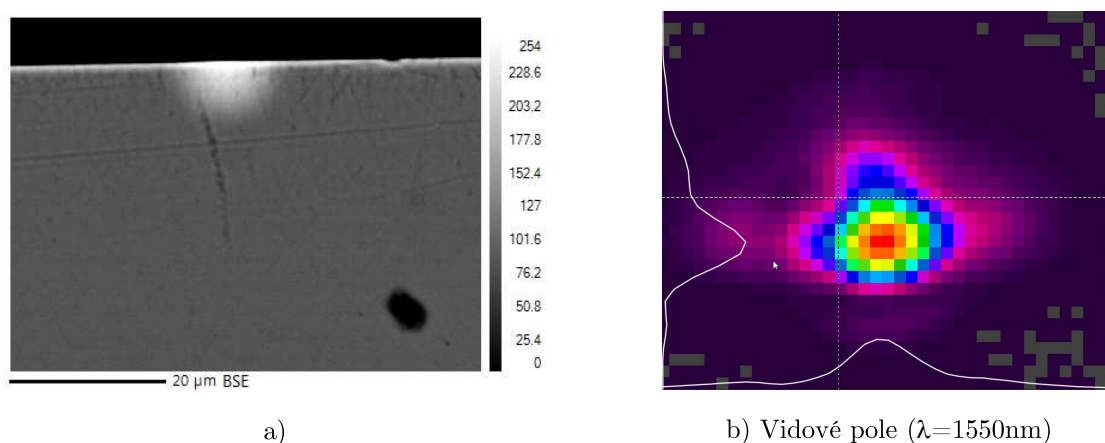
M1-1-C2- K12 ($w_0=1,6 \mu\text{m}$)

Z výsledků analýzy je zřejmé, že vytvořené kanálkové vlnovody mají difuzní profil, s povrchem kanálku lokalizovaným u povrchu substrátu. Příčný rozměr kanálku s rostoucí šířkou štěrbiny mírně roste. Je ovšem evidentní, že jeho příčné rozměry jsou díky dlouhotrvající iontové výměně markantní a eliminují do značné míry vliv štěrbiny na rozměry vlnovodu. Šířka vlnovodu se pro štěrbiny v masce rozsahu $w_o = 1,0\mu\text{m} - 1,6\mu\text{m}$ mění v rozsahu $12,4\mu\text{m} - 14,5\mu\text{m}$.

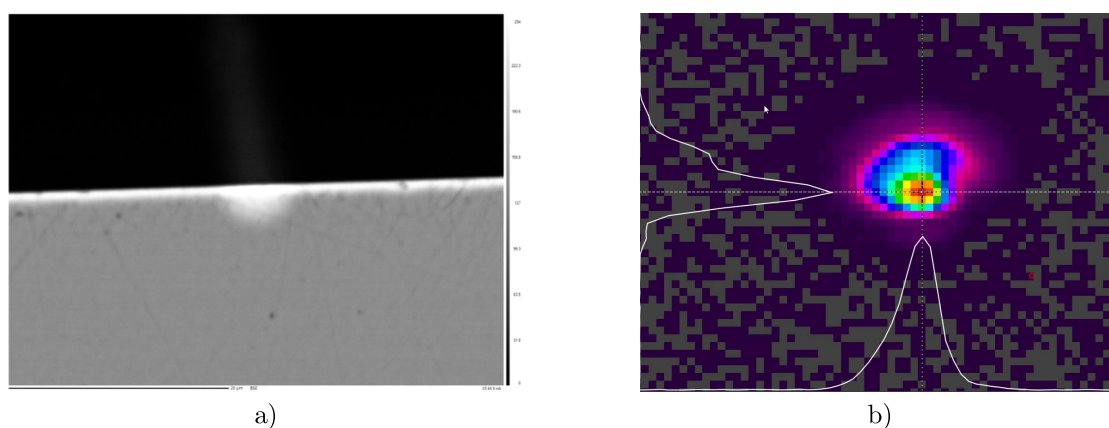
Hloubka difuze se mění v rozmezí $6,8\mu\text{m} - 7,3\mu\text{m}$ a dosahuje přibližně poloviny příčného rozměru kanálku. Tento fakt odpovídá předpokladu, budeme-li uvažovat všesměrový charakter difuze od středu štěrbiny a zachování symetrie kanálku. Maximální koncentrace stříbra v kanálku se mění v rozsahu 3,65 at. % – 4,18 at. %. Rozdíl v uvedených koncentracích je na hranici rozlišení měřícího zařízení EMA a proto můžeme jako výslednou hodnotu považovat aritmetický průměr koncentračního množství.

4.5.2. Analýza vidového pole aktivních nezanořených vlnovodů

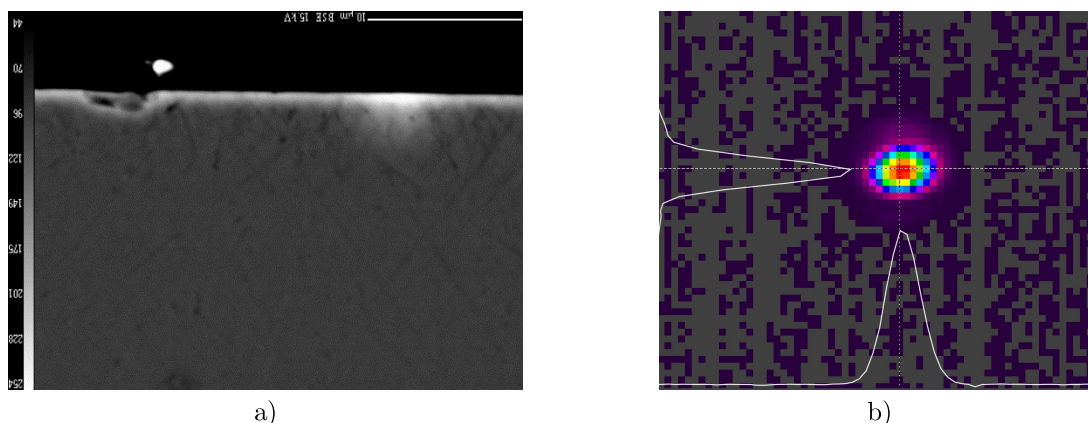
Velmi důležitým parametrem charakterizujícím vlastnosti vlnovodu je velikost vidového pole. Překryv vidových polí vstupního resp. výstupního vláknového vlnovodu připojeného k čipu má zásadní vliv na přenosové vlastnosti struktury. Velikost vidového pole byla analyzována přístrojem Spiricon Laser Beam Profiler využívajícím kameru s InGaAs senzorem, vysoce citlivou v infračervené oblasti spektra. Pomocí tohoto zařízení byla analyzována vidová pole vybraných kanálkových vlnovodů odpovídající různé době trvání iontové výměny. Profily blízkého pole spolu se změřenými difuzními profily mikrosondou EMA vybraných kanálkových vlnovodů jsou uvedeny na Obr. 38 – Obr. 40.



Obr. 38. Vzorek M1-C1-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní profil (EMA), b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$)



Obr. 39. Vzorek M1-C2-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní profil EMA, b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$)



Obr. 40. Vzorek M1-C6-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní profil EMA, b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$)

Měření mikrosondou EMA prokázalo, že velikost difuzního profilu klesá s klesající dobou iontové výměny. Hloubka difuze kanálkového vlnovodu se pro iontovou výměnu v rozmezí 30 – 120 min. pohybuje od $7,4\ \mu\text{m}$ do $2,97\ \mu\text{m}$. Příčný rozměr kanálku se pro stejný časový interval pohybuje od $5,18\ \mu\text{m}$ do $14,2\ \mu\text{m}$. Pro vyhodnocení velikosti vidového pole kanálkových vlnovodů byl použit parametr $D4\sigma$, který je normovaný dle standardu ISO 11146 [69]. Velikost svazku vyhodnoceného dle této normy odpovídá šířce pasu svazku v oblasti poklesu maximální intenzity výkonu na 13,5% [67]. Dle očekávání je zřetelná klesající velikost vidového pole vzhledem ke kratším časům trvání iontové výměny. Výsledky obou měření jsou shrnuty v Tab. 25

Tab. 25. Měření velikosti difuzního profilu a vidového pole nezanořeného kanálkového vlnovodu

Vzorek	Difuzní profilu v ose x [μm]	Difuzní profil v ose y [μm]	Velikost vidového pole v ose x [μm]	Velikost vidového pole v ose y [μm]
M1-01-C1-K6	14,2	7,4	10,4	7,6
M1-01-C2-K6	7,54	3,89	8,1	6,7
M1-01-C6-K6	5,18	2,97	5,2	4,5

Shrnutí a diskuze

V této části práce byl analyzován vliv jednostupňové iontové výměny na vlastnosti kanálkového vlnovodu na substrátu s podílem 0,25 at. % erbia, 5 at. % ytterbia a 4 at. % zinku. Cílem výzkumu bylo nalézt vztah mezi dobou trvání iontové výměny tvarem a velikostí difuzního profilu a vidovým polem kanálkového vlnovodu. Po depozici litografické masky byl wafer rozřezán na celkem šest čipů. Tři vybrané čipy prošly iontovou výměnou délky 30, 60 a 120 min v tavenině E při teplotě 280 °C. Cílem experimentu bylo realizovat vlnovody, které budou velikostí difuzního profilu odpovídat trvání iontové výměny.

Za účelem studia vztahu šířky štěrbin na litografické masce a výsledných parametrů difuzního profilu byl vyroben vzorek M1-01-C2, který byl později podroben detailní analýze mikrosondou EMA. Prostřednictvím EMA byly změřeny rozměry difuzního profilu a stanovena maximální koncentrace stříbra uvnitř vlnovodu. Výsledky prokázaly, že maximální koncentrace stříbra není za daných podmínek závislá na době trvání iontové výměny. Hloubka difuze se v závislosti na čase pohybovala v rozmezí 6,8 μm – 7,3 μm . Příčný rozměr vyrobených vlnodů se pohyboval v rozmezí 12,4 μm – 14,5 μm a je tedy vůči hloubce difuze přibližně dvojnásobný. Rozměry štěrbin, přes které probíhá difuze, není možné vzhledem k dlouhému času iontové výměny, korelovat s rozměry vlnovodu.

Dále byly prostřednictvím EMA analyzovány další dva vzorky M1-01-C1 a M1-01-C6, u kterých bylo později spolu se vzorkem M1-01-C2 změřeno blízké pole na konkrétních kanálcích. Provedená měření prokázala, že s rostoucí dobou trvání iontové výměny se zvětšují rozměry vlnovodu.

Srovnáme-li velikost vidového pole s difuzním profilem, můžeme konstatovat, že velikost vidového pole v zásadě odpovídá velikosti a tvaru difuzního profilu. Uvedené vzorky byly za účelem měření přenosových vlastností integrovány s optickými vlákny. Vlivem tvaru vyrobených kanálkových vlnovodu a skutečnosti, že je vlnovod situován při povrchu substrát, dosahoval vložný útlum vyrobených struktur více než 20dB. Vzhledem k vysokému vložnému útlumu vyrobených vzorků nebylo možné prokázat optickou aktivitu vlnodů.

4.6. Realizace vzorků aktivních kanálkových vlnovodů pomocí dvoustupňové iontové výměny

Druhá sada kanálkových vlnovodů byla připravena dvoustupňovou iontovou výměnou, kde jsou povrchové kanálkové vlnovody zanořeny v elektrickém poli a tím pohrouženy několik mikrometrů pod povrch substrátu. Vlnovody uvedených vlastností mají předpoklady pro účinnější vazbu s optickými vlákny, nižší ztráty vyvazováním záření z povrchu substrátu a také větší účinný průřez, který umožňuje zvýšení interakce optického záření s prvky vzácných zemin a tím i zvýšení zesilovacích vlastností.

4.6.1. Realizace funkčních vzorků aktivních vlnovodů

Litografická maska SQS-VIS-01 byla deponována celkem dva na dva wafery s označením M2-02 a M3-02, které svými rozměry umožňují vložení do zařízení pro provedení druhé iontové výměny.



Obr. 41. Zařízení pro iontovou výměnu v elektrickém poli

Wafery pocházejí z taveb skloviny GZ4 s obsahem 0,25 at. % erbia, 5 at. % ytterbia a 4,8 at. % (M2-02) resp. 5,6 at. % zinku (M3-02). Na základě analýzy nezanořených kanálkových vlnovodů byla pro výrobu dvoustupňovou iontovou výměnou zvolena délka trvání první iontové výměny 60 min. v tavenině E při teplotě 280°C. Můžeme tak uvažovat, že rozměry vlnovodů před zanořením by měly být 7,5 μ m x 3,9 μ m. Druhý stupeň iontové výměny byl proveden za stejných podmínek pro oba vzorky, tedy při teplotě 260°C, v tavenině bez přítomnosti iontů stříbra, době ponoření 5 minut a konstantním proudem 50 mA. Napětí v případě obou vzorků klesalo z počáteční hodnoty 450V na konečných 130V. Tento pokles napětí je způsoben změnou vodivosti skla v závislosti na fázi procesu zanoření.

Taveniny tvoří eutektické směsi upravené tak, aby měly optimální vlastnosti za zvolených pracovních teplot a především obsahovaly dostatečný počet prvků, které se účastní iontové výměny. Složení použitých tavenin při realizaci vzorků je uvedeno v Tab. 26.

Tab. 26: Složení tavenin pro přípravu kanálkových vlnodů [hm. %]

Složka taveniny	AgNO ₃	KNO ₃	NaNO ₃	NaNO ₂
Tavenina E	23,7	43,0	33,3	--
Tavenina N	--	--	51,2	44,8

Zachování parametrů druhé iontové výměny pro oba vzorky bylo zvoleno s ohledem na minimalizaci proměnných v procesu a vyhodnocení vlivu první iontové výměny na parametry zanořeného vlnovodu. Procesní nastavení obou stupňů iontové výměny při zpracování waferů je uveden v Tab. 27.

Tab. 27. Vzorky vyrobené dvoustupňovou iontovou výměnou

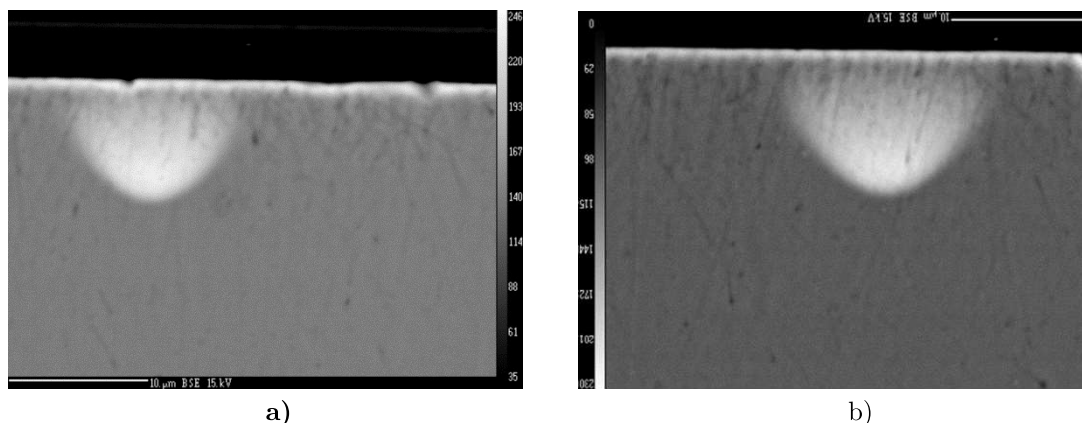
Vzorek	1. Iontová výměna		2. Iontová výměna		
	Teplota [°C]	Čas [min]	Teplota [°C]	Čas [min]	Proud [mA]
M2-02	280	60	260	5	50
M3-02	280	60	260	5	50

Po rozřezání waferů na jednotlivé čipy a opracování optických povrchů byla stejně jako v případě nezanořených kanálkových vlnodů provedena analýza vlastností vyrobených vlnodů.

