

České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering



Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Polymerní pasivní a aktivní fotonické struktury

Polymer passive and active photonic structures

Praha, 2014

Summary

Optical waveguides are dielectrical space-limited media made for transmission, distribution and harnessing of optical signal. Two basic types of the waveguides are generally recognized – fibre waveguides, which are used for long distance transmissions of optical signal (hundreds or even thousands of kilometres) and planar waveguides transmitting signal to the distances maximally few centimetres.

Planar optical waveguides are basic elements of photonics structures, mostly done in a form of channel waveguides suitable to distribute or harness the optical signal. Such waveguides are usually realised by deposition of the waveguiding layers onto the substrates, or controlled in-diffusion of functional ions into the surface of the substrates. The substrates are usually optical glasses, crystals or semiconductors. Photonics structures made this way have excellent properties; however, their fabrication is usually considerably demanding and costly. Therefore, new options, which would allow for feasible and less expensive production of such components while still maintaining their excellent properties, are highly desirable.

One of such options provides polymer materials, because of their suitable optical and mechanical properties and rather simple technology of their production. Beside it they offer whole array of technological possibilities that had not been earlier conceivable. Polymer materials designated for photonics applications are nowadays widely investigated and some of them are even commercially available.

Optical waveguides at the Department of Microelectronics with the Faculty of Electroengineering of Czech Technical University have been researched for a long time and the research lead to design and realization of original photonics structures based on polymer optical waveguides. It concerns mainly multi-mode polymer splitters for the POF (Plastic Optical Fibre) fibres, structures with multi-mode interference or designs of the structures with circular microresonators. Moreover, many tests on deposition of polymer thin films doped with laser active ions and measurements of their photoluminescence properties have been done as well and that tests were crowned with realisation of polymer Er^{3+} doped thin layer that has photoluminescence at 1530 nm. Among other original results should be mentioned bismuth-doped thin layer with luminescence around 1300 nm that has not been reported any time before.

Souhrn

Optické vlnovody jsou dielektrická prostorově omezená prostředí, která slouží k přenosu, distribuci a zpracování optického signálu. Rozlišujeme dva základní typy optických vlnodů, a to vláknové vlnovody, které jsou určeny pro přenos optického signálu na velké vzdálenosti (100-ky až tisíce kilometrů), a planární optické vlnovody, které přenáší optický signál na vzdálenost maximálně několika málo centimetrů.

Základním stavebním prvkem fotonických struktur je právě planární optický vlnovod. Z planárních optických vlnodů jsou pak realizovány kanálkové vlnovody, které slouží k realizaci fotonických struktur, které jsou použity k distribuci a zpracování optického signálu. Tyto vlnovody jsou realizovány nanesením vlnovodné vrstvy na planární podložku (substrát), nebo přímo difúzí do podložky. Pro výrobu těchto planárních optických vlnodů se běžně používají optická skla, krystaly a polovodiče. Fotonické struktury vyrobené z těchto materiálů mají vhodné vlastnosti, ale jejich výroba je technologicky náročná a tedy i drahá. Proto jsou vyvíjeny nové materiály, které by umožnily realizaci fotonických struktur s nižšími náklady, ale se srovnatelnými technickými parametry.

V současnosti jsou intenzivně zkoumány a vyvíjeny nové polymerní materiály, které mají vhodné optické a mechanické vlastnosti a také se dají vyrobít jednoduchou technologií. Dokonce řada renomovaných firem nabízí komerčně speciální polymery pro fotonické aplikace, které nabízejí nové technologické možnosti, které v minulosti nebyly myslitelné.

V oblasti optických vlnodů byly na Katedře mikroelektroniky na Fakultě elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém v Praze navrženy a realizovány optické planární vlnovody z nových polymerních materiálů, které vedly k návrhu a realizaci původních fotonických struktur. Jedná se především o mnohavidové polymerní rozbočnice pro POF (Plastic Optical Fiber) vlákna a struktury s multividovou interferencí, návrhy struktur s kruhovými mikrozónátory. Dále byly prováděny depoziční testy polymerních vrstev s dotací aktivními ionty a byly u těchto vrstev studovány fotoluminiscenční vlastnosti. Podařilo se připravit polymerní vrstvy s dotací Er^{3+} , které vykazovaly fotoluminiscenci na vlnové délce 1530 nm. U vrstev s dotací bismutu byla pozorována luminiscence na vlnové délce kolem 1300 nm, která nebyla doposud u polymerů pozorována.

Obsah

1. Úvod	1
2. Planární optické vlnovody	2
3. Pasivní fotonické struktury	5
4. Aktivní polymerní vrstvy	10
5. Závěr.....	17
6. Použitá literatura	18
Ing. Václav Prajzler, Ph.D.....	22

1. Úvod

Fotonika je vědní obor, který v posledních letech zažívá velký rozvoj. Výraz fotonika "photonics" pochází z řeckého slova "photos" - světlo a fotonika je velmi mladým oborem navazujícím na tradiční vědní disciplínu - optiku. Fotonické struktury mají široké uplatnění jak v optické, tak vysokofrekvenční telekomunikační technice, v senzorových systémech, v lékařství a podobně.

Nejjednodušší a základní fotonickou strukturou je planární optický vlnovod. Optické planární vlnovody jsou realizovány nanosením vlnovodné vrstvy na planární podložku (substrát), nebo přímo difuzí do podložky [1], [2]. Pro realizaci vlastní fotonické struktury je základem pak kanálkový optický vlnovod, kde je vlnovodná struktura prostorově omezena. Pro výrobu planárních vlnovodů se běžně používají optická skla, krystaly a polovodiče [3]. Použité materiály pro optické kanálkové vlnovody jsou stále rozšiřovány a neustále jsou vyvíjeny nové, a to jak na vědeckých pracovištích, tak v komerční sféře. V současnosti jsou intenzivně zkoumány a vyvíjeny nové polymerní materiály, které mají velice perspektivní vlastnosti a jednoduchou technologii výroby [4]-[6].

V počátcích rozvoje integrované optiky a fotoniky byl vývoj struktur zaměřen na návrh a realizaci struktur v jednovidovém nebo v mnohavidovém režimu, které mají rozměry řádově několik mikrometrů. V současnosti je věnována také velká pozornost vývoji nových fotonických struktur, které mají rozměry řádově v nanometrech. Dá se říci, že dochází k rozvoji nového vědního oboru označeného jako nanofotonika [7]. Přestože nejnovější vývoj je především zaměřen právě na nanofotoniku, je stále věnována velká pozornost i strukturám, které pracují v mnohavidovém režimu. Jsou vyvíjeny nové mnohavidové planární struktury, které budou sloužit k distribuci a zpracování signálu v lokálních optických sítích, na palubách letadel, lodí, v automobilech apod. [8], [9].

2. Planární optické vlnovody

Planární optické vlnovody jsou základním stavebním prvkem pro většinu fotonických struktur. Jejich cílem je přenos nebo zpracování optického signálu na vzdálenost jen několika málo desítek milimetrů, maximálně několika málo centimetrů. Tyto vlnovody se skládají z podložky (substrátu), vlnodné vrstvy a horní krycí vrstvy. Aby vlnovodem mohl být optický signál veden, tak hodnota indexu lomu vlnodné vrstvy (n_f) musí mít vyšší hodnotu, než je index lomu podložky (n_s) a horní krycí vrstvy (n_c). Pro vlastní realizaci fotonických struktur je nutné realizovat kanálkové optické vlnovody, kde je vlnodná struktura prostorově omezena. Optické vlnovody můžeme rozdělit podle profilu indexu lomu na vlnovody se skokovou změnou indexu lomu, nebo optické vlnovody se spojitě proměnným indexem lomu. Optické vlnovody dále dělíme na jednořadové nebo mnohářadové [10].

Optické planární vlnovody, a tedy i fotonické struktury jsou vyráběny z polovodičových materiálů, optických skel a krystalů. Kromě těchto výše zmíněných materiálů jsou v současnosti intenzivně vyvíjeny nové polymerní materiály, které umožní vyrobit fotonické struktury se srovnatelnými vlastnostmi jako u fotonických struktur vyrobených z tradičních materiálů, ale pomocí jednodušších technologických postupů. V současnosti řada vědeckých skupin vyvíjí a také již vyvinula několik unikátních polymerů s vhodnými vlastnostmi pro fotonické aplikace. Některé z těchto polymerů jsou dokonce komerčně dostupné (viz Tab. 2.1).

