

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

## HABILITAČNÍ PRÁCE

Praha 2013

Václav Prajzler

ČESKÉ VYSOKÉ ÚČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



HABILITAČNÍ PRÁCE

**Optické planární pasivní a aktivní  
fotonické struktury**

Praha 2013

Václav Prajzler

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem kolegům z Katedry mikroelektroniky, a to především vedoucímu skupiny optoelektroniky panu Vítězslavu Jeřábkovi za vytvoření příjemné pracovní atmosféry, dále pak zvláštní poděkování patří panu Doc. Zdeňku Burianovu za cenné rady a připomínky při řešení technických problémů. Dále bych pak chtěl poděkovat za pomoc při experimentech kolegům z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, a to jmenovitě I. Hüttelovi, J. Špirkové, P. Nekvindové a O. Lyutakovovi. Dále bych chtěl poděkovat kolegům z Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i., a to panu M. Vargovi, A. Kromkovi a J. Oswaldovi. Poděkování také patří kolegům z Masarykovy univerzity v Brně z laboratoře polovodičů P. Mikulíkovi a M. Kučerovi.

Také bych chtěl poděkovat technickému personálu za výrobu a úpravu přípravků, bez kterých by nebylo možné provést řadu experimentů, a to jmenovitě panu P. Bakovi z Katedry elektrotechnologie a panu M. Horníkovi z Katedry mikroelektroniky z ČVUT v Praze a panu J. Denkovi z Ústavu anorganické chemie z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze.

Na závěr bych chtěl poděkovat manželce za vytvoření rodinné pohody a také dětem za trpělivost, že jsem jim nevěnoval tolik času, kolik by si zasloužili.

# ANOTACE

Práce popisuje dosažené výsledky výzkumu probíhající na Katedře mikroelektroniky na Fakultě elektrotechnické, Českého vysokého učení technického v Praze, v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO), na které se autor této habilitační práce přímo podílel. Práce popisuje výzkum pasivních a aktivních materiálů a struktur pro fotonické aplikace. V práci je popsána řada původních postupů přípravy tenkých vrstev, návrh a realizace fotonických struktur.

První část této práce je věnována materiálům a technologiím používaným pro fotonické aplikace. Jsou zde popsány technologie pro výrobu uhlíkových vrstev a vrstev nitridu gallia. Pozornost je zde také věnována novým perspektivním polymerním materiálům a jsou zde zmíněny technologické procesy, které byly ve spolupráci s kooperujícími laboratořemi používány k výrobě navržených struktur. Detailněji jsou zde popsány litografické procesy pro výrobu jednovidových optických polymerních vlnovodů a je zde také uveden postup pro výrobu mnohavidových optických rozbočnic s velkým rozměrem vlnovodné vrstvy, které umožňují připojení optického signálu pomocí standardních optických vláken POF (Plastic Optical Fiber).

Další část je věnována návrhu pasivních polymerních fotonických struktur. Nejdříve jsou zmíněny návrhy polymerních planárních optických vlnovodů. Pro návrhy byly vybrány nové typy polymerních materiálů, jako epoxidová pryskyřice ENR (Epoxy Novolak Resin) a dále organicko-anorganický hybridní polymer Ormocore a akrylátový polymer WIR. Pro multividové vlnovody byly pak použity různé druhy fotopolymerů Norland Optical Adhesive.

Návrh struktur probíhal hlavně pomocí programu BeamPROP<sup>TM</sup> od firmy RSoft Design Group, Inc. a byl zaměřen, z důvodu snadnější integrace, na návrh optických vlnovodů a vlnovodných struktur pro realizaci na podložce z křemíku. Je zde uveden popis návrhu standardních optických rozbočnic se sudým počtem výstupních vlnovodů (1x2 a 1x4). Autor se také zabýval návrhem symetrické rozbočnice se třemi výstupními vlnovody. Následují popisy návrhů složitějších struktur, které využívají principu mnohavidové interference. Jedná se o návrhy děličů optického výkonu a optických demultiplexorů. Následuje popis návrhu optických filtrů složených z polymerních mikrorezonátorů. Tento návrh byl prováděn pomocí programu FullWAVE<sup>TM</sup> také od firmy RSoft Design Group, Inc. Na závěr této části jsou uvedeny návrhy optických triplexerů, a to jak v hybridním provedení, kde je využito pro rozdělení optického signálu holografické mřížky, tak i návrhu optických triplexerů planárních, které využívají principu mnohavidové interfe-

rence, popřípadě kombinace struktury s mnohavidovou interferencí a optického směrového vazebního členu.

V poslední části této práce jsou studovány vlastnosti dotovaných optických materiálů, které by mohly být v budoucnu využity pro aktivní fotonické struktury. Byly studovány uhlíkové vrstvy s dotací erbia a vrstvy nitridu gallia s obsahem erbia a ytterbia. Zde byly studovány fotoluminiscenční spektra na vlnové délce 1530 nm. Kromě těchto dvou materiálů byly provedeny dotace několika druhů polymerních materiálů vybranými vzácnými zeminami (erbium, ytterbium, dysprosium, holmium, thulium). Dále byly studovány také fotoluminiscenční vlastnosti polymerních vrstev s dotací bismutu. Studium optických materiálů s dotací bismutu je v současnosti v popředí zájmu mnoha vědeckých týmů. Tyto materiály umožňují fotoluminiscenci v širokém spektru vlnových délek a v případě další kodotace aktivních iontů například ionty erbia, lze pokrýt celou šířku telekomunikačního pásma druhého i třetího telekomunikačního pásma.

Na závěr je uvedeno zhodnocení dosažených výsledků a je zde nastíněno, jakým směrem se bude vědecká činnost v laboratoři PLANIO dále ubírat.

## ANNOTATION

This habilitation thesis deals with the results of the research that has been taking place at the Department of Microelectronics, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague in the laboratory of Planar opto-electrical and optical integrated structures (PLANIO) to which the author of this habilitation thesis has been directly involved. In the thesis the research of passive and active materials and structures for photonic applications is described and as well as introduces several original procedures of deposition of thin films, designs and implementation of photonic structures.

First part of the thesis concerns materials and technologies. There are described the technologies for fabrication of carbon and gallium nitride layers and attention is paid also to promising new polymeric materials. Technological processes used for fabrication of the proposed structures in collaboration with cooperating laboratories are here mentioned as well. In particular, description of lithographic processes for the production of single-mode optical polymer waveguides, and procedure for the fabrication of multimode optical splitters with large core size waveguide layer that allow for connection of optical signal using standard plastic optical fiber (POF) form substantial part of this section.

Next part describes how the design of passive polymer photonic structures was done starting with proposals of polymer planar optical waveguides. For that new types of polymeric materials, such as epoxy ENR (Epoxy Novolac Resin) and organic-inorganic hybrid polymer Ormocore and the acrylate polymer WIR, were selected. For multimode waveguides were then used different types of photopolymers Norland Optical Adhesive. To design the waveguides and waveguiding structures, and make them easy to integrate with silicon substrate, mainly BeamPROP<sup>TM</sup> supported by RSoft Design Group, Inc. was used. The thesis gives description of the draft standard optical splitter with an even number of output waveguides (1x2 and 1x4).

Next part of the thesis deals with symmetrical splitter with three output waveguides. Then follows detailed descriptions of the design of complex structures, such as optical power splitters and optical demultiplexers, based on principle of multimode interference. Description of the design of optical filters consisting of polymer optical microresonators is another part of this section. These designs were carried out using FullWAVE<sup>TM</sup> supported by RSoft Design Group, Inc. Finally, this section gives the designs of optical triplexer, either in a hybrid design (which is used to split the optical signal holographic grating) either a schema of planar optical triplexer, which utilizes the principle of multimode interference, eventually combination structure of multimode interference and

optical directional coupler member.

Last part of the theses deals with is studying of the properties of optical materials, which are promising for future application in active photonic structures with photoluminescence spectra at 1530 nm taken as the figure of merit. The main attention was paid to carbon layers containing with erbium ions and gallium nitride layer containing erbium and ytterbium ions, but also several types of polymeric materials doped with selected rare earth elements (erbium, ytterbium, dysprosium, holmium, thulium and etc.) were measured. Investigation of properties of optical materials doped with bismuth ions has been currently interest at the forefront of many research groups as they offer the photoluminescence in a wide range of wavelengths in the case of other co-dotation with other active ions such as erbium covering thus a wide range of telecommunication second and third telecommunications bandwidth. In this thesis study photoluminescence properties of polymer layers doped with bismuth ions is also involved.

The thesis is concluded with the evaluation of the reached results and proposition in what direction the research activities in the laboratory PLANIO would go further.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Cíle práce</b>	<b>5</b>
<b>3 Materiály a technologie pro fotonické struktury</b>	<b>7</b>
3.1 Materiály pro fotoniku . . . . .	7
3.2 Technologie používané pro výrobu fotonických struktur . . . . .	11
<b>4 Pasivní fotonické struktury</b>	<b>21</b>
4.1 Planární optické vlnovody . . . . .	21
4.2 Děliče optického výkonu . . . . .	35
4.3 Struktury s multividovou interferencí . . . . .	46
4.4 Optické mikrorezonátory . . . . .	52
4.5 Optické triplexery . . . . .	63
<b>5 Aktivní fotonické struktury</b>	<b>75</b>
5.1 Optické materiály s dotací vzácných zemin . . . . .	76
5.2 Optické materiály s dotací bismutu . . . . .	93
<b>6 Závěry, možnosti využití výsledků a další směr výzkumu</b>	<b>100</b>
<b>Literatura</b>	<b>103</b>
<b>Příloha</b>	<b>118</b>
<b>A Práce autora s bezprostředním vztahem k řešené problematice</b>	<b>I</b>
A.1 Patenty, užitné vzory, funkční vzory . . . . .	II
A.2 Publikace . . . . .	IV
<b>B Bakalářské a diplomové práce, které vznikly pod vedením autora</b>	<b>XVII</b>

**Seznam obrázků**

**XVII**

**Seznam tabulek**

**XXVII**

# Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Popis
AWG	Arrayed Waveguide Grating
ENR	Epoxy Novolak Resin
ERDA	Elastic Recoil Detection Analysis
FSR	Free Spectral Range
FTTH	Fiber to the Home
FWHM	Full Width at Half Maximum
MMI	Multi-mode Interference
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
MOPECVD	Metal-Organic Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition
NCD	Nanocrystalline Diamond
NOA	Norland Optical Adhesive
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
PLANIO	Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur
PMMI	Poly(methylmethacrylimide)
PMMA	Polymethyl-methakrylát
POF	Plastic Optical Fiber
PON	Passive Optical Network
RE	Rare Earth
RBS	Rutherford Backscattering Spectrometry
VHGT	Volume Holographic Grating Triplexer
WDM	Wavelength Division Multiplex
XRD	X-Ray Diffraction Analysis

# Kapitola 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 obořem 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. Přestože se tento pojem používá již několik desítek let, přesná a jednotná definice neexistuje. Jedna z mnoha různých definic fotoniku považuje za aplikovanou kvantovou elektrodynamiku. Kvantová elektrodynamika je teorie, která vznikla ve snaze spojit kvantovou mechaniku s klasickou Maxwellovou teorií elektřiny a magnetismu koncem dvacátých let minulého století. V podstatě popisuje interakci světla a hmoty.

Například na konferenci Photonics Overview v USA v roce 1988 zazněla definice pro výraz fotonika takto: „Tak jako je elektronika věda a technika zabývající se přenosem energie a informace prostřednictvím elektronů, fotonika je věda a technika zabývající se přenosem energie a informace prostřednictvím fotonů (světla). Hlavními zdroji fotonické energie jsou lasery a diody emitující světlo. Velmi rychlý rozvoj aplikací fotoniky se objevuje v telekomunikacích, výrobě, počítacích, zpracování obrazu, strojovém vidění, vojenské technice a v mnoha dalších průmyslových odvětvích.“<sup>1</sup>

Vědecký a technický obor fotonika má velice blízko k termínu integrovaná optika. Výraz integrovaná optika se poprvé objevil v roce 1969, kdy bylo v časopise Bellových laboratoří v USA publikováno několik článků poukazujících na možnost vytvořit určitou optickou analogii integrovaných elektronických obvodů [1]. První z těchto publikovaných článků napsal pan S.E. Miller s názvem „Integrated Optics: and Introduction“ [2]. Inte-

---

<sup>1</sup>převzato z: [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)

grovaná optika se tedy zabývá technologií integrace velkého počtu různých optických a elektrooptických prvků pro generování, fokusování, rozdělování, slučování, izolaci, polarizování, vazbu, přepínání, spínání, modulaci a detekci světla na jedné podložce. První mezinárodní kongres o integrované optice se konal pod názvem A Topical Meeting on Integrated and Guide Wave Optics v roce 1972 ve Spojených státech amerických v Salt Lake City. V České republice se první fotonický kongres konal v roce 1992 v Olomouci pod názvem Photonics'92 a pořádala jej Česká a Slovenská společnost pro fotoniku.<sup>2</sup>

Nejjednodušší a základní fotonickou strukturou je planární optický vlnovod. Optické planární vlnovody jsou realizovány nanesením vlnovodné vrstvy na planární podložku (substrát) nebo přímo difuzí do podložky [3], [4]. Pro realizaci vlastní fotonické struktury je základem pak kanálkový optický vlnovod, kde je vlnovodná struktura prostorově omezena. Pro přípravu planárních vlnovodů se běžně používají optická skla, krystaly a polovodiče [5]. Použité materiály pro optické kanálkové vlnovody jsou stále rozširovány a neustále jsou vyvíjeny nové materiály, a to jak na vědeckých pracovištích, tak v komerčních firmách. V současnosti jsou intenzivně zkoumány a vyvíjeny nové polymerní materiály, které mají velice perspektivní vlastnosti a jednoduchou technologii výroby [6], [7], [8]. Myšlenka použít pro fotonické aplikace polymery není nová a dokonce byly některé druhy polymerní materiálů testovány hned na počátku rozvoje integrované optiky. Díky významnému vědeckému pokroku byly vyvinuty nové druhy polymerních materiálů, které nabízí nové technologické možnosti, které v minulosti nebyly myslitelné, a několik renomovaných firem nabízí komerčně řadu unikátních polymerních materiálů pro fotonické aplikace.

Technologie výroby fotonických struktur přímo souvisí s použitými materiály [1]. 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 [9], [10]. Drobná technická komplikace spočívá v tom, že křemík má vysokou hodnotu indexu lomu a v případě optických vlnovodů musí platit, že index lomu podložky musí být menší, než je hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy. Tato drobná nepříjemnost je vyřešena nanesením přechodové vrstvy s hodnotou indexu lomu nižší, než je hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy. Nejčastěji je tento problém řešen oxidací křemíku, kdy dojde k vytvoření vrstvy  $\text{SiO}_2$ , která má vhod-

---

<sup>2</sup>[www.photon-czsk.org](http://www.photon-czsk.org)

nou hodnotu indexu lomu. Vytvoření vrstvy  $\text{SiO}_2$  na Si podložce je běžný technologický krok používaný v Si technologii a nepředstavuje technologický problém. V řadě případů, z důvodu fyzikálních omezení křemíku, ale musí být fotonická struktura realizována na podložce z optického skla, nebo optického krystalu [11]. Samostatnou kapitolou jsou potom fotonické struktury realizované v hybridním provedení [12], [13], [14]. Tyto struktury umožňují optimalizovat vlastnosti každé optické, optoelektronické součástky samostatně před vlastním zapojením do fotonického integrovaného obvodu.

V počátcích rozvoje integrované optiky a fotoniky byl vývoj struktur zaměřen na návrh a realizaci struktur v jednovidovém režimu, které mají rozměry řádově několik mikrometrů. V současnosti je věnována velká pozornost vývoji nových fotonických struktur, které mají rozměry řádově v nanometrech. Dá se říci, že vzniká nový vědní obor označený jako nanofotonika [15]. Přestože nejnovější vývoj je především zaměřen právě na nanoftotoniku, tak 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 na palubách letadel, lodí, v automobilech apod. [16], [17].

Cílem této práce je tedy shrnout vědeckou činnost, která probíhala v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky na Fakultě elektrotechnické na ČVUT v Praze a na kooperujících pracovištích, se kterými laboratoř PLANIO dlouhodobě spolupracuje, na které se autor této práce přímo podílel. V práci jsou na začátku nejdříve uvedeny materiály a technologie, které jsou používány pro výrobu fotonických struktur. Dále je zde popsán návrh pasivních především polymerních struktur, které probíhalo pomocí specializovaných programů, kterými je laboratoř PLANIO vybavena. Byly navrhovány děliče optického výkonu a to jak jednovidové, tak i mnohavidové. Návrh těchto struktur probíhal pomocí metody šíření optického svazku za pomocí programu BeamPROP<sup>TM</sup> od firmy RSoft Design Group Inc. Vybrané mnohavidové rozbočnice byly modelovány a optimalizovány pomocí metody Ray tracing pomocí programu Opticad. Dále je popsán návrh struktur s mnohavidovou interferencí, zde se jedná o návrh nejen optických děličů výkonu, ale také o návrh optických demultiplexorů. V předkládané práci jsou shrnutý i návrhy optických polymerních mikrorezonátorů, které byly prováděny pomocí programu FullWAVE<sup>TM</sup>. Dále jsou zde uvedeny návrhy optických triplexerů, kde jsou pro přenos optických signálů využívány tři vlnová pásma. Celkem byly navrženy 3 druhy optických triplexerů. První návrh je pro hybridní realizaci, kde pro rozdelení optického signálu je použita speciální optická holografická mřížka. Další dva návrhy představují planární řešení za použití polymerních kanálkových vlnovodů, kdy rozdelení optického signálu je provedeno pomocí dvou struktur s mnohavi-

dovou interferencí nebo pomocí jedné struktury s monohavidovou interferencí doplněnou o směrový vazební člen.

Na závěr jsou popsány vlastnosti optických materiálů s dotací aktivních iontů. Práce je nejvíce zaměřena na přípravou tenkých vrstev s dotací vzácných zemin. Zvláště byla věnována pozornost iontům erbia, kde byla snaha připravit vrstvy s luminiscencí na vlnové délce 1530 nm. Dále byly prováděny dotace polymerních vrstev ionty bismutu, zde byla studována luminiscence na vlnové délce 1300 nm.

# Kapitola 2

## Cíle práce

Výzkum integrované fotoniky<sup>1</sup> má v České republice dlouhou historii. Výzkum byl prováděn především v ústavu TESLA VÚST<sup>2</sup> a po zániku toho ústavu pokračoval a dodnes pokračuje především na Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR v.v.i.<sup>3</sup>. Výzkum integrované fotoniky má také dlouhou tradici na našem pracovišti a je spjat především s panem Doc. Ing. J. Schröfelem CSc., který na Katedře mikroelektroniky ČVUT v Praze působil po zániku pracoviště TESLA VÚST. Další důležitou osobností, která se danou problematikou dlouhodobě zabývá, je pan Doc. Ing. Z. Burian CSc., který přednášel a přednáší předměty spjaté s touto problematikou, a to jmenovitě Optoelektronika, Optoelektronika a fotonika, Optické zdroje a detektory a další. V současnosti na našem pracovišti probíhá výzkum fotoniky pod vedením pana Ing. V. Jeřábka, CSc.

Z první kapitoly vyplývá, že vědní obor, který zahrnuje optiku, integrovanou optoelektroniku a fotoniku, je velice široký a není v lidských silách provádět výzkum v celé této šíři a je tedy nutné se zaměřit jen na určitou její malou část. V začátcích byl výzkum fotoniky na Katedře mikroelektroniky zaměřen na výzkum optických skel a krystalů. Později byla oblast výzkumu rozšířena o studium dalších materiálů. Jednalo se především o studium vrstev na bázi uhlíku a dalších jejich sloučení. Dále jsme intenzivně studovali možnosti výroby vrstev GaN a dotaci výše zmíněných materiálů aktivními ionty. V současnosti je výzkum naší skupiny zaměřen především na testování nových komerčně dostupných polymerních materiálů, návrh a realizace jednodušších fotonických struktur.

Předložená habilitační práce si klade za cíl seznámit s návrhy struktur a depozičními

---

<sup>1</sup>Dříve se používalo označení integrovaná optika. Toto označení je dnes nahrazováno moderním termínem integrovaná fotonika.

<sup>2</sup>více na: <http://vust.webnode.cz>

<sup>3</sup>více na: [www.ufe.cz](http://www.ufe.cz)

testy, které byly prová-děny na základě získaných zkušeností. Návrhy struktur byly prováděny v laboratoři PLANIO pomocí specializovaných programů, které jsou v laboratoři k dispozici. Část výroby navržených struktur probíhalo v nově budované laboratoři Nanolithografie na Katedře mikroelektroniky, ale většina testů byla prováděna na pracovištích, se kterými dlouhodobě spolupracujeme. Jmenovitě se jedná o technologické laboratoře na Ústavu inženýrství pevných látek a na Ústavu anorganické chemie na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze, dále pak o Laboratoř elektronové litografie na Fyzikálním ústavu Akademie věd České republiky a Laboratoř polovodičů na Ústavu fyziky kondenzovaných látek Přírodovědecké fakulty na Masarykově univerzitě v Brně.

**Předložená práce sledovala tyto hlavní cíle:**

- Návrh nových optických polymerních planárních vlnovodů,
- Návrh jednoduchých jednovidových a mnohavidových fotonických struktur (optické rozbočnice apod.),
- Návrh mnohavidových rozbočnic s velkým rozměrem vlnovodné vrstvy (struktury umožňující připojení POF vláken),
- Návrh fotonických struktur využívajících principu mnohavidové interference (děliče optického výkonu, demultiplexory),
- Návrh optických polymerních mikrezonátorů,
- Návrh optických triplexerů,
- Výroba navržených struktur z nových polymerních materiálů (depoziční testy),
- Příprava a studium vlastností optických materiálů s dotací aktivních iontů (vzácné zeminy Er, Yb, bismut a pod.).

Předložená práce obsahuje popis nejpodstatnějších částí prováděného výzkumu, která byla a je v laboratoři PLANIO prováděna. Z hlediska rozsáhlosti prováděných návrhů, experimentů, depozičních testů a velkého množství realizace fotonických struktur nemohla tato práce do detailu a vyčerpávajícím způsobem vše postihnout, a proto v případě hlubšího zájmu o naši výzkumnou činnost doporučuji prostudovat bakalářské, diplomové práce a vědecké publikace, které v této laboratoři vznikly.

# Kapitola 3

## Materiály a technologie pro fotonické struktury

V této kapitole se pokusím shrnout nejdůležitější materiály a technologie, které jsou používány pro výrobu fotonických struktur a které jsou dále použity pro výrobu navržených struktur v laboratoři PLANIO. V kapitole 3.1 jsou uvedeny již tradiční materiály, jako polovodiče, optická skla a krystaly, které se běžně používají pro realizaci fotonických struktur. Dále jsou zde uvedeny nové polymerní materiály, které jsou v současnosti intenzivně studovány jako alternativní nový perspektivní materiál, ze kterého mohou být fotonické struktury vyrobeny. V kapitole 3.2 jsou potom v krátkosti popsány výrobní postupy, které jsou používány pro výrobu fotonických struktur.

### 3.1 Materiály pro fotoniku

Základním stavebním kamenem pro fotonické aplikace jsou optické planární vlnovody, ze kterých jsou potom realizovány vlnovody kanálkové. Kanálkové vlnovody jsou použity k realizaci fotonických struktur - jak pasivních (optické slučovače, rozbočovače, multiplexory/demultiplexory, přepínače apod.), tak aktivních (optické zdroje, zesilovače, konvertory vlnového záření apod.).

Množství materiálů, které jsou používány pro výrobu optických vlnovodů, se stále rozšiřuje. Výběr vhodného materiálu pro výrobu optických planárních vlnovodů, ze kterých jsou realizovány fotonické struktury, závisí na mnoha faktorech.

Nejdůležitější požadavky na optické materiály jsou [1], [3], [4], [9], [18]:

- Nízké optické ztráty v oblasti požadovaných vlnových délek,
- Vhodná hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy a okolního prostředí,
- Vysoká optická kvalita použitých materiálů (homogenita, nízký počet poruch apod.),
- Dobré mechanické vlastnosti,
- Jednoduchá technologie výroby a slučitelnost s mikroelektronickými technologiemi (např. kompatibilita s Si technologií),
- Další speciální vlastnosti (elektrooptické, magnetooptické apod.),
- Nízká cena.

Fotonické struktury jsou nejčastěji vyráběny z polovodičových materiálů, speciálních optických skel a optických krystalů. Příklady nejčastěji používaných optických materiálů jsou uvedeny v Tab. 3.1 [19], [20].

Tabulka 3.1: Přehled nejzajímavějších optických materiálů používaných pro fotonické aplikace [19], [20].

materiál	index lomu (-)	optický útlum (dB/cm)
Křemík (Si)	3,5	0,1
Křemen ( $\text{SiO}_2$ )	1,46	0,1
Silicon Oxynitrid ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ )	$\text{Si}_3\text{N}_4 : 2,0$	0,1
Indium Fosfid (InP)	3,1	3,0
Arsenid gallitý (GaAs)	3,4	0,5
Nitrid gallitý (GaN)	2,32	1,3
Oxid zinečnatý (ZnO)	1,99	0,7-2,1
Niobičnan Lithný ( $\text{LiNbO}_3$ )	2,2	0,01
Corning 7059	1,52-1,53	2-4
Sol-Gel	1,2-1,5	0,1
Polymery	1,3-1,7	0,1

Kromě výše uvedených materiálů jsou intenzivně studovány a hledány nové materiály s novými perspektivními vlastnostmi a s jednoduší technologií výroby. Takovýmito materiály mohou být nové druhy polymerů, které se ukazují být velice perspektivní pro realizaci fotonických struktur. Tyto polymery se vyznačují vysokou transparentností ve viditelné a blízké infračerveném spektru, mají dobré kontrolovatelnou hodnotou indexu lomu, dostatečnou časovou a teplotní stabilitu, nízké optické ztráty na provozních vlnových délkách. Fotonické struktury z polymerních materiálů lze také vyrobit s nižšími náklady a s menší zátěží životního prostředí.

V současné době mnoho výzkumných skupin a komerčních firem vyvíjí nové druhy polymerů, které mají zajímavé vlastnosti pro fotonické aplikace, například akrylátové polymery (AlliedSignal), benzocyclobutene (Dow Chemical), chlor-fluorované polyimidy (Samsung), deuterovaná polysiloxan (NTT), epoxidové pryskyřice (Micro Resist Technology), fluorderiváty polyimidu (Amoco), halogen akryláty, polyetherimide (General Electric), polykarbonát s CLD-1 chromofor (PacificWave), polykarbonát (JDS Uniphase), polyuretan (Lumera) atd. [7], [8], [19], [20], [21]. Některé z těchto polymerů jsou již také komerčně dostupné a příklady zajímavých polymerních materiálů jsou uvedeny v Tab. 3.2.