4.6.2. Analýza zanořených aktivních vlnovodů elektronovou mikrosondou

Analýza elektronovou mikrosondou SEM prokázala, že došlo k zanoření kanálkových vlnovodů přibližně 2 μm pod povrch substrátu. Snímky zhotovených vzorků pořízené elektronovým mikroskopem jsou na Obr. 42.

Ze snímků je patrné, že maximální koncentrace stříbra je v dolní části vlnovodu. V důsledku procesu zanoření došlo ke zvětšení vlnovodné oblasti a změně jejího tvaru



Obr. 42. Difuzní profil kanálkového zanořeného vlnovodu a) M2-02-C4-K5, b) M3-02-C1-K4

Změřené velikosti difuzních profilů zanořených vlnovodů jsou uvedeny v Tab. 28. Z výsledků je patrné, že oba vlnovody mají prakticky stejné rozměry i maximální koncentraci stříbra v dolní části kanálku.

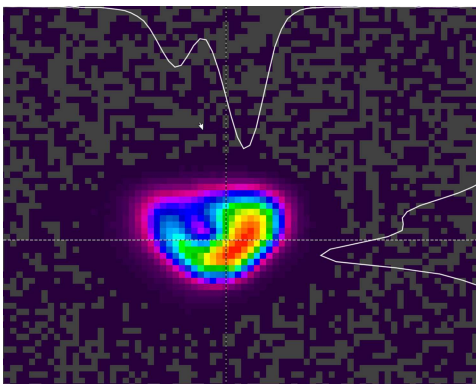
Tab. 28. Výsledky měření velikosti difuzního profilu zanořeného kanálkového vlnovodu

Vzorek	Velikost difuzního profilu v ose x [μm]	Velikost difuzního profilu v ose y [μm]	Maximální koncentrace stříbra v kanálku [at. %]
M2-02-C4-K4	11,6	7,3	3,17
M3-02-C2-K4	11,4	7,4	3,27

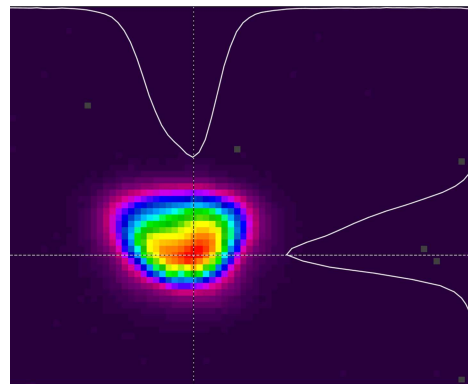
Srovnáme-li difuzní profily nezanořených vlnovodů s difuzními profily zanořených vlnovodů, můžeme sledovat zvětšení rozměrů vlnovodné vrstvy přibližně o 4 μm v příčném směru a 3,5 μm ve směru do hloubky substrátu. Dle očekávání byl naměřen pokles maximální koncentrace stříbra ve středu kanálku o 0,4 at. %. Ačkoli je tato hodnota na úrovni rozlišení měřícího zařízení, můžeme ji považovat za relevantní. Během procesu zanořování dochází kromě driftu iontů stříbra ve směru elektrického pole také k difuzi z omezeného zdroje příměsí. Difuzním zdrojem je v tomto případě kanálkový vlnovod po 1. iontové výměně. Vlivem zvětšení rozměrů kanálku tak dochází ke snížení maximální koncentrace v oblasti jejího maxima.

4.6.3. Analýza vidového pole aktivních zanořených vlnovodů

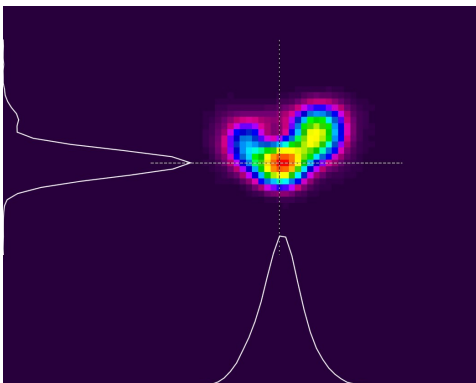
V porovnání s difuzním profilem nezanořeného vlnovodu můžeme pozorovat výraznou změnu v lokalizaci maximální koncentrace stříbra v difuzním profilu kanálku. V procesu zanoření došlo k přesunu koncentračního maxima iontů stříbra z horní oblasti kanálkového vlnovodu do jeho spodní části. Vlivem aplikovaného elektrického pole při zanořování, je mobilita oblastí s vysokým koncentračním gradientem stříbra vzhledem k okrajovým oblastem kanálku, výrazně vyšší. Výsledky měření blízkého pole tento jev velmi dobře potvrzují. Z výsledků měření uvedených na Obr. 43 – Obr. 46 je evidentní, že oblast nejvyšší intenzity výkonu koreluje se s oblastí maximální koncentrace stříbra v kanálku.



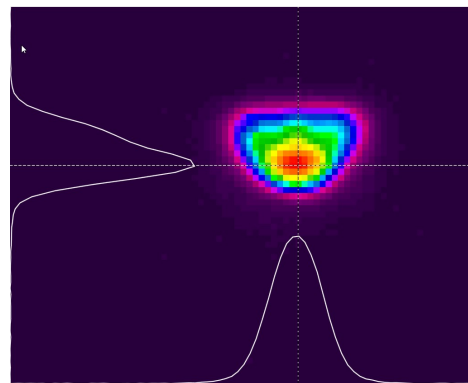
Obr. 43. Vidové pole kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4 na vlnové délce 1550 nm



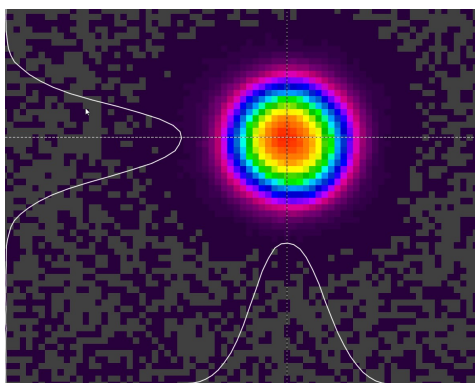
Obr. 44. Vidové pole kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4 na vlnové délce 980 nm



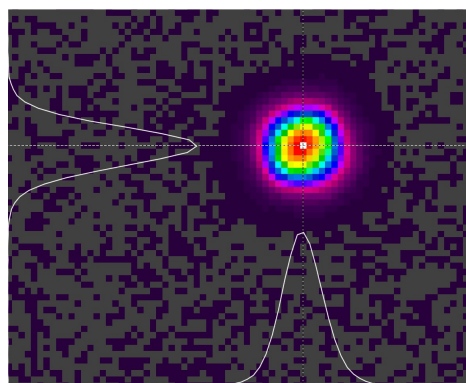
Obr. 45. Vidové pole kanálkového vlnovodu M3-02-C2-K4 na vlnové délce 1550 nm



Obr. 46. Vidové pole kanálkového vlnovodu M3-02-C2-K4 na vlnové délce 980 nm



Obr. 47. Vidové pole vláknového vlnovodu Nufern HP980-XP na vlnové délce 1550 nm



Obr. 48. Vidové pole vláknového vlnovodu Nufern HP980-XP na vlnové délce 980 nm

Navíc můžeme pozorovat zajímavý efekt deformace vidového pole, který by se na první mohl jevit jako mnohavidovost kanálku. Ta by se ovšem musela projevit spíše na nižších vlnových délkách, což je v rozporu se změřenými výsledky. Příčinu je třeba hledat ve způsobu buzení kanálku ze vstupního vláknového vlnovodu.

Pro měření integrovaných optických zesilovačů bylo zvoleno optické vlákno Nufern 980 - XP, neboť umožňuje jednovidový pracovní režim v pásmu 970 – 1550 nm.[73] Změřené vidové pole tohoto vlákna je na obrázcích Obr. 47 Obr. 48. Tvar vidového pole vláknového vlnovodu je kruhově symetrický a rozdíl velikosti vidového pole pro vlnové délky 980 nm a 1550nm činí 4 μm . Srovnáme-li velikost vidového pole vláknového vlnovodu a kanálkových vlnovodů uvedených v Tab. 29, můžeme pozorovat značnou diferencii především na vlnové délce 980 nm.

Tab. 29. Změřená velikost vidového pole vlákna HP980-XP a vlnovodů na vzorcích M1-01 a M3-02

Vzorek	$\lambda = 1550 \text{ nm}$		$\lambda = 980 \text{ nm}$	
	Velikost vidového pole v ose x [μm]	Velikost vidového pole v ose y [μm]	Velikost vidového pole v ose x [μm]	Velikost vidového pole v ose y [μm]
HP980-XP	11,0	11,0	7,1	7,0
M2-02-C4-K4	11,6	8,0	11,5	8,5
M3-02-C2-K4	10,1	7,1	11,4	8,8

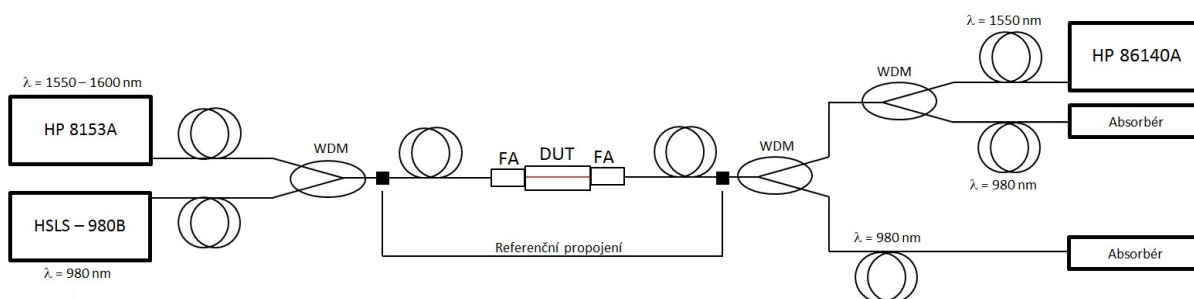
V případě excitace vlnovodu uvedeným typem vlákna na vlnové délce 980nm, dochází díky menšímu průměru vidového pole k účinnějšímu navázání signálu do prostorové oblasti maximální koncentrace stříbra v kanálku. Změřený průměr vidového pole kanálkového vlnovodu (Obr. 44, Obr. 46) ukazuje naplnění vlnovodné vrstvy odpovídající rozložení indexu lomu.

Je-li vlnovod excitován vláknovým vlnovodem na vlnové délce 1550 nm, vlivem zvětšení vidového pole je část energie je navázána do horní oblasti vlnovodu. Zde je v důsledku nedostatečného množství stříbra, resp. nízkého a nehomogenního indexu

lomu, energie slabě vedena a dochází k výkonovým ztrátám. Ztráty se v tomto případě projeví deformací vidového pole (Obr. 43, Obr. 45).

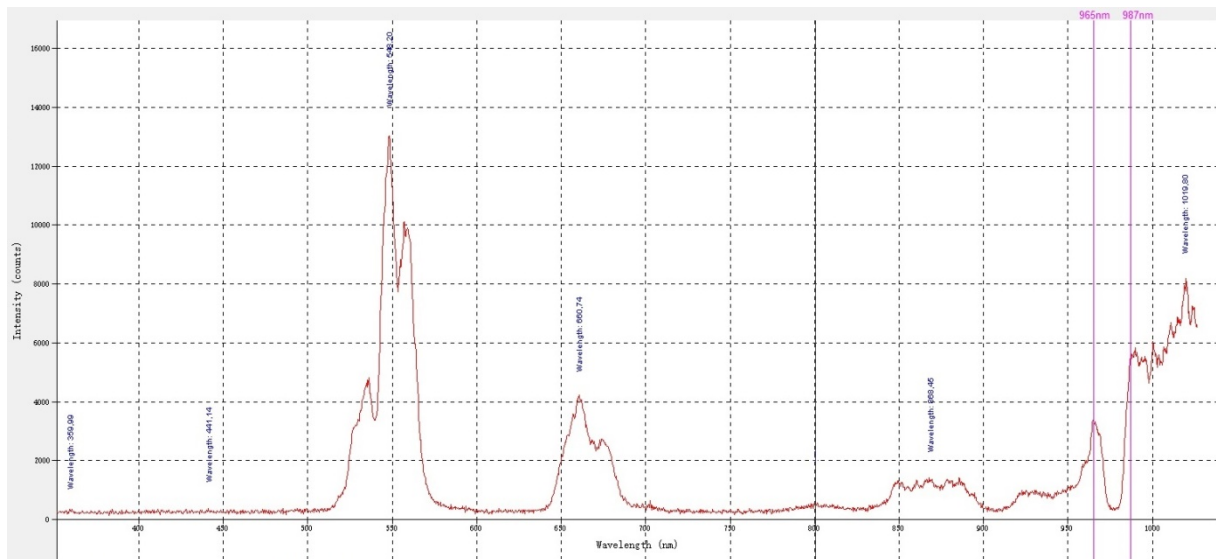
4.6.4. Měření zesílení aktivních zanořených kanálkových vlnovodů

Před samotným měřením optické aktivity vyrobených vzorků je třeba zajistit vazbu mezi optickým vláknem a kanálkovým vlnovodem na vstupní resp. výstupní straně čipu. Kvalita této vazby do značné míry ovlivňuje vlastnosti přenosu a proto je třeba jí věnovat zvýšenou pozornost. Již při vytváření optické vazby je možné oddělit čipy, které jsou z pohledu přenosových vlastností přijatelné. Čipy vykazující vysoký útlum neumožňují dosáhnout dostatečné výkonové úrovně nutné pro nastavení optické vazby. Hranice maximálního vloženého útlumu s ohledem na dynamiku měřicího pracoviště byla stanovena na hodnotu – 20 dB. Měření bylo provedeno dle metodiky popsané v kapitole 2.5. Schéma uspořádání měřicího pracoviště je na Obr. 49



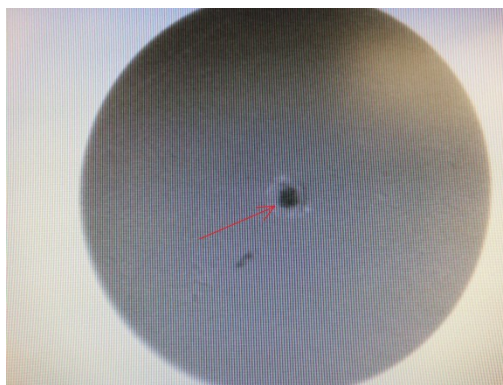
Obr. 49. Schéma uspořádání měřicího pracoviště pro měření optické aktivity

Velmi důležitou součástí měřicí sestavy je zdroj čerpacího záření vlnové délky 980 nm, který umožňuje nastavení výkonu až 600mW. Průchod čerpacího záření vlnovodem dopovaným prvky vzácných zemin způsobí kromě absorpce čerpacího záření a žádoucího zesílení také luminiscenční projevy ve viditelné oblasti spektra. K analýze těchto jevů byl použit spektrální analyzátor Ocean Optics USB 2000+ VIS, který umožňuje analýzu spektra v rozsahu 400 – 1100 nm. Výsledky spektrální analýzy při excitaci vzorku kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4 čerpacím zářením vlnové délky 980 nm a výkonu 200mW jsou uvedeny na Obr. 50.