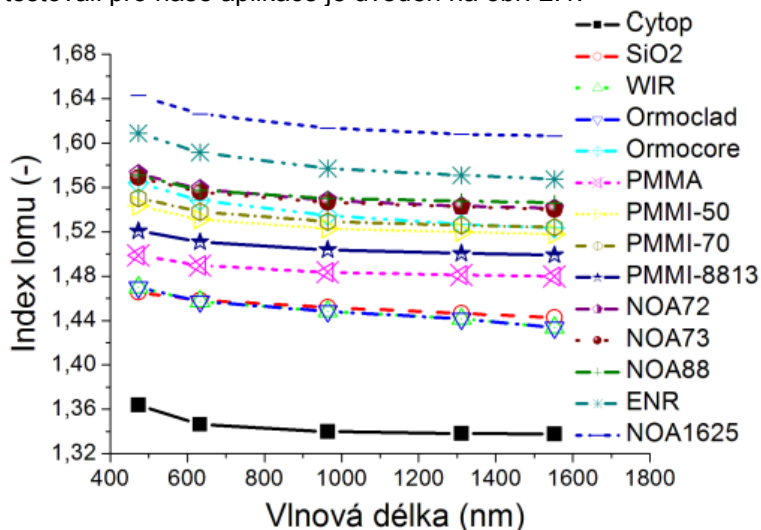
Tab. 2.1: Přehled zajímavých polymerních materiálů pro fotonické aplikace.

firma	název polymeru	technologie výroby	optický útlum (dB/cm)
AlliedSignal	Acrylate	UV/laser writting	0,24 @ 1550 nm
Amaco Chemicals	Ultradel 9000	UV/mokrý leptání	1,00 @ 1550 nm
Dow Chemicals	Cyclotene 3022	RIE	1,50 @ 1550 nm
DuPont Acrylate	[Polyguide TM]	-	0,6 @ 1550 nm
Hitachi	Fluorinated polyimide	UV/mokrý leptání	0,60 @ 1300 nm
IBM	PMMA-DR1	RIE	0,40 @ 1300 nm
JDS Uniphase	Polycarbonate	RIE	0,60 @ 1550 nm
K-JIST	Fluorinate	RIE	0,42 @ 1550 nm
NTT	Fluorinated polyimide	RIE	0,7 @ 1310 nm
PacificWave	Polycarbonate	RIE	1,8 @ 1550 nm
Samsung Electronics	Polyimides	UV	0,4 @ 1550 nm
Zen Photonics	ZP21451	UV/mokrý leptání	0,40@1550 nm

Nově vyvinuté polymery se vyznačují vysokou transparentností ve viditelném a blízkém infračerveném spektru a tedy mají nízké optické ztráty na provozních vlnových délkách, mají dobře kontrolovatelnou hodnotou indexu lomu, dostatečnou časovou a teplotní stabilitu. Fotonické struktury z polymerních materiálů lze také vyrobit s nižšími náklady a s menší zátěží životního prostředí.

Technologie výroby fotonických struktur přímo souvisí s použitými materiály [11]. K vytvoření potřebných geometrických rozměrů jsou používány litografické procesy, po kterých následují procesy mokrého nebo suchého leptání. Z důvodu jednodušší integrace a nižší ceny, pokud je to technologicky možné, je snaha vyrábět fotonické struktury pomocí technologických postupů kompatibilních s křemíkovou technologií. To znamená, že je snaha celé fotonické struktury vyrobit na křemíkové podložce [12], [13]. Nevýhodou křemíku je jeho vysoká hodnota indexu lomu. A proto je nutné mezi vlnovodnou vrstvou a křemíkovou podložku nanést oddělovací vrstvu s nižší hodnotou indexu lomu než má vlnovodná vrstva. Nejčastěji je tento problém řešen oxidací křemíku, kdy dojde k vytvoření vrstvy SiO_2 , která má vhodnou hodnotu indexu lomu. Vytvoření vrstvy SiO_2 na Si podložce je běžný technologický krok používaný v Si technologii.

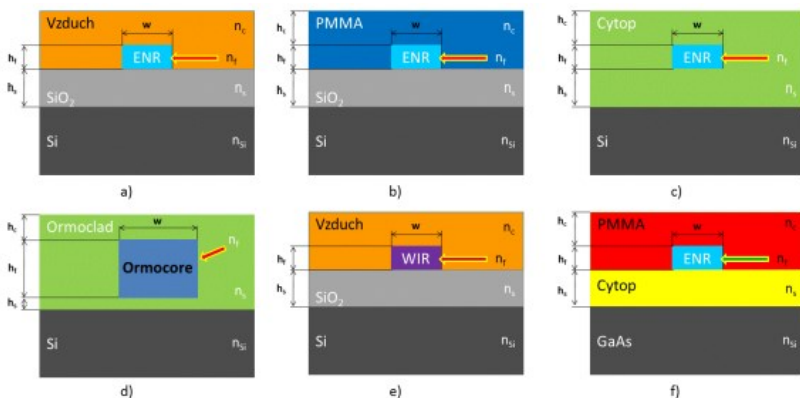
Přehled použitých materiálů pro vlnovodné struktury, které jsem testovali pro naše aplikace je uveden na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Naměřené hodnoty indexu lomu použitých materiálů pro realizaci optických polymerních vlnovodů pomocí jednohranolové vidové spektroskopie.

V laboratoři PLANIO (Planárních Optoelektronických a Optických Integrovaných Struktur) na Katedře mikroelektroniky na FEL ČVUT v Praze jsme prováděli návrh několika typů jednovidových polymerních kanálkových vlnodůů na Si podložce. Jednalo se o dva základní návrhy, které jsou pak modifikovány použitím různých typů mezivrstev a vlnodných vrstev.

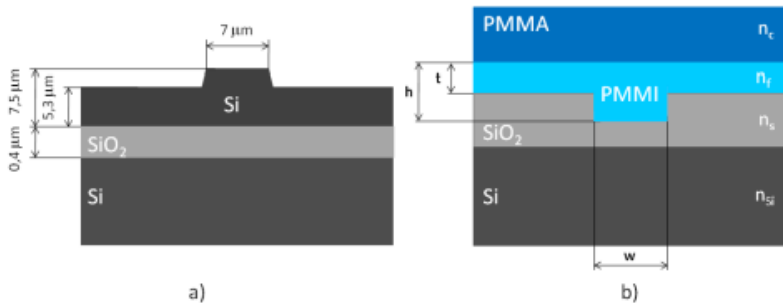
V prvním případě se jedná o hřebenové vlnodvy, kde je na Si podložku nanášena mezivrstva z SiO_2 , a na tuto mezivrstvu je pak nanášena polymerní vlnodná vrstva. V druhém případě je na Si podložku nanášena mezivrstva z polymerního materiálu s nižší hodnotou indexu lomu, než má polymerní vlnodná vrstva. Ve speciálních případech je nutné navrhout a realizovat kanálkové vlnodvy na jiných než Si podložkách. V našem případě jsme pro jednu speciální aplikaci navrhli a zrealizovali polymerní optický vlnod na podložce z polovodiče GaAs. Základní přehled struktur optických kanálkových vlnodůů, které byly navrženy v laboratoři PLANIO, je uveden na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Příklady navržených struktur optických hřebenových a kanálkových vlnodůů: a) Si/ SiO_2 /ENR, b) Si/ SiO_2 /ENR/PMMA, c) Si/Cytop/ENR/Cytop, d) Si/Ormoclad/Ormocore/Ormoclad, e) Si/ SiO_2 /WIR, f) GaAs/Cytop/ENR kanálkový vlnod s krycí vrstvou.

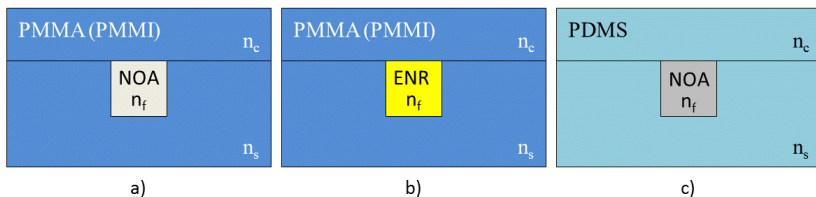
Druhý návrh jednovidového optického planárního vlnodvy vychází z konceptu, který byl popsán panem Fischbeckem [14], který vycházel z práce pana Mercatiliho [15], a byl použit u polovodičových struktur [16]. Navrhovaná struktura je uvedena na obr. 2.3a. Navržená modifikovaná struktura s polymerní vlnodnou vrstvou z Poly(methylmethacrylimide) (PMMI) od firmy Evonik Industries AG je uvedena na obr. 2.3b. [17]. Kromě této struktury s vlnodnou vrstvou z polymeru PMMI jsme také navrhli a zrealizovali optický

vlnovod s jádrem vlnovodu z polymeru z epoxidové pryskyřice ENR (Epoxy Novolak Resin) [18].