Tabulka 3.2: Přehled zajímavých polymerních materiálů pro fotonické aplikace [19].

firma	název polymeru	technologie výroby	optický útlum (dB/cm)
AlliedSignal	Acrylate	UV/laser writing	0,24 @ 1550 nm
Amaco Chemicals	Ultradel 9000	UV/mokré leptání	1,00 @ 1550 nm
Dow Chemicals	Cyclotene 3022	RIE	1,50 @ 1550 nm
DuPont Acrylate	[Polyguide <sup>TM</sup> ]	-	0,6 @ 1550 nm
Hitachi	Fluorinated polyimide	UV/mokré 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/mokré leptání	0,40@1550 nm

Rozměry fotonických struktur jsou omezeny pracovní vlnovou délkou, pro kterou jsou konstruovány, a tedy vyrobit integrovanou fotonickou strukturu s malými kompaktními rozměry není jednoduché. Současně je snaha, pokud je to možné, realizovat fotonické struktury s možností přímého připojení na standardní telekomunikační vlákna. Jednovidová telekomunikační vlákna mají jádra s průměrem  $8\text{--}9 \mu\text{m}$  a průměr pláště je pak  $125 \mu\text{m}$ . Nejmenší rozměr jádra kommerčně dostupných telekomunikačních vláken je  $4 \mu\text{m}$  s průměrem pláště  $125 \mu\text{m}$ . Menší rozměr jádra mají pak už jen speciální zúžená vlákna, která jsou označovaná jako taperovaná vlákna. Aby bylo možno realizovat jednovidové kanálkové vlnovody s rozměrem kompatibilním s jednovidovými vláknovými vlnovody, je nutné, aby pro danou pracovní vlnovou délku byl rozdíl mezi indexem lomu jádra vlnovodu a indexem lomu okolního prostředí co nejmenší. Rozdíl indexu lomu mezi vlnovodnou vrstvou a okolním prostředím je označován jako kontrast indexu lomu ( $\Delta$ ). Optické vlnovody s nízkým kontrastem indexu lomu, kde rozdíl indexu lomu se liší na třetím a čtvrtém desetinném místě, umožňují realizaci jednovidových kanálkových vlnovodů, jejichž rozměr je srovnatelný s rozměry jednovidových optických vláknových vlnovodů. Tyto optické kanálkové vlnovody, ale nejsou vhodné pro realizaci kompaktních fotonických obvodů. Pro integrované fotonické struktury se více hodí materiály s velkým kontrastem indexu lomu (HIC - High Index Contrast) [22], [23], [24]. Rozměry těchto jednovidových vlnovodů se pohybují řádově ve stovkách nanometrů a umožňují realizaci vlnovodních struktur s malým poloměrem ohybu a s vysokým stupněm integrace.

Tradiční optické vlnovody s vysokým kontrastem indexu lomu jsou vlnovody s vlnovodnou vrstvou tvořenou z polovodičů, jako např. GaAs/AlGaAs, SOI, SiN, SiON apod. [23]. V posledních letech je snaha také vyvinout nové polymerní vlnovodné vrstvy s co možná nejvyšší hodnotou indexu lomu a naopak oddělující vrstvy s co možná nejmenší hodnotou indexu lomu. Příkladem polymerů s vysokou hodnotou indexu lomu je například polymer z epoxidové pryskyřice ENR (Epoxy Novolak Resin), který je výrobcem Micro resist technology GmbH prodáván pod označením Su-8 a má hodnotu indexu lomu 1,5709 pro  $\lambda = 1311 \text{ nm}$ . Jedním z nových polymerů s vysokou hodnotou indexu lomu je polymer NOA1625 s indexem lomu 1,6079 pro  $\lambda = 1311 \text{ nm}$  od firmy Norland Optical Adhesive. Příklad polymerů s nízkou hodnotou indexu lomu jsou pak např. Teflon AF 1600 od firmy Dupont (hodnota indexu lomu 1,297) [25], PC-414 EFIGRON (hodnota indexu lomu 1,405) [17] a Cytop od firmy Bellex internatioanl Co. (hodnota indexu lomu 1,334 pro  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) [26].

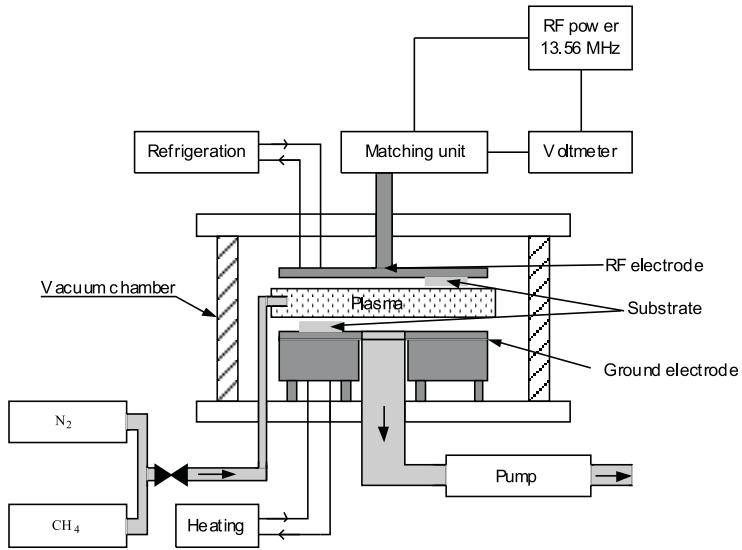
## 3.2 Technologie používané pro výrobu fotonických struktur

Technologie používané pro výrobu fotonických struktur je velice široké téma a zahrnuje veliké množství depozičních technik. Velice často jsou struktury natolik technologicky složité, že je nezbytná kombinace několika technologií. Nejběžnější technologie pro výrobu planárních vlnovodů můžeme rozdělit na [1], [3], [4], [27]:

- vrstvové technologie (vakuové napařování, naprašování, laserová ablace, CVD technologie, epitaxní technologie apod.),
- difuzní procesy,
- iontová implantace,
- tvarování vrstev (imprinting),
- metoda rotačního lití (spin coating).

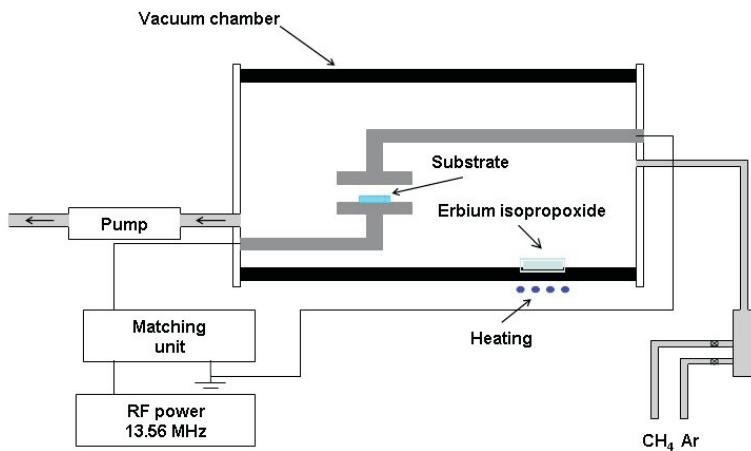
Mezi základní přípravu planárních vlnovodů patří vrstvové technologie. Na Katedře mikroelektroniky na ČVUT v Praze nejsou k dispozici žádné tyto technologie, ale výroba navržených struktur a depoziční testy jsou prováděny na spolupracujících pracovištích.

Například aparatura PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) je dostupná na Ústavu inženýrství pevných látek na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze a pomocí této aparatury byly připravovány uhlíkové vrstvy. Aparatura PACVD byla vyrobena na pracovišti TESLA VUST podle návrhu společnosti Plasma Technology Company. Jedná se o zařízení se dvěma standardními růstovými elektrodami (průměr 34 cm). Uzemněná elektroda může být ohřívána až na teplotu 250°C. Depozice uhlíkových vrstev byla provedena z prekurzoru metanu ( $\text{CH}_4$ ) za použití RF generátoru (13,56 MHz) s výkonem 500 W. PACVD aparatura použitá pro výrobu uhlíkových vrstev je uvedena na obr. 3.1.



Obrázek 3.1: Aparatura PACVD použitá pro výrobu uhlíkových vrstev.

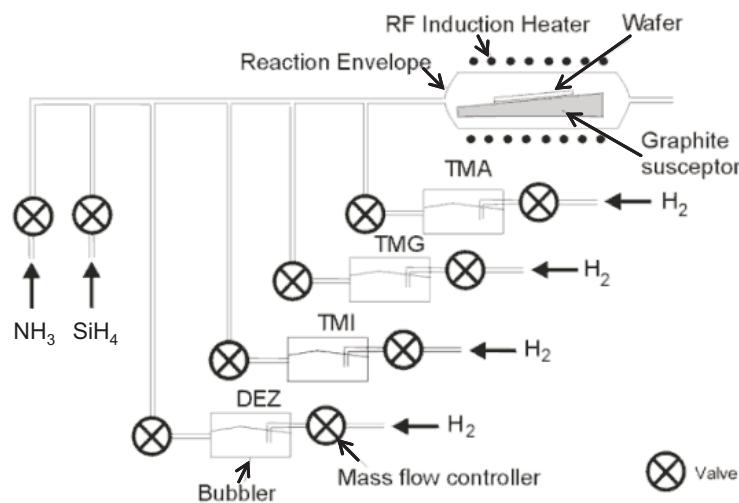
Depoziční testy pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací erbia byly prováděny na Ústavu fyziky na Fakultě strojní na ČVUT v Praze. Depozice byla prováděna v aparatuře PACVD vlastní konstrukce (viz obr. 3.2). Jako zdroj uhlíku byl použit metan a jako zdroj erbia byl použit isopropoxid erbia. Plynné fáze isopropoxidu erbia, bylo dosaženo jeho zahřátím na teploty 240 - 260°C.



Obrázek 3.2: Aparatura PACVD použitá pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací erbia.

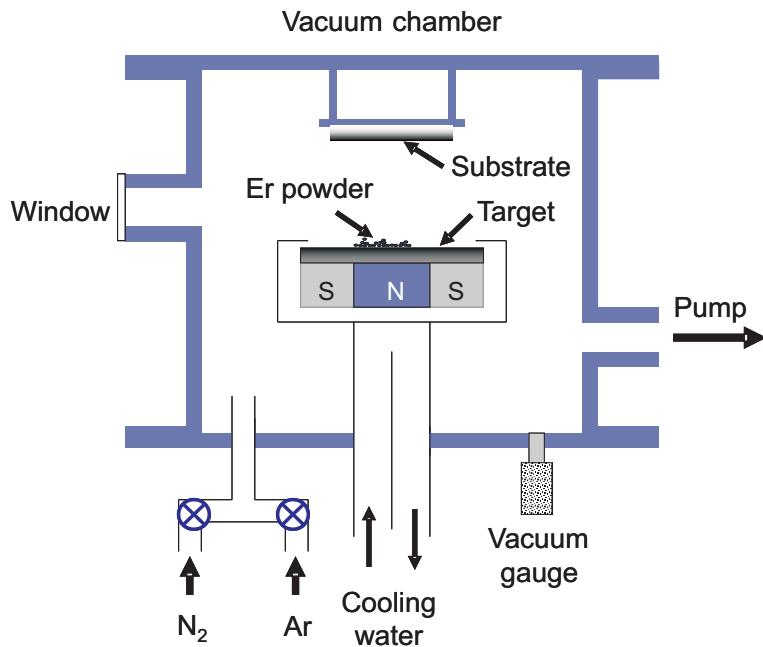
Dále jsme se zabývali výrobou vrstev nitridu gallia (GaN). Tyto vrstvy byly vyráběny pomocí epitaxe z plynné fáze (MOCVD - Metal Organic Chemical Vapor Deposition)

v reaktoru, který byl vyroben na Ústavu inženýrství pevných látek na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze. Aparatura je vybavena horizontálním reaktorem, kde jako prekurzor pro gallium je použit zdroj TriMethyl-Gallia (TMGa) a pro dusík je použit jako zdroj čpavek ( $\text{NH}_3$ ). Vrstvy GaN byly připravovány na safírové podložky a zahřátí podložky na požadovanou teplotu bylo zajištěno vysokofrekvenčním ohřevem [28], [29]. Aparatura MOCVD s horizontálním reaktorem použitá pro přípravu vrstev GaN je uvedena na obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Aparatura MOCVD pro výrobu vrstev GaN.

Dále byly uhlíkové vrstvy a vrstvy GaN vyráběny pomocí magnetronového naprašování v aparatuře Balzers Pfeiffer PLS 160 na Katedře elektrotechnologie na ČVUT v Praze. Aparatura je uvedena na obr. 3.4. V případě depozice uhlíkových vrstev byla depozice provedena pomocí vysoce čistého targetu uhlíku (99,9999 %), kdy depozice probíhala v argonové atmosféře. Vrstvy GaN byly vyráběny pomocí targetu z gallia (Ga) nebo za pomocí targetu z oxidu gallia ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ). Depozice potom probíhala ve směsi plynu dusíku a argonu.



Obrázek 3.4: Aparatura magnetronového naprašování Balzers Pfeiffer PLS 160.

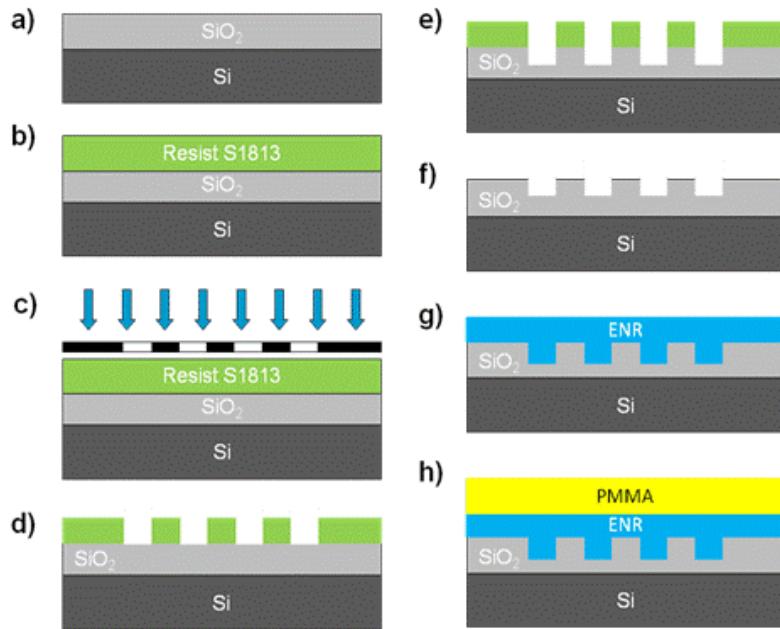
Vrstvy GaN byly také dotovány ionty vzácných zemin. V případě vrstev GaN vyrobených epitaxní technologií byla dotace provedena pomocí iontové implantace. Iontová implantace byla prováděna v laboratořích Instituto Tecnologico e Nuclear, EN10, 2686-953 Sacavém v Portugalsku a také v laboratořích Institutu für Schichten und Grenzflächen, Forschungszentrum v Jülichu v SRN. V případě výroby vzorků GaN pomocí magnetronového naprašování byla dotace provedena pomocí úpravy targetu, kdy target byl doplněn o zdroj vzácných zemin. Detailnější postup přípravy těchto vzorků je uveden v [30].

Funkční vrstvy vyrobené pomocí vrstvových technologií jsou technologicky velice náročné. Aparatury pro vrstvové technologie vyžadují vakuovou komoru a s tím spojená vakuová zařízení, aby bylo možno dosáhnout pracovního tlaku. Dále tyto aparatury vyžadují plynové hospodářství, kdy v některých případech pro růst vrstev je nutné použít jedovatých plynů (např. čpavek, TriMethyl-Gallium pro výrobu vrstev GaN). Pro dosažení požadovaných vlastností je také často vyžadováno provést růst za zvýšené teploty. Při růstu vrstev GaN je požadovaná teplota dosti vysoká, až  $1300^{\circ}\text{C}$ , a tedy k dosažení takto vysoké teploty je zapotřebí speciální zařízení. Po růstu tenkých vrstev pro výrobu vlastních fotonických součástek je zapotřebí provést další technologické kroky, které vedou k výrobě vlastních struktur. Těmito technologickými kroky jsou především litografické procesy, které umožní výrobu struktur požadovaných tvarů a velikostí. Nejběžněji

se jedná o fotolitografický proces a v případě dosažení menších rozměrů se jedná o proces elektronové litografie. Po litografickém procesu následuje proces leptání, který je možno provést pomocí suchého nebo mokrého leptání. Z hlediska technologie je samozřejmě jednodušší provést leptání mokré, protože k tomuto není zapotřebí specializovaných zařízení, ale mokré leptání lze použít jen v omezené míře.

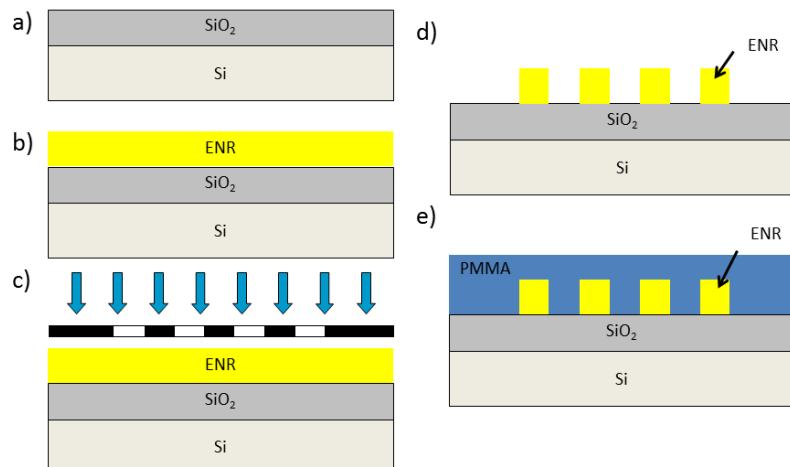
Z důvodu dosažení nižších výrobních nákladů je často požadováno, aby fotonické struktury byly vyrobeny na Si podložce a technologické kroky, které vedou k realizaci fotonické struktury, byly kompatibilní s Si technologií. Křemík má svoji nezastupitelnou pozici jak v mikro, tak v optoelektronice, ale jeho nevýhodnou vlastností pro fotonické aplikace je vysoká hodnota indexu lomu ( $n = 3,478$  pro  $\lambda = 1550$  nm). Aby bylo možno realizovat optický vlnovod, je jednou ze základních podmínek, aby index lomu vlnovodné vrstvy byl vyšší než index lomu okolního prostředí. Protože hodnota indexu lomu Si je velice vysoká, je potřeba na Si podložku nanést mezivrstvu z materiálu, který bude mít hodnotu indexu lomu nižší, než je hodnota indexu lomu materiálu, který bude sloužit jako vlnovodná vrstva. Jako tato přechodná mezivrstva se velice často používá vrstva  $\text{SiO}_2$ , která může být vytvořena jednoduchou termickou oxidací Si podložky. Problém je, že pokud by vrstva  $\text{SiO}_2$  neměla dostatečnou tloušťku, tak díky evanescentní vlně může dojít k přenosu energie z vlnovodné vrstvy do Si podložky. Proto pro danou vlnovodnou vrstvu a pracovní vlnovou délku je nutné stanovit minimální tloušťku přechodové vrstvy.

Z výše zmíněného textu plyne, že výroba fotonických struktur je velice technologicky náročný komplexní proces. Proto jsou hledány alternativní postupy, které umožní realizovat fotonické struktury a součástky za pomoci jednodušších technologií při dosažení vyrobených součástek s technicky porovnatelnými parametry. Těmito novými strukturami se zdá mohou být fotonické součástky z polymerních materiálů. Příklad výroby fotonické struktury z polymerní vlnovodné vrstvy vytvořené pomocí optické litografie na podložce Si s kanálkovým hřebenovým vlnovodem vytvořeným do přechodové vrstvy  $\text{SiO}_2$  je uveden krok za krokem na obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Postup výroby fotonické struktury pomocí optické litografie (fotonická struktura je vyrobena leptáním vrstvy SiO<sub>2</sub> na podložce Si).

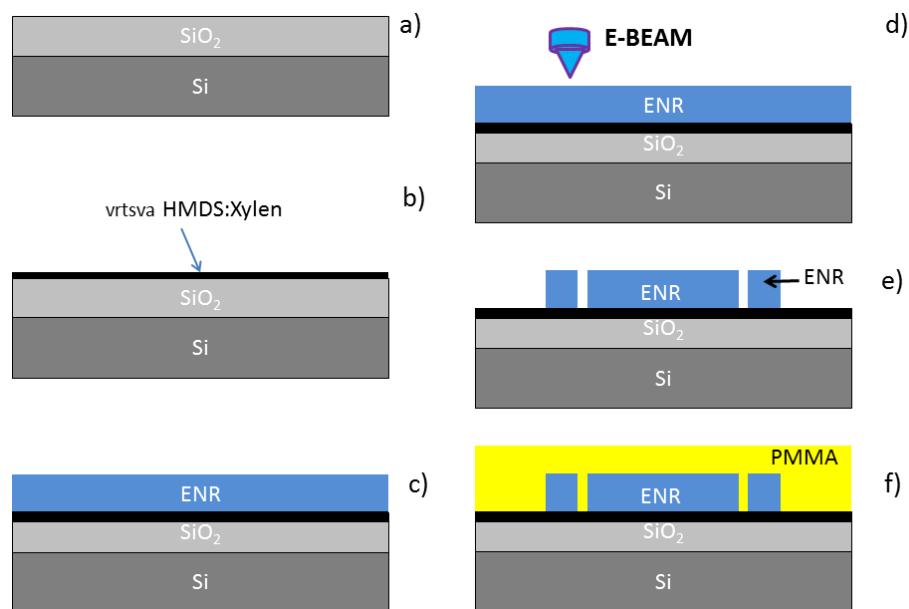
Další možností jak vyrobit fotonickou strukturu pomocí optické litografie je použít vlnovodnou polymerní vrstvu, která se chová jako fotorezist. Příkladem takového materiálu je opět epoxidová pryskyřice ENR. Příklad výroby struktury s touto vlnovodnou vrstvou pomocí optické litografie je uvedena na obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Postup výroby fotonické struktury pomocí optické litografie (příklad, kdy vlnovodná vrstva je současně fotorezistem).

Nejdříve je podložka očištěna, aby vlnovodná vrstva měla dostatečnou adhezi (obr. 3.6a). Potom je na podložku nanesena vlnovodná vrstva metodou rotačního lití (obr. 3.6b). Po nanesení vrstvy je vzorek zahřán na teplotu 90°C po dobu 20 - 60 minut a následuje fotolitografický proces, který určí výsledný tvar a rozměry struktury (obr. 3.6c). Po litografickém procesu je provedeno chemické leptání ve vývojce MR-DEV 600 (obr. 3.6d). Následuje ohřátí vzorku na teplotu 90°C po dobu 30 minut. Nakonec je metodou rotačního lití nanesena horní ochranná vrstva tvořená polymerem PMMA (obr. 3.6e).

Další možností jak vyrobit fotonické struktury je využít procesu elektronové litografie. Výhodou této metody je, že umožňuje vyrobit mnohem menší motivy, než litografie optická. V případě optické litografie jsme vyráběli struktury, které měly v případě polymeru nejmenší rozměr 5  $\mu\text{m}$ . V případě optické litografie, kdy byly vyráběny kanálky pomocí iontové výměny, se nejmenší rozměry kanálkových vlnovodů blížily šířce kanálu 2  $\mu\text{m}$  (tyto vzorky byly vyráběny v SQS Vláknová Optika a.s.). V případě struktur vyrobených pomocí elektronové litografie byla vlnovodná vrstva tvořena polymerem ENR a rozměry hřebenových vlnovodů se pohybovaly kolem 1  $\mu\text{m}$ . Fotonické struktury pomocí elektronové litografie byly vyráběny panem V. Jurkou z Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i a postup výroby je schematicky znázorněn na obr. 3.7.

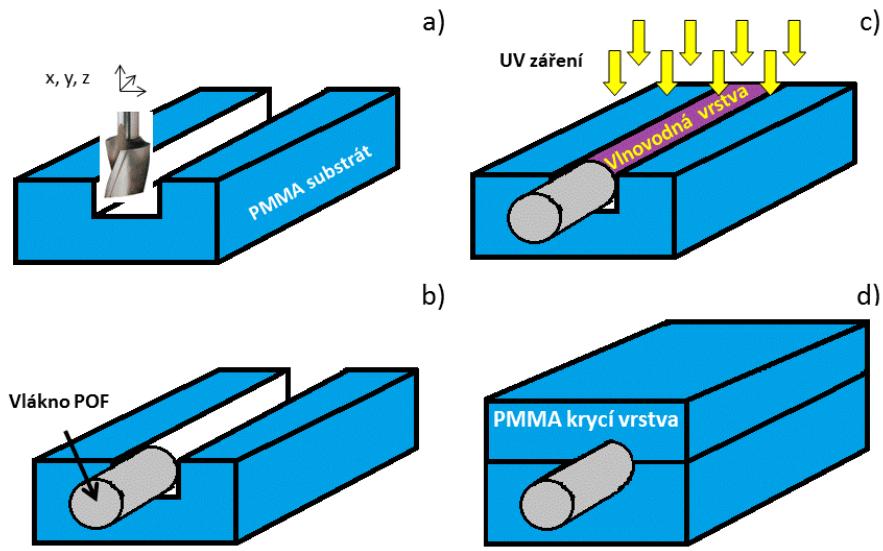


Obrázek 3.7: Postup výroby polymerních fotonických struktur pomocí elektronové litografie.

Před vlastním litografickým procesem je podložka Si/SiO<sub>2</sub> důkladně vyčištěna. Podložka je leptána ve směsi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> v poměru 1:10 po dobu 5 min, a potom je substrát omýt v Demi vodě a vysušen proudem N<sub>2</sub> (obr. 3.7a). Pro zlepšení adheze mezi podložkou a vlnovodnou vrstvou je pomocí metody rotačního lití nanесена vrstva primeru (obr. 3.7b). Byly zkoušeny dva typy primeru, a to HMDS-Xylen, nebo primer Omnicat. Následuje nanесení vlnovodné vrstvy ENR opět pomocí metody rotačního lití (obr. 3.7c) a ohřátí vzorku na teplotu 50°C po dobu 30 minut, a potom je ještě vzorek zahrán na teplotu 90°C po dobu 15 minut. Následuje vlastní proces elektronové litografie (obr. 3.7d), kdy v našem případě jsme použili urychlovací napětí 10 kV s expoziční dávkou 1,3 μC·cm<sup>-2</sup>. Následuje žíhání vzorku při teplotě 50°C po dobu 60 minut. Poté je vzorek ponořen do vývojky MR-DEV 600 po dobu 3x1 minuta (obr. 3.7e). Vzorek je pak opláchnut v isopropylalkoholu a vysušen proudem N<sub>2</sub>. Na závěr je pomocí metody rotačního lití nanесена ochranná krycí vrstva tvořená polymerem PMMA (obr. 3.7f).

Další technologií výroby, kterou jsme se zabývali, je výroba fotonických struktur, která by umožnila zpracování optického signálu připojeného pomocí standardních POF (Plastic Optical Fiber) vláken. Výroba takovýchto struktur je velice specifická, protože rozdíl jádra POF vlnovodu je 980 μm. Tento rozdíl je mnohem větší, než u běžných optických kanálkových a hřebenových vlnovodů, které jsou vyráběny pomocí litografických procesů.