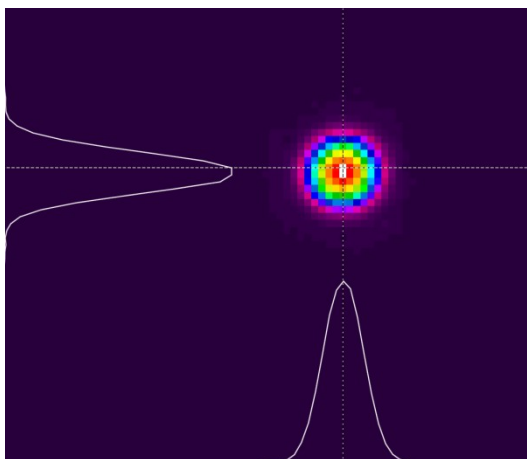
Obr. 50. Luminiscenční spektrum měřeného kanálového vlnovodu M2-02-C4-K4

Na obrázku je patrná luminiscence v oblasti vlnových délek okolo, 521nm, 655nm, 908nm, které odpovídají přechodům mezi energetickými hladinami erbia nebo ytterbia, konkrétně, $^2H_{11/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4I_{9/2}$ a také velmi výrazná oblast absorpce na vlnové délce 980 nm odpovídající energetické hladině $^4I_{11/2}$. Zejména v oblasti okolo 521 nm se objevuje výrazný vrchol způsobený jevem tzv. kooperativní up-konverzí [3]. Přesto, že čerpací zdroj umožňuje zvýšení čerpacího výkonu až na úroveň 600mW, již při zvýšení výkonu na 300mW byla opakovaně zaznamenána degradace v oblasti vazby vláknového pole a planárního čipu způsobená absorpcí použitého lepidla. Tato degradace způsobuje poškození vlnovodu, které je možné odstranit pouze přebroušením povrchu.

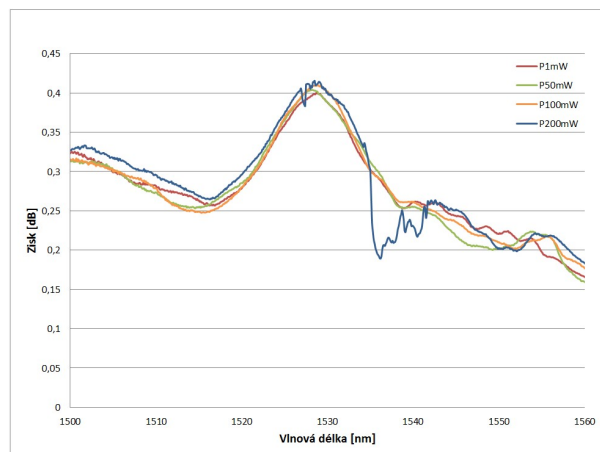


Obr. 51. Poškození jádra vláknového vlnovodu vlivem degradace lepidla v optickém spoji

Za účelem porovnání úrovně zesílení realizovaných funkčních vzorků s konvenčními vlákny určenými pro optické zesilovače, byl připraven úsek erbiem dopovaného vlákna, který svojí délkou odpovídá délce aktivních kanálkových vlnovodů. Úsek cca 2 cm dlouhého vlákna OFS GP980 byl navařen k vláknům Nufern 980-XP s konektory. Oblast aktivního vlákna a svárů je v celé délce chráněna svárovou ochranou. Po napojení prvního z vláken byla změřena velikost vidového pole aktivního vlákna (Obr. 52). Průměr změřeného vidového pole na vlnové délce 1550nm je v tomto případě 6 μm . Následné měření zesílení u tohoto referenčního vzorku prokázalo maximální zesílení přibližně 0,41dB na vlnové délce 1530 nm. Této úrovni zesílení bylo dosaženo již pro nejnižší nastavenou úroveň čerpání výkonu 1mW. Při dalším zvyšování čerpání již k nárůstu zesílení nedochází. Změřená pozice maxima zesílení i velikost vidového pole přesně souhlasí s katalogovými informacemi výrobce vlákna [71].

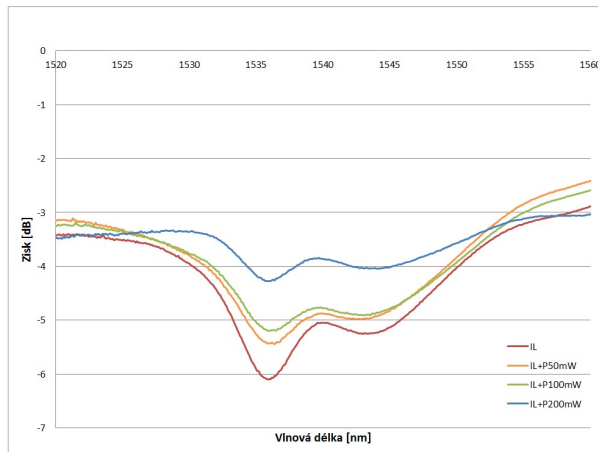


Obr. 52. Změřené vidové pole erbiem dopovaného vlákna OFS GP980.

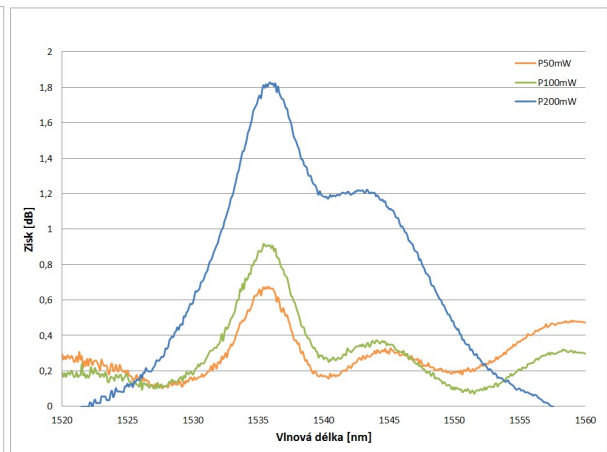


Obr. 53. Změřený diferenciální zisk erbiem dopovaného vlákna OFS GP980 pro různé úrovně čerpání.

Dále byly obdobným způsobem analyzovány vyrobené vzorky kanálkových vlnovodů. Vzhledem k faktu, že tvar vidového pole kanálkových vlnovodů není plně přizpůsoben vidovému poli vstupního resp. výstupního vlákna, můžeme sledovat značnou závislost útlumu na vlnové délce, která je pro takové případy typická. Nejlepších výsledků u vlnovodů vyrobených na substrátu M2-02 bylo dosaženo u vzorku s označením M2-02-C2-K4. Vložný útlum tohoto vzorku se v pásmu 1520 nm – 1560 nm pohyboval v rozmezí 2,9 dB až 6,1 dB. Při maximální úrovni čerpacího výkonu 200mW bylo na vlnové délce 1536 nm naměřeno zesílení 1,8 dB. Pásmo, kde dochází k zesílení, je široké přibližně 20nm. Výsledky měření vložného útlumu pro čerpací výkon 0 – 200mW jsou uvedeny na Obr. 54. Diferenciální zisk pro různé úrovně čerpání je uveden na Obr. 55.

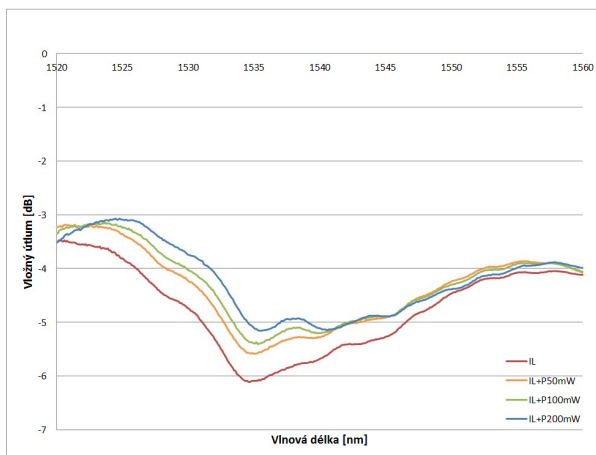


Obr. 54. Spektrální závislost útlumu vzorku M2-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.

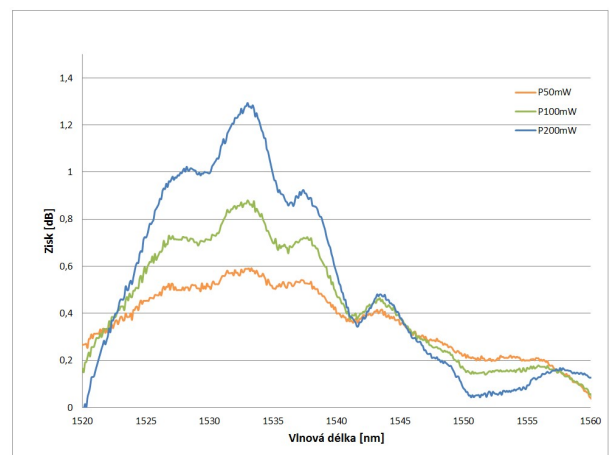


Obr. 55. Změřený diferenciální zisk vzorku M2-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.

Z měření vzorků kanálkových vlnovodů na sklovině M3-02 bylo dosaženo nejlepších výsledků u vzorku s označením M3-02-C2-K6. Vložný útlum tohoto vzorku se v pásmu 1520nm – 1560nm pohyboval v rozmezí – 3,5dB – 6,1dB. Při čerpacím výkonu 200mW bylo dosaženo na vlnové délce 1533nm zesílení 1.29 dB. Spektrální závislost útlumu při čerpání 0-200mW je uvedena na Obr. 56. Diferenciální zisk pro různé úrovně čerpání na Obr. 57.



Obr. 56. Spektrální závislost vložného útlumu vzorku M3-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu



Obr. 57. Změřený diferenciální zisk vzorku M1-01-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu

Shrnutí a diskuze

V další části této práce byl vyhodnocen vliv dvoustupňové iontové výměny na tvar a rozměry zanořených kanálkových vlnovodů. Vzorky byly realizovány dvoustupňovou iontovou výměnou do substrátů skloviny GZ4 s příměsí 0,25 at. % erbia, 5 at. % ytterbia. Wafer s označením M2-02 obsahoval kromě uvedených příměsí 4,8 at. % zinku. Wafer s označením M3-02 5,8 at. % zinku. Oba wafery prošly po depozici litografické masky SQS-VIS-01 prvním stupněm iontové výměny za shodných podmínek. Na základě výsledků analýzy nezanořených vlnovodů provedené v předchozí kapitole byl zvolen čas 1. iontové výměny 60 minut v tavenině E při teplotě 280°C. Následně byly vytvořené vlnovody zanořeny pod povrch substrátu při 2. iontové výměně v elektrickém poli. Délka výměny byla stanovena na 5 minut v tavenině N o teplotě 280 °C, při konstantním proudu 50 mA.

Po provedení iontové výměny byly oba wafery rozřezány na jednotlivé čipy. Z jednoho waferu byly vytěženy čtyři čipy obsahující přímé kanálkové vlnovody a dva čipy s optickými rozbočnicemi s Y-větvením. Čipy s kanálkovými vlnovody byly podrobeny analýze na elektronové mikroskopii EMA. Výsledky analýzy prokázaly, že v porovnání s nezanořenými vlnovody došlo k zvětšení velikosti kanálkového vlnovodu přibližně o 4 μm a poklesu maximální koncentrace stříbra uvnitř kanálku o 0,4 at. %. V horní části kanálkového vlnovodu je vzdálenost od povrchu substrátu 2 μm .

Provedená analýza vidového pole vyrobených vzorků prokázala deformaci vidového pole způsobenou nehomogenitou difuzního profilu. K této deformaci dochází z důvodu rozdílného překryvu vidových polí jádra vláknového vlnovodu a difuzního kanálkového vlnovodu. Vlivem zvětšení vidového pole jádra vlákna na vlnové délce 1550 nm dochází k navázání signálu do oblasti s nižší koncentrací stříbra. V této oblasti je signál slabě veden a dochází k jeho útlumu. Při měření na vlnové délce 980nm kopíruje vidové pole difuzní profil. Vzhledem k tvaru difuzního profilu je rozložení energie v kanálkovém vlnovodu závislé na pozici vstupního vlákna. Vhodným umístěním jádra optického vlákna vůči kanálkovému vlnovodu je možné tento efekt do jisté míry omezit, ovšem nelze ho zcela eliminovat.

U vzorku M2-02-C2-K4 byla po navázání čerpacího záření vlnové délky 980nm do kanálku provedena spektrální analýza. Výsledky jsou ve shodě se změřenými absorpčními spektry v kapitole 4.4.1. Ze změřeného spektra je patrná vysoká míra absorpce zapříčiněná vysokým obsahem ytterbia ve skelné matici.

Experimenty zvyšování čerpání prokázaly, že při zvýšení úrovně čerpacího výkonu nad 300mW dochází k degradaci v oblasti průchodu signálu lepeným spojem fixujícím vstupní vláknové pole a planární čip. Uvedená degradace vede až k přerušení optické vazby a poškození čela jádra optického vlákna i kanálkového

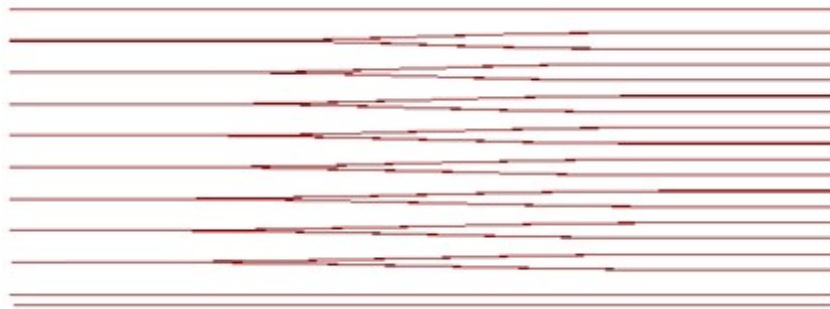
vlnovodu. Maximální bezpečná hranice výkonu čerpacího signálu byla stanovena na 200mW. Pro zvýšení této hranice by bylo nutné zvolit jiné lepidlo.