Obr. 2.3: Struktura žebrového optického vlnovodu, a) s polovodičovou Si vlnovodnou vrstvou [16], b) struktura s polymerní PMMI vlnovodnou vrstvou [17].

Kromě jednovidových vlnovodů byly také navrhovány a vyráběny polymerní planární vlnovody s velkým průměrem jádra vlnovodné vrstvy. Tyto mnohavidové vlnovody byly navrženy tak, aby byly kompatibilní se standardními POF vlákny (Plastic Optical Fiber) s rozměrem 980/1000 μm (průměr jádro/plášť). Na obr. 2.4 jsou uvedeny struktury těchto navržených vlnovodů. Např. na obr. 2.4c je uvedena struktura s vlnovodnou vrstvou z fotopolymerů NOA (Norland Optical Adhesive) a substrátem a z horní krycí vrstvou z polymeru Polydimethylsiloxan (PDMS).



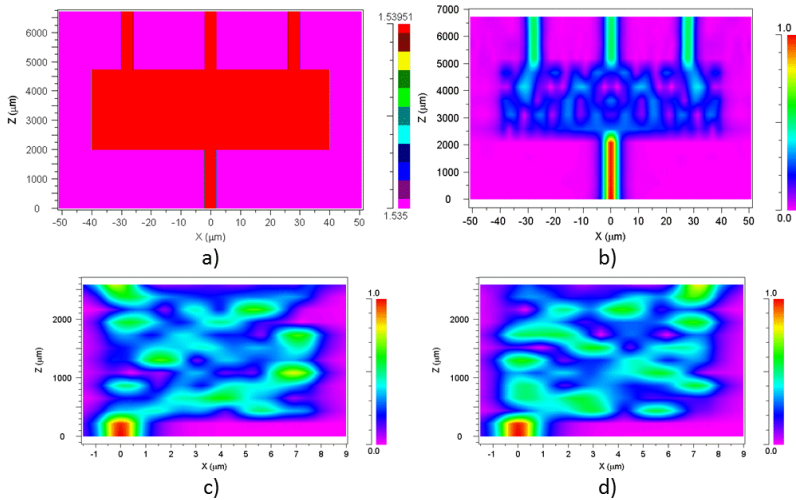
Obr. 2.4: Struktury navržených mnohavidových planárních optických vlnovodů pro struktury s POF vstupními/výstupními vlnovody, a) struktura PMMA(PMMI)/NOA, b) struktura PMMA(PMMI)/ENR, c) struktura PDMS/NOA.

3. Pasivní fotonické struktury

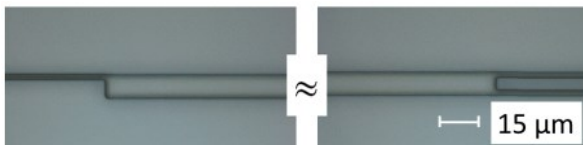
Základní a klíčovou fotonickou strukturou, která je používána ve všech optických sítích, je optická Y rozbočnice, která slouží k rozdělení optických signálů z jednoho vstupního do dvou nebo více výstupních vlnovodů. Navrhovali jsme a realizovali optické polymerní jednovidové rozbočnice s jedním vstupním a dvěma nebo čtyřmi

výstupními vlnovody. Tyto návrhy byly prováděny pomocí programu BeamPROPTM od firmy RSoft.

Dále jsme navrhovali struktury s mnohavidovou interferencí, a to jak optické rozbočnice, tak demultiplexory. Příklady navržených struktur jsou uvedeny na obr. 3.1. Na obr. 3.1a,b je ukázka navržené struktury optické rozbočnice se třemi výstupními vlnovody a na obr. 3.1c,d je struktura optického demultiplexoru pro vlnové délky 1490/1555 nm. Fotografie vyrobené struktury z obr. 3.1c pomocí elektronové litografie je uvedena na obr. 3.2.



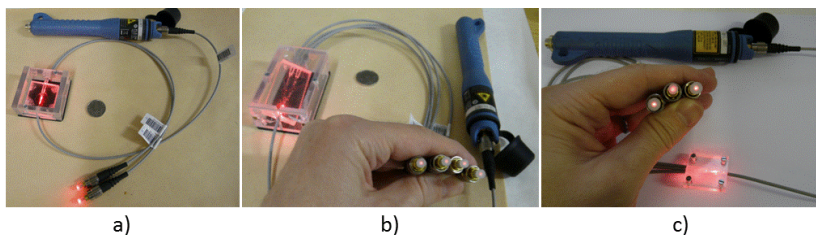
Obr. 3.1: Fotonické struktury s multivídnou interferencí, a) optická rozbočnice 1x3 (profil indexu lomu z pohledu shora), b) šíření optického signálu pro $\lambda=1310$ nm. Šíření optického signálu navrženého demultiplexoru 1490x1555 nm pro signál c) $\lambda=1490$ nm, d) $\lambda=1555$ nm.



Obr. 3.2: Fotografie optického demultiplexoru 1490/1555 nm vyrobeného pomocí elektronové litografie.

Ukázky vyrobených optických mnohavidových rozbočnic se vstupními/výstupními POF vlákny při průchodu signálu 635 nm jsou uvedeny na obr. 3.3. Na obr. 3.3a je uvedena struktura s jedním vstupním a dvěma výstupními POF vlákny. Na obr. 3.3b je uvedena struktura s jedním vstupním a čtyřmi výstupními POF vlákny.

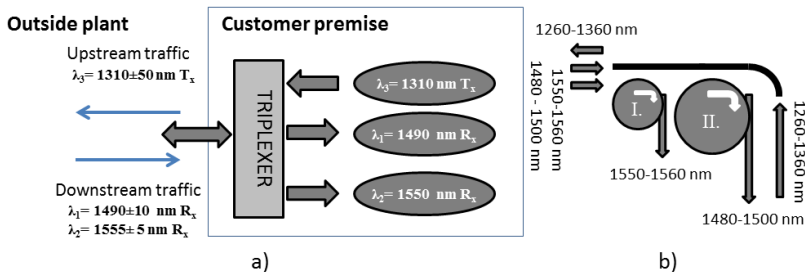
Na obr. 3.3c je uvedena fotografie rozbočnice se třemi výstupními vlnovody. Topologie této struktury je původní a struktura je chráněna zápisem na Úřadu průmyslového vlastnictví (č. patentu 304236).



Obr. 3.3: Fotografie vyrobených optických planárních rozbočnic s POF vlákny při průchodu signálu o vlnové délce 635 nm., a) struktura 1x2 Y, b) struktura 1x4 Y, c) struktura 1x3 Y.

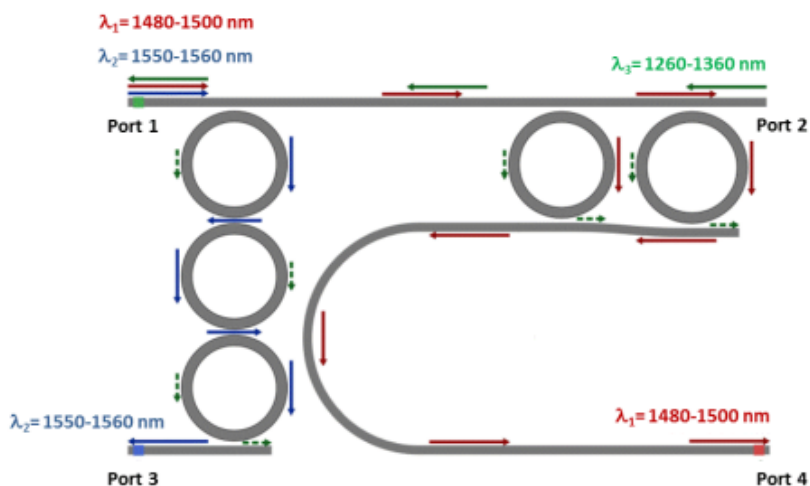
Kromě optických rozbočnic popsaných výše byly navrženy a realizovány i vlnově selektivní mnohavidové rozbočnice. Při realizaci těchto rozbočnic jsme vyšli z návrhu mnohavidových 1x2Y rozbočnic a tyto struktury jsou původní a ve výstupních vlnovodech jsou doplněny o plastové nebo tenkovrstvé filtry.