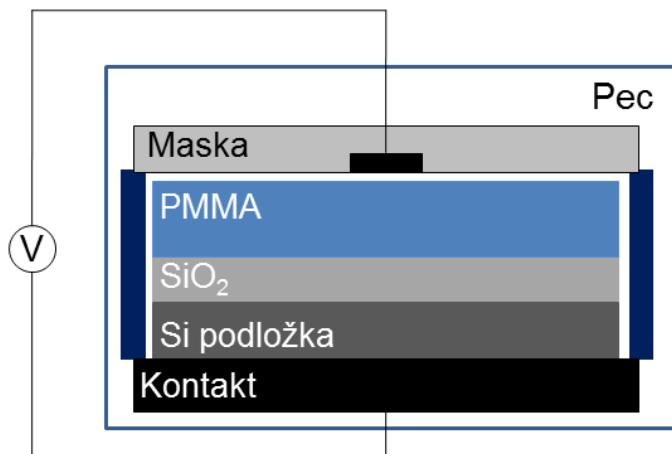
Pro výrobu těchto struktur jsme testovali tři výrobní postupy. Jednalo se o výrobu optických rozbočnic, kde jsme vyráběli kanály pro vlnovodnou vrstvu s rozdílem 1 mm. V prvním případě jsme výrobu prováděli pomocí CNC gravírování do desky z polymeru PMMA o tloušťce 3 mm. V druhém případě byla nejdříve vyrobena negativní předloha do duralu pomocí CNC gravírování, nebo do mosazi pomocí laserového gravírování. Tato předloha sloužila potom jako razník, nebo forma k vytvoření potřebných drážek pro vlnovodnou vrstvu. Poslední postup spočíval ve vytvoření drážky pro vlnovodnou vrstvu pomocí laserového gravírování. Při depozičních testech se ukázalo, že první dvě metody jsou vhodné pro výrobu těchto struktur. V případě výroby většího počtu vzorků je vhodnější druhý postup, kdy je vyrobena nejdříve negativní předloha (matrice), a potom jsou vzorky vyráběny pomocí vyražení motivu do podložky, nebo jako forma pro vytvoření požadovaného tvaru podložky pro vlnovodnou vrstvu. Jako nevhodná metoda se ukázal postup přímé výroby drážek pomocí laserového gravírování. Tento postup je časově nejnáročnější a drsnost vyrobených drážek byla příliš vysoká. Postup výroby mnohavídové struktury s možností připojení standardního POF vlákna pomocí CNC gravírování je uveden na obr. 3.8.



Obrázek 3.8: Postup výroby mnohavidových struktur kompatibilních s POF vlákny.

Nejdříve je do podložky z polymeru PMMA vytvořen motiv drážek pomocí CNC gravírovacího stroje (obr. 3.8a). Pro vytvoření drážek jsme použili zařízení CNC NONCO Kx3. Následně jsou do vytvořených drážek vloženy vstupní/výstupní POF vlákna (obr. 3.8b). Poté je do vytvořených drážek nanesena polymerní vlnovodná vrstva, která je vytvrzena UV světlem (obr. 3.8c). Jako vlnovodné vrstvy jsme použili různé druhy UV polymerů od firmy Norland Optical Adhesive a testovali jsme také možnost použití epoxidové pryskyřice ENR. Na závěr je přidána horní krycí vrstva, která je ze stejného materiálu jako podložka (obr. 3.8d). Postup výroby je detailněji popsán v [31], [32], [33]. Kromě podložek a horní krycí vrstvy z polymeru PMMA jsme také testovali možnost použít jako podložku a horní krycí vrstvu ze silikonového gelu Sylgard 184.

Kromě výše zmíněných technologických postupů jsme se ve spolupráci se skupinou pod vedením pana Doc. I. Hüttela z Vysoké školy chemicko technologické v Praze spolupodíleli na vývoji nového technologického postupu pro přípravu polymerních kanálkových vlnovodů. Tento nový postup spočívá na principu ovlivnění indexu lomu pomocí elektromagnetického pole. Nejdříve je polymer PMMA nanesen metodou rotačního lití na podložku Si/SiO<sub>2</sub>, a potom je část polymerní vrstvy vystavena elektromagnetickému poli při zvýšené teplotě. V místě, kde je vrstva PMMA vystavena elektromagnetickému poli, dojde ke zvýšení indexu lomu. Princip metody je uveden na obr. 3.9.



Obrázek 3.9: Výroba polymerního optického vlnovodu působením elektromagnetického pole.

Příklad struktury optické rozbočnice vyrobené výše zmíněnou technologií je uveden na obr. 3.10. Na obr. 3.10a je uvedena fotografie struktury, na obr. 3.10b je fotografie struktury při průchodu optického signálu o vlnové délce 632,8 nm. Depoziční testy, které byly prováděny touto technologií, jsou popsány v [34], [35]. Dosažené výsledky byly také publikovány v [36], [37], [38].



Obrázek 3.10: Vyrobená struktura optické rozbočnice ovlivněním polymerního optického vlnovodu působením elektromagnetického pole, a) fotografie struktury, b) struktura při průchodu signálu 632,8 nm.

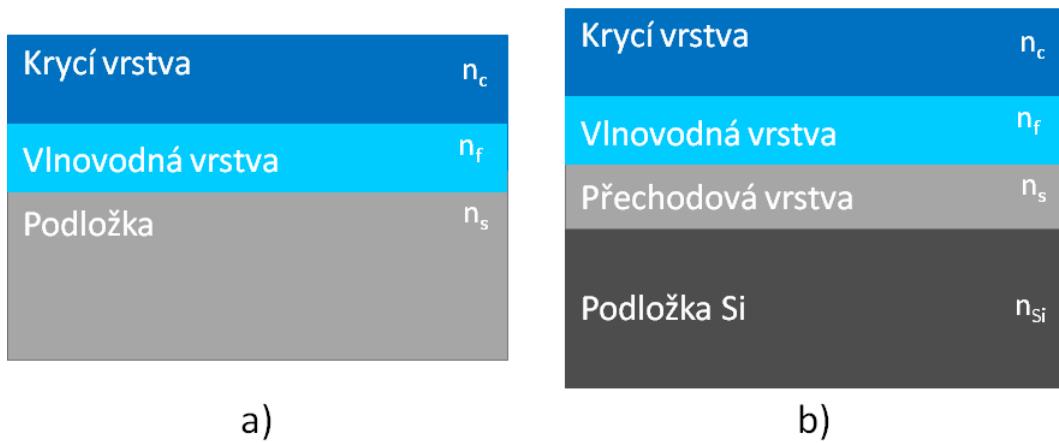
# Kapitola 4

## Pasivní fotonické struktury

V této kapitole jsou popsány pasivní fotonické struktury, které byly navrhovány, a vybrané struktury byly pak realizovány a diagnostikovány v Laboratoři planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO) na Katedře mikroelektroniky FEL, ČVUT v Praze. V kapitole 4.1 jsou popsány základní planární optické vlnovody, které jsou dále použity pro návrh a realizaci složitějších fotonických struktur. V kapitole 4.2 jsou uvedeny návrhy optických rozbočnic. V kapitole 4.3 jsou shrnuty návrhy struktur, které využívají princip mnohavidové interference, a v kapitole 4.4 jsou pak zmíněny návrhy optických polymerních mikrorezonátorů. V poslední kapitole 4.5 o pasivních fotonických strukturách jsou popsány návrhy optických triplexerů.

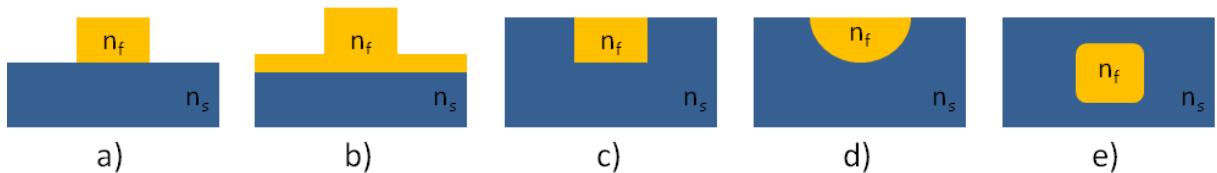
### 4.1 Planární optické vlnovody

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), vlnovodné vrstvy a horní vrstvy. Aby vlnovodem mohl být optický signál veden, tak hodnota indexu lomu vlnovodné vrstvy ( $n_f$ ) musí mít vyšší hodnotu, než je index lomu podložky ( $n_s$ ) a horní krycí vrstvy ( $n_c$ ). Řez struktury planárního optického vlnovodu je uveden na obr. 4.1a. Řez struktury planárního optického vlnovodu na Si podložce je pak uveden na obr. 4.1b.



Obrázek 4.1: a) Řez strukturou planárního optického vlnovodu, b) řez planárního vlnovodu na Si podložce.

Planární vlnovody můžeme rozdělit podle toho, jestli je změna indexu lomu mezi jádrem a podložkou skoková, nebo gradientní. Základní příklady různých druhů kanálkových vlnovodů jsou shrnutý na obr. 4.2. Na obr. 4.2a,b,c jsou uvedeny vlnovody se skokovou změnou indexu lomu a na obr. 4.2d a obr. 4.2e jsou uvedeny vlnovody s gradientním indexem lomu.

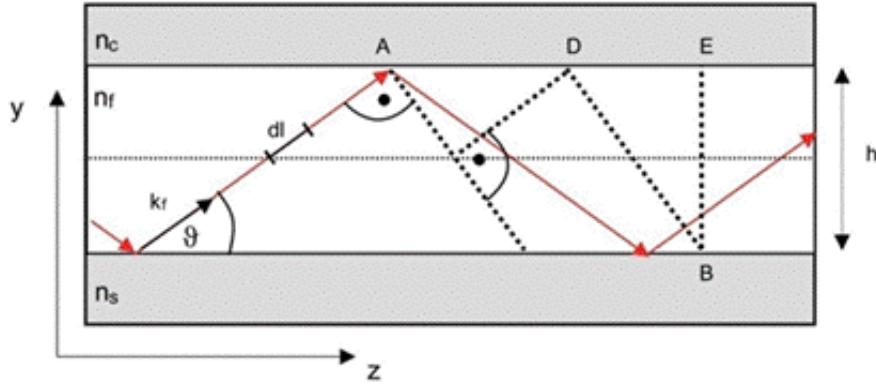


Obrázek 4.2: Příklady planárních optických vlnovodů, a) hřebenový vlnovod, b) žebrový vlnovod, c) kanálkový vlnovod se skokovou změnou indexu lomu, d) difúzní kanálkový vlnovod, e) zanořený difúzní kanálkový vlnovod po druhém stupni iontové výměny.

Na obr. 4.2a je optický hřebenový vlnovod na obr. 4.2b je žebrový vlnovod a na obr. 4.2c je uveden částečně zanořený kanálkový vlnovod. Na obr. 4.2d je difúzní kanálkový vlnovod pro první stupni difúze a na obr. 4.2e je zanořený kanálkový vlnovod po druhém stupni difúze.

Optické vlnovody dále dělíme na jednovidové nebo mnohavidové. Počet vedených vidù

závisí na hodnotách indexu lomu jádra vlnovodu a okolního prostředí, a také na pracovní vlnové délce. Aby byl optický signál veden vlnovodem, tak nestačí, aby byl index lomu vlnovodné vrstvy vyšší, než index lomu okolí. Musí také platit tzv. podmínka příčné rezonance, kterou lze popsat rovnicí (4.1)(viz obr. 4.3) [39].



Obrázek 4.3: Planární optický vlnovod s popisem změny fáze vedeného vidu.

Postoupí-li vlna o  $dl$ , změní se její fáze o  $\Delta\phi = k_f dl$ , kde  $k_f = k_0 n_f$ . Čárkování čáry značí roviny kolmé na trajektorii paprsku a na těchto rovinách je fáze konstantní. Pro vznik vidu musí mít vlna, která se dostane do bodu D z bodu C po přímé dráze stejnou fazou, nebo se lišit o násobek  $2\pi$  jako vlna, která se tam dostane po odrazech v bodech A a B.

$$2k_f h \sin\theta - \phi_{fc} - \phi_{fs} = 2m\pi \quad (4.1)$$

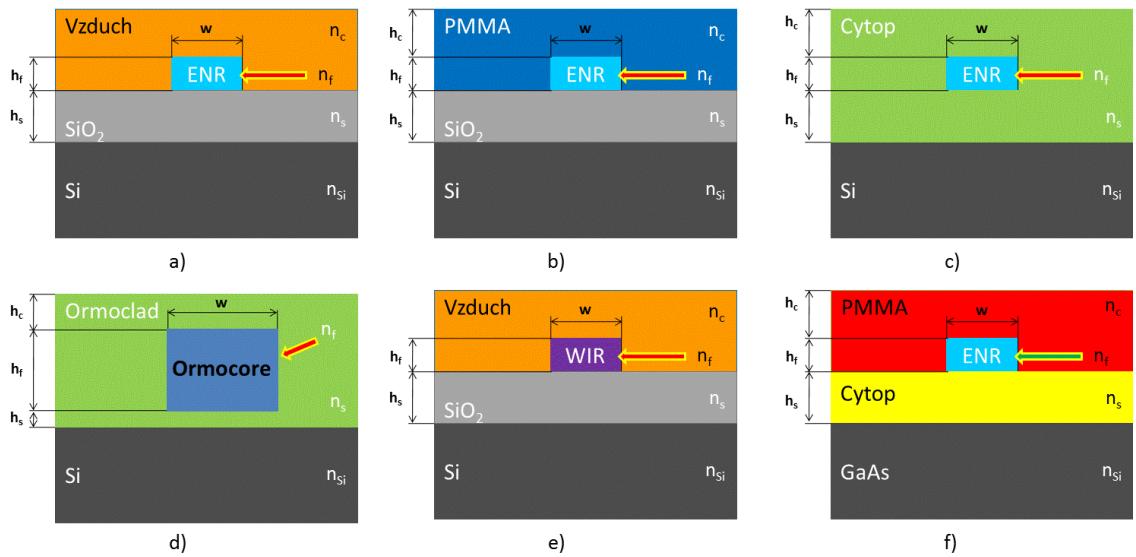
Tato rovnice se nazývá disperzní rovnicí a má zásadní význam pro návrh optických vlnovodů, protože se z ní dá určit počet vedených vidů, kritická výška vlnovodné vrstvy, kritická vlnová délka vlnovodu apod. Jiná podoba disperzní rovnice má tvar [39]:

$$\frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \operatorname{arctg} \left[ p_{12} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] - \operatorname{arctg} \left[ p_{13} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] = m\pi \quad (4.2)$$

Kde  $n_{ef}$  je efektivní hodnota indexu lomu,  $p_{13}$  je 1 pro TE vidy (transverzálně elektrické) a pro TM vidy (transverzálně magnetické) je tato proměnná definována vztahem  $p_{13} = (\frac{n_f}{n_c})^2$ .

Z důvodu snadné integrace s dalšími elektronickými a podpůrnými prvky je velice často vyžadováno, aby fotonické struktury byly vyrobeny na jednom křemíkovém čipu. Nevýhodou křemíkového substrátu je jeho vysoká hodnota indexu lomu, a proto je nezbytné mezi vlnovodnou vrstvu a Si substrát vložit mezivrstvu, která má nižší hodnotu indexu lomu, než má vlnovodná vrstva (viz obr. 4.1b).

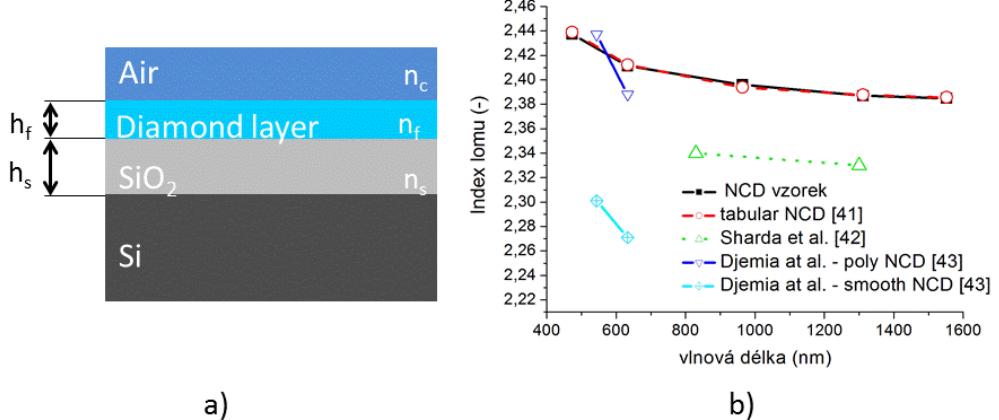
V laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky na FEL ČVUT v Praze jsme prováděli návrh několika typů jednovidových polymerních kanálkových vlnovodů na Si podložce. Jednalo se o dva základní návrhy, které jsou pak modifikovány použitím různých typů mezivrstev a vlnovodných vrstev. V prvním případě se jedná o hřebenový vlnovod, kde je na Si podložku nanesena mezivrstva z  $\text{SiO}_2$ , a na tuto mezivrstvu je pak nanesena polymerní vlnovodná vrstva. V druhém případě je na Si podložku nanesena mezivrstva z polymerního materiálu s nižším indexem lomu, než má polymerní vlnovodná vrstva. Ve speciálních případech je nutné navrhnout a realizovat kanálkové vlnovody na jiných než Si podložkách. V našem případě jsme pro jednu speciální aplikaci navrhli a zrealizovali polymerní optický vlnovod na podložce z GaAs. Základní přehled struktur optických kanálkových vlnovodů, které byly navrženy v laboratoři PLANIO jsou uvedeny na obr. 4.4.



Obrázek 4.4: Příklady navržených struktur optických hřebenových a kanálkových vlnovodů, a) Si/SiO<sub>2</sub>/ENR, b) Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA, c) Si/Cytop/ENR/Cytop, d) Si/Ormoclad/Ormocore/Ormoclad, e) Si/SiO<sub>2</sub>/WIR, f) GaAs/Cytop/ENR kanálkový vlnovod s krycí vrstvou.

Na obr. 4.4a je uvedena struktura navržená na Si podložce s přechodovou vrstvou  $\text{SiO}_2$ . Vlnovodnou vrstvu zde tvoří polymer z epoxidové pryskyřice Epoxy Novolak Resin (ENR) od firmy MicroChem Corp. Na obr. 4.4b je stejná struktura, jen zde je použita ochranná krycí vrstva z polymeru z Polymethyl-methakrylátu (PMMA). Na obr. 4.4c je struktura s vlnovodnou vrstvou, kterou tvoří polymer ENR a oddělující vrstva mezi vlnovodnou vrstvou a podložkou Si, a také horní krycí vrstva je tvořena polymerem Cytop od firmy Bellex International Corp. Další návrh planárních optických vlnovodů byl proveden pro strukturu s vlnovodnou vrstvou Ormocore a oddělující a horní krycí vrstvy z polymeru Ormoclad (viz obr. 4.4d). Tyto materiály byly zakoupeny od firmy MicroChem Corp. Výhodou vlnovodné vrstvy z materiálu Ormocore je možnost nadání hodnoty indexu lomu tohoto polymeru pomocí ředění s materiélem Ormoclad, použitým jako oddělující vrstva. Lze takto připravit vlnovodnou vrstvu s velmi malým kontrastem indexu lomu a lze tedy dosáhnout rozdílu jednovidového vlnovodu se stejným rozdílem, jako mají standardní křemenná optická vlákna ( $4/125 \mu\text{m}$ ,  $9/125 \mu\text{m}$ ). Další návrh hřebenového vlnovodu byl proveden pro vlnovodnou vrstvu WIR dodanou firmou ChemOptics (viz obr. 4.4e). Základní vlastností tohoto materiálu je, že hodnota indexu lomu je jen o něco málo vyšší než je hodnota indexu lomu mezivrstvy  $\text{SiO}_2$  a lze tedy opět vyrobit tuto jednovidovou strukturu s rozdíly, které se blíží jednovidovému křemennému vláknovému vlnovodu s rozdílem  $4/125 \mu\text{m}$ . Na obr. 4.4f je uvedena navržená struktura, která je určena pro speciální hybridní aplikace, kdy je nutné strukturu realizovat na substrátu z GaAs.

Kromě polymerních optických vlnovodů jsme navrhovali a vyrábili ve spolupráci s Fyzikálním ústavem AV ČR, v. v. i. i optické vlnovody z nanokrystalického diamantu (NCD - Nanocrystalline Diamond). Navrhovaná struktura je uvedena na obr. 4.5a. Opět z důvodu vysoké hodnoty indexu lomu Si podložky je mezi vlnovodnou vrstvou z materiálu NCD vložena mezivrstva z  $\text{SiO}_2$ . Takovéto optické vlnovody by mohly být použity pro realizaci fotonických struktur, které by byly provozovány v extrémních podmínkách z důvodu vysoké stability materiálu NCD. Na obr. 4.5b jsou porovnány hodnoty indexu lomu námi navrženého a realizovaného NCD planárního vlnovodu na Fyzikálním ústavu AV ČR, v. v. i. s hodnotami publikovanými v literatuře. Z obr. 4.5b vyplývá, že se podařilo vyrobit velice kvalitní NCD vrstvu, jejíž hodnota indexu lomu se blíží tabulkové hodnotě přírodního diamantu [40].



Obrázek 4.5: a) Struktura planárního optického vlnovodu s vlnovodnou vrstvou z nanokrystalického diamantu NCD, b) porovnání hodnot indexu lomu planárního vlnovodu NCD vyrobeného v laboratořích na Fyzikálním ústavu AV ČR, v.v.i. s publikovanými hodnotami indexu lomu u vrstev NCD.

Rozměry optických vlnovodů lze určit z následujících rovnic. Výšku vlnovodné vrstvy  $h_f$  lze určit pomocí vztahu [39]:

$$h_f = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ m\pi + \arctg \left[ p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\} \quad (4.3)$$

Šířku vlnovodné vrstvy  $w$  lze určit ze vztahu:

$$w = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ m\pi + \arctg \left[ p_{13} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_c^2}} \right] \right\} \quad (4.4)$$

Minimální tloušťku mezivrstvy  $h_s$  a krycí vrstvy  $h_c$  jsme při našich návrzích navrhovali tak, aby energie vyvázaná vlivem evanescentní vlny do substrátu Si, nebo jiného okolního prostředí byla menší, než 1%. Výpočet byl prováděn následovně:

Nejdříve jsme určili konstanty šíření pro daná prostředí, proto jsme upravili disperzní rovnici (4.2) tak, abychom mohli určit kořeny  $n_{ef}$ :

$$k_0 h_f \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \arctg \left( \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right) - \arctg \left( \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right) = 0 \quad (4.5)$$

Dále byl vybrán pouze jeden kořen, pro jehož hodnotu platí  $n_s < n_{ef} < n_c$ . Tuto hodnotu jsme upravili na podélnou složku vektoru k, tj.  $k_z$  (příčná konstanta  $k_z$  se v odborné literatuře označuje obvykle  $\beta$ , toto označení bude dále použito). Pomocí složky  $\beta$  vyjádříme tzv. normované příčné konstanty u, v a w, které jsou definovány vztahy:

$$u = \sqrt{k_f^2 - \beta}, v = \sqrt{\beta - k_s^2}, w = \sqrt{\beta - k_c^2} \quad (4.6)$$

Maximum intenzity elektromagnetického pole se určí pomocí druhé derivace, kterou položíme rovnu nule. Maximum intenzity elektromagnetického pole lze pak určit pomocí druhé derivace, která je rovna nule:

$$\frac{dE_{yf}}{dx} = 0 \quad (4.7)$$

Řešením této diferenciální rovnice je maximální hodnota  $E_{yfm}$ . Po zavedení konstanty, kterou budeme normovat ostatní hodnoty intenzit:

$$konst = \left| \cos(u \cdot E_{yfm}) - \frac{w \cdot \sin(u \cdot E_{yfm})}{u} \right| \quad (4.8)$$

Normovanou intenzitu elektromagnetického pole ve vlnovodné vrstvě lze potom tedy popsat rovnicí:

$$E_{yfn} = \frac{\cos(ux) - \frac{w}{u} \sin(ux)}{konst} \quad (4.9)$$

Ze vztahu 4.9 je zřejmé, že maximum této funkce po normování bude 1, tedy 100%. Předpokládáme-li, že energie vyvedená z vlnovodné vrstvy pomocí evanescentní vlny do podložky přes mezi vrstvu  $h_s$ , a nebo přes horní krycí vrstvy  $h_c$ , má být maximálně 1%, lze tuto tloušťku určit ze vztahu:

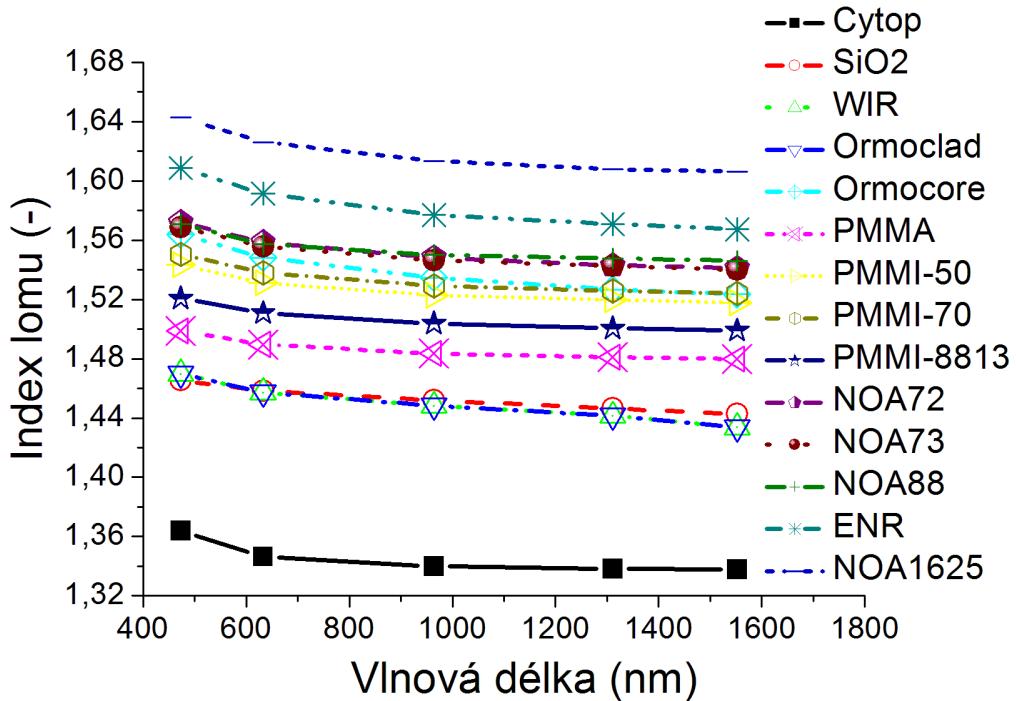
$$E_{ycn} = \left[ \cos(uh_f) - \frac{w}{u} \sin(uh_f) \right] e^{v(x+h_f)} = 0,01 \quad (4.10)$$

$$E_{ysn} = \frac{e^{-wx}}{konst} = 0,01 \quad (4.11)$$

Kde hledanou tloušťku těchto vrstev určíme vyjádřením hodnoty x.

Před vlastním návrhem polymerních planárních a kanálkových optických vlnovodů byly provedeny depoziční testy, kde byly jednotlivé použité materiály naneseny na podložky Si/SiO<sub>2</sub> a na křemenné sklo. U takto připravených vrstev byly potom změřeny hodnoty indexu lomu pomocí optické elipsometrie a jednohranolové vidové spektroskopie pomocí

zařízení Metricon 2010<sup>1</sup>. Tyto naměřené hodnoty byly použity potom pro návrh struktur, aby byly návrhy co možná nejpřesnější. Naměřené hodnoty indexu lomu pomocí zařízení Metricon jsou uvedeny na obr. 4.6.



Obrázek 4.6: Naměřené hodnoty indexu lomu u vybraných polymerních materiálů a vrstvy SiO<sub>2</sub> pomocí zařízení Metricon.