Hlavním cílem tohoto výzkumu bylo dosáhnout optické aktivity vyrobených vzorků. Optická aktivita byla prokázána u obou měřených waferů s různým složením skloviny. V případě vzorku s označením M2-02-C2-K4 bylo při maximálním čerpacím výkonu dosaženo zisku 1,9 dB s maximem na vlnové délce 1536nm. Druhý vzorek s označením M3-02-C2-K4 vykazoval při stejné míře čerpání zisk 0,45 dB s maximem taktéž na vlnové délce 1536 nm. Pásmo, kde dochází k zesílení, je široké přibližně 20 nm. Míra optické aktivity je do značné míry závislá na kvalitě přenosu vlnovodem. Pro zvýšení optické aktivity by bylo nutné přizpůsobit parametry iontové výměny tak, aby bylo zaručeno optimální překrytí vidových polí jádra optického vlákna a kanálkového vlnovodu. Přesto dosahují vyrobené aktivní kanálkové vlnovody v porovnání s měřeným aktivním optickým vláknem srovnatelné délky přibližně čtyřnásobného zesílení. Závislost míry zesílení na objemu zinku ve skelné matici nebyla potvrzena. Důvodem je nižší než předpokládaná účinnost přenosu kanálkových vlnovodů a malý rozdíl mezi koncentračními podíly.

4.7. Realizace aktivní optické rozbočnice 1x2 pomocí dvoustupňové iontové výměny

Účelem funkce aktivní optické rozbočnice není zesílení signálu, k jehož ztrátám došlo vlivem útlumu optické přenosové sítě, nýbrž kompenzace vlastních ztrát způsobených rozdělením optického signálu z N do N přenosových tras. Struktura aktivní optické rozbočnice se svojí topologií od pasivní optické rozbočnice v zásadě neliší. Její podstata spočívá především v klíčové výhodě technologie iontové výměny, která umožňuje vytvoření optického vlnovodu, takřka libovolné topologie, v substrátech dopovaných prvky vzácných zemin.

Topologie litografické masky SQS-VIS-01 obsahuje kromě čtyř čipů s přímými kanálovými vlnovody také čtyři čipy s topologií optických výkonových rozbočnic. Každý čip pak obsahuje osm optických rozbočnic, které se liší délkou zakřivených vlnovodů, resp. úhlem rozbočení. Detail rozložení optických rozbočnic na čipu je na Obr. 58.



Obr. 58. Rozložení struktur rozbočnic 1x2 na čipu

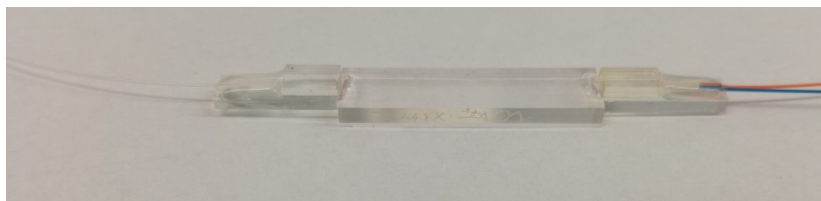
V případě pasivní optické rozbočnice je, z důvodu kaskádního řazení struktur a vložené tlumu, vhodné dosáhnout co nekratší délky struktury. Pro strukturu aktivní optické rozbočnice je naopak žádoucí co nejdelší délka struktury, neboť ta je předpokladem vyšší míry zesílení.

4.7.1. Struktury realizovaných aktivních rozbočnic 1x2

Dvoustupňovou iontovou výměnou na waferech M2-02 a M3-02 byly kromě čipů s aktivními kanálkovými vlnovody získány také čipy aktivních výkonových rozbočnic s dělicím poměrem 1x2. Celková délka čipu je po oddělení z waferu a vybroušení a vyleštění čelních ploch čipů přibližně 25 mm. Čipy obsahující struktury optických rozbočnic byly zhotoveny ve stejném procesním kroku, a tedy i za stejných podmínek, jako čipy s aktivními kanálkovými vlnovody. Analýzy profilu indexu lomu provedené na kanálkových vlnovodech vlnovodech prokázaly, že tvar difuzní profil vlnovodu v rámci jednoho wafaru je zachován. Lze tedy očekávat, že v případě optických rozbočnic tomu nebude jinak. Vzhledem k provedeným analýzám u přímých aktivních kanálkových vlnovodů byla v případě optických aktivních rozbočnic soustředěna pozornost především na měření optické aktivity.

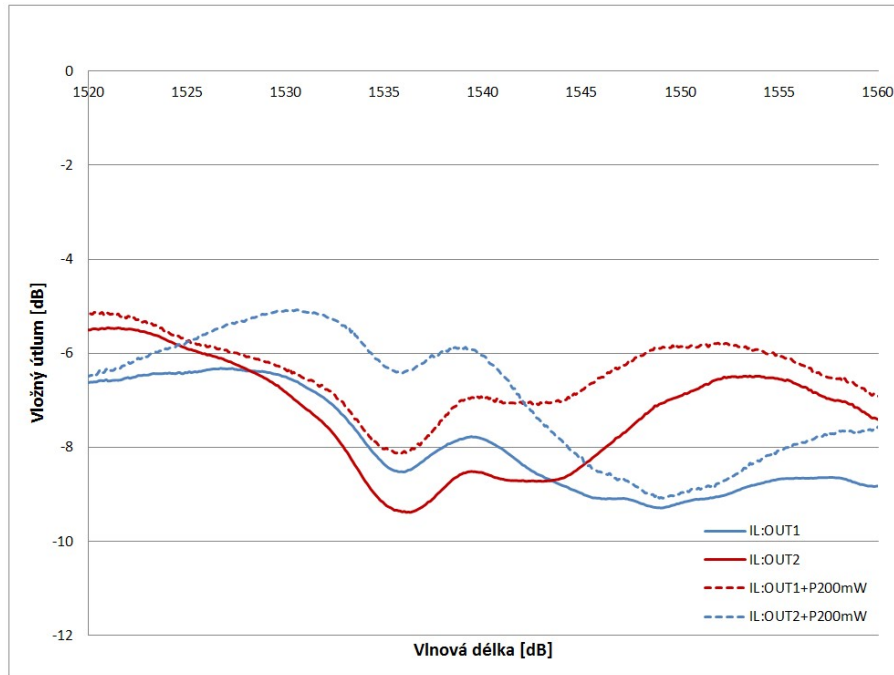
4.7.2. Měření optické aktivity výkonových rozbočnic 1x2

Při měření optické aktivity rozbočnic byl použit stejný přístup jako v případě měření zesílení přímých vlnovodů. V případě optické rozbočnice byla změřena separátně spektrální charakteristika při průchodu signálu ze vstupního portu na jednotlivé výstupních porty. Výstupní port č.1 (OUT 1) je značen modrou barvou. Výstupní port č.2 (OUT 2) je značen barvou červenou. Toto barevné rozlišení je respektováno také na optických vláknech připojených k výstupním vlnovodům. Struktura realizované aktivní optické rozbočnice je uvedena na Obr. 59



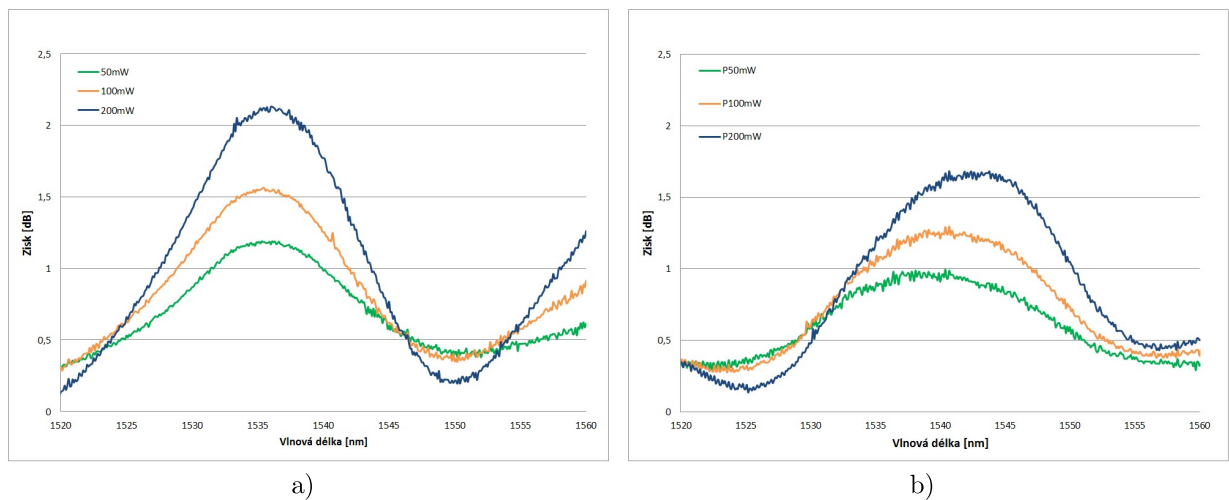
Obr. 59. Sestava čipu optické aktivní rozbočnice 1x2 se vstupním a výstupním vláknovým polem

Měření optické aktivity bylo provedeno vždy na několika strukturách vyrobených na vzorcích skloviny s označením M2-02-C8 a M3-02-C8. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorku M2-02-C8, na optické rozbočnici s označením M2-02-C8-Y8. Změřená spektrální tlumová charakteristika pro stav průchodu signálu bez čerpání a při čerpacím výkonu 200 mW je uvedena na Obr. 60. Při průchodu signálu bez čerpání dosahoval vložný útlum v oblasti očekávaného maximálního zesílení struktury 8,5dB na portu č.1 a 9,4dB na portu č. 2. Po aktivaci čerpacího záření pak dochází k zesílení signálové složky a tím ke kompenzaci útlumu. V případě portu č.1 je dosaženo zisku 2,1dB, v případě portu č. 2 k zisku 1,6dB.



Obr. 60. Spektrální útlumová charakteristika aktivní rozbočnice s označením M2-02-C8-Y8. Stav bez čerpání plná čára, při čerpání 200mW přerušovaná čára

Pro lepší přehlednost jsou diferenciální zisky obou výstupních portů shrnuty v grafu na Obr. 61. Zde jsou kromě diferenciálního zisku pro čerpací výkon 200mW vyneseny také diferenciální zisky pro výkon čerpacího laseru 100mW a 50mW.



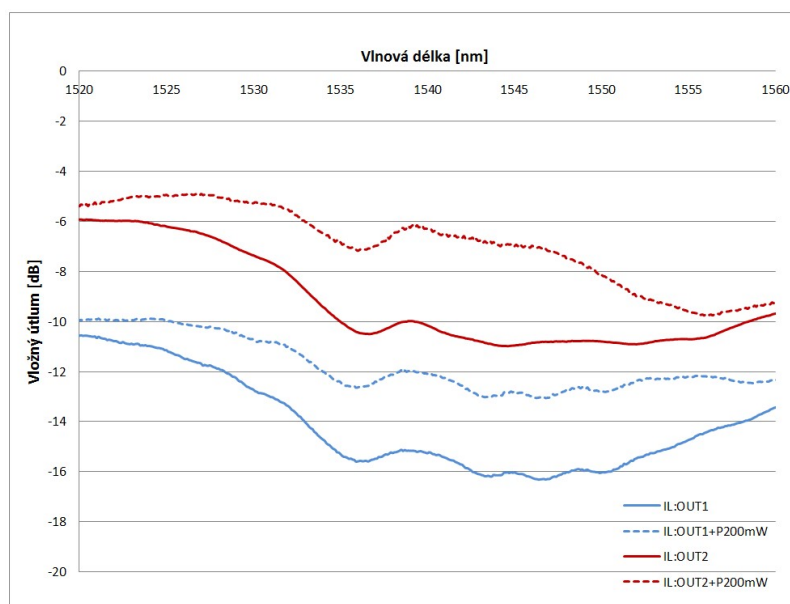
Obr. 61. Diferenciální zisk optické aktivní rozbočnice M2-02-C8-Y8 při čerpacím výkonu 50mW (zelená), 100mW (oranžová) a 200mW (modrá). a) Výstupní port č. 1, b) Výstupní port č. 2

Maximální hodnoty diferenciálního zisku změřené u aktivní rozbočnice s označením M2-02-C8-Y8 jsou uvedeny v Tab. 30.

Tab. 30. Maximální změřený diferenciální zisk aktivní optické rozbočnice M2-02-C8-Y8.

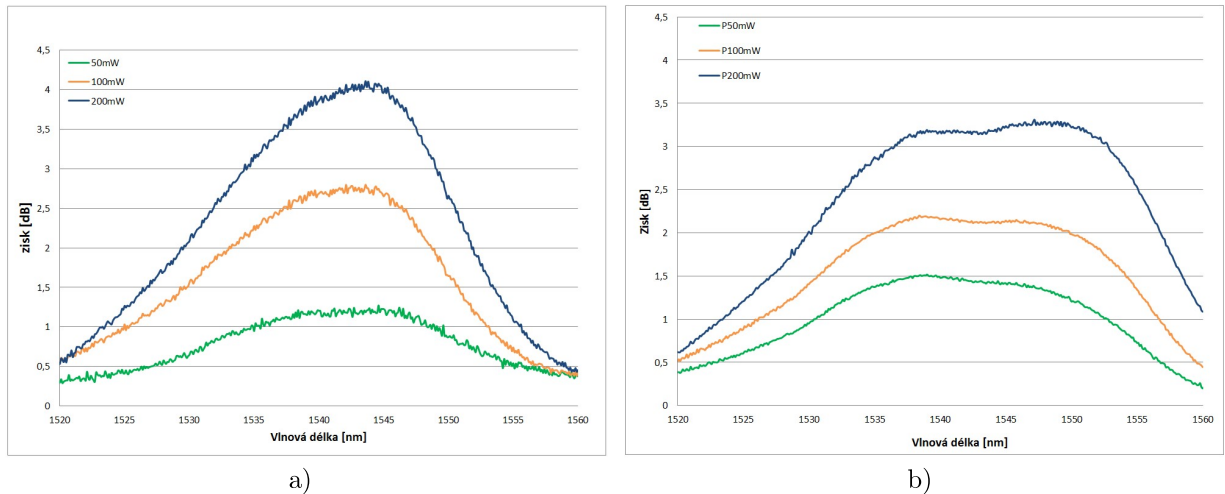
Čerpací výkon [mW]	Diferenciální zisk Port č.1 [dB]	Diferenciální zisk Port č.1 [dB]
50	1,2	0,9
100	1,5	1,3
200	2,1	1,7

U druhého vzorku s označením M3-02 byla vyhodnocena nejsilnější optická aktivita u struktury s M3-02-C7-Y8. Při průchodu signálového výkonu strukturou byl změřen v oblasti předpokládaného zesílení vložný útlum 15,6 dB na portu č. 1 a vložný útlum 10,5 dB na portu č. 2. Zhoršené přenosové vlastnosti a horší uniformita rozdělení výkonu v porovnání se vzorkem M2-02-C8-Y8 byly typickým projevem struktur pocházejících ze vzorku M3-02. Po aktivaci čerpacího zdroje nastaveného na výkon 200mW byl naměřen zisk 4,1 dB na portu č. 1 a 3,3 dB na portu č. 2. Změřená spektrální tlumová charakteristika pro stav průchodu signálu bez čerpání a při čerpacím výkonu 200 mW je uvedena na Obr. 62.