Dále jsme se zabývali návrhem optického triplexeru složeného z optických polymerních mikrozónátorů (OM). OM jsou velice moderní fotonické struktury, které je možno použít pro řadu fotonických aplikací, jako např. optické filtry, zpožďovací členy, optické přepínače, modulátory, optické senzory apod. Obecný princip optického triplexeru je uveden na obr.3.4a. Struktura pracuje se třemi vlnovými pásmy, a to 1490 ± 10 nm, 1555 ± 5 a 1310 ± 50 nm. Pásmo 1490 nm a 1555 nm zabezpečuje přenos dat k uživateli a pásmo 1310 nm slouží k přenosu dat od uživatele. Tyto vlnové délky jsou zvoleny z důvodu mezinárodního standardu TDM-PON G.983 a G.984 [19], [20].



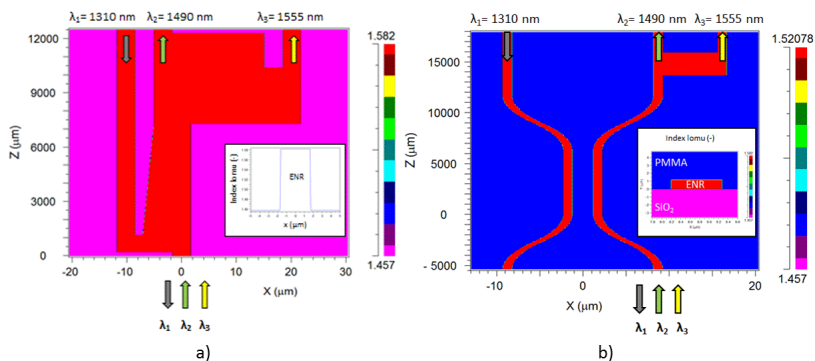
Obr. 3.4: a) Obecné schéma optického triplexeru, b) Schéma optického triplexeru složeného z mikrozónátorů.

Princip triplexeru s mikrorezonátory spočívá v tom, že mikrorezonátor I. vydělí pásmo 1555 nm, mikreorezonátor II vydělí pásmo 1490 nm. Současně je struktura navržena tak, aby se mikreorezonátory vzájemně neovlivňovaly a umožnily přes vstupně/výstupní vlnovod přenos pásma 1310 nm (viz obr. 3.4b). Návrh jsme prováděli pomocí programu FullWAVE™ od firmy RSoft a výsledkem návrhů optických mikrorezonátorů byla nová původní topologie optického triplexeru s vlnovodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR (viz obr. 3.5). Princip tohoto triplexeru spočívá tedy ve vydělení pásma 1555 nm pomocí trojitého sériově vázaného mikrorezonátoru do portu 3. Pásmo 1490 nm je vyděleno pomocí dvojitého paralelně vázaného mikrorezonátoru do portu 4. Struktura je současně navržena tak, aby pásmo 1310 nm z portu 2 prošlo na výstup struktury do portu 1, aniž by ovlivnilo ostatní pásma. Současně pásma 1490 nm a 1555 nm neovlivní pásmo 1310 nm v portu 2. Vlastnosti tohoto triplexeru byly publikovány v [21]-[23].



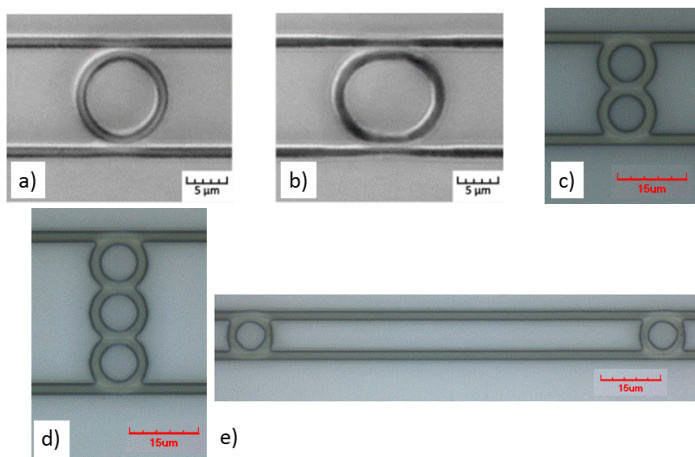
Obr. 3.5: Topologie optického triplexeru složeného z mikrorezonátorů.

Navrhovali jsme také optický triplexer skládající se ze struktur s mnohavidovou interferencí (Obr. 3.6a) a jednu strukturu s multividovou interferencí doplněnou a směrový vazební člen (Obr. 3.6b). Návrh topologie optického triplexeru se směrovým vazebním členem je opět původní a byl publikován v [21].



Obr. 3.6: Návrh optických polymerních triplexerů, a) struktura se dvěma multivodovými interferenčními členy, b) struktura s interferenčním členem a směrovým vazebním členem.

Kromě teoretických návrhů byly prováděny depoziční testy pro výrobu optických mikrozonačů a to jak pomocí optické, tak pomocí elektronové litografie. Fotografie vyrobených struktur jsou uvedeny na obr. 3.7. Na obr. 3.7a je fotografie jednoduchého optického mikrozonačů na obr. 3.7b je fotografie mikrozonačů tvaru racetrack, na obr. 3.7c je uvedena fotografie sériově vázaného dvojitého mikrozonačů. Na obr. 3.7d je uvedena fotografie sériově vázaného trojitého mikrozonačů a na obr. 3.7e je uveden dvojitý paralelně vázaný mikrozonač.

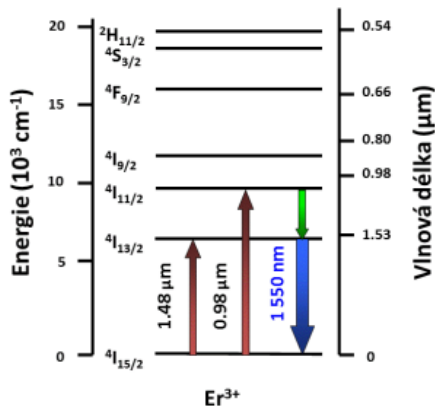


Obr. 3.7: Fotografie optických polymerních ENR mikrozonačů vyrobených pomocí elektronové litografie, a) jednoduchý kruhový mikrozonač, b) mikrozonač tvaru racetrack, c) sériově vázaný dvojitý mikrozonač, d) sériově vázaný trojitý mikrozonač, e) dvojitý paralelně vázaný mikrozonač.

4. Aktivní polymerní vrstvy

Výzkum optických materiálů s dotací aktivních iontů má na Katedře mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze více než 20letou tradici. Tento výzkum se dá rozdělit do dvou tematických okruhů. Za prvé se jedná o studium optických skel a polovodičů s dotací vzácných zemin. Především se jedná o dotací ionty erbia. Studovali jsme i další materiály, jako například vrstvy uhlíku a nitridu gallia (GaN) opět s dotací erbia, popřípadě erbia/ytterbia. Druhým tematickým okruhem je výzkum polymerních materiálů. Zde jsme studovali optické vlastnosti polymerních materiálů s dotací ionty erbia a ytterbia, popřípadě dotací dalších vzácných zemin jako jsou dysprosium, praseodym, thulium apod. Nejnověji jsme se zabývali polymerními materiály s dotací bismutu.

Vlastnosti optických materiálů dotovaných vzácnými zeminami jsou studovány již řadu let. Tyto materiály lze užít v optických telekomunikačních systémech pro vytvoření optických zesilovačů, generátorů optického záření, optických zdrojů, popřípadě při realizaci barevných zobrazovačů [24]-[26]. Nejčastěji studovanými ionty vzácných prvků jsou ionty erbia (Er^{3+}), protože optické materiály s dotací Er^{3+} iontů mohou být použity jako aktivní vlnovody, které mohou pracovat jako optický zesilovač, nebo zdroj pracující na vlnové délce 1530 nm [27], [28]. Energetické úrovně přechodů v atomu Er^{3+} pro tříhladinový systém jsou uvedeny na obr. 4.1 [26].



Obr. 4.1: Energetické úrovně přechodů v atomu Er^{3+} (významné přechody jsou zde vyznačeny šipkami. Přechod $4\text{I}_{15/2} - 4\text{I}_{11/2}$ platí pro optické čerpání pro vlnovou délku 980 nm, pás $4\text{I}_{13/2}$ pro čerpání 1480 nm s přechodem mezi úrovněmi $4\text{I}_{15/2} - 4\text{I}_{13/2}$ a následná emise na vlnové délce 1530 nm pomocí přechodu $4\text{I}_{13/2} - 4\text{I}_{15/2}$).

Optické zesilovače s dotací Er^{3+} , které pracují na vlnové délce 1530 nm a jsou buzeny optickými zdroji pracujícími na vlnových délkách 1470-1500 nm, nebo 980 nm. Ytterbium (Yb^{3+}) má silný absorpční pás na vlnové délce 980 nm. Tato vlastnost umožňuje ionty Yb^{3+} použít jako syntetizér pro optické materiály s dotací Er^{3+} při optickém buzení na vlnové délce 980 nm [21], [29], [30].