Příklady vypočtených rozměrů vlnovodů z obr. 4.4b pro vlnovou délku 1310 nm jsou uvedeny v Tab. 4.1. Detailnější popis návrhů těchto struktur lze nalézt v [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50].

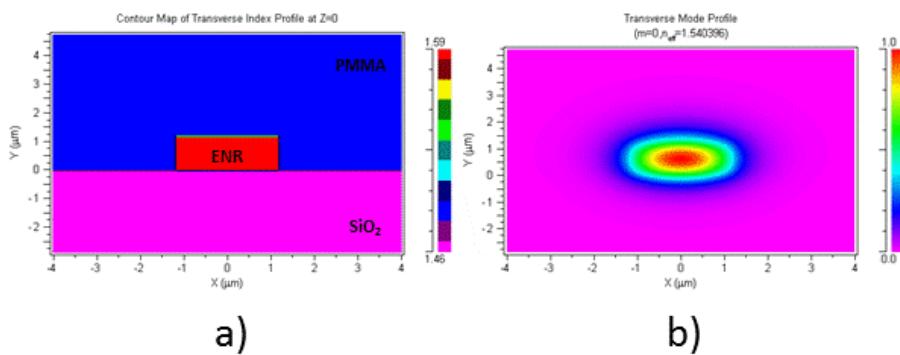
Tyto základní návrhy byly poté upřesňovány pomocí počítačové simulace za použití softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> od firmy RSoft Design Group, Inc<sup>2</sup>. Ukázka návrhu struktury Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA z obr. 4.4b z tohoto programu je uvedena na obr. 4.7. Na obr. 4.7a je uveden profil indexu lomu dané struktury a na obr. 4.7b je uveden výpočet efektivní hodnoty indexu lomu základního modu ve 3D simulaci pro vlnovou délku 1310 nm.

<sup>1</sup>[www.metricon.com](http://www.metricon.com)

<sup>2</sup>[www.RSoftdesign.com](http://www.RSoftdesign.com)

Tabulka 4.1: Vypočtené rozměry polymerního žebrového vlnovodu s vlno-vodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR (viz obr. 4.4b).

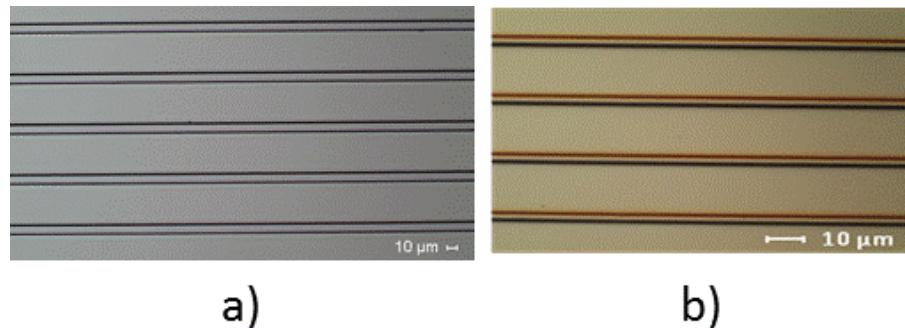
TE mody	$h_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$h_1$ ( $\mu\text{m}$ )	w ( $\mu\text{m}$ )	$h_2$ ( $\mu\text{m}$ )
0	3,55	1,19	2,36	2,86
1	4,17	2,23	3,54	3,16
2	4,82	3,27	4,72	3,41
3	5,52	4,31	5,90	3,64
4	6,54	5,35	7,08	3,89



Obrázek 4.7: Simulace hřebenového vlnovodu struktury Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA pro  $\lambda = 1310 \text{ nm}$  [45], a) rozložení profilu indexu lomu, b) výpočet efektivní hodnoty indexu lomu základního modu.

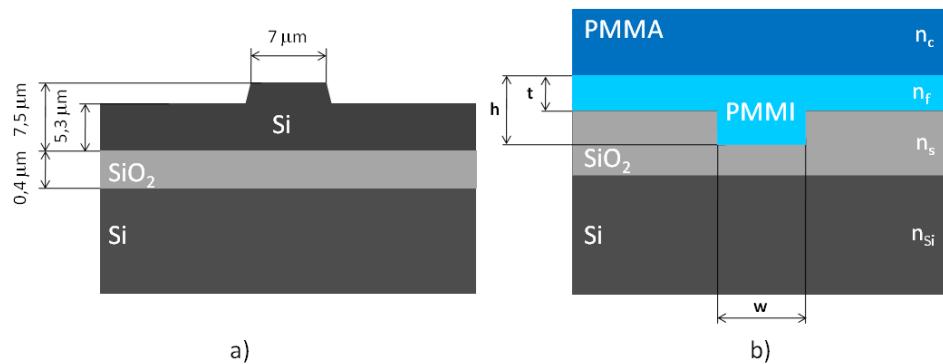
Příklady realizovaných struktur jsou uvedeny na obr. 4.8. Na obr. 4.8a je uvedena struktura Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA. Tento typ planárního optického vlnovodu byl použit pro realizaci struktur optických odbočnic a demultiplexorů s mnohavidovou interferencí (tyto struktury jsou popsány v kapitolách 4.2 a 4.3) a pro realizaci polymerních optických mikrorezonátorů (návrh optických mikrorezonátorů je uveden v kapitole 4.4). Optický útlum těchto optických vlnovodů byl nižší než 3,0 dB/cm a optický útlum nejlepších vzorků se pohyboval kolem 0,6 dB/cm na vlnových délkách 650 nm a 1310 nm. Realizace optického planárního vlnovodu pro hybridní aplikace na substrátu z GaAs (viz obr. 4.4f) je uvedena na obr. 4.8b. Optický útlum těchto vzorků se pohyboval kolem 3,1 dB/cm

pro vlnovou délku 650 nm a 2,4 dB/cm pro vlnovou délku 1310 nm. Optický útlum po optimalizaci byl u těchto vzorků nižší, než 1 dB/cm.



Obrázek 4.8: Obrázky realizovaných struktur polymerních hřebenových vlnovodů, a) Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA [45], b) GaAs/Cytop/ENR/PMMA [51].

Další návrh jednovidového optického planárního vlnovodu vychází z konceptu, který byl popsán panem Fischbeckem [52], který vycházel z práce pana Mercatiliho [53], a byl použit u polovodičových struktur [54]. Navrhovaná struktura je uvedena na obr. 4.9a. Modifikovaná navržená struktura s polymerní vlnovodnou vrstvou z Poly(methylmethacrylimide) (PMMI) od firmy Evonik Industries AG je uvedena na obr. 4.9b. [55]. Kromě této struktury s vlnovodnou vrstvou z polymeru PMMI jsme také navrhli a realizovali podobný optický vlnovod s jádrem vlnovodu z polymeru z epoxidové pryskyřice ENR. Návrh a vlastnosti této struktury jsme popsali v [56].



Obrázek 4.9: Struktura žebrového optického vlnovodu, a) s polovodičovou Si vlnovodnou vrstvou [54], b) struktura s polymerní vlnovodnou vrstvou [55].

Rozměry jednovidového vlnovodu z obr. 4.9b lze určit pomocí vztahů 4.12, 4.13 a 4.14 [57]:

$$\frac{w}{h_f} \leq 0,3 + \frac{\frac{t}{h_f}}{\sqrt{1 - (\frac{t}{h_f})^2}} \quad (4.12)$$

$$t > \frac{h_f}{2} \quad (4.13)$$

Rozměr šírky kanálku w určíme úpravou vztahu 4.4 a v případě TE vidu dostáváme vztah:

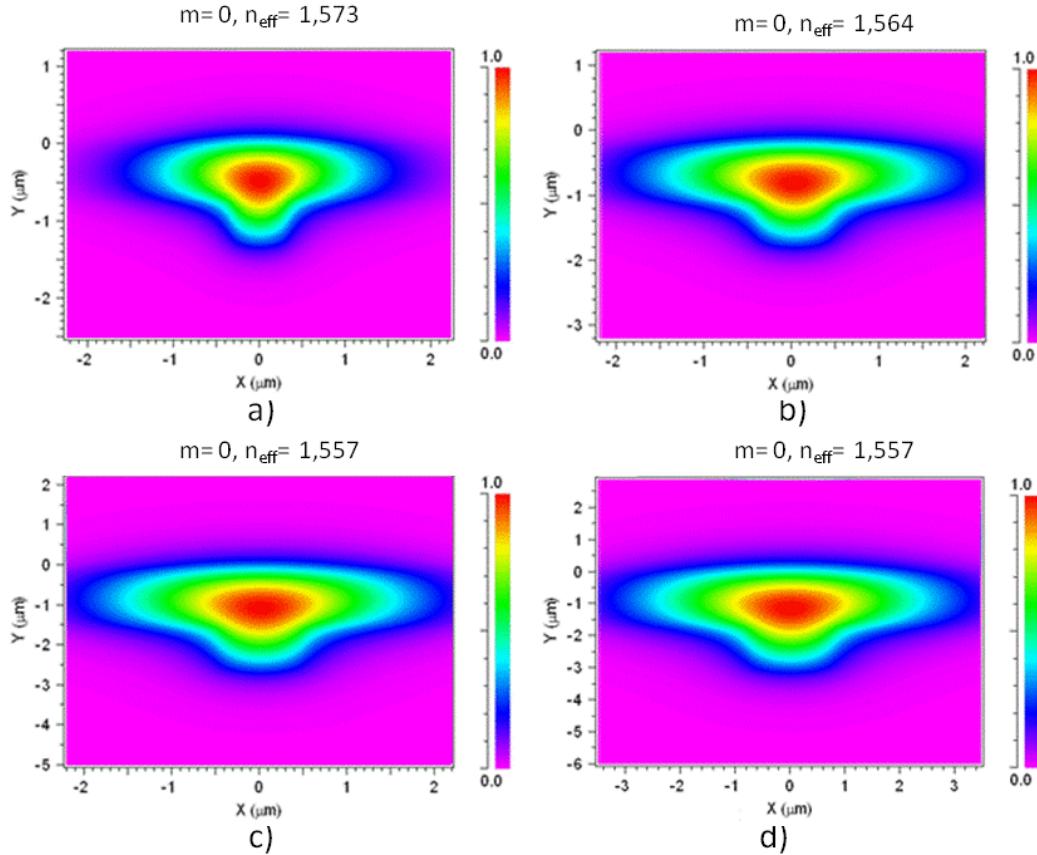
$$w_m = \frac{\lambda_t}{2\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \quad (4.14)$$

Z řešení výše zmíněných vztahů vznikne omezená množina výsledků, ze které lze pak určit rozměry jednovidového vlnovodu z obr. 4.9b. Příklad výpočtu rozměrů tohoto typu vlnovodu s vlnovodnou vrstvou Poly(methylmethacrylimide) je shrnut v Tab. 4.2. Návrhy dalších takovýchto struktur jsou popsány v [58] a [59].

Tabulka 4.2: Vypočtené rozměry polymerního žebrového vlnovodu s vlnovodnou vrstvou PMMI (viz obr. 4.9b) [55].

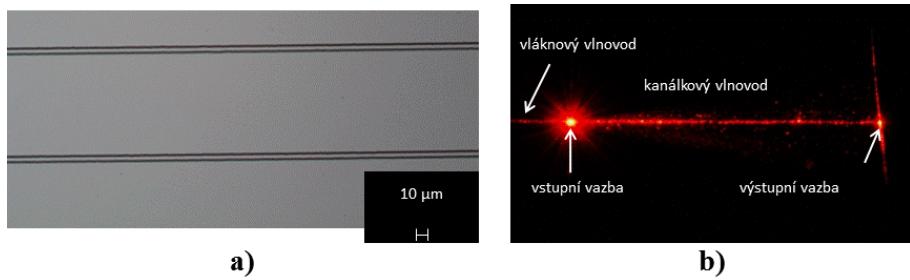
vlnová délka (nm)	mody	t (μm)	w (μm)	$h_f$ (μm)	$h_{SiO_2}$ (μm)	$h_c$ (μm)
650	TE <sub>01</sub>	0,74	0,65	1,35	0,94	1,23
	TM <sub>01</sub>	0,75	0,65	1,36	0,97	1,26
850	TE <sub>01</sub>	0,97	0,85	1,76	1,23	1,62
	TM <sub>01</sub>	0,98	0,85	1,78	1,27	1,65
1310	TE <sub>01</sub>	0,74	0,65	1,35	0,94	1,23
	TM <sub>01</sub>	0,75	0,65	1,36	0,97	1,26
1550	TE <sub>01</sub>	1,78	1,55	2,24	2,27	2,98
	TM <sub>01</sub>	1,80	1,55	2,27	2,32	3,03

Vlastnosti takto navržených vlnovodů byly dále simulovány v programu BeamPROP<sup>TM</sup> a příklad simulace pro čtyři pracovní vlnové délky ( $\lambda = 650$  nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm) je uveden na obr. 4.10.



Obrázek 4.10: Vypočítané hodnoty efektivního indexu lomu pro základní mody pro polymerní žebrový vlnovod z obr. 4.9b pro různé vlnové délky pomocí programu BeamPROP<sup>TM</sup> [55], a)  $\lambda= 650 \text{ nm}$ , b)  $\lambda= 850 \text{ nm}$ , c)  $\lambda= 1310 \text{ nm}$ , d)  $\lambda= 1550 \text{ nm}$ .

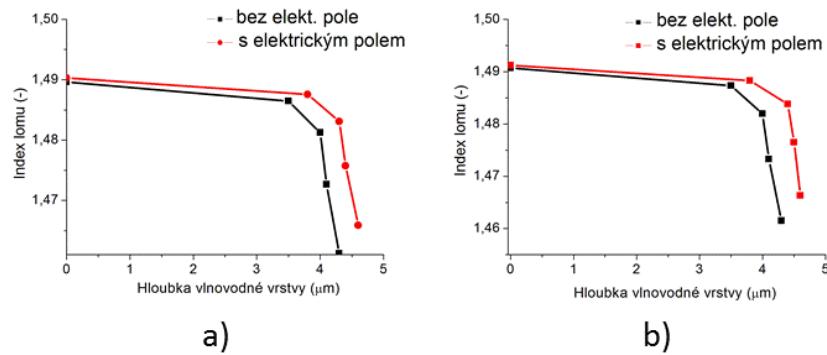
Příklad realizace takovéhoto navrženého vlnovodu je uveden na obr. 4.11. Na obr. 4.11a je fotografie takovéhoto vlnovodu a na obr. 4.11b je potom fotografie struktury, kterou prochází signál o vlnové délce 650 nm. Hodnoty optického útlumu byly nižší, než 1,1 dB/cm a nejlepší vlnovody měly hodnoty optického útlumu kolem 0,6 dB/cm na vlnových délkách 650 nm, 1,1 dB/cm na 850 nm, 0,55 dB/cm na 1310 nm a 0,30 dB/cm na vlnové délce 1550 nm [55].



Obrázek 4.11: a) Fotografie hřebenového vlnovodu PMMI, b) fotografie struktury při průchodu optického signálu 650 nm.

U podobných navržených a realizovaných struktur, ale s vlnovodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR, byly změřeny hodnoty optického útlumu nižší než 1,5 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 0,5 dB/cm pro vlnovou délku 1310 nm [56].

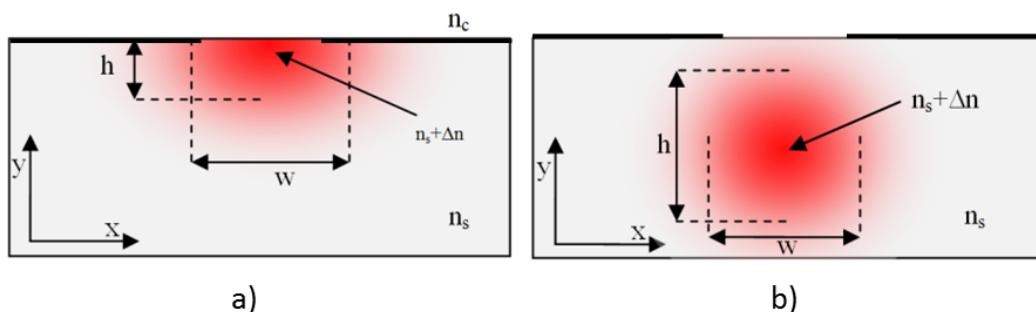
Pro výrobu kanálkových polymerních vlnovodů jsme ve spolupráci z kolegy z Ústavu inženýrství pevných látek z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze používali novou metodu, jejíž princip je založen na modifikaci indexu lomu polymerní vrstvy pomocí elektrického pole při zvýšené teplotě (viz kapitola 3.2). Takto jsme připravovali planární a kanálkové optické vlnovody z polymeru PMMA a z epoxidové pryskyřice ENR na Si podložce. Příklad průběhu indexu lomu v závislosti na hloubce pro vlnovou délku 632,8 nm změřeného pomocí vidové spektroskopie pro planární vlnovod připravený z 5% roztoku PMMA v  $C_2H_4Cl_2$  naneseným na podložku z Si/SiO<sub>2</sub> je uveden na obr. 4.12. Na obr. 4.12a je uvedena tato závislost pro TE a na obr. 4.12b pro TM vidy.



Obrázek 4.12: Hloubkový profil indexu lomu pro optický planární vlnovod z polymeru PMMA pro 632,8 nm [37], a) TE vidy, b) TM vidy.

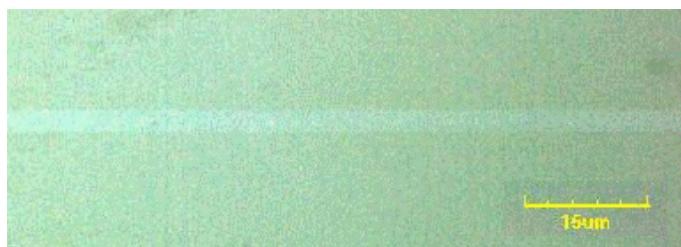
Detailnější popis návrhů, výroba a vlastnosti těchto vlnovodů jsou popsány v [34], [35], [37], [38], [60].

Kromě návrhu optických planárních vlnovodů se skokovou změnou indexu lomu byly také prováděny návrhy planárních vlnovodů s gradientním profilem indexu lomu. Byly prováděny návrhy jak pro vlnovody s jedním stupněm iontové výměny (viz obr. 4.13a), tak pro gradientní vlnovody se dvěma stupni iontové výměny (viz obr. 4.13b) [61], [62], [63].



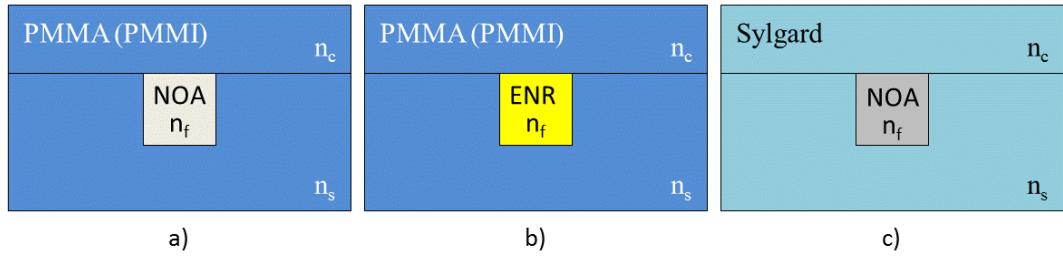
Obrázek 4.13: Planární kanálkové vlnovody s difúzním profilem indexu lomu [61], a) jednostupňová difúze b) dvoustupňová difúze.

Fotografie kanálkového vlnovodu vyrobeného difuzí do skleněné podložky je uveden na obr. 4.14. Optický útlum těchto vlnovodů i s vazební ztrátou se pohyboval kolem 0,5 dB/cm.



Obrázek 4.14: Kanálkový vlnovod vyrobený pomocí difúze.

Kromě jednovidových vlnovodů se skokovým a gradientním indexem lomu 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  $\mu\text{m}$  (průměr jádro/pláště). Na obr. 4.15 jsou uvedeny struktury těchto navržených vlnovodů.



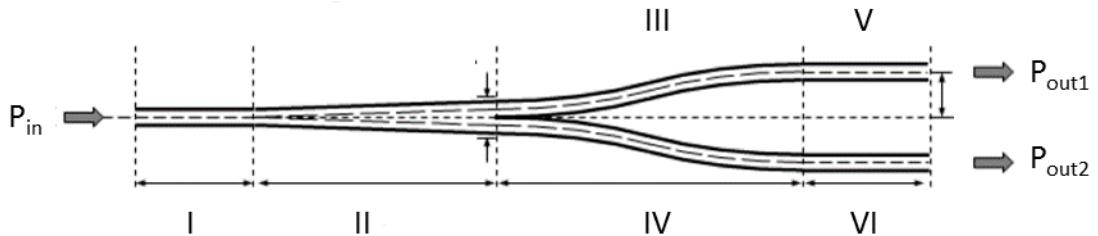
Obrázek 4.15: Struktury navržených mnohavidových planárních optických vlnovodů pro struktury s POF vstupními/výstupními vlnovody, a) struktura PMMA(PMMI)/NOA, b) struktura PMMA(PMMI)/ENR, c) struktura Sylgard/NOA.

Na obr. 4.15a je uvedena struktura, kterou tvoří podložka z polymeru Polymethylmethakrylátu (PMMA), nebo Poly(methylmethacrylimide) (PMMI) a vlnovodná vrstva je pak tvořena různými druhy polymeru Norland Optical Adhesive (NOA) od firmy APM Technica GmbH. Na obr. 4.15b je uvedena struktura, kterou tvoří opět podložka z polymeru PMMA, nebo PMMI a vlnovodná vrstva je pak tvořena polymerem z epoxidové pryskyřice ENR. Poslední příklad je uveden na obr. 4.15c, kde vlnovodná vrstva je tvořena polymerem NOA a substrát a krycí vrstva je ze silikonového gelu Sylgard 184 od firmy ELCHEMCo.

## 4.2 Děliče optického výkonu

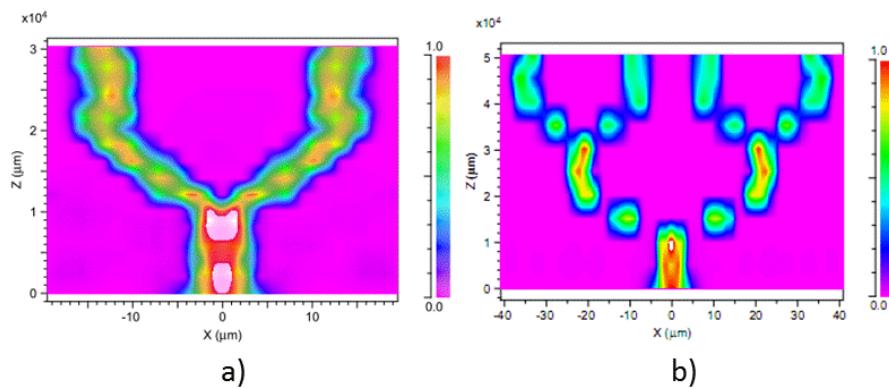
Základní a klíčovou fotonickou strukturou, která je používaná ve všech optických sítích, je optická Y rozbočnice, která slouží k rozdělení optických signálů z jednoho vstupního do dvou nebo více výstupních vlnovodů. V laboratoři PLANIO jsme navrhovali polymerní optické rozbočnice, kde byla použita vlnovodná vrstva z epoxidové pryskyřice ENR. Při návrhu rozbočnice s jedním vstupním a dvěma výstupními optickými vlnovody jsme vycházeli z návrhu popsaného v [64]. Návrh takovéto rozbočnice spočívá v rozdělení struktury na segmenty, a to vstupní vlnovod (I), na který je pak připojena tzv. taperovaná část (II). Tato část se rozšiřuje ve směru šíření optického signálu a je vyústěna do dvou kanálkových vlnovodů ve tvaru S, a to do levého kanálkového vlnovodu (III) a pravého kanálkového vlnovodu (IV). Tyto S vlnovody jsou pak zakončeny levým (V) a pravým výstupním (VI) vlnovodem. Geometrické rozměry každé části jsou opti-

malizovány a ve výsledku vytvoří strukturu s optimalizovanými parametry. Navrhovaná struktura 1x2Y rozbočnice je uvedena na obr. 4.16.



Obrázek 4.16: Struktura symetrické 1x2Y optické rozbočnice zobrazující jednotlivé segmenty, ze kterých je složena a která byla použita pro návrh polymerních děličů výkonu [64].

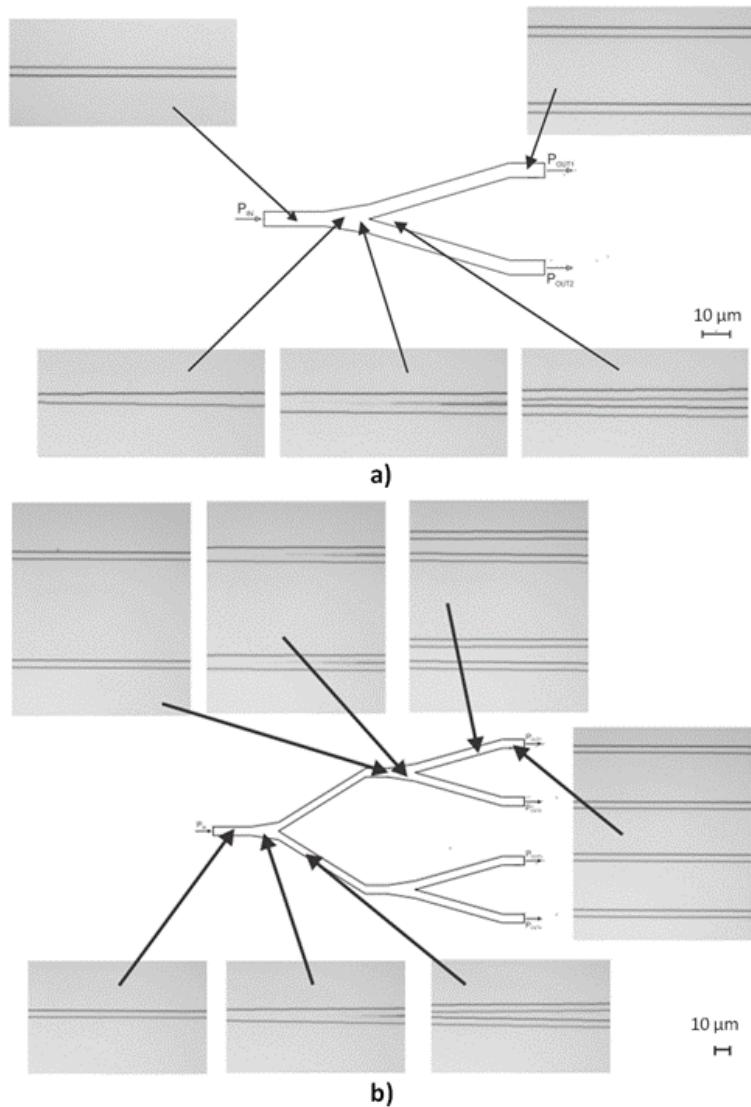
Příklady výsledků počítačových návrhů optických polymerních rozbočnic jsou uvedeny na obr. 4.16. Návrh byl prováděn pomocí metody BPM pomocí počítačové simulace za použití softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> od fy RSoft Design Group, Inc. Výsledky těchto návrhů jsou detailněji popsány v [65], [66].



Obrázek 4.17: Výsledek simulace optimalizované struktury optické polymerní rozbočnice, a) struktura 1x2Y, b) struktura 1x4Y [64].