**Obr. 62.** Spektrální útlumová charakteristika aktivní rozbočnice s označením M3-02-C7-Y8.

Stav bez čerpání plná čára, při čerpání 200mW přerušovaná čára

Stejným způsobem byl změřen diferenciální zisk rozbočnice pro různé čerpací výkony v rozsahu 50mW – 200mW. Výsledky měření jsou shrnuty v grafech Obr. 63.



Obr. 63. Diferenciální zisk optické aktivní rozbočnice M1-02-C8-Y8 při čerpacím výkonu 50mW (zelená), 100mW (oranžová) a 200mW (modrá). a) Výstupní port č. 1, b) Výstupní port č. 2

Maximální hodnoty diferenciálního zisku jsou pro přehlednost shrnuty v Tab. 31.

Tab. 31. Maximální změřený diferenciální zisk aktivní optické rozbočnice M3-02-C8-Y8.

Čerpací výkon [mW]	Diferenciální zisk Port č.1 [dB]	Diferenciální zisk Port č.2 [dB]
50	1,2	1,5
100	2,7	2,2
200	4,0	3,2

Shrnutí a diskuze

Výzkum provedený v této kapitole, byl cílen na měření zesílení struktur optických aktivních rozbočnic. Souběžně s aktivními kanálkovými vlnovody byly na waferch M2-02 a M3-02 zhotoveny také struktury aktivních optických rozbočnic. Podmínky procesu iontové výměny jsou homogenní na celém waferu. Lze proto očekávat, že difuzní profily kanálkových vlnovodů budou totožné jako u analyzovaných kanálkových vlnovodů. Pozornost byla zaměřena výhradně na měření struktur rozbočnic při různých úrovních čerpacího výkonu.

V případě optické rozbočnice M2-02-C8-Y8 byl změřen vložný útlum v oblasti očekávaného zesílení 8,5dB u portu č. 1 a 9,4dB u portu č. 2. Po aktivaci čerpacího zdroje byl měřen diferenciální zisk pro hodnoty čerpacího výkonu 50mW, 100mW a 200mW. Při maximální míře čerpání bylo dosaženo diferenciálního zisku rozbočnice na portu č. 1 2,1 dB a na portu č. 2 1,6 dB. Byl tak kompenzován vložný útlum struktury z 8,5 dB na 6,4 dB na portu č. 1 a z 9,4 dB na 7,8 dB u portu č. 2.

U rozbočnice s označením M3-02-C8-Y8 byl stejným způsobem změřen maximální vložný útlum při průchodu signálu bez čerpání a následně při různých hodnotách čerpání. Vložný útlum struktury bez čerpání dosahoval ve srovnání s předchozí rozbočnicí vyšších hodnot. Vložný útlum na portu č. 1 dosáhl hodnoty - 15,6 dB a vložný útlum na portu č. 2 hodnoty - 10,5 dB. Při maximální výkonu čerpací laseru 200mW byl změřen diferenciální zisk rozbočnice 4,0 dB na portu č. 1 a diferenciální zisku 3,2 na portu č. 2. Vložný útlum rozbočnice byl tak kompenzován z 15,6 dB na 11,6 dB na portu č. 1 a z 10,5 dB na 7,3dB.

Rozdílné vložné útlumy obou rozbočnic jsou v souladu s výsledky změřenými u kanálkových vlnovodů, kde byl rovněž pozorován vyšší útlum u vzorků z waferu M3-02. Celkový vyšší vložný útlum, ve srovnání s kanálkovými vlnovody je způsoben nekruhovým tvarem difuzního profilu. Díky tomu dochází v oblasti dělicí části rozbočnice k výkonovým ztrátám a nerovnoměrnému rozdělení výkonu do výstupních ramen. Obě optické rozbočnice vykazují nezanedbatelný zisk, který by mohl být dále navýšen prodloužením délky aktivního vlnovodu případně zajištěním zvýšení míry čerpání vlnovodů. Snížení útlumu optické rozbočnice bude možné optimalizací tvaru vlnovodu či jeho hlubším zanořením pod povrch substrátu.

5. Výsledky a diskuze

Disertační práce se zabývá výzkumem pasivních a aktivních optických integrovaných struktur vyrobených technologií iontové výměny do skleněných substrátů. V předložené práci je prezentován systematický výzkum vedoucí k realizaci dosud nepublikované struktury aktivní optické výkonové rozbočnice realizované s vlnovodem s gradientním indexem lomu.

V první části byla pozornost zaměřena na návrh a realizaci pasivních optických struktur. Prvním cílem byla extrakce materiálových konstant pro účely přesného modelování optického kanálkového vlnovodu až po návrh a realizaci složitějších pasivních struktur v podobě optických rozbočnic.

V druhé části práce jsou prezentovány poznatky z provedeného výzkumu, které jsou dále využity při návrhu a realizaci struktur optických integrovaných zesilovačů na nových silikátových sklovinách dopovaných prvky erbia, ytterbia a zinku. Hlavním výsledkem je prokázání optické aktivity výkonové rozbočnice s Y-větvením, která umožňuje kompenzovat vlastní vložný útlum, a tím docílit bezztrátové výkonové rozbočnice. Výsledky jednotlivých částí výzkumu je možné rekapitulovat v několika následujících bodech.

Návrh a realizace pasivních kanálkových vlnovodů

V první fázi výzkumu byly provedeny experimenty za účelem extrakce materiálových konstant pro vytvoření přesného modelu kanálkových vlnovodů na nových sklovinách určených pro technologii dvoustupňové iontové výměny. Následně byl vytvořen model profilu indexu lomu reprezentující nezanořený kanálkový vlnovod. Výsledky výzkumu byly publikovány ve sborníku konference Optické komunikace 2011.[89]

Na základě provedených simulací byly zhotoveny vzorky nezanořených kanálkových vlnovodů, které byly využity při zavedení poloprovozu teplotního senzoru s vlnovodnou polymerovou Braggovskou mřížkou ve firmě SQS Vláknová Optika a.s.[101]

Návrh a realizace pasivní optické výkonové rozbočnice s Y-větvením

Na základě předchozího výzkumu byla navržena pasivní optická výkonová rozbočnice s Y - větvením s dělicím poměrem 1x2. Vytvořený model rozbočnice simuluje průchod signálu strukturou a umožňuje volbu optimálního úhlu rozbočení, při kterém jsou minimalizovány ztráty způsobené zakřivením vlnovodu. Tento model se vyznačuje tím, že ve svém výpočtu zohledňuje materiálové konstanty kanálkového vlnovodu vytvořeného v novém typu skla. Při modifikaci skloviny pak umožňuje rychle optimalizovat parametry navržené struktury. Tento výzkum byl podpořen grantem SGS-ČVUT[97], jehož byl autor řešitelem. Výsledky byly prezentovány na studentské konferenci POSTER 2012 [90]. Výsledky výzkumu byly navíc úspěšně využity při

zavedení poloprovozu výroby optických planárních rozbočnic ve firmě SQS Vlákenná optika a.s.[100], [102]

Návrh a realizace pasivní optické výkonové rozbočnice pracující na principu interference v mnohavidovém vlnovodu

V této části práce byl využit již ověřený model gradientního kanálového vlnovodu k návrhu struktury děliče výkonu 1x3 využívajícího principu mnohavidové interference (MMI) ve vlnovodu. Bylo prokázáno, že rozdíl výpočtu rozměrů struktury analytickým řešením dle uvedených vztahů neodpovídá výsledkům numerického řešení pomocí metody BPM se stávajícím difuzním profilem vlnovodu. Důvodem je závislost profilu indexu lomu vlnovodu na formování interferenčních obrazů. Výsledky uvedeného výzkumu byly publikovány v impaktovaném časopise [91].

Na základě provedených simulací byla za podpory grantu SGS-ČVUT [98] navržena a vyrobena litografická maska, která umožnila realizovat vzorky navržených struktur. Studium realizovaných struktur potvrdilo, že pro dosažení optimálních přenosových vlastností rozbočnice je nutná iterace výrobních parametrů, případně úprava profilu indexu lomu difuzního vlnovodu.

Analýza nových skel dopovaných prvky vzácných zemin a zinkem

V této části práce byla ve spolupráci s kolegy z Ústavu anorganické chemie a Ústavu skla a keramiky VŠCHT připravena nová silikátová skla obsahující prvky erbia, ytterbia a zinku. Následně byly studovány vzájemné koncentrační poměry uvedených prvků s ohledem na absorpční a luminiscenční vlastnosti a navrženy skloviny s předpoklady pro aplikace integrovaných zesilovačů. Výsledky provedeného výzkumu byly publikovány v impaktovaném časopise [94].

Realizace aktivních nezanořených kanálových vlnovodů

V první fázi tohoto výzkumu byl analyzován vliv jednostupňové iontové výměny na vlastnosti kanálového vlnovodu na substrátu s podílem 0,25 at. % erbia, 5 at. % ytterbia a 4 at. % zinku. Vzorky vlnovodů byly zhotovené při různé délce trvání čistě termální iontové výměny. Později byly analyzovány elektronovou mikrosondou EMA, kde byly stanoveny jejich rozměry a maximální koncentrace stříbra v difuzním profilu. Tyto výsledky byly následně korelovány s výsledky měření vidového pole a měření vložného útlumu. Vzhledem k vysokému útlumu vzorků díky silné povrchové vazbě vlnovodu nebyla u těchto vzorků optická aktivita prokázána.

Realizace aktivních zanořených kanálkových vlnovodů

Na základě analýzy difuzních profilů vlnovodů po první iontové výměně byly zhotoveny dvě sady vzorků na substrátech 0,25 at. % erbia, 5 at. % ytterbia 4,0 at. % resp. 5,6 at. % zinku. Zhotovené vzorky byly analyzovány stejným způsobem jako v předchozím případě. V tomto případě vykazovaly oba vzorky přijatelné přenosové vlastnosti. Především však byla u obou vzorků prokázána velmi solidní optická aktivita dosahující zisku 1,2 dB až 1,8 dB.

Realizace aktivní optické rozbočnice

V závěrečné části této práce byly analyzovány vlastnosti dvou realizovaných aktivních optických rozbočnic s gradientním indexem lomu. Tyto rozbočnice vykazují vyšší hodnoty útlumu, které byly ovšem s ohledem na výsledky měření kanálkových vlnovodů vyrobených za stejných podmínek iontové výměny očekávány. Výrazné snížení vložných ztrát vlnovodů je možné optimalizací jejich tvaru a hlubším zanořením pod povrch substrátu. Velmi pozitivní výsledky byly dosaženy při měření zesílení těchto optických rozbočnic neboť se podařilo prokázat míru optické aktivity, která by v případě optimálních přenosových parametrů zcela kompenzovala vložný útlum. Zesílení optické aktivity by bylo možné dále prodloužením délky aktivního vlnovodu a zvýšením míry čerpání vlnovodu.

Závěry pro další rozvoj vědy a realizaci v praxi

Výsledky této práce mají vysoký potenciál pro další výzkum a další rozvoj vědy. V disertační práci byl navržen a realizován opticky aktivní planární vlnovod s difuzním rozhraním, dotovaný ionty erbia a ytterbia se zinkovým modifikátorem v optimalizovaném poměru. Tento vlnovod vykazuje diferenciální optický zisk do 2 dB/cm při čerpání 200mW, což je čtyřikrát krát více než u Er dotovaných vláken optických zesilovačů. S využitím tohoto vlnovodu pak byla nově navržena, realizována a odměřena aktivní optická planární Y – rozbočnice, jejíž diferenciální zisk na jednotlivých výstupech částečně kompenzoval vložný útlum. Tato aktivní optická rozbočnice nebyla, dosud pokud je nám známo, ve světě publikována.

V praxi, může aktivní optická rozbočnice nalézt své uplatnění při budování metropolitních sítí, kdy je třeba kompenzovat optický útlum způsobený rozdělením signálu mezi velké množství koncových uživatelů. Pomocí technologie iontové výměny je možné takovou rozbočnici zhotovit difuzí stříbra přímo do substrátu obsahujícího prvky vzácných zemin, jako součást integrovaného optického obvodu

Při pokračujícím výzkumu mohou vést, po optimalizaci parametrů, výsledky této práce vést k zavedení výroby aktivní Y – výkonové rozbočnice do výrobního programu firmy SQS Vlákenná optika a.s. Ta se technologií iontové výměny na výzkumné i komerční úrovni dlouhodobě zabývá. Publikace těchto výsledků se připravuje.

Seznam použité literatury

- [1] Snitzer E., *Amplification in a fiber laser*, 1964, Applied Optics, No. 10, p. 1182,
- [2] Stolen, R. H., Ippen E.P., *Raman gain in glass optical waveguides*, 1973, Applied Physics Lett. 22(6), 276
- [3] Bayart, D. *Optical fiber amplification technology*, 2003, Alcatel Research and Innovation, Marcoussis, France
- [4] Mears, R.J. et al, *Low noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m*, 1987, IEE Electronics Letters, Vol.23, No.19, pp.1026-1028
- [5] Brinkman, R., et. al, *Absorption, fluorescence, and stimulated emission in Ti diffused Er:LiNbO₃ waveguides*, 1990, Proc. SPIE, Vol.1362,.
- [6] Kiagawa T, et. al, *Amplification in Erbium-doped Silica-based planar lightwave Circuits*, 1992, IEEE Electronics Letters, Vol.28, No.19, pp.1818-1819,
- [7] Shotu. K. et. al, *Erbium-doped phosphosilicate glass waveguide amplifier fabricated by PECVD*, 1993. IEE Electronics Letters, V01.29, No.2, pp.139-141,
- [8] Hattori K., et al, *Erbium-doped silica-based planar-waveguide amplifier integrated with 980/1530-nm WDM coupler*, 1994 Technical Digest OFC'94, FB2, pp.280-281,
- [9] D.Barbier, et al, *Amplification in Erbium doped microguides realised on phosphate glass*, 1995, Proc. ECIO, Tu C4, pp.241-243,.
- [10] Huang, et al, *Er-indiffused Ti:L W₃ channel waveguide optical amplifiers pumped at 980 nm*, 1996, IEEE Electronics Letters, Vol.32, No.3, pp.215-216,.
- [11] G.N.van den Hoven, et al, "Net optical gain at 1530 nm in Er-doped AWG waveguides on silicon", 1996, Applied Physics Letters, 68,(14), pp.1886-1888.
- [12] Choo P.Y, Frantz J. A. , "Measurement and modeling of ion-exchange parameters for IOG-10 glass", 2003 Optical Engineering,
- [13] B. R. West, „Modeling and analysis of ion-exchanged photonic devices“, *Disertation*, 2004, University of Arizona,
- [14] Ondráček F., „Charakterizace fotonických vlnovodných struktur“, 2009 Disertační práce, ČVUT, Praha
- [15] Lahodný F., „Nová skla pro kanálkové optické vlnovody“, 2012, Disertační práce, VŠCHT Praha,
- [16] Schott, *IOG-1 Phosphate Laser Glass*,
https://www.schott.com/d/advanced_optics/7dbb44af-30f8-4aec-868d-371de845d532/1.2/schott-iog-1-phosphate-laser-glass-may-2013-eng.pdf