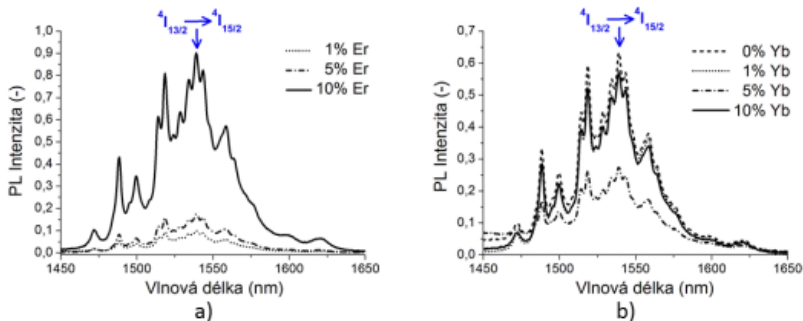
Při studiu optických materiálů s dotací aktivních iontů jsme také studovali uhlíkové vrstvy připravené pomocí technologií tenkých vrstev, kdy dotace erbiem byla prováděna během růstu uhlíkových vrstev [31]-[33]. Podařilo se připravit uhlíkové vrstvy s obsahem erbia, kde u vrstev připravených pomocí magnetronového naprašování byla změněna fotoluminiscence na vlnové délce 1530 nm. Dále jsme studovali vlastnosti vrstev GaN s dotací erbia a erbia/ytterbia připravených pomocí epitaxní technologie MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) na podložkách Al_2O_3 . Dotace pak byla provedena pomocí iontové implantace. Dále jsme pak dotované vrstvy GaN připravovali pomocí magnetronového naprašování na Si podložkách a na skleněných podložkách Corning, kdy dotace ionty vzácných zemin probíhala přímo při depozici. Podařilo se připravit vrstvy GaN, u kterých při optickém čerpání na vlnové délce 980 nm byla pozorována luminiscence na vlnové délce 1530 nm a bylo také pozorováno zvýšení intenzity luminiscence při kodotaci iontů Yb^{3+} [34]-[36].

Studovali jsme také vlastnosti polymerních materiálů s dotací vzácných zemin. Polymerní materiály jsou v poslední době intenzivně studovány řadou výzkumných skupin, protože mají vhodné optické vlastnosti a jednodušší postup výroby v porovnání s tradičními optickými materiály, jako jsou optická skla, krystaly, nebo polovodiče.

V laboratoři PLANIO jsme se zabývali studiem vlastností epoxidové pryskyřice ENR a polymeru PMMA s dotací iontů Er^{3+} , $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, popřípadě dalších vzácných zemin jako Dy^{3+} , Tm^{3+} , Eu^{3+} apod. Polymerní ENR vrstvy s dotací aktivních iontů byly vyrobeny metodou rotačního lití (spin-coating). Pro dotaci vzácných zemin byly použity chloridy a fluoridy vzácných zemin, které byly rozpuštěny v $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}$, nebo $\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$ rozpouštědlech. U těchto vrstev jsme měřili infračervená spektra, transmisní spektra a fotoluminiscenční spektra. Studovali jsme vliv množství dotace na intenzitu fotoluminiscenčního spekter.

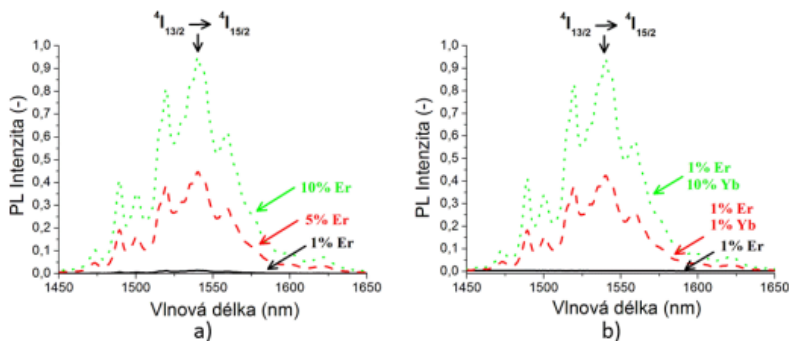
Příklad fotoluminiscenčních (PL) spekter polymeru ENR s dotací iontů Er^{3+} je uveden na obr. 4.4a a fotoluminiscenční spektra polymeru ENR s dotací 1,0 at.% Er^{3+} a kodotací Yb^{3+} iontů jsou

uvedena na obr. 4.4b ($\lambda_{\text{ex}} = 980 \text{ nm}$, $E_{\text{ex}} = 500 \text{ mW}$). U všech vzorků byla pozorována luminiscence na vlnové délce 1530 nm odpovídající přechodu Er^{3+} (${}^4\text{I}_{13/2} - {}^4\text{I}_{15/2}$). U vzorků, kde byla použita kodotace ionty Yb^{3+} , došlo ke zvýšení PL intenzity.



Obr. 4.4: Luminiscenční spektra polymeru ENR, a) s dotací Er^{3+} iontů, b) s dotací Er^{3+} iontů (1 at%) a Yb^{3+} iontů.

Fotoluminiscenční spektra vrstev PMMA s dotací iontů Er^{3+} jsou uvedena na obr. 4.5a a fotoluminiscenční spektra polymeru PMMA s dotací 1,0 at.% Er^{3+} a kodotací Yb^{3+} iontů jsou uvedena na obr. 4.5b ($\lambda_{\text{ex}} = 980 \text{ nm}$, $E_{\text{ex}} = 500 \text{ mW}$).



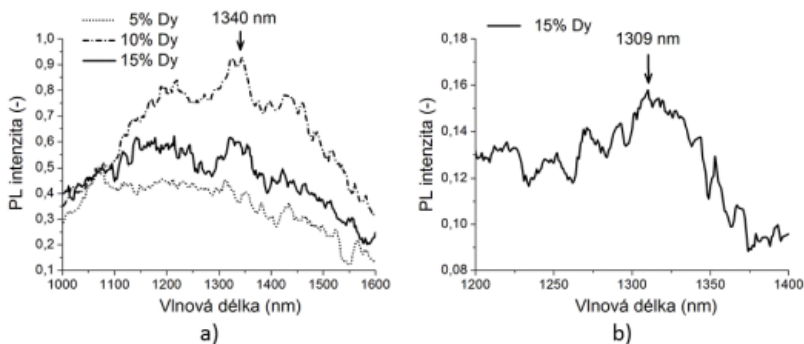
Obr. 4.5: Luminiscenční spektra polymeru PMMA, a) s dotací Er^{3+} iontů, b) s dotací Er^{3+} iontů (1 at%) a Yb^{3+} iontů.

Z obr. 4.5a vyplývá, že byla pozorována luminiscence, která odpovídá přechodu erbia ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ a s rostoucím množstvím dopantu roste intenzita luminiscenčních spekter. Z obr. 4.5b plyne, že přidáním ytterbia při optickém čerpání 980 nm dojde ke zvýšení

intenzity luminiscenčních spekter. Vlastnosti těchto vrstev byly detailněji popsány v [37]-[39].

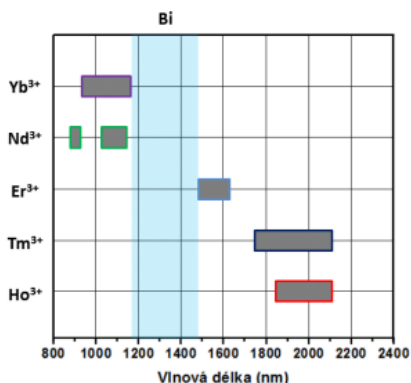
Kromě polymerních vrstev s dotací iontů Er^{3+} a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ byly studovány optické vlastnosti polymerních vrstev s dotací dalších vzácných zemin. Konkrétně jsme dotovali epoxidovou pryskyřici ENR ionty praseodymu (Pr^{3+}), thulia (Tm^{3+}), holmia (Ho^{3+}) a dysprosia (Dy^{3+}). Dotace polymeru ENR trojmocnými ionty Dy^{3+} a Pr^{3+} byly studovány pro emisi na vlnové délce 1300 nm a optické materiály s dotací Tm^{3+} jsou studovány pro emisi na vlnových délkách kolem 1470 nm. Materiály s dotací ionty Tm^{3+} vykazují také luminiscenci na vyšších vlnových délkách, a to od 1600 nm do 2100 nm. Ionty Ho^{3+} se pak používají jako kodopant k optickým materiálům s dotací Tm^{3+} .