Tyto navrhované struktury byly tvoreny z epoxidové pryskyřice ENR na podložce z Si s mezivrstvou SiO<sub>2</sub>. Horní krycí vrstva byla z polymeru PMMA (viz struktura na obr. 4.4b). Na obr. 4.16a je uvedena simulace pro rozbočnici s jedním vstupním a dvěma výstupními vlnovody. Na obr. 4.16b je uvedena simulace pro rozbočnici s jedním

vstupním a čtyřmi výstupními vlnovody. Fotografie vyrobených rozbočnic jsou pak uvedeny na obr. 4.18.



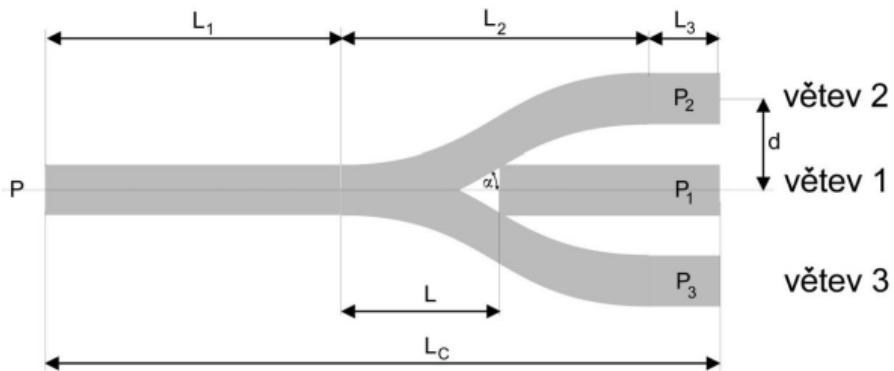
Obrázek 4.18: Fotografie vyrobených rozbočnic [66],

a) struktura 1x2Y, b) struktura 1x4Y.

Kromě návrhu kaskádních symetrických rozbočnic se sudým počtem výstupních vlnovodů jsme navrhovali polymerní rozbočnice s jedním vstupním a třemi výstupními optickými vlnovody. Nevýhodou kaskádního řazení je, že v případě většího množství výstupních vlnovodů bude mít tato struktura velké rozměry. Dále pak tento postup neumožní realizací symetrické dělení optického výkonu u děličů s lichým počtem výstupních vlnovodů. Například u rozbočnice se třemi výstupními vlnovody bude většina optického

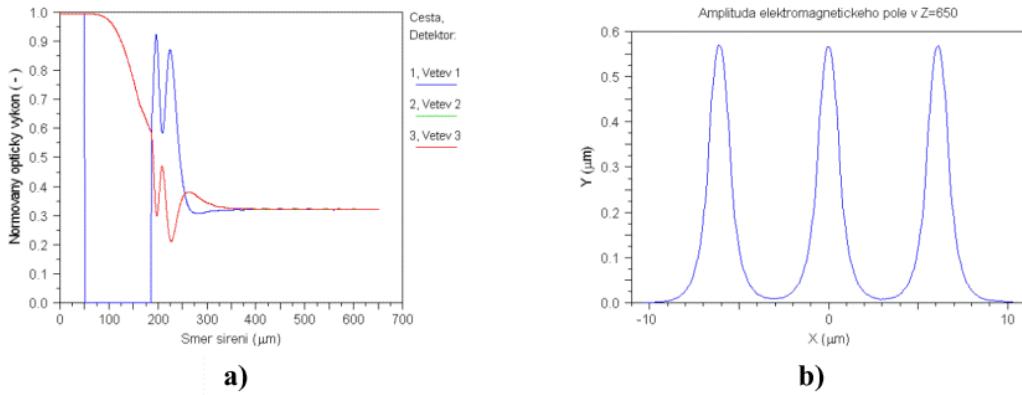
výkonu soustředěna v prostředním výstupním vlnovodu. Při návrhu struktury se třemi výstupními vlnovody, která umožní symetrické dělení optického výkonu, jsme vycházeli z prací, které popisují tyto rozbočnice realizované pomocí iontové výměny do optických skel nebo krystalů [67], [68], [69], [70].

Symetrické rozdělení optického výkonu je dosaženo vložením oblasti trojúhelníkového tvaru s nižší hodnotou indexu lomu, než je index lomu vlnovodné vrstvy. V případě správného navržení této trojúhelníkové oblasti dojde k rovnoměrnému rozdělení optického signálu do všech třech výstupních vlnovodů. Popis takového symetrického dělení optického výkonu na polymerních strukturách nebylo doposud popsáno. Obrázek nám navržené struktury je uveden na obr. 4.19. Tato struktura byla stejně jako v případě 1x2Y optických rozbočnic navržena pro vlnovodnou vrstvu z epoxidové pryskyřice ENR na podložce z Si s mezivrstvou  $\text{SiO}_2$ . Horní krycí vrstva byla z polymeru PMMA (viz struktura na obr. 4.4b).



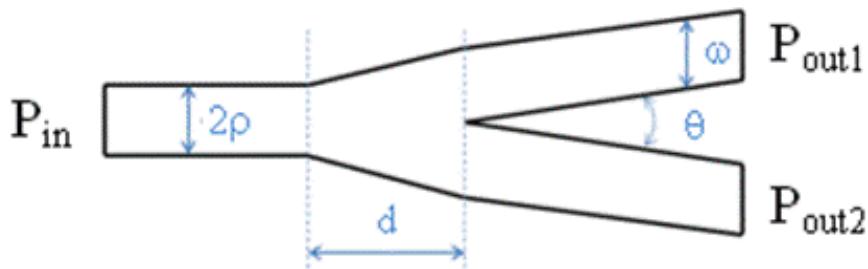
Obrázek 4.19: Struktura navrhované 1x3Y symetrické optické rozbočnice [71], [72].

Výsledek simulace optimalizované struktury je uveden na obr. 4.20. Na obr. 4.20a je uvedeno šíření optického signálu strukturou pro vlnovou délku 1310 nm, kde šíření signálů levým (větev 2 - zelená čára) a pravým (větev 3 - červená čára) výstupním vlnovodem je symetrické, a proto se na obr. 4.20a tyto průběhy překrývají. Na obr. 4.20b je uvedena amplituda na výstupu struktury. Z obrázku je patrné, že na výstupu struktury dojde k symetrickému rozdělení optického signálu. Detailní návrh této struktury je popsán v [50], [71], [72].



Obrázek 4.20: Výsledek simulace optimalizované rozbočnice 1x3, a) šíření optického signálu strukturou, b) amplituda optického signálu na výstupu struktury [72].

Kromě výše popsaných jednovidových optických rozbočnic jsme navrhovali optické děliče výkonu s velkým rozměrem vlnovodné vrstvy. Navrhovali jsme a realizovali struktury, které umožní připojení optického signálu pomocí standardních plastových vláken POF (Plastic Optical Fiber), kde vlnovodná vrstva má průměr  $980 \mu\text{m}$  a průměr pláště je pak  $1000 \mu\text{m}$ . Základní návrh těchto pasivních struktur jsme prováděli podle modelu, který vytvořil pan Belrami [73], a tento návrh byl pak upřesněn pomocí počítačové simulace. Pro optimalizaci těchto mnohavidových struktur jsme používali metodu Ray tracing za pomocí programu Opticad 10 a metodu BPM za použití softwaru BeamPROP<sup>TM</sup>. Struktura navrhované 1x2Y rozbočnice je uvedena na obr. 4.21.



Obrázek 4.21: Struktura navrhované 1x2Y symetrické optické rozbočnice s velkým průměrem vlnovodné vrstvy.

Návrh geometrických rozměrů vychází z rovnic 4.15, 4.16, 4.17 odvozených v [73]. Maximální úhel  $\theta$  mezi výstupními rameny je vyjádřen vztahem:

$$\theta \leq \arcsin \left\{ \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{n_f} \right\} \quad (4.15)$$

kde  $n_f$  je index lomu vlnovodné vrstvy a  $n_s$  je index lomu podložky. Minimální délka střední taperované části  $d$  je popsána vztahem:

$$D = \frac{d \cdot \sin \Omega}{\rho(2 - \cos \Omega)} \quad (4.16)$$

kde  $D$  je normovaná délka a  $\Omega$  je úhel, který je popsán vztahem:

$$\Omega \leq \frac{\theta \cdot D}{D + 1} \quad (4.17)$$

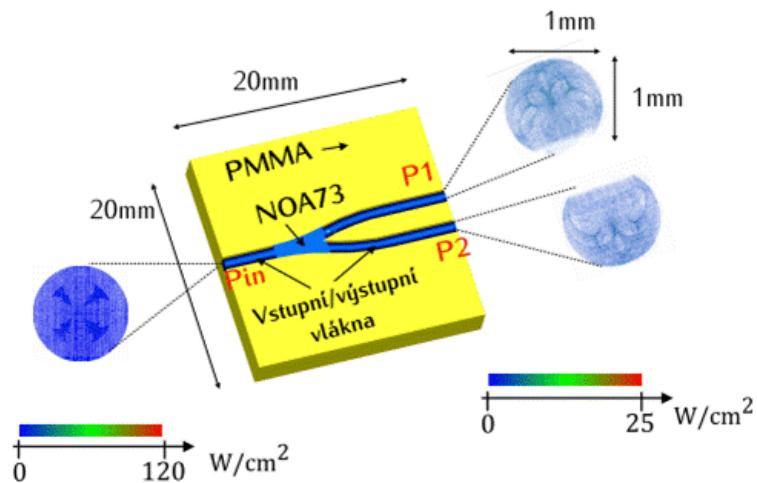
$\Omega$  je poloviční hodnota kritického úhlu,  $\rho = w/2$  a  $w$  je šířka vlnovodné vrstvy.

Pro návrh struktur pomocí metody Ray tracing je důležitá podmínka, která je popsána v [74]:

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (4.18)$$

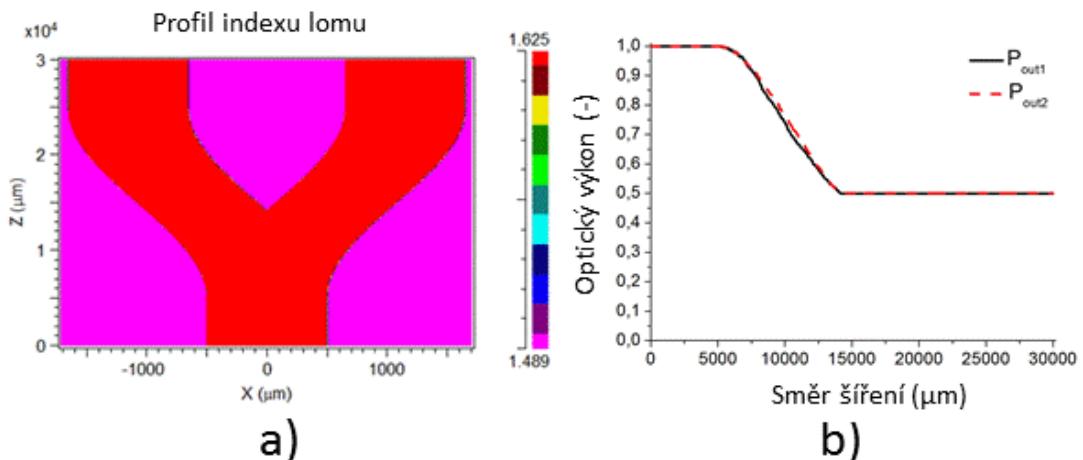
Parametr  $V$  je označován jako frekvence vlnovodu, a pokud je tento parametr mnohem větší než 1 ( $V \gg 1$ ), pak lze takovou strukturu navrhovat pomocí metody Ray tracing.

Metodou Ray tracing jsme navrhovali odbočnici s jedním vstupním a dvěma výstupními vlnovody, nebo s jedním vstupním a čtyřmi výstupními vlnovody, kde je podložka z polymeru PMMA, nebo z PMMI a vlnovodná vrstva je pak tvořena různými druhy polymeru NOA, nebo polymerem z epoxidové pryskyřice ENR. Příklad návrhu struktury na podložce PMMA a vlnovodné vrstvy NOA73 ze softwaru Opticad 10 je uveden na obr. 4.22. Návrhy optických mnohavidových rozbočnic modelovaných metodou Ray tracing jsou uvedeny v [32], [75].



Obrázek 4.22: Návrh mnohavidové rozbočnice PMMA/NOA73 v softwaru Opticad 10 [32].

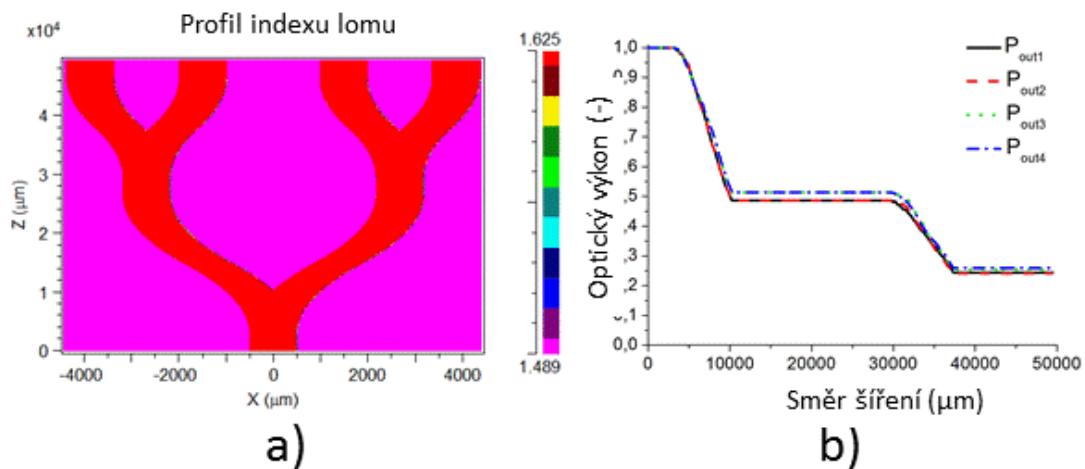
Ukázka návrhu optické mnohavidové rozbočnice s jedním vstupním a dvěma výstupními vlnovody pomocí metody BPM pomocí programu BeamPROP<sup>TM</sup> je na obr. 4.23.



Obrázek 4.23: Návrh mnohavidové rozbočnice 1x2Y z polymerních materiálů PMMA/NOA1625 v softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ), a) profil indexu lomu optimalizované struktury, b) šíření optického signálu strukturou.

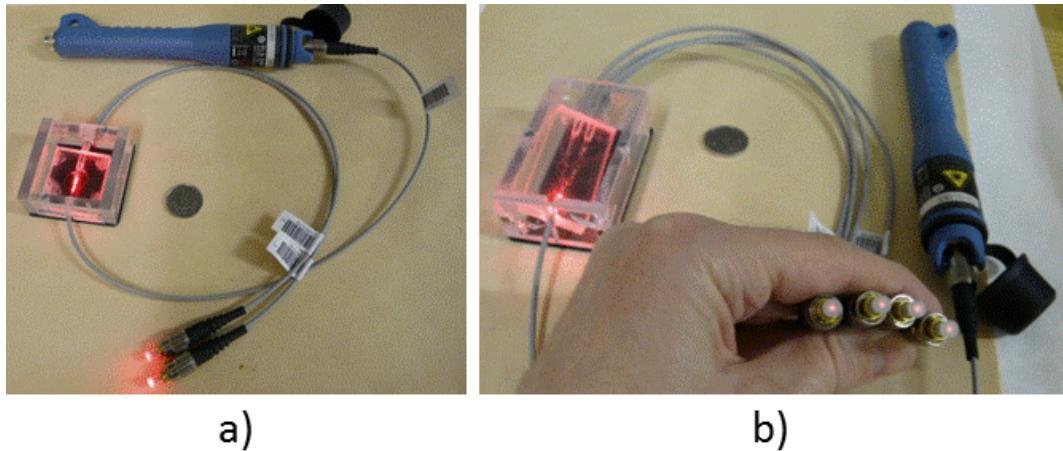
Ukázka návrhu optické mnohavidové rozbočnice s jedním vstupním a čtyřmi výstupními vlnovody pomocí stejného postupu je uvedena na obr. 4.24. U obou struktur je použita

podložka a horní krycí vrstva z polymeru PMMA a vlnovodná vrstva je pak z materiálu NOA1625.



Obrázek 4.24: Návrh mnohavidové rozbočnice 1x4Y z polymerních materiálů PMMA/NOA1625 v softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ), a) profil indexu lomu optimalizované struktury, b) šíření optického signálu strukturou.

Ukázky funkčních vzorků optických mnohavidových rozbočnic se vstupními/výstupními POF vlákny jsou uvedeny na obr. 4.25. Na obr. 4.25a je uveden funkční vzorek s jedním vstupním a dvěma výstupními POF vlákny (Identifikace záznamu v databázi VVVS 197275). Na obr. 4.25b je uveden funkční vzorek s jedním vstupním a čtyřmi výstupními POF vlákny (Identifikace záznamu v databázi VVVS 197276). Obě struktury jsou realizovány na podložce z polymeru PMMA a vlnovodná vrstva je z polymeru NOA.



Obrázek 4.25: Fotografie vyrobených optických planárních rozbočnic s POF vlákny, a) struktura 1x2 Y, b) struktura 1x4 Y.

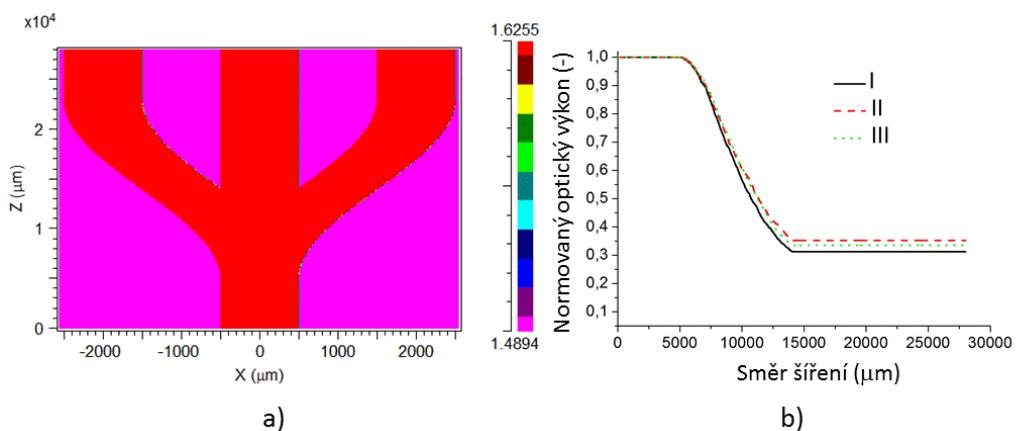
Nejlepší struktura s jedním vstupním a dvěma výstupními vlnovody, měla vložný optický útlum 2,7 dB pro  $\lambda = 532,8$  nm; 4,1 dB pro  $\lambda = 650$  nm; 4,5 dB pro  $\lambda = 850$  nm a bylo dosaženo dělícího poměru optického výkonu 52:48. U vzorků byl také testován přenos dat pomocí přepínačů (KCD-303P-A2) s konvertory na elektrický/optický signál (KTI Networks) při připojení do internetové sítě s přenosovou rychlosťí 100 Mb/s a bylo dosaženo maximální možné přenosové. Struktura se čtyřmi výstupními vlnovody měla vložný optický útlum 14,7 dB pro  $\lambda = 532,8$  nm; 17,6 dB pro  $\lambda = 650$  nm; 13,9 dB pro  $\lambda = 850$  nm. Návrh, výroba a vlastnosti těchto mnohavidových struktur s velkým průměrem vlnovodné vrstvy jsou podrobněji popsány v [31], [32], [33], [76].

Pro návrh optických rozbočnic se vstupními/výstupními POF vlákny jsme také testovali nové druhy optických materiálů, u kterých by bylo možno dosáhnout většího kontrastu indexu lomu mezi vlnovodnou vrstvou a podložkou/krycí vrstvou. Proto jsme navrhli optickou rozbočnici s podložkou ze silikonového gelu Sylgard 184 a vlnovodnou vrstvou NOA1625. Díky kombinaci těchto dvou materiálů můžeme dosáhnout kompaktnějších rozměrů vlnovodné struktury. Tento návrh byl zapsán v roce 2013 jako užitný vzor pod číslem 25538 na Úřadu průmyslového vlastnictví.

Kromě symetrických rozbočnic s velkým průměrem vlnovodné vrstvy kompatibilní s POF vlákny s jedním vstupním a dvěma nebo čtyřmi výstupními vlnovody jsme navrhli a realizovali rozbočnici se třemi výstupními vlnovody. Tato struktura byla navržena tak, aby se optický signál z jednoho vstupního POF vlákna symetricky rozdělil do třech výstupních POF vláken. Při návrhu těchto struktur jsme vycházeli ze zkušeností s návrhem

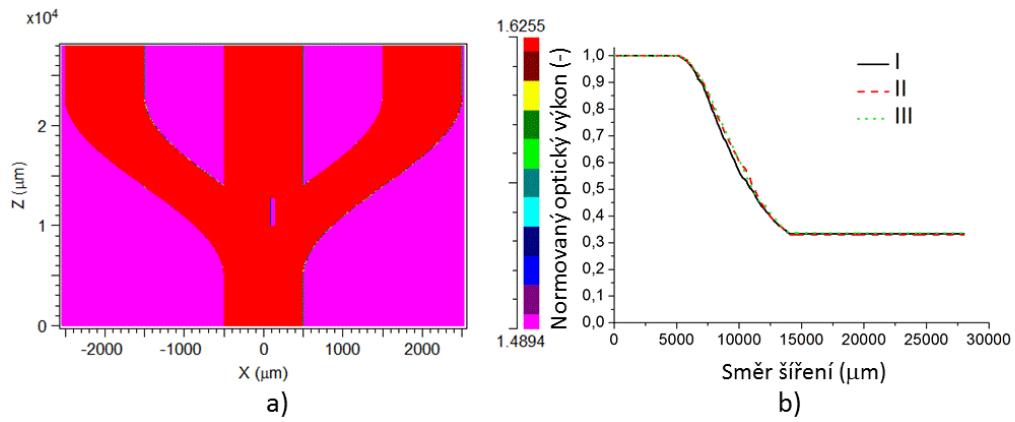
jendovidových struktur se třemi výstupními vlnovody, kde bylo symetrického rozdělení optického výkonu dosaženo vložením oblasti trojúhelníkového tvaru s nižší hodnotou indexu lomu, než je index lomu vlnovodné vrstvy [72]. Příklad návrhu těchto mnohavidových struktur je uveden na obr. 4.26 a obr. 4.27.

V případě, že střední taperovaná část se rozdělí do třech výstupních vlnovodů, je větší část optického výkonu vedena prostředním výstupním vlnovodem (viz obr. 4.26). Na obr. 4.26a je profil indexu lomu struktury s jedním vstupním a třemi výstupními vlnovody. Na obrázku obr. 4.26b je simulace průchodu optického signálu strukturou. Signál, který prochází středním vlnovodem je označen červenou přerušovanou čarou a je zde patrné, že přenášený optický výkon tímto vlnovodem je vyšší, než přenášený optický výkon bočních vlnovodů.



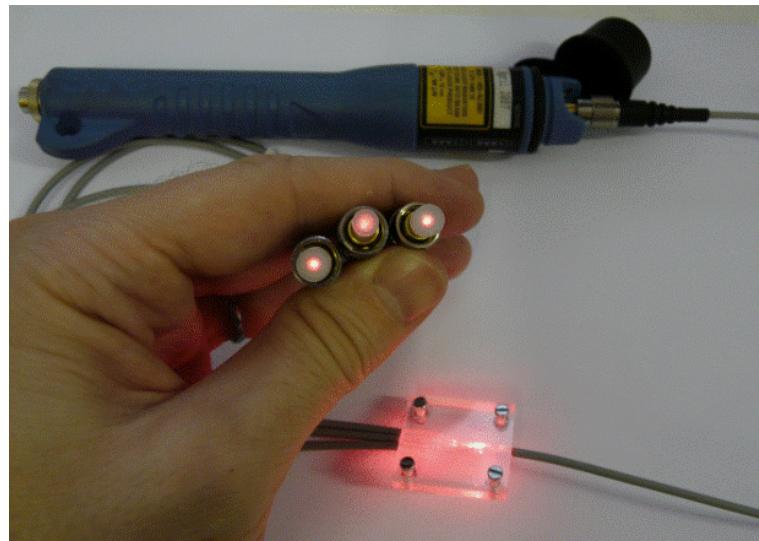
Obrázek 4.26: Výsledek simulace struktury 1x3Y z materiálů PMMA/NOA ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ), a) profil indexu lomu, b) šíření optického signálu strukturou.

Na obr. 4.27a je uveden profil indexu lomu námi navržené struktury, kde do taperované části je vložena obdélníková oblast s nižší hodnotou indexu lomu, než má okolní vlnovodná vrstva. Tato obdélníková oblast způsobí rovnoměrné rozdělení optického výkonu do všech třech výstupních vlnovodů (viz obr. 4.27b). Na tuto strukturu byla podána žádost o zápis na vynález pod číslem PV 2013-56 a byl také zapsán jako užitný vzor pod číslem 25535 na Úřadu průmyslového vlastnictví.



Obrázek 4.27: Výsledek simulace struktury 1x3Y PMMA/NOA s obdélníkovou oblastí v taperované části ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ ),  
a) profil indexu lomu, b) šíření optického signálu struktury.

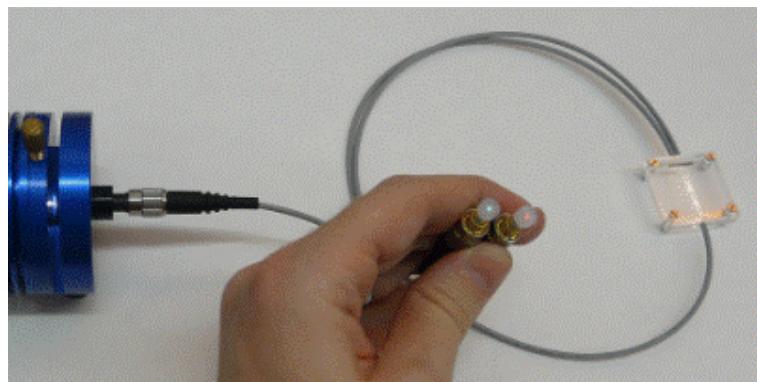
Na obr. 4.28 je uvedena fotografie jedné z prvních optických rozbočnic se třemi výstupními vlnovody při průchodu signálu o vlnové délce 635 nm. V současnosti probíhá optimalizace výrobního procesu této struktury.



Obrázek 4.28: Fotografie vyrobené 1x3 Y struktury s obdélníkovou oblastí v taperované části při průchodu signálu o vlnové délce 635 nm.

Kromě optických rozbočnic popsaných výše byly navrženy a realizovány i vlnově se-

lektivní mnohavidové rozbočnice. Při realizaci těchto rozbočnic jsme vyšli z návrhu mnohavidových 1x2Y rozbočnic a tyto struktury jsme ve výstupních vlnovodech doplnili o plastové filtry. Na obr. 4.29 je fotografie realizované vlnově selektivní rozbočnice připojené pomocí standardních POF vláken. Struktura je připojena na širokopásmový zdroj a z obr. 4.29 je patrné, že v jednom výstupním vlnovodu je veden optický signál o vlnové délce 650 nm (červené světlo) a v druhém výstupním vlnovodu je veden jen signál o vlnové délce 532 nm (zelené světlo). Přenášené spektrum je dáno typem použitých optických filtrů. Tato struktura byla zapsána jako užitný vzor pod číslem 25454 na Úřadu průmyslového vlastnictví a v současnosti probíhá optimalizace výroby těchto rozbočnic.