- [17] Veasey, D.L., Funk D.S., Sanford, N.A. “*Arrays of distributed Bragg-reflector waveguide lasers at 1536 nm in Yb/Er codoped phosphate glass,*” 1999, Appl. Phys. Lett., Vol 74(6), 789-791
- [18] Švecová B., Disertační práce, 2011, VŠCHT Praha, Praha,
- [19] Málek J, Diplomová práce, 2009 VŠCHT Praha, Praha,
- [20] Stará, S., Disertační práce, 2012, VŠCHT Praha, Praha,
- [21] Vytykacova S., Stanek S., et. al., “*The effect of zinc content on the enhancement Er–Yb luminescence properties in the silicate glass matrix*”, 2018, Ceramics-Silikaty- open-access journal 10.13168/cs.2018.0011
- [22] B. Svecova, P. Nekvindova, et. al., svecová, B, spirková J., Mika M., Materials Science and Engineering B 149, 2008, 177-180
- [23] Janáková, S, Švecová, B., Salavcová L., Spirková J., Mika, M, Oswald J., Journal of Physics and Chemistry of Solids 68, 2007, 1263-1267
- [24] Salavcova, L., Mackova A., Oswald J., Svecova B., Janakova B., Spirkoiva J., Mika, M., Journal of Physics and Chemistry of Solids 68, 2007, 891-895
- [25] Salavcová L., Švecová B., Janaková S., Kolek, O., Míka, M., Špirková, J., Langrová, A., Ceramics-Silikáty 49 (1), 2005, 53-57
- [26] Mika M., et. al., Optical Components and Materials I, Proceedings of SPIE 5723, 2005, 63
- [27] Švecová, et. al., Journal of Materials Science: Materials in Electronics 20, 2009, 510-513
- [28] Svecova, B., Nekvindova, P., et. al., Journal of Non-Crystalline Solids 356, 2010, 2468-2472
- [29] Malinský P., Macková, A. J. Bočan, B. Švecová, P. Nekvindová, Nucl. Instr. Methods B 267, 2009, 1575-1578
- [30] Svecova, B. Nekvindova, B., Mackova, A., Oswald J., Vacik, J, Grötzschel, Spirkoiva R., Nucl. Instr. Methods B 267, 2009, 1332-1335
- [31] Malta O., et al., Journal of Luminescence, 33(3), 1985, 261-272
- [32] Staněk., S., Disertační práce, VŠCHT Praha, Praha, 2018
- [33] Izawa, T., Nakagome, H.” *Silver Ion-Exchange Glass Waveguides*” Appl. Phys. Lett., 1972, Vol. 21, pp. 584-586,
- [34] Philipsen, J., Thomsen K.J. et. al, “*Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA) Technology and Components*” , 2003, ECOC 29th European Conference on Optical Communication, p .420-421
- [35] Kik, P.G., Polman A. “*Erbium doped optical waveguide amplifiers on silicon*”, 1998, Materials Research Society, Volume 23, Issue 4, pp. 48-5

- [36] Vázquez-Córdova S. A., Aravazhi S. et. al., *High optical gain in erbium-doped potassium double tungstate channel waveguide amplifiers*, 2018, Optics Express, Vol. 26, Issue 5, pp. 6260-6266
- [37] Vázquez-Córdova S. A., Aravazhi S. et. al., *High gain in erbium-doped channel waveguides*, 2017, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), ISBN: 978-1-5090-6736-7
- [38] Jose, G., Sorbello, G. Taccheo, S., et. al. “*Active waveguide devices by Ag-Na ion exchange on erbium-ytterbium doped phosphate glasses*, 2003, Journal of Non-Crystalline Solids, Issue: 322, pp.256-261
- [39] Becker, P.C., Olsson N.A., Simpson J.R., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*, 1999, Academic Press; 1st edition ISBN-13: 978-0120845903
- [40] Mishra R., Shukla N.K., Dwivedi, C.K., *Performance analysis and implementation of different pumping techniques on an EDFA amplifier*, 2017, 2017 Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS), 10.1109/SSPS.2017.8071561
- [41] H. Shalibeik, *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, 2007 Cuvillier Verlag
- [42] Polman A, Nature Materials, (2002), volume 1, p. 10–12.
- [43] S. Keyvaninia, G. Roelkens, D. Van Thourhout , *A highly efficient electrically umped optical amplifier integrated on a SOI waveguide circuit*, 2012, The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP), San Diego, USA
- [44] Novotný K., *Optická komunikační technika*, 2007, ČVUT, ISBN 978-80-01-03920-5.
- [45] Saleh, Teich, *Základy fotoniky 2*, 1994, Matfyzpress, ISBN 80-85863-02-2.
- [46] Čtyroký, Hüttel, Schröfel, *Integrovaná optika*, 1986, SNTL.
- [47] RSoft design group, *Rsoft CAD Enviroment 8.1*, User Guide, 2008.
- [48] RSoft design group, *BeamPROP 8.1 User Guide*, 2008.
- [49] Barkman, O., *Návrh optických kanálkových difuzních rozbočnic na skleněných podložkách*, Diplomá práce, ČVUT, 2011.
- [50] Bertin, E.P., *Electron-Probe Microanalysis, Introduction to X-Ray Spectrometric Analysis, book*, Pages 439-473
- [51] Ramaswamy, R.V. , Srivastava R., 1988, “*Ion-Exchanged Glass Waveguides: A Review*” 1988, J. Light. Technol., 6 pp. 984-1000
- [52] Madasamy, P., West, B.R., et. Al., *Buried ion-exchanged glass waveguides: burial-depth dependence on waveguide width*, 2003, Optics Letters, Vol. 28, No.

- [53] Albert, J., Lit, J., W.,Y, *Full Modeling of Field-Assisted Ion Exchange for Graded Index Buried Channel Optical Waveguides*, 1990, Applied Optics / Vol. 29, No. 18, 20
- [54] Gupta, C., Ballato J., “*The Hand Book of Photonics*”, 2007, CRC Press.
- [55] Das S., Geraghty D., Honkanen S., Peyghambarian N., *MMI Splitters by Ion-Exchange in Glass*, 2000, SPIE vol. 3936.
- [56] Kasprzak D., Blahut M., Maciak M., *Applications Of Multimode Interference Effect In Gradient Waveguides Produced By Ion-Exchange In Glass*, 2008, The European Physical Journal, Special Topics 154, 113-116.
- [57] Bachman M., Besse P. A., Meichior H., *General Self-Imaging Properties in $N \times N$ Multimode Interference Couplers Including Phase Relations*, 1994, Applied Optics, Vol. 33, No. 18.
- [58] Blahut M., Kasprzak D., *Multimode Interference Structures-Properties and Applications*, 2004, Optica Applicata, Vol. 34, No. 4.
- [59] Anderson I., *Transmission Performance of Y-junctions in Planar Dielectric Waveguide*, 1978, Microwaves, Optics and Acoustics.
- [60] Chih-Wei Hsu, Hsuen-Li Chen,Way-Seen Wang, *Compact Y-branch power splitter based on simplified coherent coupling*, 2003, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 8.
- [61] Sakai, Fukuzawa, Baba, *Low Loss Ultra-Small Branches in a Silicon Photonic Wire Waveguide* , 2002, IEICE Trans. Electron., Vol. E85-C, No. 4.
- [62] Han-Bin Lin, Rei-Shin Cheng, and Way-Seen Wang, *Wide-Angle Low-Loss Single-Mode symmetric Y junctions*, 1994, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6. No. 7.
- [63] Blahut M., Kasprzak D., *Gradient Index Multimode Interference Structures- Technology and Applications*,2009, Acta Physica Polonica, Vol. 116, No.3.
- [64] Shanying Lu, Xiaoqing Jiang, Minghua Wang, *New Compact Design of Planar $1 \times N$ Branching Splitter*, 2004, Proc. of SPIE Vol. 5279
- [65] Madasamy, West ,Morrell, Geraghty, Honkanen, Peyghambarian, *Buried Ion-exchanged Glass Waveguides: Burial-depth Dependence on Waveguide Width*, 2003, Optics Letters, Vol. 28, No. 13.
- [66] B. Svecova, J. Spirkova, S. Janakova, M. Mika, *Ion-exchanged optical waveguides fabricated in novel Er^{3+} and Er^{3+}/Yb^{3+} -doped silicate glasses: relations between glass composition, basicity and waveguide properties*, Mater. Sci. Eng. B 149 (2) (2008) 177e180.
- [67] Hui R., O'Sullivan, *Fiber Optic Measurement Techniques*, 2009, Elsevier Science;, ISBN 9780080920436.

- [68] Najafi, S.I, *Introduction to Glass Integrated Optics*, 1992, Artech House, Inc., ISBN 0-89006-547-0.
- [69] ISO Standard 11146, “*Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios*”, 2005 ITU-T, Transmission characteristics of optical components and subsystems, 02/2012, https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.310-201604-I!!PDF-E&type=items
- [70] Blahut M., Kasprzak D., *Self-imaging Effects in Curved Gradient Index Multimode Interference Structures Made by K^+ - Na^+ Ion Exchange*, 2009, *Optica Aplicata*, Vol. 39, No. 3.
- [71] OFS Optics , *RightWave Erbium-Doped Optical Fiber*, https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/Asset/Erbium_Doped_Optical_Fiber.pdf
- [72] Otruba, V. “*Elektronová mikroanalýza*” *Masarykova univerzita Brno*, https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C7031/um/15_AS_Elektronova_mikroanalýza.pdf
- [73] Nufern, *980-XP fiber*, http://www.nufern.com/pam/optical_fibers/2926/980-XP/
- [74] Kumar, S., Willner, A. E., *All-optical half adder using an SOA and a PPLN waveguide for signal processing in optical networks*, 2006, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 14, No. 22
- [75] S. Stanek, P. Nekvindova, B. Svecova, S. Vytykacova, M. Mika, J. Oswald, A. Mackova, P. Malinsky, J. Spirikova; The influence of silver-ion doping using ion implantation on the luminescence properties of Er-Yb silicate glasses, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Volume 371, 15 March 2016, Pages 350–354
- [76] B. Svecova, P. Nekvindova, S. Stanek, S. Vytykacova, A. Mackova, P. Malinsky, R. Miksova, M. Janecek, J. Pesicka, J. Spirikova; *The effect of various silicate-glass matrixes on gold-nanoparticle formation*, 2017 *Ceramics-Silikáty* 61 (1), Pages 52-58
- [77] S. Vytykacova, S. Stanek, B. Svecova, M. Mika, J. Oswald, A. Mackova, P. Malinsky, R. Bottger, R. Yatskiv, P. Nekvindova, *The effect of zinc content on the enhancement Er–Yb luminescence properties in the silicate glass matrix*, 2018 accepted to the *Ceramics-Silikaty*- open-access journal, doi 10.13168/cs.2018.0011
- [78] Chryssou, C. E., Di Pasquale, F., Pitt, C. W.: *Improved Gain Performance In Yb³⁺-Sensitized Er³⁺-Doped Alumina (Al₂O₃) Channel Optical Waveguide Amplifiers*, 2001 *Journal of Lightwave Technology*, , vol. 19, no. 3, pp. 345–349.

- [79] Ferziger, J.H.: *Numerical Methods for Engineering Applications* 1982, New York: Wiley,
- [80] Oberson, P., et al.: *Refracted near-field measurements of refractive index and geometry of silica-on-silicon integrated optical waveguides*, 1998, Applied Optics, , vol. 37, no. 31, pp.7268–7272.
- [81] Fontaine, N. H., Young, M.: *Two-dimensional index profiling of fibers and waveguides*, 1999. Applied Optics, vol. 38, no. 33, pp. 6836–6844.
- [82] Karásek, M., Čtyroký, J.: *Design Considerations for Er³⁺-doped Planar Optical Amplifiers in Silica on Silicon*, 1995 Journal of Optical Communications, , vol. 16, no. 3, pp. 115–118.
- [83] Karásek, M.: *Optimum Design of Er³⁺-Yb³⁺ Codoped Fibers for Large-Signal High-Pump-Power Applications*. IEEE Journal of Quantum Electronics, Oct. 1997, vol. 33, no. 10, pp. 1699–1705.
- [84] Judd, B. R.: *Optical Absorptions Intensities of Rare-Earth Ions.*, 1962, Phys. Rev., , vol. 127, p.750.
- [85] Hehlen, M. P., et al.: *Spectroscopic properties of Er³⁺- and Yb³⁺-doped soda-lime silicate and aluminosilicate glasses.*, 1997, Physical Review B, Oct., vol. 56, no. 15, pp. 9302–9318
- [86] Righini, G. C., et al.: *Active opticals waveguides based on Er- and Er/Yb-doped silicate glasses*, 2001, Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 284, pp. 223–229.
- [87] Míka, M., et al., *Effect of Ca²⁺, Mg²⁺, and Zn²⁺ on optical properties of Er³⁺ doped silicate glass*, 2005, In Proceedings of SPIE, vol. 5723, Bellingham: SPIE,
- [88] Čapek, P.: *Erbium Doped Planar Waveguides in Dielectric Materials*. Ph.D. thesis, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Praha, 2004.