U připravených vzorků byly měřeny transmisní spektra a byly pozorovány výrazné pásy, které odpovídají daným vzácným zeminám [40]. Na obr. 4.6 jsou uvedena luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací iontů Dy^{3+} v rozsahu vlnových délek 1000-1600 nm. Obr. 4.6a ukazuje fotoluminiscenci při optickém buzení 632,8 nm (He-Ne laser) při teplotě 4 K. Na tomto obrázku je vidět maximum intenzity luminiscence na vlnové délce 1340 nm, které odpovídá přechodu $\text{Dy}^{3+} \ ^5\text{H}_{9/2} - \ ^5\text{F}_{11/2} \rightarrow \ ^5\text{H}_{15/2}$. Tento přechod byl pozorován jen u vzorku s obsahem 10,0 at.% iontů dysprosia. Obr. 4.6b ukazuje luminiscenci při optickém buzení na vlnové délce 827 nm (teplota 4 K). Luminiscence na vlnové délce 1309 nm byla pozorována jen u vzorku s obsahem Dy^{3+} 15,0 at. %.



Obr. 4.6: Luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací Dy^{3+} iontů, a) $\lambda_{\text{ex}} = 632 \text{ nm}$, b) $\lambda_{\text{ex}} = 827 \text{ nm}$.

V současné době vysoce výkonné aktivní vlnovody, které jsou dotovány vzácnými zeminami, našly široké uplatnění v aktivních fotonických aplikacích. Jedná se o možnost využití těchto vlnovodů v optických komunikacích, v medicíně, v senzorových systémech a podobně. Tyto vlnovody, jak už vláknové, tak planární, generují optické záření na vlnových délkách v blízké infračervené oblasti. Spektrální oblast, kterou lze optickými materiály s dotací vzácných zemin pokrýt, je uvedena na obr. 4.7. Z obr. 4.7 vyplývá, že pomocí materiálů s vzácnými zeminami nelze pokrýt spektrální oblast přibližně od 1190 nm do 1490 nm. Výjimku tvoří optické zesilovače dotované ionty Pr^{3+} , ale účinnost těchto struktur je omezena.



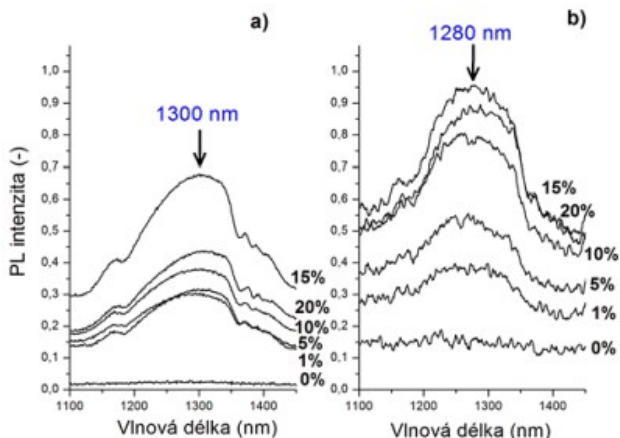
Obr. 4.7: Spektrální pokrytí optických materiálů s dotací vzácných zemin (Oblast modrého obdélníku označuje rozsah vlnových délek, která může být případně pokryta aktivními materiály s dotací bismutu).

V roce 2001 autoři Fujimoto a Nakatsuka publikovali vědecké práce, kde prokázali, že optické materiály s dotací bismutu mohou být použity k realizaci optických zdrojů a zesilovačů, které pokryjí blízké infračervené pásmo v rozsahu vlnových délek od 1190 nm [41]-[43]. Z obr. 4.7 tedy vyplývá, že optické materiály s dotací bismutu, které jsou dále kodotovány ionty vzácných zemin, např. ionty ytterbia [44], dysprosia [45], thulia [46] apod., umožní pokrýt vlnové délky v rozsahu od 1190 nm do 1650 nm.

Až doposud byly popsány vlastnosti optických skel a krystalů s dotací bismutu v našem případě jsme se zabývali studiem optických vlastností polymerních materiálů s dotací bismutu. Vlastnosti těchto vrstev nebyly doposud popsány.

U připravených polymerních vzorků s dotací bismutu byla změřena infračervená spektra. Důvodem tohoto měření bylo zjistit, zda dotace nezpůsobí zvýšení OH pásů, které by mohly snížit

intenzitu fotoluminiscence. Z měření vyplynulo, že mezi referenčním polymerním vzorkem (vzorek bez dotace) a vzorkem s vysokou mírou dotace bismutu (20,0 at.% Bi) je jen zanedbatelný rozdíl [47]. U polymeru s dotací bismutu byl také měřen vliv dotace na změnu hodnoty indexu lomu a změnu absorpčních spekter. Z měření indexu lomu vyplynulo, že zvýšením obsahu bismutu došlo ke zvýšení hodnot indexu lomu. Z měření absorpčních spekter vyplynulo, že s rostoucí úrovní dotace se absorpční hrana posouvá k vyšším vlnovým délkám. Dále byla měřena fotoluminiscenční spektra, a to za použití polovodičového laseru POL 4300 s excitační vlnovou délkou 980 nm (250 mW) a pomocí laseru pracujícím na vlnové délce 808 nm (250 mW). Luminescenční spektra polymeru ENR s různou výší dotace bismutu jsou uvedena na obr. 4.8. Na obr. 4.8a jsou luminescenční spektra pro čerpací vlnovou délku 980 nm a na obr. 4.8b jsou luminescenční spektra pro čerpací vlnovou délku 808 nm. Maximum intenzity na vlnové délce 1300 nm (obr. 4.8a) a 1280 nm (obr. 4.8b) odpovídá luminescenci iontů bismutu. Maximální intenzita byla pozorována u vzorku s obsahem 15,0 at.% iontů bismutu. U vzorku s maximální dotací (20,0 at.% Bi) došlo k poklesu intenzity. Pokles je pravděpodobně způsoben koncentračním zhášením [27], [48].

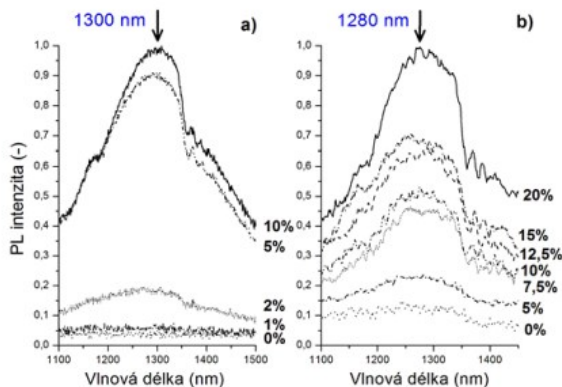


Obr. 4.8: Fotoluminiscenční spektra pro polymer ENR s dotací bismutu, a) $\lambda_{ex} = 980$ nm, b) $\lambda_{ex} = 808$ nm.

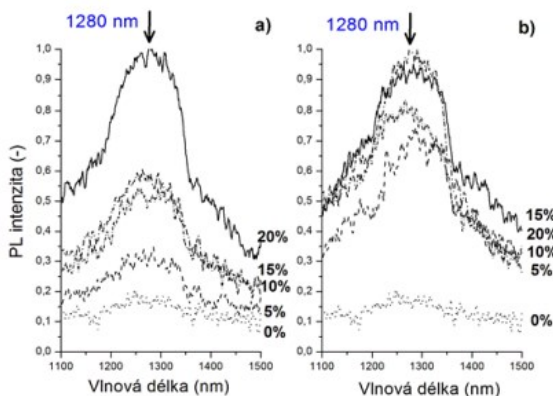
Dále jsme se zabývali měřením optických vlastností polymerních ENR vrstev s dotací bismutu (1,0 at.%) a kodotací dalších aktivních iontů a to ionty ceru (Ce^{3+}), dysprosia (Dy^{3+}) a yttria. Na obr. 4.9 jsou

uvedena luminiscentní spektra polymeru ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) a kodotací iontů Ce^{3+} . Z obr. 4.9 vyplývá, že se zvyšující se dotací ionty bismutu se zvyšuje intenzita luminescence.

Fotoluminiscentní spektra polymeru ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) a s kodotací ionty Dy^{3+} jsou uvedena na obr. 4.10a a s kodotací ionty yttria jsou uvedena na obr. 4.10b.



Obr. 4.9: Fotoluminiscentní spektra pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty Ce^{3+} , a) $\lambda_{ex}=980$ nm, b) $\lambda_{ex}=808$ nm.



Obr. 4.10: Fotoluminiscentní spektra ($\lambda_{ex}=808$ nm) pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty, a) Dy^{3+} , b) Y.