Obrázek 4.29: Fotografie vlnově selektivní optické mnohavidové rozbočnice 1x2Y s plastovými filtry při průchodu širokopásmového optického signálu.

### 4.3 Struktury s multividovou interferencí

Jak již bylo řečeno, tak optické rozbočnice jsou základním stavebním kamenem pro většinu fotonických struktur. Optické rozbočnice popsané v předchozí kapitole umožní rozdělení optického výkonu z jednoho vstupního do dvou výstupních vlnovodů popřípadě pomocí kaskádního řazení Y rozbočnic lze realizovat i strukturu s větším počtem výstupních vlnovodů. Takovéto řešení umožňuje také přenos větší spektrální šířky optického signálu, ale nevýhodou této struktury jsou její větší rozměry. Proto jsme také navrhovali alternativní struktury, které pracují na principu mnohavidové interference MMI (Multi-mode Interference). Výhodou této struktury je, že umožňuje realizaci odbočnic s větším množstvím výstupních vlnovodů, a to jak se sudým, tak i s lichým počtem. Další výhodou

jsou kompaktnější rozměry takovýchto struktur, které umožňují i realizaci vlnově selektivních rozbočnic. Nevýhodou je, že struktury pracují jen na pracovních vlnových délkách, na které je interferenční část naladěna. To znamená, že tyto struktury neumožňují přenášet optický signál s větší šířkou spektra.

Optické rozbočnice s multividovou interferencí se skládají ze vstupního jednovidového optického vlnovodu, za tímto vstupním vlnovodem následuje interferenční část, která je navržena tak, aby podporovala šíření optického signálu s větším počtem vidů ve směru šíření. Do hloubky vlnovodná vrstva v této interferenční části zůstává jednovidová. Počet výstupních vlnovodů závisí na požadované realizaci rozbočnice a je možné takto, jak již bylo řečeno, realizovat i vlnově selektivní strukturu (demultiplexer) a výstupní počet vlnovodů může být jak sudý, tak lichý. Jednovidový optický signál tedy vstupuje z jednovidového vlnovodu do interferenční části, kde dojde k vybuzení vyššího počtu vidů a je zde možné pozorovat přizpůsobení vstupního elektromagnetického pole z jednovidového vlnovodu k multividovému a vznik tzv. zobrazovacího efektu, Self - Imaging Effect. Tento jev spočívá v rozložení elektromagnetického pole ze vstupního jednovidového vlnovodu do mnohavidové interferenční části. V interferenční části lze tedy pozorovat vznik interferenčních zobrazení ve směru šíření signálu skládajících se z opakujících se přímých, zrcadlených a násobných zobrazení. V interferenční části rozbočnice se každý vid šíří různou fázovou rychlostí, a proto je elektromagnetické pole ve směru šíření optického signálu superpozicí všech vidů. Při vhodně zvolené šířce a délce této interferenční části dojde tedy pro danou vlnovou délku k symetrickému rozdělení optického signálu. Nevýhodou této metody je, že ji lze použít jen pro struktury pracující s jednovidovým signálem a symetricky rozděluje signál jen pro jednu danou vlnovou délku, na kterou je interferenční část naladěna. Tohoto principu nelze tedy využít pro rozdělení mnohavidových optických signálů, protože tyto mnohavidové vlnovody přenáší několik desítek, stovek až tisíc vidů, jejichž rozložení elektromagnetického pole se výrazně liší. Princip mnohavidové interference (MMI) byl popsán v [77] a MMI část lze popsat podmínkou:

$$E(x, z) = \sum_{m=0}^{M-1} c_m(x) \psi_m(x) \exp \left[ jm(m+2) \frac{\pi \cdot z}{L_{mmi}} \right] \quad (4.19)$$

kde  $E(x, z)$  je elektromagnetické pole,  $z$  je směr šíření,  $x$  je směr kolmý na směr šíření  $c_m$  a  $\psi_m$  jsou koeficienty budícího pole a číslo  $m$  označuje počet vidů. Konstanta šíření  $\beta_m$  je definována vztahem:

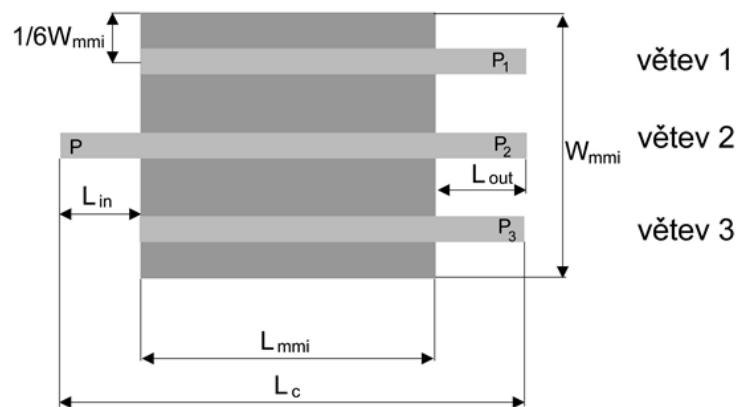
$$\beta_m = nk_0 - \frac{(m+1)^2 \pi \lambda_0}{4nW_{mmi}^2} \quad (4.20)$$

kde  $n$  je index lomu,  $k_0$  je vlnové číslo,  $\lambda_0$  je vlnová délka a  $m$  je m-tý vid. Tzv. rekom-binační délka  $L_r$  označuje vzdálenost, kde se objeví stejný optický výkon jako na vstupu, a její přibližnou hodnotu lze určit ze vztahu:

$$L_r \approx \frac{3\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_{ef}W_{ef}^2}{\lambda_0} \quad (4.21)$$

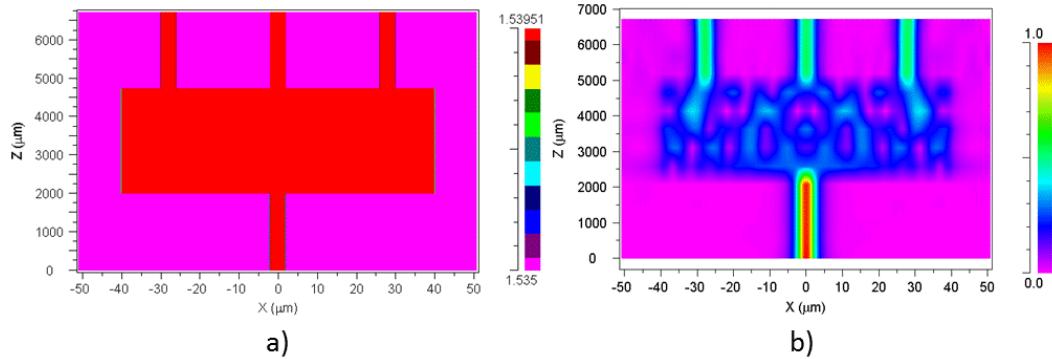
kde  $\beta_0$  a  $\beta_1$  jsou konstanty šíření pro nultý resp. první vid,  $n_{ef}$  je hodnota efektivního indexu lomu a  $W_{ef}$  je efektivní šířka mnohovidové oblasti rozbočnice.

Struktura optické rozbočnice s multividovou interferencí s jedním vstupním a třemi výstupními optickými vlnovody je uvedena na obr. 4.30.



Obrázek 4.30: Struktura optické rozbočnice s multividovou interferencí se třemi výstupními vlnovody.

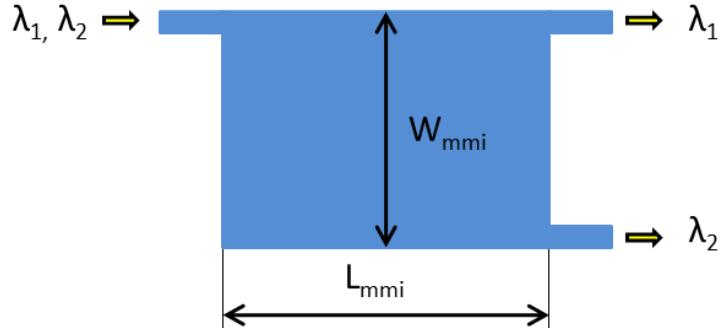
Výsledek simulace optimalizované struktury s vlnovodnou vrstvou Ormocore a oddělu-jící vrstvou Ormoclad, kde indexy lomu použitých optických materiálu jsou zvoleny tak, aby rozměr jednovidového optického vlnovodu byl  $4 \mu\text{m}$  (viz obr. 4.4d), je uvedena na obr. 4.31. Na obr. 4.31a je uveden profil indexu lomu struktury a na obr. 4.31b je uvedeno šíření optického signálu touto strukturou. Výsledky návrhů a simulací struktur optických rozbočnic s multividovou interferencí jsou popsány např. v [47], [71], [72].



Obrázek 4.31: Struktura optické rozbočnice s multividovou interferencí,

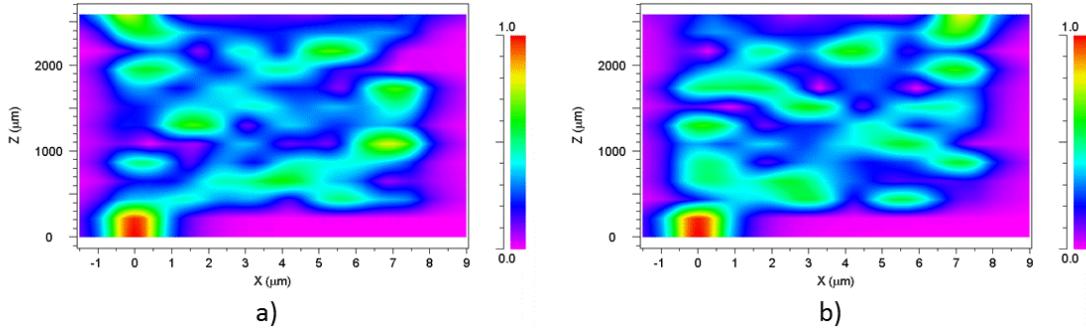
a) profil indexu lomu z pohledu shora, b) šíření optického signálu strukturou ( $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ).

Jak již bylo řečeno, tak lze pomocí MMI struktur realizovat vlnově selektivní optické děliče (demultiplexory). Příklad takovéhoto demultiplexoru je uveden na obr. 4.32.



Obrázek 4.32: Struktura optického demultiplexoru s multividovou interferencí.

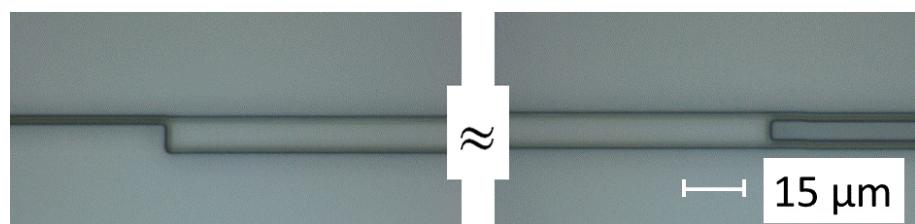
V literatuře byla popsána řada takovýchto struktur realizovaných pomocí polovodičových materiálů [78], [79]. Jen několik málo prací prezentovalo tyto struktury z polymerních materiálů. V našem případě jsme navrhli například demultiplexory, které pracují s vlnovými délkami 1310/1550 nm, 1490/1555 nm apod. Výsledek simulace optimalizované struktury optického demultiplexoru s vlnovodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR na substrátu Si/SiO<sub>2</sub> a horní krycí vrstvou z polymeru PMMA je uveden na obr. 4.33.



Obrázek 4.33: Šíření optického signálu demultiplexorem 1490x1555 nm,  
a)  $\lambda = 1490$  nm, b)  $\lambda = 1555$  nm.

Tato navržená struktura pracuje s vlnovými délkami 1490/1555 nm a postup návrhu takovéto struktury byl následující: Nejdříve jsme navrhli geometrické rozměry vstupních a výstupních vlnovodů tak, aby byly jednovidové pro daný použitý materiál a pro použité vlnové délky. Dále byly optimalizovány rozměry interferenční části tak, aby bylo dosaženo rozdělení optických signálů s co největší účinností. Například pro strukturu Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA byly určeny rozměry vstupního a výstupních vlnovodů pro vlnové délky 1490 nm a 1555 nm tak, aby byly jednovidové pro obě tyto vlnové délky ( $h_1 = 1,28 \mu\text{m}$  - výška vlnovodu,  $w = 1,48 \mu\text{m}$  - šířka vlnovodu). Dále byly pomocí počítačové simulace určeny rozměry interferenční části ( $W_{mmi} = 8,4 \mu\text{m}$  - šířka MMI části a  $L_{mmi} = 2191 \mu\text{m}$  - délka MMI části). Výsledek 3D simulace ukázal, že přenos energie pro signál o vlnové délce 1490 nm byl 56,7% a pro signál o vlnové délce 1555 nm přenos energie byl 57,9%. Přeslechy pro signál 1490 nm byly 4,5% a pro signál o vlnové délce 1555 nm byly přeslechy 6,8%. Vlastnosti těchto struktur byly popsány v [80], [81].

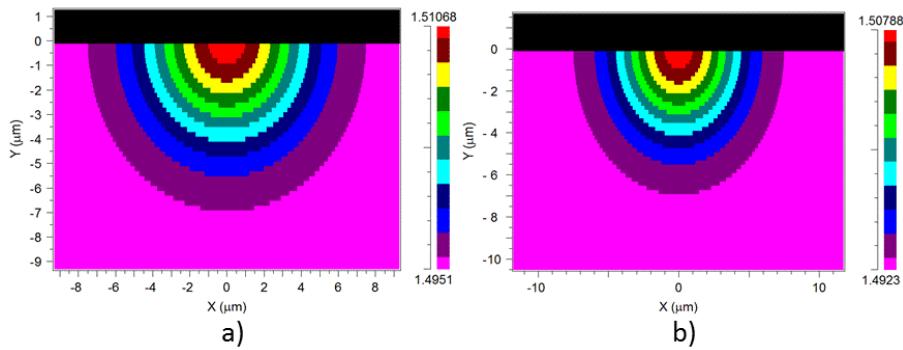
Fotografie vyrobené struktury na Fyzikálním ústavu AV ČR, v. v. i. pomocí elektro-nové litografie je uvedena na obr. 4.34.



Obrázek 4.34: Fotografie optického demultiplexoru 1490/1555 nm vyrobeného pomocí elektronové litografie.

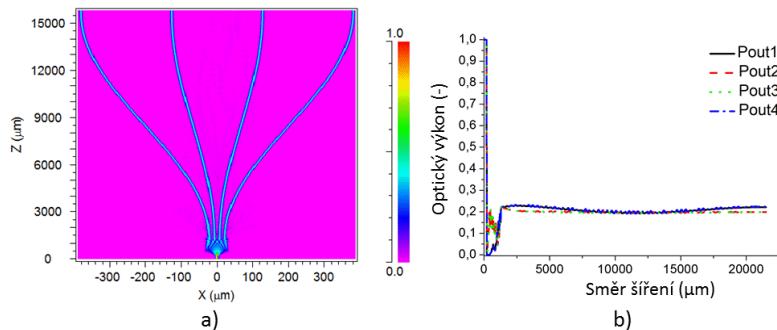
Výše navržené struktury jsou z polymerních materiálů, kde vlnovodná vrstva má skokovou změnu indexu lomu. Kromě těchto polymerních struktur jsme také navrhovali ve spolupráci s firmou SQS Nová Paka a.s. struktury s multividovou interferencí na skleněných podložkách s gradientním indexem lomu. Návrh a realizace těchto struktur je velice aktuální téma a v současnosti struktury pracující na principu mnohavidové interference s optickými vlnovody s gradientním indexem lomu popsalo jen několik málo vědeckých skupin [82], [83], [84], [85].

Návrh těchto MMI struktur byl proveden pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm pro vlnovody připravené pomocí jednostupňové difúze  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ . Profily indexu lomu použité pro návrh kanálkových gradientních vlnovodů jsou uvedeny na obr. 4.35.



Obrázek 4.35: Model profilu indexu lomu kanálkových vlnovodů,  
a)  $\lambda = 1310 \text{ nm}$ , b)  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  [61].

Příklad ukázky návrhu struktury s multividovou interferencí s jedním vstupním a čtyřmi výstupními vlnovody s gradientním indexem lomu je uveden na obr. 4.36 [61].

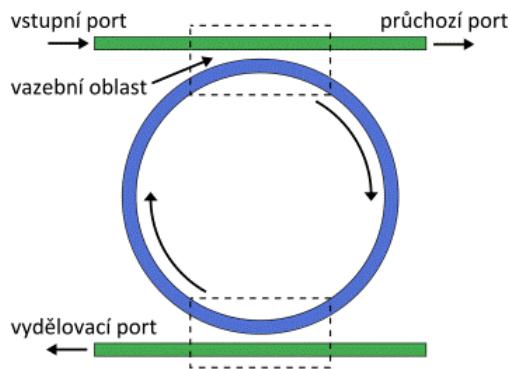


Obrázek 4.36: a) Simulace šíření optického signálu rozbočnicí s multividovou interferencí se čtyřmi výstupními vlnovody, b) rozdělení energie do výstupních rámén ( $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ) [61].

Další návrhy těchto struktur jsou popsány v [62], [63], [86]. Kromě děličů optického výkonu a demultiplexorů jsme také navrhovali planární optické triplexery, které využívají principu mnohavidové interference. Optické triplexery pracují se třemi optickými signály a těmto strukturám je věnována samostatná kapitola (viz kap. 4.5).

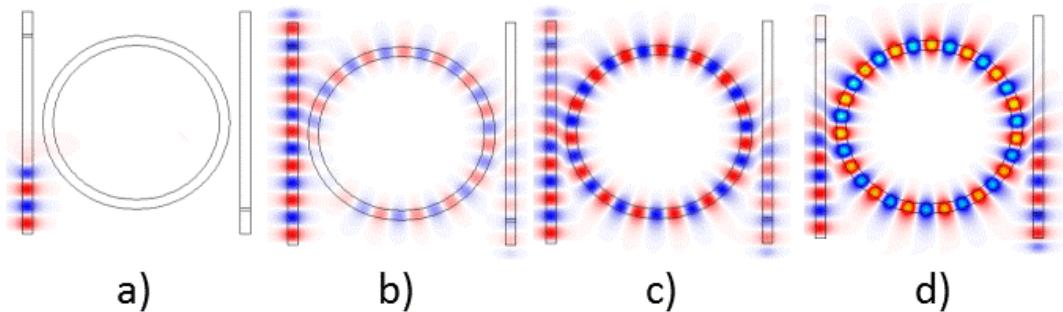
## 4.4 Optické mikrorezonátory

Optické mikrorezonátory 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. Optický mikrorezonátor lze také použít pro laserové aplikace [87], [88], [25]. Struktura optického mikrorezonátoru je uvedena na obr. 4.37.



Obrázek 4.37: Struktura optického mikrorezonátoru.

Struktura se skládá ze tří částí, ze vstupního vlnovodu, kruhového rezonátoru a výstupního vlnovodu. Princip struktury optického kruhového mikrorezonátoru je uveden na obr. 4.38. Signál vstupuje do vstupního vlnovodu a ve vazební oblasti je část signálu navázána do kruhového rezonátoru (obr. 4.38a). Část optického signálu projde do průchovního portu (obr. 4.38b). Signál prochází kruhovou částí rezonátoru a dojde k druhé vazební oblasti a část signálu je vyvázána do výstupního vydělovacího portu. V případě, že struktura kruhového rezonátoru má pro danou vlnovou délku správné geometrické rozměry, tak začne vstupní signál rezonovat se signálem z rezonátoru a do kruhové části rezonátoru se naváže větší část optického signálu, než při prvním průchodu (obr. 4.38c). Tento proces se opakuje, dokud se veškerý signál ze vstupního portu nepřenese do výstupního vlnovodu (obr. 4.38d) [89].

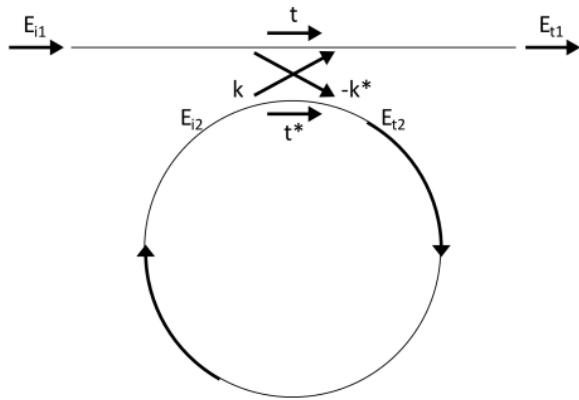


Obrázek 4.38: Princip optického mikrorezonátoru, a) navázání signálu do vstupního vlnovodu, b) část signálu je navázáno do kruhové části mikrorezonátoru, c) vstupující signál rezonuje se signálem v rezonátoru a ze vstupního vlnovodu se navazuje více energie, d) veškerý signál ze vstupního vlnovodu se přenáší do vydělovacího vlnovodu [89].

Kruhový mikrorezonátor může být popsán pomocí parametrů, které se používají při popisu optických filtrů [87]. Základním parametrem je vazební koeficient  $k$ , který určuje vazbu mezi vstupním/výstupním optickým vlnovodem a rezonátorem. Tento koeficient je závislý na vzdálenosti mezi vlnovodem a vlastním kruhovým rezonátorem, dále závisí na poloměru kruhového rezonátoru, délce vazby, pracovní vlnové délce a rozdílech vlnovodu. Protože je velice obtížné tento parametr určit jednoduchým výpočtem, proto se k určení používají různé numerické metody. Koeficient vazby může být popsán pomocí následující matice:

$$\begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Kde amplitudy  $E$  jsou normalizovány tak, aby jejich druhá mocnina odpovídala výkonu. Význam proměnných koeficientů  $k$  a  $t$  je vysvětlen na obr. 4.39 (komplexně sdružené hodnoty jsou označeny „\*“) [87].



Obrázek 4.39: Kruhový rezonátor - princip funkce [87].

Vzhledem k symetričnosti vazby lze napsat:

$$|k^2| + |t^2| = 1 \quad (4.23)$$

Dalším důležitým parametrem je vzdálenost mezi rezonancemi FSR (Free Spectral Range). Pro určení velikosti FSR můžeme použít přibližný vztah [87]:

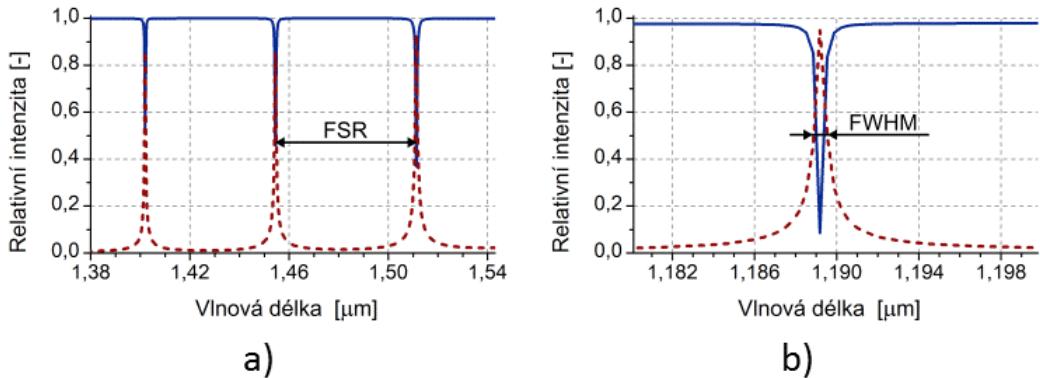
$$FSR \approx \frac{\lambda^2}{2\pi R n_{ef}} \quad (4.24)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $R$  je poloměr prstence,  $n_{ef}$  je hodnota efektivního indexu lomu vlnovodné vrstvy. Z rovnice 4.24 tedy plyne, že FSR lze nastavit pomocí vhodně zvoleného poloměru kruhové části rezonátoru.

Dalším důležitým parametrem je šířka rezonanční křivky FWHM (Full Width at Half Maximum). Parametr FWHM lze určit pomocí vztahu:

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{2\pi^2 R n_{ef}} \cdot \frac{1-t^2}{t} \quad (4.25)$$

Vysvětlení parametrů FSR a FWHM je uvedeno na obr. 4.40.



Obrázek 4.40: Definice parametrů a) FSR, b) FWHM.

Dalšími důležitými parametry jsou jemnost F (Finesse) a činitel jakosti Q (Quality). Parametr F popisuje tvar rezonanční křivky a lze ho popsat pomocí vztahu mezi FSR a FWHM:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (4.26)$$

Činitel jakosti Q určuje ostrost rezonanční křivky a je definován jako poměr vlnové délky a FWHM:

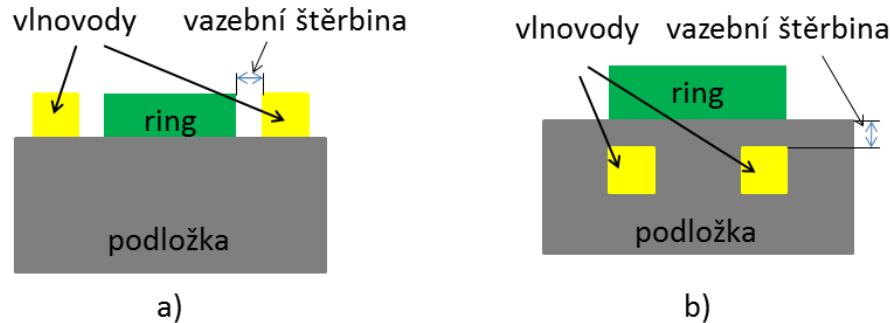
$$Q = \frac{\lambda}{FWHM} \quad (4.27)$$

Dále lze činitel jakosti určit pomocí vztahu:

$$Q = mF \quad (4.28)$$

kde m je počet period signálu.

Dalším důležitým parametrem je provedení optické vazby mezi vstupními/výstupními vlnovody a rezonátorem. Tuto vazbu lze provést pomocí laterální vazby (obr. 4.41a), nebo pomocí vazby vertikální (obr. 4.41b).

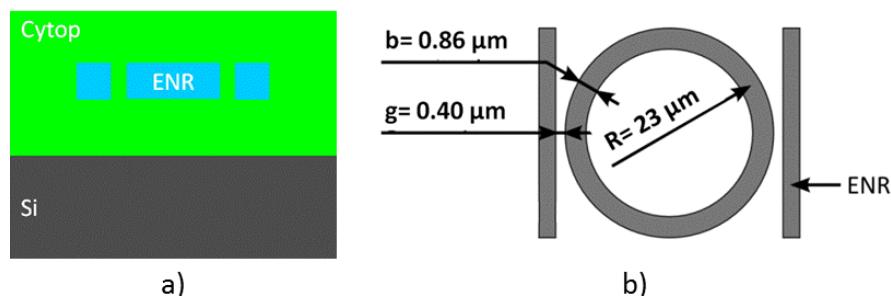


Obrázek 4.41: Optická vazba mezi vlnovody a kruhovou částí mikreorezonátoru, a) laterální vazba, b) vertikální vazba.

Rezonátory s vertikální vazbou umožňují lepší reprodukovatelnost a větší flexibilitu nastavení vazební mezery, ale pro výrobu je nutné použít dvoustupňový litografický proces. Z tohoto důvodu jsme navrhovali optické mikrerezonátory s laterální vazbou, kde tyto struktury je možno vyrobit v jednom litografickém kroku.