Seznam publikační činnosti

- [89] Barkman O., Prajzler V., Nekvindova P., *Design and Modeling of the Single Mode Optical Glass Waveguides for Passive Photonics Structures*, 2011, 23RD Conference And Exhibition On Optical Communications 2011 (Ok 2011) Pages: 5-8
- [90] Barkman O., „Design and Modeling of The Planar Optical Splitters with Y-Branching Made by Ion Exchange Technology, Poster 2012, Prague May 17.
- [91] Barkman O., Jerabek V., Nekvindova P., *Optical Splitters Based on Self-Imaging Effect in Multi-Mode Waveguide Made by Ion Exchange in Glass*, 2013, **Radioengineering**, Volume: 22, Issue: , Special Issue: SI Pages: 352-356 Part: 2
- [92] Tsai, W.-S., Liu Y.-H.g, Barkman O., *Burying Of Channel Optical Waveguides - Relation Between Nearfield Measurement And Ag Concentration Profile*, 2015, Photonics, Devices, And Systems Vi Book Series: Proceedings Of Spie, Volume: 9450 Article Number: Unsp 945015
- [93] Barkman O., Jerabek V., Prajzler V., *Design And Modeling Of Multimode Interference Structures Made By Two Step Ion Exchange In Glass*, 2015, Photonics, Devices, And Systems Vi Book Series: Proceedings Of Spie, Volume: 9450
- [94] Stanek, S., Nekvindova, P., Svecova, B., Vytykacova, S., Mika, M., Oswald, J., Barkman O., Spirkova J., *The Influence Of Silver Ion Exchange On The Luminescence Properties Of Er-Yb Silicate Glasses*, 2017, **Optical Materials**, Volume: 72, Pages: 183-189
- [95] Mareš, D., Barkman, O. et al. “*Design and Technology of Planar Polymer Waveguide Bragg Grating*”. 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2013 Proceedings. 25th Conference and Exhibition on Optical Communications 2013, s. 17-21. ISBN 978-80-86742-37-3. 2013

Další výzkumné aktivity

- [96] SGS11/156/OHK3/3T/13 “*Rozvoj inteligentních součástek a systémů v oblasti mikroelektroniky, nanoelektroniky a optoelektroniky*” (RISMiNO), 2011-2013
- [97] SGS12/072/OHK3/1T/13 “*Vývoj integrovaných struktur planárních optických rozbočnic pracujících na principu interference v mnohavidovém vlnovodu s gradientním indexem lomu*”, 2012
- [98] SGS14/195/OHK3/3T/13 “*Mikro-nano-optoelektronické struktury, součástky a systémy (MiNa)*”, 2014-2016
- [99] MSM6840770014 *Výzkum perspektivních informačních a komunikačních technologií*, 2005-2011
- [100] Poloprovoz, ověřená technologie v rámci projektu Polyplan, grant MPO-TIP, FR-TI3 797, 2011-2013, “*Optická výkonová rozbočnice 1x2 Y realizovaná iontovou výměnou*”
- [101] Poloprovoz, ověřená technologie v rámci projektu Polyplan, grant MPO-TIP, FR-TI3 797, 2011-2013, “*Teplotní senzor s vlnovodnou polymerovou Braggovskou mřížkou*”
- [102] Komanec M., Barkman O. et al. *Asymetrický polarizaci-zachovávající planární 1:3 dělič výkonu s konektorizovaným vstupem a výstupy*. [Funkční vzorek]. 2016

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Jednotka
λ	Vlnová délka	m
Δn	Poměrný rozdíl indexu lomu	
ASE	Amplified Spontaneous Emission	
DUT	Device Under Test	
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	
EDS	Energeticky disperzní spektrometrie	
EDWA	Erbium Doped Waveguide Amplifier	
EMA	Elektronová mikrosonda	
FA	Fiber Array	
G	Zesílení	dB
I	Proud	A
IE	Iontová výměna	
L_c	Celková délka součástky	m
L_{in}	Délka vstupního vlnovodu	m
L_{MMI}	Délka interferenční oblasti	m
L_o	Rozteč mezi výstupními vlnovody	m
L_{out}	Délka výstupního vlnovodu	m
L_S	Délka zakřiveného vlnovodu (S-bend)	m
L_z	Zázněžová délka	m
m	Vidové číslo	
MMF	Mnohavidové vlákno	
N	Stupeň rozbočení	
n_c	Index lomu jádra	
n_{ef}	Efektivní index lomu	
n_s	Index lomu substrátu (pláště)	
OSA	Optický spektrální analyzátor	
P	Výkon	W
P_{IN}	Vstupní výkon	W
P_{OUT}	Výstupní výkon	W
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie	
SMF	Jednovidové vlákno	
t	Čas	s
U	Napětí	V
UV	Ultrafialová oblast spektra	
VIS	Viditelná oblast spektra	

Symbol	Popis	Jednotka
w	Šířka štěrbin na namaskovaném waferu	m
w ₀	Šířka štěrbin na litografické masce (předloze)	m
W _{MMI}	Šířka interferenční oblasti	M
T _g	Teplota skelného přechodu	
PON	Passive Optical Network	
FHD	Flame Hydrolysis Deposition	
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	
1.IE	1. Iontová výměna	
2.IE	2. Iontová výměna	

Seznam obrázků

Obr. 1 První optický zesilovač publikovaný v roce 1964 Eliasem Snitzerem	- 1 -
Obr. 2. Profil kanálkového vlnovodu vyrobeného technologií FHD. Fotografie SEM. Archiv SQS Vlákenná optika.....	- 2 -
Obr. 3. Profil zanořeného kanálkového vlnovodu vyrobeného dvoustupňovou iontovou výměnou. Fotografie SEM. Archiv SQS Vlákenná optika.....	- 3 -
Obr. 4. Schéma litografického procesu	- 6 -
Obr. 5. Procesy optické fotolitografie	
a) Deponovaná maska na povrch waferu určeného pro iontovou výměnu,	
b) Detail štěrbin optických rozbočnic	- 7 -
Obr. 6. Kontrola litografické masky a) Rozšíření šířky štěrbin z 2,80 μ m (na předloze) na 2,86 μ m (výsledný motiv), b) Nedokonale vyleptaná oblast štěrbin kanálku. ...	- 7 -
Obr. 7. Schéma procesu termální iontové výměny (Převzato z [54]).....	- 9 -
Obr. 8. Schéma procesu iontové výměny v elektrickém poli. (Převzato z [54]).....	- 9 -
Obr. 9. Příklad optického integrovaného obvodu s multiplexorem a zesilovačem EDWA.[42]	- 11 -
Obr. 10. Přechody elektronu mezi hladinami	
a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulovaná emise	- 12 -
Obr. 11. Princip zesilovače dopovaného erbiem a ytterbiem.....	- 13 -
Obr. 12. Architektura sítě PON	- 14 -
Obr. 13. Měřicí systém Metricon Prism Coupler	
a) měřicí sestava b) princip měření.....	
.....	- 16 -
Obr. 14. Elektronová mikrosonda EMA	
a) Interakce primárního elektronového svazku s hmotou vzorku (převzato z [72]) b) Zanořený kanálkový vlnovod s typickými fragmenty po analýze EMA	- 17 -
Obr. 15. Schéma měřicího pracoviště pro měření vidového pole	- 18 -
Obr. 16 Blokové schéma zařízení pro zajištění optické vazby vláknových a kanálkových vlnovodů	- 19 -
Obr. 17 Zajištění optické vazby vlnovodu a optického vlákna.	
a) Sestava s mikromanipulátory b) integrovaný čip s vstupním a výstupním vláknovým polem.....	
.....	- 20 -
Obr. 18. Fixace optických vláken ve vláknovém poli. Foto SEM. [Archiv SQS Vlákenná optika].....	- 20 -
Obr. 19. Schéma zapojení sestavy pro měření optické aktivity kanálkových vlnovodů.	- 21 -

Obr. 20 Schématické znázornění profilu indexu lomu nezanořeného kanálkového vlnovodu.....	- 28 -
Obr. 21 Model profilu indexu lomu navrženého kanálkového vlnovodu v rovině kolmé na směr šíření v $z=0$ pro vlnové délky a) $\lambda = 1310$ nm a b) $\lambda = 1550$ nm.....	- 29 -
Obr. 22. Výsledky simulace profilu rozložení energie základního vedeného vidu pro vlnové délky	- 30 -
Obr. 23. Struktura optické rozbočnice s Y větvením	- 32 -
Obr. 24. Výsledky simulace BPM rozbočnice 1x2 pro úhly rozbočení $0,5^\circ - 5^\circ$ a $\lambda = 1550$ nm	- 34 -
Obr. 25 Simulace šíření svazku pro uhel $\alpha_s = 5,0$	- 35 -
Obr. 26. Simulace šíření svazku pro uhel $\alpha_s = 0,5$	- 35 -
Obr. 27. Struktura optické interferenční rozbočnice	- 36 -
Obr. 28. Detail oblasti mnohavidového vlnovodu excitovaného vstupním jednovidovým vlnovodem a vznik interferenčních obrazů.....	- 37 -
Obr. 29. Rozložení energie v interferenční oblasti MMI rozbočnice pro dělicí poměr 1x3	- 39 -
Obr. 30. Simulace šíření signálu navrženou strukturou MMI rozbočnice 1x3.....	- 40 -
Obr. 31. Struktury MMI rozbočnic 1x2 deponované na substrátu	- 41 -
Obr. 32. Spektrální závislost útlumu realizovaného vzorku optické MMI rozbočnice 1x2.....	- 42 -
Obr. 33. a) Změřené absorpční spektrum pro skla s 5 at. % Yb a měnícím se množstvím Er. b) Změřené luminiscenční spektrum pro skla s 5 at. % Yb a měnícím se množstvím Er.	- 45 -
Obr. 34. a) Změřené absorpční spektrum sklo GZ4 s 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb a měnícím se obsahem zinku, b) Změřené luminiscenční spektrum sklo GZ4 s 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb a měnícím se obsahem zinku	- 46 -
Obr. 35. Silikátové sklo GZ4s obsahem erbia, ytterbia a zinku (převzato z [94])..	- 47 -
Obr. 36. Wafer silikátového sklo GZ4s obsahem erbia, ytterbia a zinku.....	- 49 -
Obr. 37. Schéma uspořádání štěrbin na litografické masce	- 50 -
Obr. 38. Vzorek M1-C1-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní provil (EMA), b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$)	- 54 -
Obr. 39. Vzorek M1-C2-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní provil EMA, b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$).....	- 54 -
Obr. 40. Vzorek M1-C6-K6 ($w_0 = 1,6\mu\text{m}$), a) Difuzní provil EMA, b) Vidové pole ($\lambda=1550\text{nm}$)	- 55 -
Obr. 41. Zařízení pro iontovou výměnu v elektrickém poli	- 57 -
Obr. 42. Difuzní profil kanálkového zanořeného vlnovodu a) M2-02-C4-K5, b) M3-02-C1-K4	- 59 -

Obr. 43. Vidové pole kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4 na vlnové délce 1550 nm...	- 60 -
Obr. 44. Vidové pole kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4 na vlnové délce 980 nm	- 60 -
Obr. 45. Vidové pole kanálkového vlnovodu M3-02-C2-K4 na vlnové délce 1550 nm...	- 60 -
Obr. 46. Vidové pole kanálkového vlnovodu.....	- 60 -
Obr. 47. Vidové pole vláknového vlnovodu Nufern HP980-XP na vlnové délce 1550 nm	- 61 -
Obr. 48. Vidové pole vláknového vlnovodu Nufern HP980-XP na vlnové délce 980 nm	- 61 -
Obr. 49. Schéma uspořádání měřícího pracoviště pro měření optické aktivity.....	- 62 -
Obr. 50. Luminiscenční spektrum měřeného kanálkového vlnovodu M2-02-C4-K4-	63 -
Obr. 51. Poškození jádra vláknového vlnovodu vlivem.....	- 63 -
Obr. 52. Změřené vidové pole erbiem dopovaného vlákna OFS GP980.	- 64 -
Obr. 53. Změřený diferenciální zisk erbiem dopovaného vlákna OFS GP980 pro různé úrovně čerpání.	- 64 -
Obr. 54. Spektrální závislost útlumu vzorku M2-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.	- 65 -
Obr. 55. Změřený diferenciální zisk vzorku M2-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.....	- 65 -
Obr. 56. Spektrální závislost útlumu vzorku M3-02-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.....	- 65 -
Obr. 57. Změřený diferenciální zisk vzorku M1-01-C2-K4 pro různé úrovně čerpacího výkonu.....	- 65 -
Obr. 58. Rozložení struktur rozbočnic 1x2 na čipu.....	- 68 -
Obr. 59. Sestava čipu optické aktivní rozbočnice 1x2 se vstupním a výstupním vláknovým polem.....	- 69 -
Obr. 60. Spektrální útlumová charakteristika aktivní rozbočnice s označením M2-02-C8-Y8. Stav bez čerpání plná čára, při čerpání 200mW přerušovaná čára.....	- 70 -
Obr. 61. Diferenciální zisk optické aktivní rozbočnice M2-02-C8-Y8 při čerpacím výkonu 50mW (zelená), 100mW (oranžová) a 200mW (modrá). a) Výstupní port č. 1, b) Výstupní port č. 2.....	- 70 -
Obr. 62. Spektrální útlumová charakteristika aktivní rozbočnice s označením M3-02-C7-Y8. Stav bez čerpání plná čára, při čerpání 200mW přerušovaná čára.....	- 71 -
Obr. 63. Diferenciální zisk optické aktivní rozbočnice M1-02-C8-Y8 při čerpacím výkonu 50mW (zelená), 100mW (oranžová) a 200mW (modrá). a) Výstupní port č. 1, b) Výstupní port č. 2.....	- 72 -

Seznam tabulek

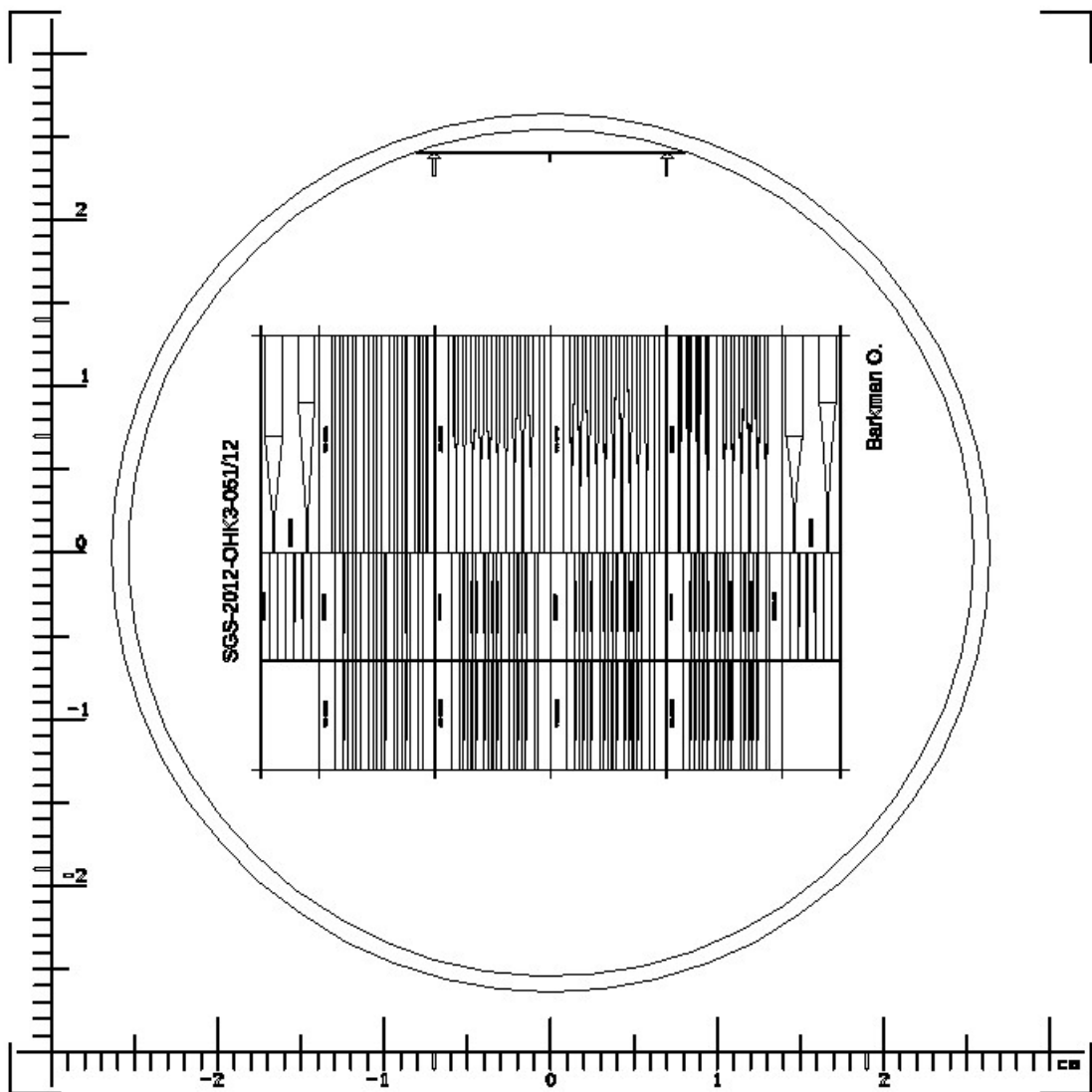
Tab. 1 Složení optických skel s označením B1T1 a I1T1 a IAG1 [hm. %]	4 -
Tab. 2. Složení základní skloviny GZ4 [hm. %]	5 -
Tab. 3 Komponenty pracoviště pro měření optické aktivity.....	21 -
Tab. 4. Chemické složení skel použitých pro realizaci pasivních optických struktur-	24 -
-	
Tab. 5. Podmínky aplikované iontové výměna na použité substráty.....	25 -
Tab. 6. Souhrn změřených parametrů vyrobených vzorků planárních vrstevových vlnovodů.....	25 -
Tab. 7. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1588 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$	26 -
Tab. 8. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1587 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$	27 -
Tab. 9. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku 1923 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$	27 -
Tab. 10. Výsledky měření profilu indexu lomu vzorku vzorku 1524 na vlnové délce $\lambda = 632,8\text{nm}$	27 -
Tab. 11. Parametry navrženého kanálkového vlnovodu.....	28 -
Tab. 12. Porovnání změřených a vypočítaných hodnot efektivního indexu lomu .	30 -
Tab. 13. Výsledky výpočtu délky zakřivených vlnovodů v závislosti na úhlu α_s ..	33 -
Tab. 14. Výkonová bilance na výstupu rozbočnice 1x2 pro úhel rozbočení $0,5^\circ - 5^\circ$	34 -
.....	
Tab. 15. Parametry navržené struktury MMI rozbočnice.....	39 -
Tab. 16. Parametry navržené MMI optické rozbočnice pro výrobu funkčních vzorků ...	40 -
.....	
Tab. 17. Parametry iontové výměny aplikované při realizaci funkčních vzorků MMI rozbočnic.....	41 -
Tab. 18. Základní složení základního skla GZ4.....	44 -
Tab. 19. Vzájemné poměry erbia a ytterbia přidávané do základního skla GZ4...	45 -
Tab. 20. Změřený index lomu skel GZ4 0,25 at. % Er a 5 at. % Yb pro různé koncentrace zinku	47 -
Tab. 21. Značení substrátů použitých skel.....	47 -
Tab. 22. Šířky štěrbin na litografické masce pro depoziční testy	49 -
Tab. 23. Vzorky vyrobené pomocí jednostupňové iontové výměny.....	50 -
Tab. 24. Analýza rozměrů a koncentrace stříbra kanálkových vlnovodů vzorku s označením M1-1-C2 provedená pomocí metody EMA.....	51 -