Z obr. 4.10a plyne, že intenzita se zvyšuje s rostoucí koncentrací kodopantu a maximální intenzita luminescence byla zjištěna u vzorku obsahujícího nejvyšší koncentraci (20,0 at.%) iontů Dy^{3+} . V případě kodotace ionty yttria byla maximální intenzita zjištěna při koncentraci

15,0 at.% (obr. 4.10b). Opět zde byl tedy pozorován jev koncentračního zhášení, kdy při koncentraci 20,0 at.% došlo ke snížení intenzity luminiscence. Další vlastnosti polymerů z epoxidové pryskyřice ENR dotovaných ionty bismutu byly popsány v [49], [50].

5. Závěr

Výzkum skupiny optoelektroniky na Katedře mikroelektroniky FEL na Fakultě elektrotechnické, Českého vysokého učení technického v Praze v oblasti integrované optiky a fotoniky má dlouhou tradici a je spjat především s panem Doc. Ing. J. Schröfelem CSc., který na Katedře mikroelektroniky působil po zániku pracoviště TESLA VÚST. Za působení pana Doc. Schröfela byl výzkum zaměřen především na fotonické struktury vytvořené iontovou výměnou do skleněných podložek. V současnosti na našem pracovišti probíhá výzkum fotoniky pod vedením pana Doc. Ing. V. Jeřábka, CSc. A výzkum je zaměřen na návrh a vývoj fotonických struktur z polymerních materiálů. Hlavní sledované vědecké cíle v oblasti výzkumu polymerní fotoniky jsou:

- Návrh nových optických polymerních planárních vlnodů,
- Návrh flexibilních optických planárních vlnodů,
- Návrh jednoduchých jednovidových a mnohavidových fotonických struktur (optické rozbočnice apod.),
- Návrh mnohavidových rozbočnic s velkým rozměrem vlnodné vrstvy (struktury umožňující připojení POF vláken),
- Návrh fotonických struktur využívajících principu mnohavidové interference (děliče optického výkonu, demultiplexory),
- Návrh optických polymerních mikrozónátorů,
- Návrh optických triplexerů,
- Realizace navržených struktur,
- Příprava a studium vlastností optických materiálů s dotací aktivních iontů.

Předložená práce by měla dokumentovat, že výzkum fotonických struktur na Katedře mikroelektroniky, FEL ČVUT v Praze má dlouholetou tradici a že předkladatel habilitační práce se alespoň malou měrou o tento rozvoj svojí vědeckou činností zasloužil.

6. Literatura

- [1] J. Schröfel, K., Novotný: Optické vlnovody, 1986, SNTL, Praha.
- [2] R.G. Hunsperger: Integrated Optics, Theory and Technology, 2002, Springer.
- [3] H. Kogelnik: An introduction to integrated Optics, IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, vol. 23. No. 1, p. 2-16, 1975.
- [4] B.L. Booth: Low loss channel waveguides in polymers, Journal of Lightwave Technology, vol. 7, p. 1445-1453, 1989.
- [5] H. Ma, A.K.Y. Jen, L.R. Dalton: Polymer-based optical waveguides: Materials, processing, and devices, Advanced Materials, vol. 14, p. 1339-1365, 2002.
- [6] W.H. Wong, K.K. Liu, K.S. Chan, E.Y.B. Pun: Polymer devices for Photonics applications, Journal of Crystal Growth, vol. 288, p. 100-104, 2006.
- [7] P.N. Prasad: Nanophotonics, Wiley-Interscience, 2004.
- [8] T. Klotzbuecher, T. Braune, D. Dadic, et al.: Fabrication of optical 1x2 POF splitters using the Laser-LIGA technique, in Proceedings Laser Micromachining for Optoelectronic Device Fabrication, vol. 4941, p. 121-132, 2003.
- [9] H.J. Park, K.S. Lim, H.S. Kang: Low-cost 1x2 plastic optical beam splitter using a V-type angle polymer waveguide for the automotive network, Optical Engineering, vol. 50, no. 7, p. 075002-075004, 2011.
- [10] K. Novotný: Optická komunikační technika, 1998, Skripta ČVUT.
- [11] J. Čtyroký, I. Hüttel, J. Schröfel, L. Šimková: Integrovaná optika, SNTL Praha 1986.
- [12] G.T. Reed: Silicon on Photonics, John Wiley&Sons Ltd 2008.
- [13] L. Pavesi, D.J. Lockwood: Silicon Photonics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- [14] G. Fischbeck, R. Moosburger, M. Topper, et al.: Design concept for singlemode polymer waveguides, Electronics Letters, vol. 32, no. 3, p. 212-213, 1996.
- [15] E. Mercatili: Slab-coupled waveguides, Bell System Technical Journal, vol. 53, no. 4, p. 645-647, 1974.
- [16] J. Schmidtchen, A. Splett, B. Schuppert, et al.: Low loss singlemode optical waveguides with large cross-section in silicon-on-insulator, Electronics Letters, vol. 27, no. 16, p. 1486 - 1488, 1991.

- [17] V. Prajzler, J. Klapuch, O. Lyutakov, et al.: Design, Fabrication and Properties of Rib Poly(methylmethacrylimide) Optical Waveguides, *Radioengineering*, vol. 20, no. 2, p. 479-485, 2011.
- [18] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, et al.: Simple way of fabrication of Epoxy Novolak Resin optical waveguides on silicon substrate, *Physica Status Solidi C*, vol. 8, no. 9, p. 2942-2945, 2011.
- [19] ITU-T G.983.3. A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation. Geneva: ITU-T, 03/2001 : <http://www.itu.int/rec/TREC-G.983.3/en>.
- [20] ITU-T G.984.3. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification. Geneva: ITU-T, 03/2008 : <http://www.itu.int/rec/TREC-G.984.3/en>.
- [21] V. Prajzler, E. Střílek, J. Špirková, V. Jeřábek: Design of the novel wavelength triplexer using multiple polymer microring resonators, *Radioengineering*, vol. 21, no. 1, p. 258-263, 2012.
- [22] E. Střílek: Návrh optického polymerního mikrozónátoru, Diplomová práce, ČVUT 2011.
- [23] V. Prajzler, I. Hüttel, O. Lyutakov, V. Jeřábek: Design of epoxy novolak resin optical waveguides for demultiplexers based on multimode interference and optical ring resonator, *Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy & Applications VI*, Publishing House for Science and Technology, Hanoi Vietnam, November 8-12. 2010, s. 49-54.
- [24] A.J. Kenyon: Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics, *Progress in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4-5, p. 225-284, 2002.
- [25] A.J. Steckl, J.M. Zavada: Photonics applications of rare-earth-doped materials, *MRS Bulletins*, vol. 24, no. 9, p. 16-20, 1999.
- [26] M.J.F. Digonnet: Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers, Marcel Dekker Inc 2001.
- [27] A. Polman: Erbium implanted thin film photonic materials, *Journal of Applied Physics*, vol. 82, no. 1, p. 1-39, 1997.
- [28] P.G. Kik, A. Polman: Erbium-doped optical waveguide amplifiers on silicon, *MRS Bulletin*, 1998, vol. 23, no. 4, p. 48-54, 1998.
- [29] C.E. Chryssou, F. Di Pasquale, C.W. Pitt: Improved gain performance in Yb³⁺-sensitized Er³⁺-doped Alumina (Al₂O₃) channel optical waveguide amplifiers, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 3, p. 345-349, 2001.