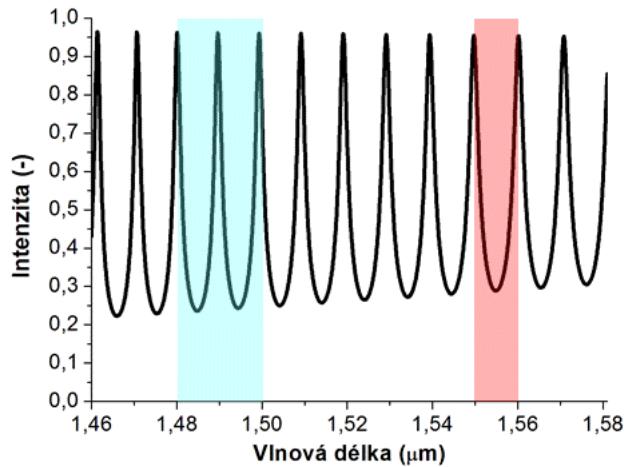
Cílem bylo navrhnout optické polymerní mikrerezonátory, které se budou chovat jako optické filtry. Navrhovali jsme filtry, které umožní přenos optického signálu na vlnové délce 1555 nm a odfiltrují signál na vlnové délce 1490 nm. Dále jsme navrhovali optický filtr, který naopak umožní přenos signálu o vlnové délce 1490 nm a odfiltruje signál na vlnové délce 1555 nm. Návrh jsme prováděli pomocí programu FullWAVE<sup>TM</sup> od firmy RSoft.

Příklad ukázky prvního typu filtru je uveden na obr. 4.42a. Jedná se o strukturu na Si podložce s oddělující vrstvou Cytop a použitá vlnovodná vrstva je tvořena z epoxidové pryskyřice ENR. Rozměry vlnovodních vrstev byly zvoleny tak, aby byla struktura jednostranná pro použité vlnové délky a rozměry kruhového rezonátoru byly zvoleny na základě simulací uvedených v [89] (viz obr. 4.42b).



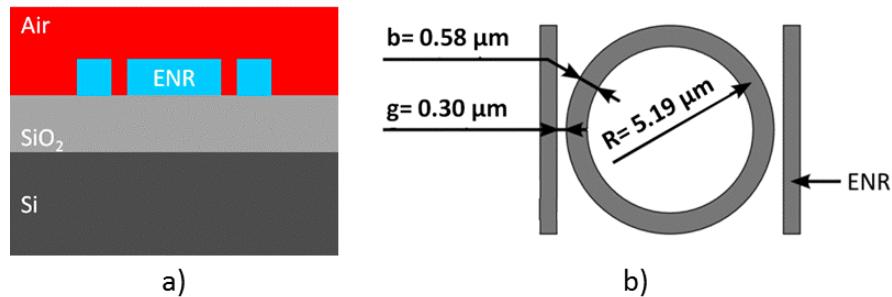
Obrázek 4.42: Struktura mikrerezonátoru Si/Cytop/ENR/Cytop.

Výsledek simulace takovéto struktury je uveden na obr. 4.43. Z tohoto grafu vyplývá, že parametry jsou  $FSR = 10 \text{ nm}$  a  $FWHM = 3,8 \text{ nm}$ , a je tedy jasné, že tato struktura nemá vhodné vlastnosti.



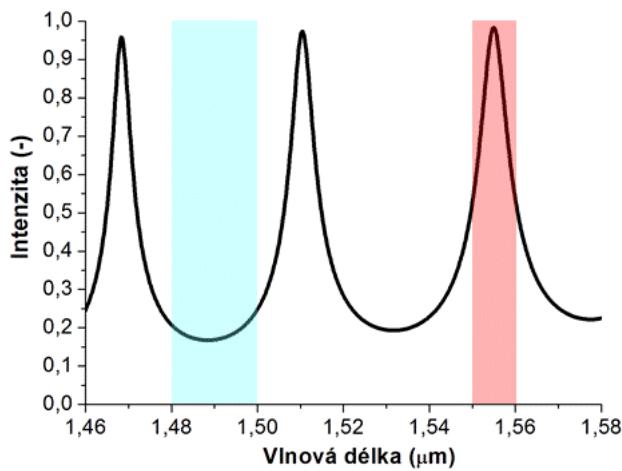
Obrázek 4.43: Struktura mikrorezonátoru Si/Cytop/ENR/Cytop.

Dále jsme tedy navrhli a simulovali strukturu uvedenou na obr. 4.44. Jedná se o mikrorezonátor na podložce Si s oddělující vrstvou  $\text{SiO}_2$  a vlnovodná vrstva je opět tvořena z epoxidové pryskyřice ENR.



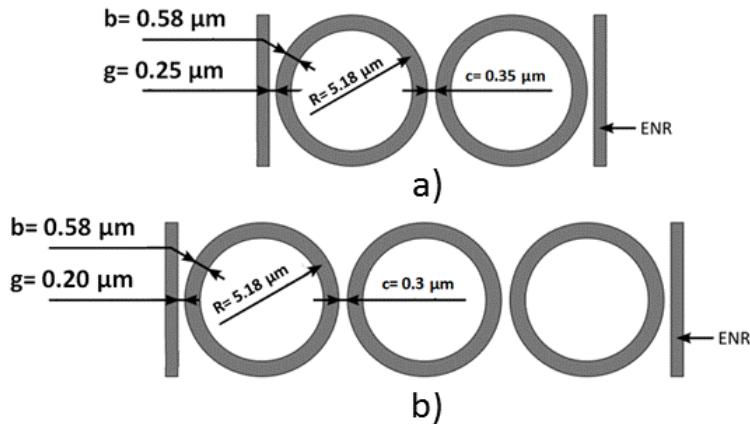
Obrázek 4.44: Struktura mikrorezonátoru Si/ $\text{SiO}_2$ /ENR.

Výsledek simulace takovéto struktury je uveden na obr. 4.45. Z tohoto grafu vyplývá, že dosažené parametry ( $FSR = 44 \text{ nm}$  a  $FWHM = 10 \text{ nm}$ ) jsou opět nedostatečné. Proto bylo navrženo řešení se sériově vázanými mikrorezonátory.



Obrázek 4.45: Výsledek simulace mikrorezonátoru Si/SiO<sub>2</sub>/ENR.

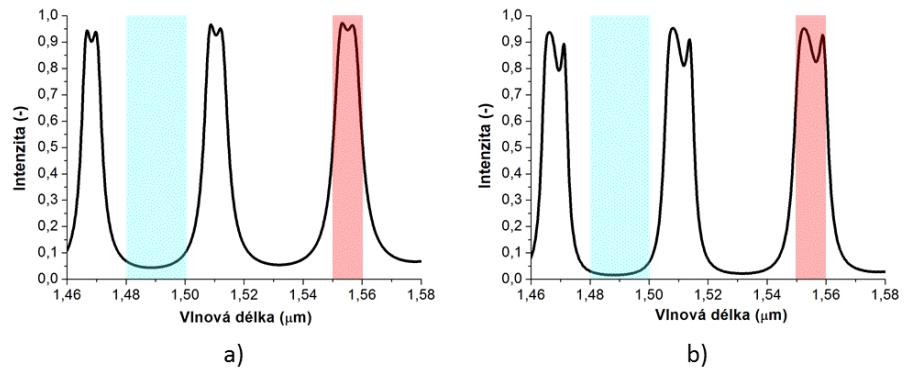
Příklad struktury s dvojitým sériově řazeným mikrorezonátorem je uveden na obr. 4.46a a příklad trojitého sériově řazeného mikrorezonátoru je uveden na obr. 4.46b.



Obrázek 4.46: Struktura se sériově vázanými mikrorezonátory,  
a) dvojitě vázaná struktura, b) trojitě vázaná struktura.

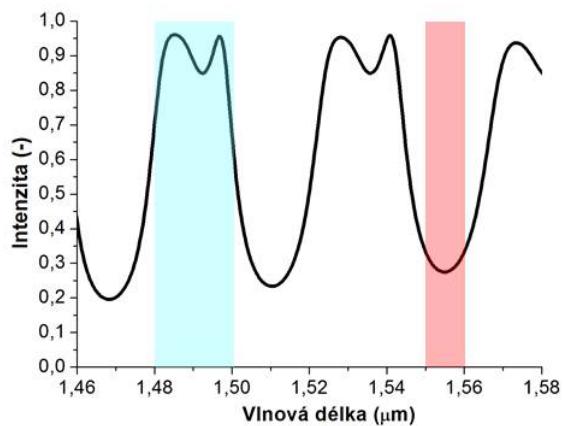
Návrh sériově řazených optických mikrorezonátorů byl opět prováděn pro strukturu na podložce Si s oddělující vrstvou SiO<sub>2</sub> a vlnovodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR. Výsledek simulací je uveden na obr. 4.47. Na obr. 4.47a je uveden výsledek modelování dvojitěho sériově vázaného mikrorezonátoru (FSR= 44 nm a FWHM= 10 nm) a na obr. 4.47b je uveden výsledek modelování trojitého sériově vázaného mikrorezonátoru (FSR= 44 nm a FWHM= 12 nm). Z obr. 4.47 plyne, že trojitý sériově vázaný optický

mikrorezonátor má vhodné vlastnosti. Struktura přenáší optický signál 1555 nm a dostatečně filtruje signál o vlnové délce 1490 nm.



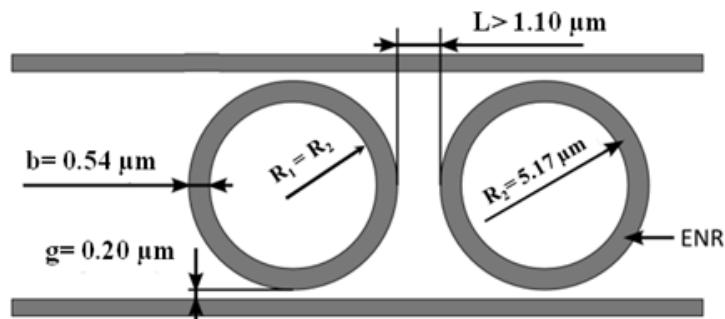
Obrázek 4.47: Výsledek simulace mikrorezonátorů Si/SiO<sub>2</sub>/ENR,  
a) dvojitě sériově vázaná struktura, b) trojitě sériově  
vázaná struktura.

Dále jsme také navrhovali optický filtr vytvořený z optických mikrorezonátorů, který bude přenášet optický signál o vlnové délce 1490 nm a naopak odfiltruje signál 1555 nm. Proto jsme modelovali vlastnosti sériově řazené dvojité a trojité mikrorezonátory, ale ani po optimalizaci nebylo dosaženo dobrých výsledků. Příklad přenosové charakteristiky optimalizovaného trojitého sériově vázaného mikrorezonátoru je uveden na obr. 4.48.

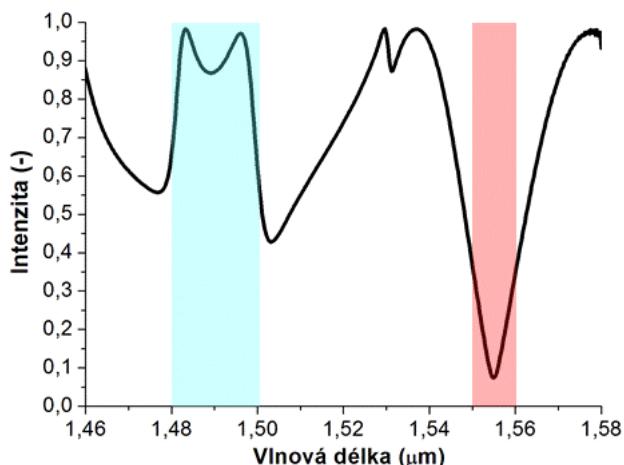


Obrázek 4.48: Přenosová charakteristika trojitého sériově vázaného mikrorezonátoru s poloměrem R= 5,17  $\mu\text{m}$ , šířkou mezery g= 0,1  $\mu\text{m}$ , c= 0,1  $\mu\text{m}$ .

Protože optický filtr pro vlnovou délku 1490 nm navržený pomocí trojitého sériově vázaného optického mikrorezonátoru nesplnil očekávání, tak jsme se pokusili takovýto filtr navrhnout pomocí paralelně vázaných mikrorezonátorů. Struktura optimalizovaného dvojitého paralelně vázaného mikrorezonátoru je uvedena na obr. 4.49 a výsledek simulace je uveden na obr. 4.50.



Obrázek 4.49: Struktura dvojitého paralelně vázaného mikrorezonátoru.

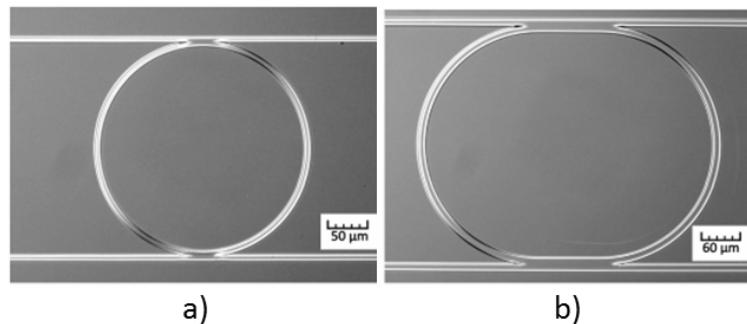


Obrázek 4.50: Výsledek simulace dvojitého paralelně vázaného optického mikrorezonátoru.

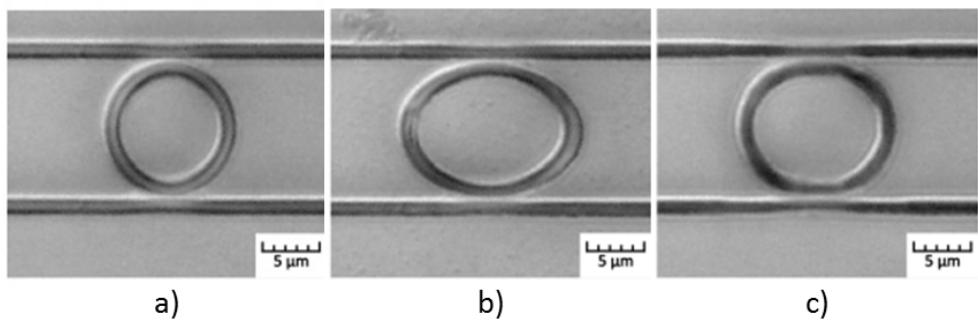
Z přenosové charakteristiky na obr. 4.50 plyne, že takováto struktura přenese signál o vlnové délce 1490 nm a odfiltruje signál o vlnové délce 1555 nm. Je tedy zřejmé, že tato struktura splňuje dané požadavky ( $FSR = 44 \text{ nm}$  a  $FWHM = 10 \text{ nm}$ ).

Kromě teoretických návrhů optických mikrorezonátorů jsme prováděli depoziční testy, které vedly k výrobě optických polymerních mikrorezonátorů. Navržené struktury jsme

vyráběli pomocí optické litografie v čistých prostorách v laboratořích na Masarykově univerzitě v Brně na Přírodovědecké fakultě Ústavu fyziky kondenzovaných látek. Protože motivy jednovidových vlnovodů se blížily rozměru jednotek mikrometrů bylo daleko lepších výsledků dosaženo při depozičních testech prováděných pomocí elektronové litografie. Tyto depoziční testy byly prováděny na Fyzikálním ústavu AV ČR, v. v. i. pomocí elektronového litografu Raith eLiNE. Ukázky vyrobených struktur optických polymerních mikrerezonátorů na podložce Si s oddělující vrstvou  $\text{SiO}_2$  a vlnovodnou vrstvou tvořenou z epoxidové pryskyřice ENR jsou uvedeny na obr. 4.51 a na obr. 4.52. Na obr. 4.51a je uvedena fotografie kruhového mikrerezonátoru a na obr. 4.51b je fotografie oválné „racetrack“ struktury mikrerezonátoru. Na obr. 4.52a,b,c jsou fotografie různých mikrerezonátorů s menším průměrem ringu.

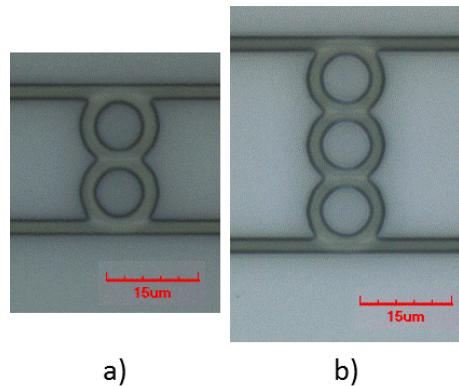


Obrázek 4.51: Fotografie vyrobených optických mikrerezonátorů pomocí elektronového litografu Raith eLiNE, a) kruhový mikrezonátor, b) oválný „racetrack“ mikrezonátor.

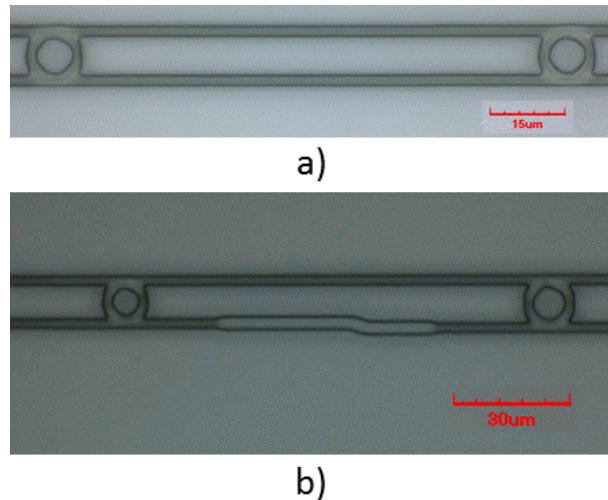


Obrázek 4.52: Fotografie vyrobených optických mikrerezonátorů pomocí elektronového litografu Raith eLiNE, a) kruhový mikrezonátor, b) oválný mikrerezonátor, c) oválný „racetrack“ rezonátor.

Fotografie vyrobených vázaných mikrorezonátorů jsou uvedeny na obr. 4.53 a na obr. 4.54. Na obr. 4.53 jsou uvedeny fotografie sériově vázaných mikrorezonátorů. Na obr. 4.53a je dvojitě vázaná struktura a na obr. 4.53b je uvedena fotografie trojitě vázané struktury. Na obr. 4.54a je paralelně vázaná struktura se dvěma stejnými ring mikrorezonátory. Na obr. 4.54b je uvedena fotografie paralelně vázaných struktur s různými průměry ring mikrorezonátorů.



Obrázek 4.53: Fotografie vyrobených sériově vázaných mikrorezonátorů,  
a) dvojitě vázaná struktura, b) trojitě vázaná struktura.



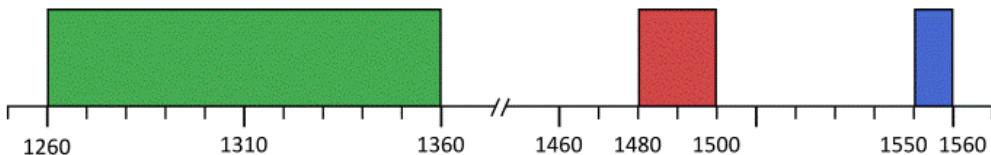
Obrázek 4.54: Fotografie vyrobených paralelně dvojitě vázaných mikrorezonátorů.

Detailnější popis návrhu, výsledky simulací a výroba a vlastnosti těchto struktur jsou uvedeny v [89], [90], [91], [92], [93], [94].

## 4.5 Optické triplexery

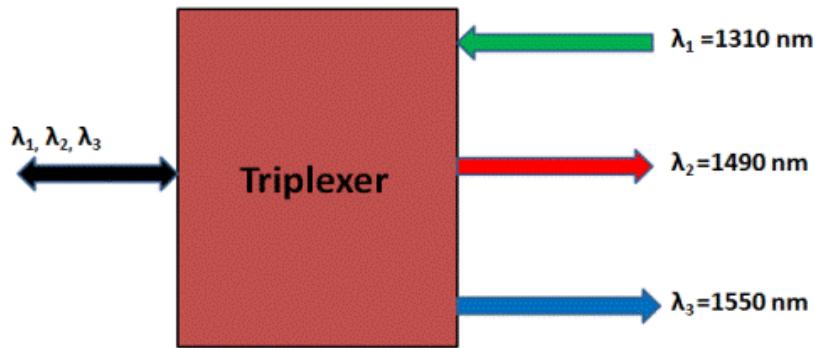
Vzhledem k stále rostoucím požadavkům na rychlosť a objem přenášených dat díky masovému rozvoji internetu jsou hledány nové možnosti, jak tyto požadavky uspokojit. Metalické vedení, která byla dříve používána, jsou v páteřních sítích již zcela nahrazena přenosovými systémy s optickými vlákny a v současnosti jsou vyvíjeny systémy, které by měly nahradit metalické připojení ke koncovým uživatelům. V současnosti velký rozvoj znamenávají systémy označované jako „vlákna až do domu“ - FTTH (Fiber to the Home), které by měly uspokojit nároky na vyšší přenosovou rychlosť a objem přenášených dat. V metropolitních sítích hovoříme o tzv. pasivních optických sítích PON (Passive Optical Network). Protože tyto sítě zaznamenávají velký rozvoj, je nutné k současným fotonickým strukturám vyvinout nové struktury, které umožní další rozšíření těchto nových sítí.

Příkladem takovéto nové struktury je optický triplexer. Tato struktura pracuje se třemi vlnovými pásmi, a to  $1490 \pm 5$  nm (pásma 1490 nm),  $1555 \pm 5$  nm (pásma 1555 nm) a  $1310 \pm 50$  nm (pásma 1310 nm). Vlnová pásma použitá pro optický triplexer jsou schematicky znázorněna na obr. 4.55. Tyto vlnové délky jsou zvoleny z důvodu mezinárodního standardu TDM-PON ITU-T G.983 a G.984 [95], [96], [97].



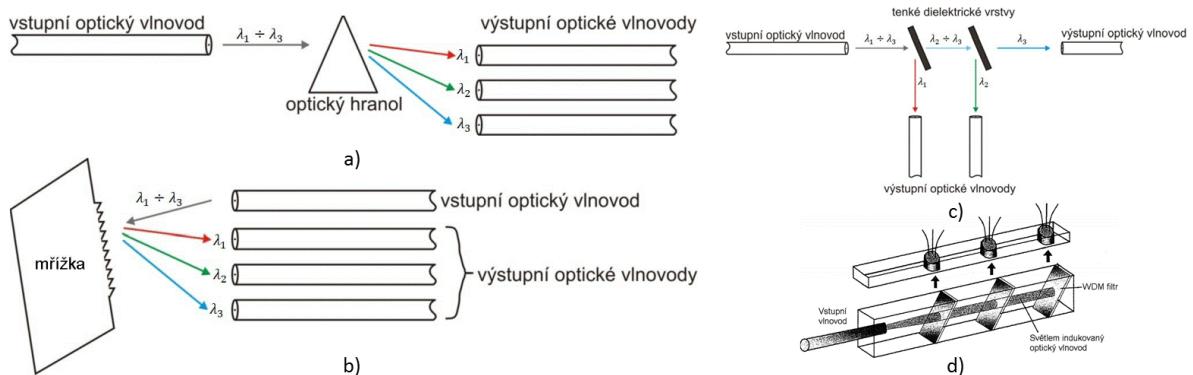
Obrázek 4.55: Spektrum vlnových délek, které používá struktura optického triplexeru v sítích PON. Pásma 1490 nm a 1555 nm je použito pro příjem dat a pásma 1310 nm je použito pro vysílání dat [89].

Princip optického triplexeru je uveden na obr. 4.56. Optické vlákno, které je připojeno k triplexeru přenáší tři vlnová pásma. Pásma 1490 nm a 1555 nm zabezpečuje přenos dat k uživateli a pásma 1310 nm slouží k přenosu dat od uživatele.



Obrázek 4.56: Obecné schéma optického triplexeru [47].

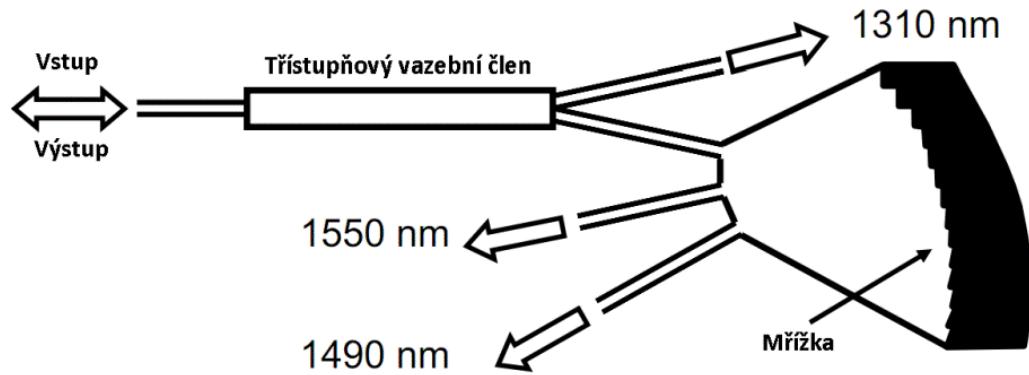
Doposud bylo popsáno několik typů optických demultiplexorů, které by bylo možné případně využít jako optické triplexery. Prvním příkladem optického demultiplexoru může být realizace, která využívá k rozdělení optického signálu na jednotlivé vlnové délky optický hranol (obr. 4.57a). Další možností, jak rozdělit jednotlivé vlnové délky, je využití principu optické mřížky (obr. 4.57b). K rozdělení signálů lze použít také tenké dielektrické filtry (obr. 4.57c), a nebo vlnový multiplex WDM (Wavelength Division Multiplex) (obr. 4.57d) [99].



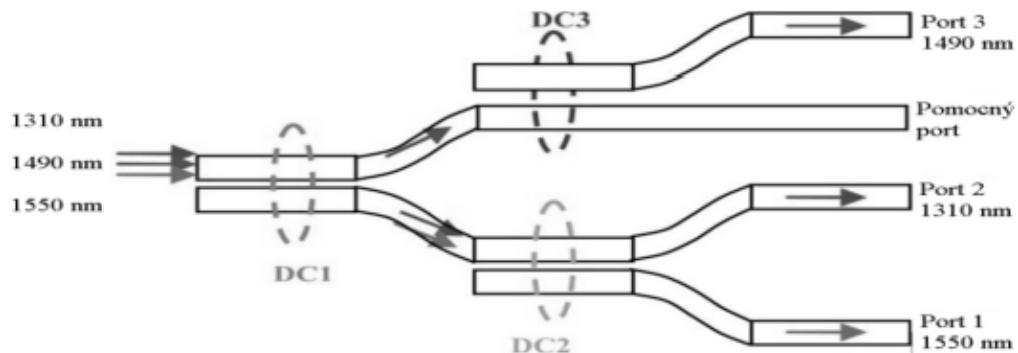
Obrázek 4.57: Příklady rozdělení optického signálu na jednotlivé vlnové délky [47], [49], [98], a) dělení pomocí optického hranolu, b) dělení pomocí optické mřížky, c) rozdělení signálů pomocí dielektrických filtrů, d) dělení signálů pomocí WDM vlnového multiplexu.

Příklad realizovaného optického triplexeru, který se skládá z vazebního členu a Bragovy mřížky, je uveden na obr. 4.58 [100]. Byl také popsán triplexer, který byl realizován

celý jen pomocí Braggových mřížek [101]. Další doposud popsaná struktura optického triplexeru je návrh na realizaci této struktury pomocí směrových vazebních členů [102]. Struktura je uvedena na obr. 4.59.