Tab. 25. Měření velikosti difuzního profilu a vidového pole nezanořeného kanálkového vlnovodu.....	- 55 -
Tab. 26: Složení tavenin pro přípravu kanálkových vlnovodů [hm. %].....	- 58 -
Tab. 27. Vzorčky vyrobené dvoustupňovou iontovou výměnou	- 58 -
Tab. 28. Výsledky měření velikosti difuzního profilu zanořeného kanálkového vlnovodu.....	- 59 -
Tab. 29. Změřená velikost vidového pole vlákna HP980-XP a vlnovodů na vzorcích M1-01 a M3-02	- 61 -
Tab. 30. Maximální změřený diferenciální zisk aktivní optické rozbočnice M2-02-C8-Y8.....	- 71 -
Tab. 31. Maximální změřený diferenciální zisk aktivní optické rozbočnice M3-02-C8-Y8.....	- 72 -

Příloha A

Dokumentace masky: SGS-2012-OHK3-05/12

Materiál:	Quartz glass/chrom	Velikost:	3 x 3 x 0,06 palců
Typ masky:	Negativní	Šířka čar motivů:	Až 0,5 μm
CD Tolerance:	0,15 μm	Defect density:	$\leq 0.2 /\text{cm}^2$ for defects $\geq 1,5 \mu\text{m}$
Číslo objednávky:			Elektronová litografie
		ISC:	
Kreslil:	Barkman O.	Datum:	9/2012



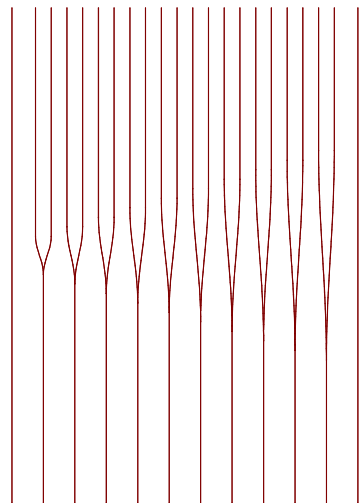
Topologie struktur na masce

SGS – 2012 - C1: (Š x V: 6 900 x 13 000 um): Rovné kanálky bez zakřivení

Vlnovod č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Šířka [um]	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20	2,6	25	30	35	40	45	50	55	60
Délka	13 000																				

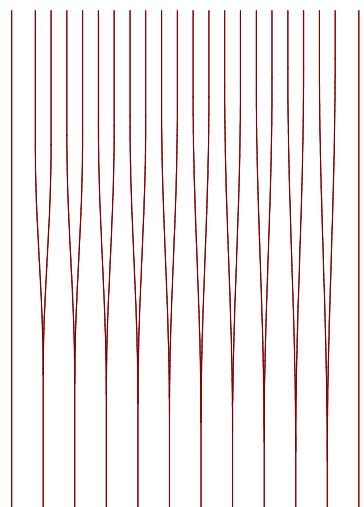
SGS – 2012 – C2 (Š x V: 6 900 x 13 000 um): Sada Y-rozbočnic 1x2

Struktura č.	Ls	Lin, Lout [um]	w [um]
K1	-	13000	2,6
Y1	1000	6000	2,6
Y2	1500	6750	2,6
Y3	2000	5500	2,6
Y4	2500	5250	2,6
Y5	3000	5000	2,6
Y6	3500	4750	2,6
Y7	4000	4500	2,6
Y8	4500	4250	2,6
Y9	5000	4000	2,6
Y10	5500	3750	2,6
K2	-	1300	2,6
K3	-	1300	2,6



SGS – 2012 – C3 (Š x V: 6 900 x 13 000 um): Sada Y-rozbočnic 1x2

Struktura č.	Ls	Lin, Lout [um]	w [um]
K1	-	13000	2,6
Y1	6000	3500	2,6
Y2	6500	3250	2,6
Y3	7000	3000	2,6
Y4	7500	2750	2,6
Y5	8000	2500	2,6
Y6	8500	2250	2,6
Y7	9000	2000	2,6
Y8	9500	1750	2,6
Y9	10000	1500	2,6
Y10	10500	1250	2,6
K2	-	1300	2,6
K3	-	1300	2,6



SGS – 2012 – C4 (Š x V: 6 900 x 13 000 um): Mnohavidové Y-rozbočnice 1x2

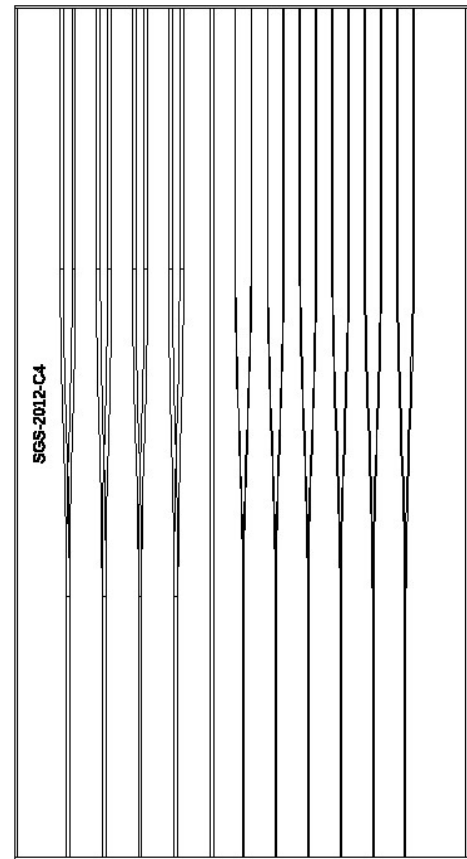
Struktura č.	Ls	Lin, Lout [um]	w [um]
1	5000	4000	50
2	5000	4000	62,5
3	5000	4000	50
4	5000	4000	62,5
5	-	13000	50
6	6000	3750	10
7	6000	3750	12
8	6000	3750	14
9	6000	3750	16
10	6000	3750	18
11	6500	3750	20

Legenda:

Ls... Délka S-band

Lin, Lout... Délka vstupního resp. výstupního vlnovodu

w ... Šířka štěrbin



MMI děliče výkonu

SGS – 2012 – C5 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI děliče výkonu

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	24	3000	1750	3
2	1675	25	3000	1750	3
3	1675	26	3000	1750	3
4	1675	27	3000	1750	3
5	1675	28	3000	1750	3
6	1675	29	3000	1750	3
7	1675	30	3000	1750	3
8	1675	31	3000	1750	3
9	1675	32	3000	1750	3
10	1675	33	3000	1750	3
11	1675	34	3000	1750	3
12	1675	35	3000	1750	3
13	1675	36	3000	1750	3
14	1675	37	3000	1750	3
15	1675	38	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C6 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI děliče výkonu

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	38	3000	1750	3
2	1675	39	3000	1750	3
3	1675	40	3000	1750	3
4	1675	41	3000	1750	3
5	1675	42	3000	1750	3
6	1675	43	3000	1750	3
7	1675	44	3000	1750	3
8	1675	45	3000	1750	3
9	1675	46	3000	1750	3
10	1675	47	3000	1750	3
11	1675	48	3000	1750	3
12	1675	49	3000	1750	3
13	1675	50	3000	1750	3
14	1675	51	3000	1750	3
15	1675	52	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C7 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI děliče výkonu

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	51	3000	1750	3
2	1675	52	3000	1750	3
3	1675	53	3000	1750	3
4	1675	54	3000	1750	3
5	1675	55	3000	1750	3
6	1675	56	3000	1750	3
7	1675	57	3000	1750	3
8	1675	58	3000	1750	3
9	1675	59	3000	1750	3
10	1675	60	3000	1750	3
11	1675	61	3000	1750	3
12	1675	62	3000	1750	3
13	1675	63	3000	1750	3
14	1675	64	3000	1750	3
15	1675	65	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C8 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI děliče výkonu

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	65	3000	1750	3
2	1675	66	3000	1750	3
3	1675	67	3000	1750	3
4	1675	68	3000	1750	3
5	1675	69	3000	1750	3
6	1675	70	3000	1750	3
7	1675	71	3000	1750	3
8	1675	72	3000	1750	3
9	1675	73	3000	1750	3
10	1675	74	3000	1750	3
11	1675	75	3000	1750	3
12	1675	76	3000	1750	3
13	1675	77	3000	1750	3
14	1675	78	3000	1750	3
15	1675	79	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

MMI Multiplexery

SGS – 2012 – C9 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI Multiplexery

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	24	3000	1750	3
2	1675	25	3000	1750	3
3	1675	26	3000	1750	3
4	1675	27	3000	1750	3
5	1675	28	3000	1750	3
6	1675	29	3000	1750	3
7	1675	30	3000	1750	3
8	1675	31	3000	1750	3
9	1675	32	3000	1750	3
10	1675	33	3000	1750	3
11	1675	34	3000	1750	3
12	1675	35	3000	1750	3
13	1675	36	3000	1750	3
14	1675	37	3000	1750	3
15	1675	38	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C10 (Š x V:6 900 x 6 425 um): MMI Multiplexery

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	38	3000	1750	3
2	1675	39	3000	1750	3
3	1675	40	3000	1750	3
4	1675	41	3000	1750	3
5	1675	42	3000	1750	3
6	1675	43	3000	1750	3
7	1675	44	3000	1750	3
8	1675	45	3000	1750	3
9	1675	46	3000	1750	3
10	1675	47	3000	1750	3
11	1675	48	3000	1750	3
12	1675	49	3000	1750	3
13	1675	50	3000	1750	3
14	1675	51	3000	1750	3
15	1675	52	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C11 (Š x V: 6 900 x 6 425 um): MMI Multiplexery

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	51	3000	1750	3
2	1675	52	3000	1750	3
3	1675	53	3000	1750	3
4	1675	54	3000	1750	3
5	1675	55	3000	1750	3
6	1675	56	3000	1750	3
7	1675	57	3000	1750	3
8	1675	58	3000	1750	3
9	1675	59	3000	1750	3
10	1675	60	3000	1750	3
11	1675	61	3000	1750	3
12	1675	62	3000	1750	3
13	1675	63	3000	1750	3
14	1675	64	3000	1750	3
15	1675	65	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

SGS – 2012 – C12 (Š x V: 6 900 x 6 425 um): MMI Multiplexery

Struktura č.	Lin [um]	Wmmi [um]	Lmmi[um]	Lout [um]	Win, W out[um]
K1	6425	-	-	-	-
1	1675	65	3000	1750	3
2	1675	66	3000	1750	3
3	1675	67	3000	1750	3
4	1675	68	3000	1750	3
5	1675	69	3000	1750	3
6	1675	70	3000	1750	3
7	1675	71	3000	1750	3
8	1675	72	3000	1750	3
9	1675	73	3000	1750	3
10	1675	74	3000	1750	3
11	1675	75	3000	1750	3
12	1675	76	3000	1750	3
13	1675	77	3000	1750	3
14	1675	78	3000	1750	3
15	1675	79	3000	1750	3
K2	6425	-	-	-	-
K3	6425	-	-	-	-

Tapery

SGS – 2012 – C15 (Š x V: 3 450 x 6 900 um) : Tapery 9 – 50 – funkce „klin“

Struktura č.	Lin [um]	Lt [um]	Lout [um]
1	1000	500	4925
2	1000	1000	4425
3	1000	2000	3425
4	1000	2500	2925
5	1000	3000	2425
6	1000	3500	1925

SGS – 2012 – C16 (Š x V: 3 450 x 6 900 um) : Tapery 9 – 50 – funkce „S“

Struktura č.	Lin [um]	Lt [um]	Lout [um]
1	1000	500	4925
2	1000	1000	4425
3	1000	2000	3425
4	1000	2500	2925
5	1000	3000	2425
6	1000	3500	1925

SGS – 2012 – C1x (Š x V: 3 450 x 13 000 um) : Tapery 50 – 1000 – funkce „S“

Struktura č.	Lin [um]	Lt [um]	Lout [um]
1	2000	5000	6000
2	2000	7000	4000

SGS – 2012 – C1x (Š x V: 3 450 x 13 000 um) : Tapery 50 – 1000 – funkce „S“

Struktura č.	Lin [um]	Lt [um]	Lout [um]
1	2000	5000	6000
2	2000	7000	4000