- [30] C. Strohhofer, A. Polman: Relationship between gain and Yb^{3+} concentration in Er^{3+} - Yb^{3+} doped waveguide amplifiers, *Journal of Applied Physics*, vol. 90, no. 9, p. 4314-4320, 2001.
- [31] V. Prajzler: The research of technology used for fabrication of active and passive waveguides on semiconductor base, PhD. Thesis ČVUT 2007.
- [32] V. Prajzler, I. Hüttel, P. Nekvindová, et al.: Erbium doping into thin carbon optical layers, *Thin Solid Films*, vol. 433, no. 1-2, p. 363-366, 2003.
- [33] V. Prajzler, I. Hüttel, J. Špírková, et al.: Properties of sputtered carbon layers containing erbium and ytterbium ions, *Electronic Devices and Systems EDS2006, IMAPS CS, International Conference 2006, Proceedings, September 14-15, 2006 Brno, Czech Republic*, p. 403-408, 2006.
- [34] V. Prajzler, I. Hüttel, E. Alves, et al.: Properties of Er^{3+} and Yb^{3+} doped gallium nitride layers, In *MIPRO 2006, 29th International Convention. Chorvatsko: Mipro HU, 2006*, p. 33-38.
- [35] V. Prajzler, I. Hüttel, J. Špírková, et al.: Rare earth doped gallium nitride layers for photonics applications, In *Photonics, Devices, and Systems III. Bellingham: SPIE, 2006*, p. 618018-618018F6.
- [36] V. Prajzler, I. Hüttel, J. Špírková, et al.: Photoluminescence study of ($\text{Er}^{3+} + \text{Yb}^{3+}$) doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering, In *Infrared Photoelectronics, Bellingham: SPIE, 2005*, vol. 5957, p. 232-240.
- [37] V. Prajzler, I. Hüttel, O. Lyutakov, et al.: Optical properties of PMMA polymer doped with Er^{3+} and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ions, *Journal of Physics: Conference Series*, no. 100, p. 1-4, 2008.
- [38] V. Prajzler, I. Hüttel, O. Lyutakov, et al.: Optical properties of PMMA doped with erbium(III) and ytterbium(III) complexes, *Polymer Engineering and Science*, vol. 49, no. 9, p. 1814-1817, 2009.
- [39] V. Prajzler, V. Jeřábek, O. Lyutakov, et al.: Optical properties of erbium and erbium/ytterbium doped polymethylmethacrylate, *Acta Polytechnica*, vol. 48, no. 5, p. 14-21, 2009.
- [40] V. Prajzler, O. Lyutakov: Optické vlastnosti epoxidové pryskyřice dotované ionty vzácných zemin, *Electroscope, Ročník 2013, Číslo II, str. 1-4*.
- [41] Y. Fujimoto, M. Nakatsuka: Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 40, p. L279-L281, 2001.

- [42] Y. Fujimoto, M. Nakatsuka: Optical amplification in bismuth-doped silica glass, *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 19, p. 3325-332, 2003.
- [43] Y.S. Seo, Y. Fujimoto, M. Nakatsuka: Simultaneous amplification at two wavelengths near 1300 nm in a 6.5-cm-long bismuth-doped silica glass, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 17-20, p. 1901-1903, 2006.
- [44] J. Ruan, E. Wu, H.P. Zeng, et al.: Enhanced broadband near-infrared luminescence and optical amplification in Yb-Bi codoped phosphate glasses, *Applied Physics Letters* vol. 92, 101121, 2008.
- [45] Y. Guang, C. Danping, R. Jing, et al.: Effects of melting temperature on the broadband infrared luminescence of bi-doped and Bi/Dy co-doped chalcogenide glasses, *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 90, no. 11, p. 3670-3672, 2007.
- [46] J. Ruan, G.P. Dong, X.F. Liu, et al.: Enhanced broadband near-infrared emission and energy transfer in Bi-Tm-codoped germanate glasses for broadband optical amplification, *Optics Letters*, vol. 34, no. 16, p. 2486-2488, 2009.
- [47] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, et al.: Properties of Epoxy Novolak Resin Layers Doped with Bismuth for Photoluminescence Near 1300 nm, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 117, no. 3, p. 1608-1612, 2010.
- [48] A.J. Kenyon: Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics, *Progress in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4-5, p. 225-284, 2002.
- [49] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, et al.: Bismuth(III) doped polymer layers for telecommunication applications, In *The 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, Washington: CLEO, 2009, vol. 1, p. 301-302.
- [50] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, et al.: Optical properties of Bi-doped epoxy novolak resin (ENR) containing Ce, Dy and Y ions, *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 125, no. 125, p. 710-715, 2012.

Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Narozen: 10. 4. 1976 Praha, Česká republika

Adresa: Nušlova 33, 158 00 Praha 13

E-mail: xprajzlv@feld.cvut.cz

Vzdělání

1991-1994 Střední odborné učiliště s maturitou, Brno, obor Přenosová a telekomunikační technika

1994-2001 Ing. (MSc) FEL, ČVUT v Praze, Studijní program Elektrotechnika a informatika, obor Elektronika

2007 Ph.D. FEL ČVUT v Praze, Studijní program Elektrotechnika a informatika, obor Elektronika

Zaměstnání

2004 - dosud: pracovník pro vědu a výzkum na Katedře mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické na Českém vysokém učení technickém v Praze v laboratoři Planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO). Zabývá se problematikou návrhu, realizací a měření fotonických struktur pro informatiku a optickou telekomunikační techniku.

Obory profesního zájmu

Návrh, realizace a diagnostika nových fotonických struktur a součástek. Výzkum vlastností nových polymerních materiálů pro pasivní i aktivní fotonické aplikace. Člen mezinárodní společnosti LEOS IEEE, člen české sekce anglické odborné elektrotechnické společnosti IET a člen České a Slovenské společnosti pro fotoniku.

Vědeckovýzkumná činnost

Řešitel postdoktorského grantu GAČR GP102/09/P104, člen řešitelského týmu pro granty GA102/06/0424, MPO-TIP FR-TI3/797, VZ 6840770014, SGS SGS10/280/OHK3/3T/13 a SGS11/156/OHK3/3T/13. Recenzent odborných časopisů Optical Materials, Journal of Non-Crystalline Solids, Polymer Engineering Science, Journal of Applied Polymer Science, Chinese Optics Letters.

V. Prajzler je autorem a spoluautorem více než 70 odborných a vědeckých publikací, z toho 41 publikací zapsaných v databázi WoS. Dále je autorem a spoluautorem 2 patentů, 5 užitečných vzorů a 7 funkčních vzorků.

Pedagogická činnost

Vede a spolupracuje na přednáškách a cvičeních v předmětech bakalářského a magisterského studia–(Optoelektronika a fotonika, Návrh fotonických obvodů). Od roku 2013 je členem komise pro obhajoby bakalářských, diplomových a doktorských prací na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT.

V současné době je školitelem specialistou pro 2 doktorandy.–Vedl 11 bakalářských a diplomových prací, které byly úspěšně obhájeny. Dvě diplomové práce obdržely cenu děkana za vynikající diplomovou práci. Deset nejvýznamnějších publikací za posledních 5 let jsou:

- [1] V. Prajzler, R. Maštera, V. Jeřábek: Large core planar 1 x 2 optical power splitter with acrylate and epoxy resin waveguides on polydimethylsiloxane substrate, *Radioengineering*, Vol. 23, No. 1, 2014, ISSN 1210-2512, pp. 488-495.
- [2] V. Prajzler, M. Varga, P. Nekvindová, Z. Remeš, A. Kromka: Design and investigation of properties of nanocrystalline diamond optical planar waveguides, *Optics Express*, Vol. 21, No. 7, pp. 8409-8416, 2013.
- [3] V. Prajzler, M. Neruda, J. Špirková: Planar large core polymer optical 1x2 and 1x4 splitters connectable to plastic optical fiber, *Radioengineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 751-757, 2013.
- [4] O. Lyutakov, J. Tůma, I. Hüttel, V. Prajzler, J. Siegel, V. Švorčík: Polymer surface patterning by laser scanning, *Applied Physics B-lasers and Optics*, Vol. 110, No. 4, pp. 539-549, 2013.
- [5] V. Prajzler, H. Tůma, J. Špirková, V. Jeřábek: Design and modeling of symmetric three branch polymer planar optical power dividers, *Radioengineering*, Vol. 22, No. 1, Part II, 2013, ISSN 1210-2512, pp. 233-239.
- [6] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Špirková, J. Oswald, V. Machovič, V. Jeřábek: Optical properties of Bi-doped epoxy novolak resin (ENR) containing Ce, Dy and Y ions. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 125, pp. 710–715, 2012.
- [7] V. Prajzler, E. Stříleek, J. Špirková, V. Jeřábek: Design of the novel wavelength triplexer using multiple polymer microring resonators, *Radioengineering*, Vol. 21, No. 1, Part II, ISSN 1210-2512, pp. 258-263, 2012.
- [8] V. Prajzler, P.N. Kien, J. Špirková: Design, Fabrication and properties of the multimode polymer planar 1 x 2 Y optical splitter, *Radioengineering*, Vol. 21, No. 4, ISSN 1210-2512, pp. 1202-1207, 2012.
- [9] V. Prajzler, J. Klapuch, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Špirková, P. Nekvindová, V. Jeřábek: Design, fabrication and properties of rib poly(methylmethacrylimide) optical waveguides, *Radioengineering*, Vol. 20, No. 2, ISSN 1210-2512, pp. 479-485, 2011.
- [10] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Špirková, J. Oswald, V. Machovič, V. Jeřábek: Properties of epoxy novolak resin layers doped with bismuth for photoluminescence near 1300 nm, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 117, No. 3 pp. 1608-1612, 2010.