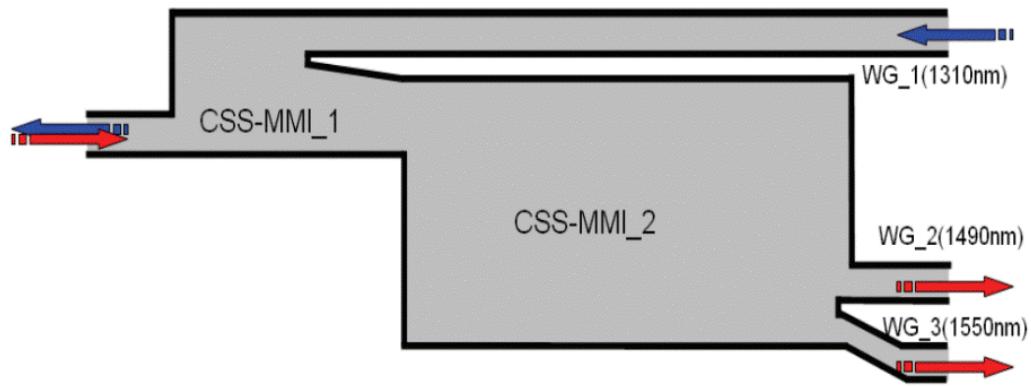
Obrázek 4.58: Optický triplexer realizovaný pomocí vazebního členu a Braggovy mřížky [100].



Obrázek 4.59: Návrh optického triplexeru využívajícího směrových vazebních členů [102].

Poslední doposud publikovaná struktura optického triplexeru byla realizována pomocí planárního řešení, kde je využito struktur pracujících na principu mnohavidové interference [103], [104]. Planární řešení optického triplexeru je uvedeno na obr. 4.60. Kromě výše zmíněných optických triplexerů byla také popsána hybridní struktura optického triplexeru, která je složena z tenkovrstvých filtrů a vlnového multiplexu (WDM), realizovaná na Si podložce [105]. Byl také popsán návrh optického triplexeru, který využívá demul-

triplexor s fázovanou řadou vlnovodů označován jako AWG (Arrayed Waveguide Grating) [106].

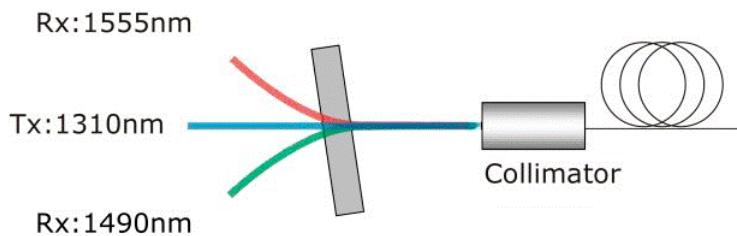


Obrázek 4.60: Planární řešení optického triplexeru realizovaného pomocí struktur s mnohavidovou interferencí [103].

V laboratoři PLANIO byly provedeny 3 návrhy optických triplexerů. První návrh k rozdělení optického signálu využíval objemové holografické triplexní mřížky (VHGT - Volume Holographic Grating Triplexer) od firmy Ondax, Inc. Další návrh optického triplexeru využíval optické polymerní mikrorezonátory. Poslední návrh byl proveden pomocí planárního řešení z polymerních optických vlnovodů, kde jeden návrh využíval principu mnohavidové interference a druhý návrh k rozdělení signálu 1490 nm a 1555 nm využíval opět strukturu s mnohavidovou interferencí a připojení signálu 1310 nm bylo provedeno pomocí směrového vazebního členu.

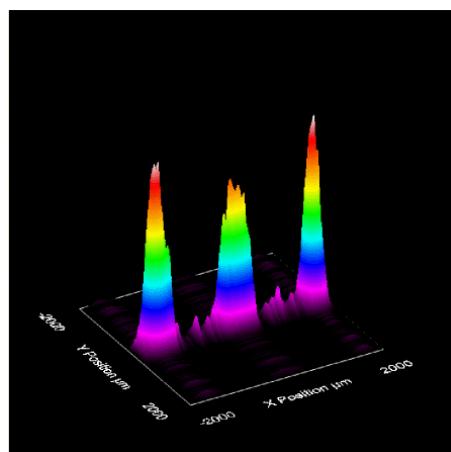
## Optický triplexer s holografickou objemovou mřížkou

Jak již bylo řečeno, optický triplexer pracuje se třemi vlnovými pásmi. Dvě vlnová pásmá 1490 nm a 1555 nm slouží k přijímání dat a vlnové pásmo 1310 nm slouží k vysílání dat. V případě realizace optického triplexeru s holografickou mřížkou VHGT slouží k rozdělení optických pásem právě tato holografická mřížka. Schématický princip holografické mřížky je zobrazen na obr. 4.61 a byl detailněji popsán v [98].



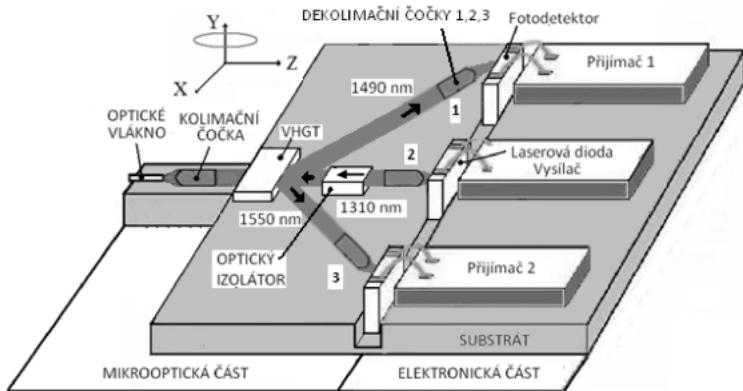
Obrázek 4.61: Objemová holografická triplexní mřížka transmisního typu od fy Ondax Inc.

Na obr. 4.62 je zobrazena difrakce jednotlivých optických svazků,  $\lambda = 1550$  nm (úhel difrakce  $19^\circ$ , vlevo),  $\lambda = 1490$  nm (úhel difrakce  $18^\circ$ , vpravo) a  $\lambda = 1310$  nm (bez difrakce, uprostřed) po průchodu optických svazků přes VHGT mřížku změřených pomocí zařízení Beam Profiler 104-IR.



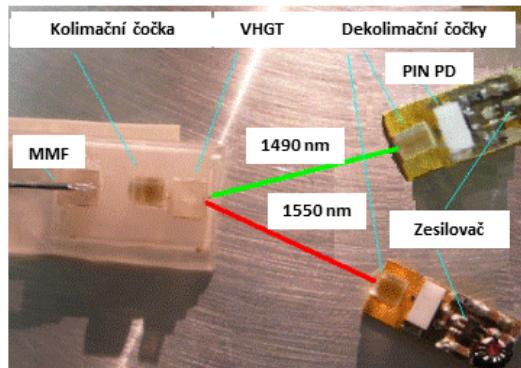
Obrázek 4.62: Průchod signálů 1550 nm (vlevo), 1490 nm (vpravo) a 1310 nm (uprostřed) přes VHGT mřížku [98].

Na obr. 4.63 je pak uvedeno schéma navrženého optického triplexeru. Mezi jednovidové optické vlákno a VHGT mřížku je vložena kolimační čočka, která kolimuje optický signál o vlnové délce 1310 nm, který přichází z laserové diody, a optický izolátor z mřížky do optického vlákna. Naopak optické signály o vlnových délkách 1490 nm a 1550 nm jsou z vlákna přes kolimační čočku přivedeny na VHGT mřížku, kde signál 1490 nm je difraktovan pod úhlem  $18^\circ$  vlevo a signál o vlnové délce 1550 nm je difraktovan pod úhlem  $19^\circ$  vpravo.



Obrázek 4.63: Schéma návrhu hybridního optoelektronického triplexeru s VHGT mřížkou [98].

Fotografie realizovaného modulu optického přijímače se vstupním mnohavidovým optickým vláknem, VHGT mřížkou a 2 přijímači 1490 nm a 1550 nm je uvedena na obr. 4.64.



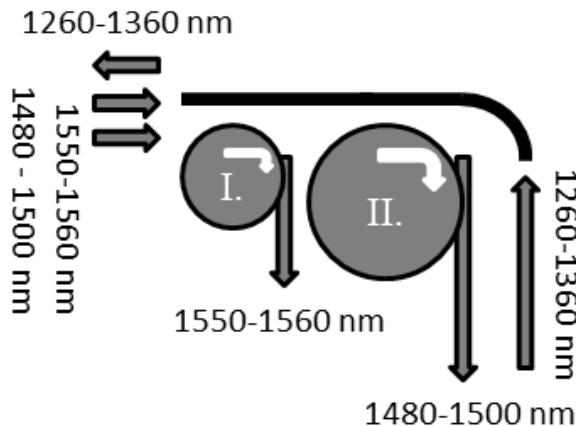
Obrázek 4.64: Fotografie optického přijímače 1490/1550 nm s VHGT mřížkou [109].

Vlastnosti této struktury byly prezentovány v [107], [108], [109], [110]. Tato struktura byla také zapsána jako patent (PV 302146) a užitný vzor (PUV 20719) na Úřadu průmyslového vlastnictví.

## Optický triplexer s optickými mikrorezonátory

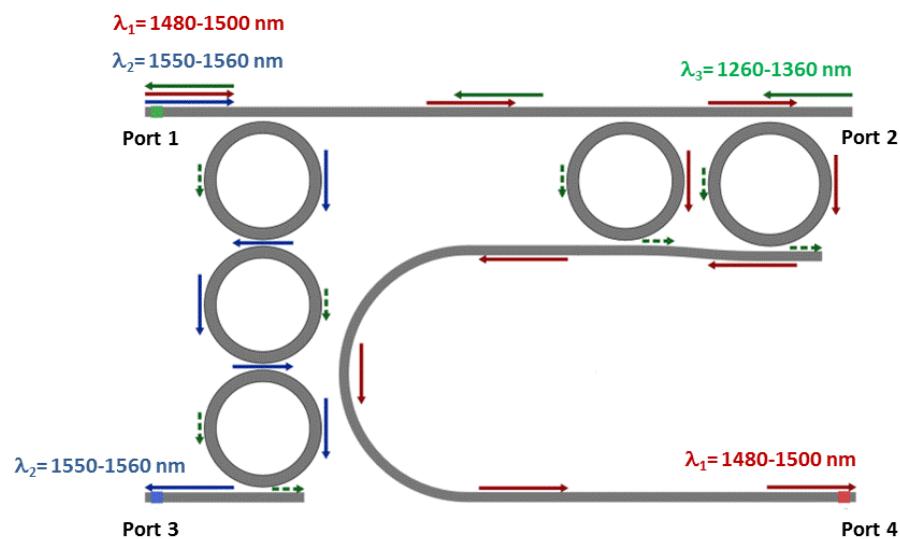
Protože jsme se zabývali návrhy optických polymerních mikrorezonátorů a navrhovali jsme tyto mikrorezonátory tak, aby měly funkci optických filtrů, tak jsme uvažovali o realizaci optického triplexeru pomocí kombinace optických mikrorezonátorů. Obecná

struktura optického triplexeru složeného z mikrorezonátorů je uvedena na obr. 4.65.



Obrázek 4.65: Obecné schéma optického triplexeru složeného z mikrorezonátorů.

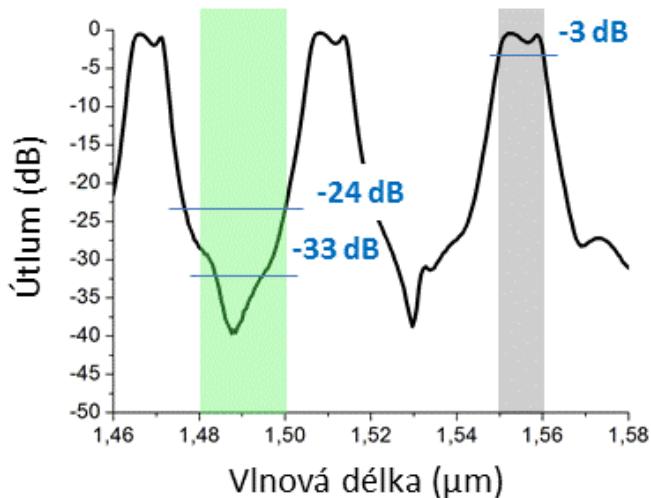
Princip struktury spočívá v tom, že mikrorezonátor I. by vydělil pásmo 1555 nm a mikrorezonátor II. by vydělil pásmo 1490 nm. Současně by tyto mikrorezonátory byly navrženy tak, aby se vzájemně neovlivňovaly a umožnily přes vstupní/výstupní vlnovod přenos pásma 1310 nm. Daný optický triplexer byl navržený pro vlnovodnou vrstvu z epoxidové pryskyřice ENR na podložce z Si/SiO<sub>2</sub>. Navržený optický polymerní triplexer složený z mikrorezonátoru je uveden na obr. 4.66.



Obrázek 4.66: Schéma optického triplexeru složeného z vázaných mikrorezonátorů [89], [111].

Z návrhů optických polymerních mikrorezonátorů v kapitole 4.4 vyplynulo, že nelze realizovat optický filtr pro pásmo 1490 nm a 1555 nm jednoduchými mikrorezonátory. Simulace ukázaly, že pro vydělení pásma 1555 nm je nutné použít trojitý sériově vázaný mikrorezonátor a pro vydělení pásma 1490 nm musíme použít dvojitý paralelně vázaný mikrorezonátor. Princip optického triplexeru spočívá tedy ve vydělení pásma 1555 nm pomocí trojitého sériově vázaného mikrorezonátoru do portu 3. Pásma 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 (viz obr. 4.66).

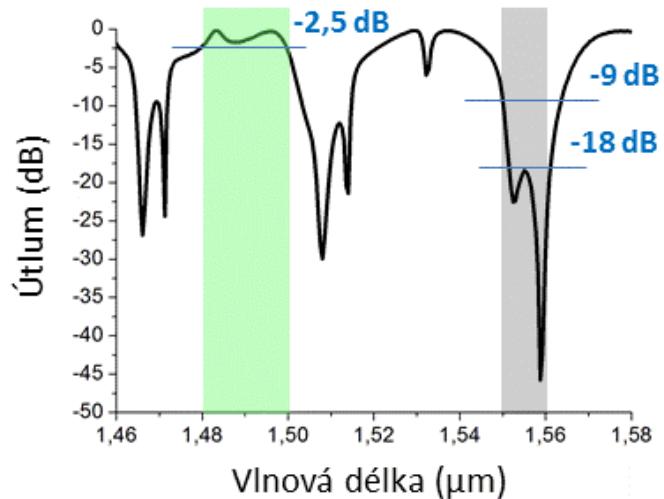
Do vstupně/výstupního portu 1 tedy vstupují pásma 1490 nm a 1555 nm a současně vystupuje pásmo 1310 nm. Přenosová charakteristika pro port 3 je uvedena na obr. 4.67. Z tohoto obrázku vyplývá, že trojitý sériově vázaný mikrorezonátor vydělí pásmo 1555 nm a současně odfiltruje pásmo 1490 nm.



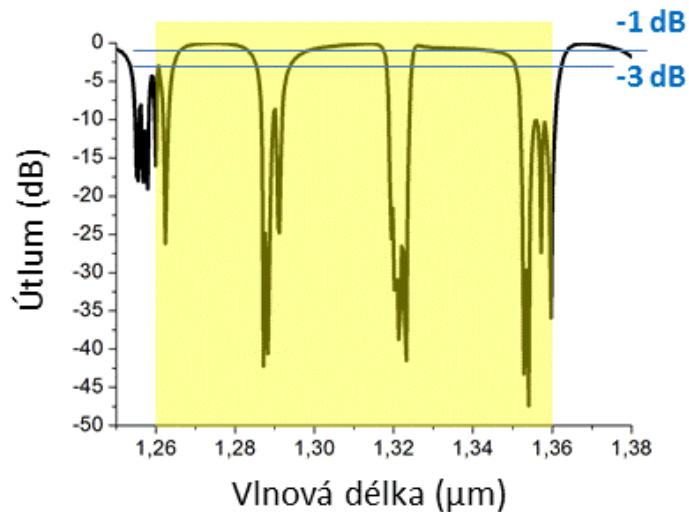
Obrázek 4.67: Přenosová charakteristika pro pásmo 1555 nm na výstupním portu 3 [89], [111].

Na obr. 4.68 je uvedena přenosová charakteristika pro port 4, který vydělí, jak již bylo řečeno, pásmo 1490 nm a současně odfiltruje pásmo 1555 nm. Na obr. 4.69 je přenosová charakteristika pro port 1. Z tohoto obrázku vyplývá, že pásmo 1310 nm není přeneseno v požadovaném rozsahu 1260-1360 nm. Pokud stanovíme hranici maximálního útlumu -3 dB, jsou přenášená pásma v rozsahu 1265-1285 nm, 1294-1318 nm a 1325-1351 nm s celkovou šírkou pásma 70 nm. Pásma 1490 nm a 1555 nm se šíří směrem k portu 2, ale

tato pásmo jsou vydělena pomocí trojitého sériového vázaného mikrorezonátoru a dvojitého paralelně vázaného mikrorezonátoru. Proto se tato pásmo do portu 2 nedostanou.



Obrázek 4.68: Přenosová charakteristika pro pásmo 1490 nm na výstupním portu 4 [89], [111].

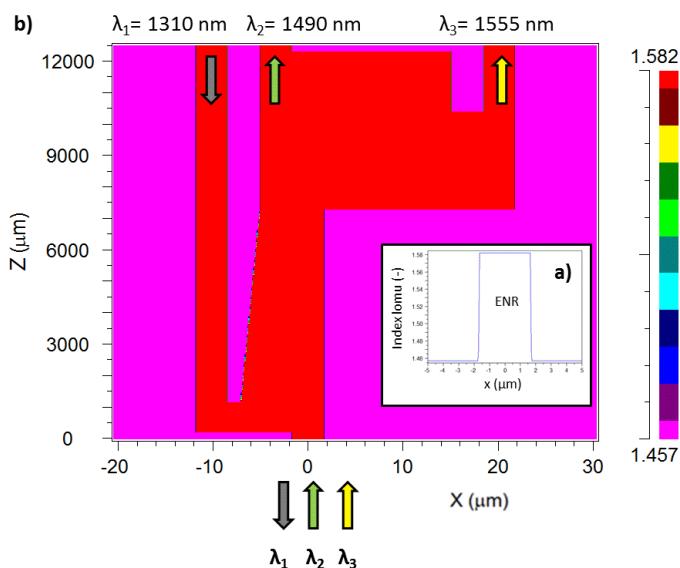


Obrázek 4.69: Přenosová charakteristika pro pásmo 1310 nm na vstupním / výstupním portu 1 [89], [111].

Myšlenka použít polymerní optické mikrorezonátory pro optický triplexer je původní a doposud nebyla jinou skupinou publikována. Detailní popis této struktury a její vlastnosti byly prezentovány v [89], [93], [94], [111].

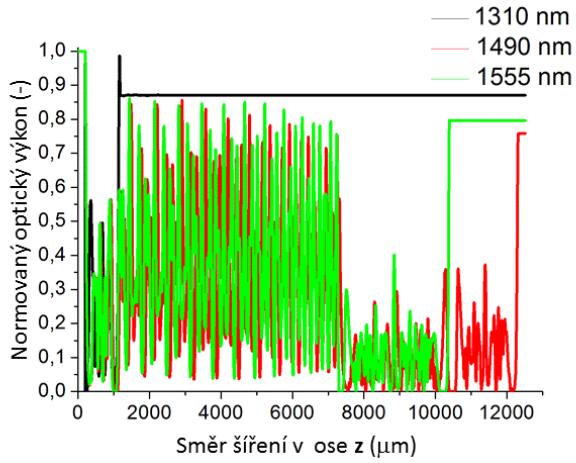
## Planární optický triplexer

Další návrh optického triplexeru vychází z publikací [103], [104], které popisují optický planární triplexer využívající princip multividové interference (viz obr. 4.60). Na základě těchto publikací jsme navrhli optické planární triplexery se strukturami, kde byla použitá vlnovodná vrstva z polymeru Ormocore a oddělující a horní ochrannou vrstvu pak tvořila vrstva z materiálu Ormoclad. V druhém případě byla vlnovodná vrstva z epoxidové pryskyřice ENR na podložce z Si/SiO<sub>2</sub> a horní krycí vrstva v tomto případě byla tvořena polymerem PMMA. Příklad takového navržené struktury optického triplexeru je uveden na obr. 4.70 [47]. Na obr. 4.70a je profil indexu lomu vstupního vlnovodu a na obr. 4.70b je uveden profil indexu lomu celé struktury z pohledu shora.



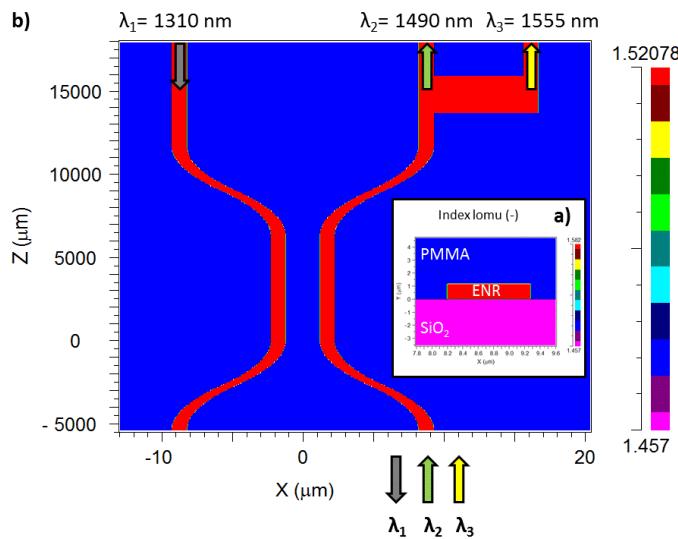
Obrázek 4.70: Profil indexu lomu struktury optického planárního polymerního triplexeru složeného ze dvou struktur s multividovou interferencí z materiálů z Si/SiO<sub>2</sub>/ENR, a) profil indexu lomu vstupního vlnovodu, b) profil indexu lomu z pohledu shora.

Výsledek simulace této struktury je uvede na obr. 4.71. Návrh byl proveden pomocí metody BPM pomocí softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> od fy RSoft. Detailnější výsledky simulací optických triplexerů, které využívají principu mnohavidové interference lze nalézt v [47].



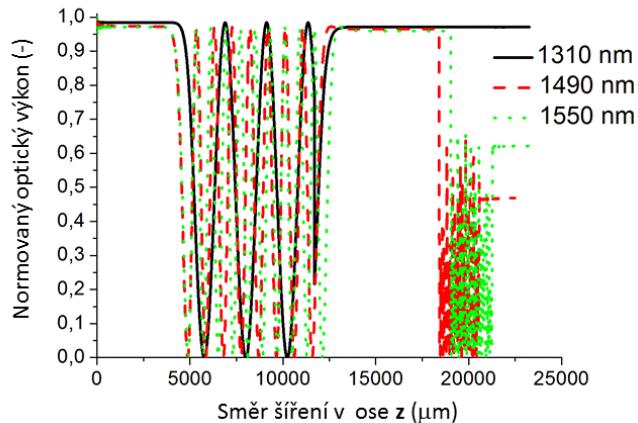
Obrázek 4.71: Výsledek simulace struktury optického planárního triplexeru.

Další návrh planárního optického triplexeru je uveden na obr. 4.72. Na obr. 4.72a je profil indexu lomu vstupního vlnovodu a na obr. 4.72b je uveden profil indexu lomu celé struktury z pohledu shora. Tato struktura se skládá z demultiplexoru, který pracuje na principu mnohavidové interference a rozděluje optické signály 1490 nm a 1555 nm. Připojení signálu 1310 nm je zajištěno pomocí směrového vazebného členu.



Obrázek 4.72: Profil indexu lomu struktury optického planárního polymerního triplexeru se směrovou vazbou z materiálů z Si/SiO<sub>2</sub>/ENR/PMMA, a) profil indexu lomu vstupního vlnovodu, b) profil indexu lomu z pohledu shora [49].

Výsledek simulace je uveden na obr. 4.73.



Obrázek 4.73: Výsledek simulace struktury optického planárního triplexeru se směrovou vazbou.

Ze simulací a modelování planárních struktur s multividovou interferencí vyplývá, že tyto struktury jsou schopné přenášet jen optický signál o vlnových délkách, na které jsou interferenční části naladěny. Aby tyto struktury pracovaly na daných vlnových délkách, musí geometrické rozměry vyrobených struktur přesně odpovídat rozměrům navržených struktur, jinak dojde k posunu pracovních vlnových délek. Výroba takovýchto struktur je tedy velice náročná a struktury neumožňují pracovat s větší šířkou přenášeného pásma.

# Kapitola 5

## Aktivní fotonické struktury

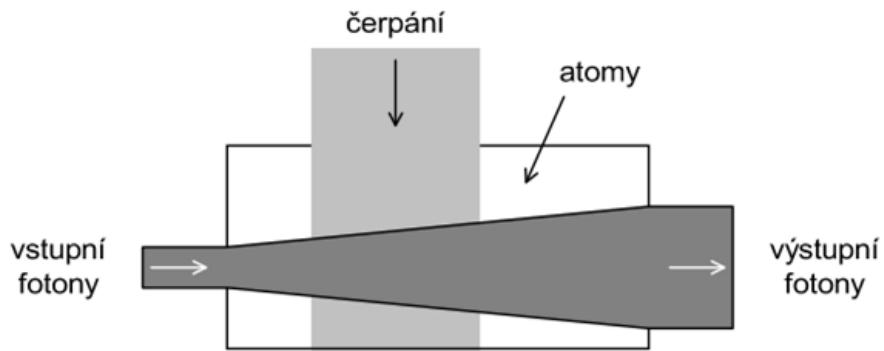
Výzkum optických materiálů s dotací aktivních iontů má na Katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze více než 20 letou tradici. S touto tématikou bylo obhájeno velké množství diplomových prací a několik prací disertačních [30], [112], [113], [114], [115], [116] atd. Bylo také publikováno i několik prací, které byly citovány v zahraniční literatuře (např. [117], [118]). Výzkum optických materiálů s dotací aktivních iontů, který probíhal na Katedře mikroelektroniky v laboratoři PLANIO, se dá rozdělit na dva tematické okruhy.

Za prvé se jedná o studium optických materiálů s dotací vzácných zemin. Zde jsme začínali se studiem vlastností optických skel a optických krystalů s dotací vzácných zemin. Především se jednalo o dotaci ionty erbia. Poté jsme studovali další materiály jako například vrstvy uhlíku a gallia nitridu s obsahem erbia, popřípadě erbia/ytterbia. V poslední době jsme se věnovali studiu vlastností aktivních polymerních materiálů. Zde jsme se zaměřili především na polymer z epoxidové pryskyřice ENR a polymerů PMMA a PMMI, kdy jsme zkoušeli tyto materiály dotovat velkým množstvím vzácných zemin - erbium, ytterbium, dysprosium, europium apod.

Druhým tématickým okruhem je výzkum polymerních materiálů s dotací bismutu, popřípadě dotací bismutu s přídavkem dalších aktivních iontů, které by měly zvýšit optickou účinnost. Každému tomuto tématickému okruhu je níže věnována samostatná kapitola.

## 5.1 Optické materiály s dotací vzácných zemin

Optické materiály dotované vzácnými zeminami jsou podrobovány studiu 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 [119], [120], [121], [122], [123], [124]. Základní princip optického zesilovače je uveden na obr. 5.1 [123].

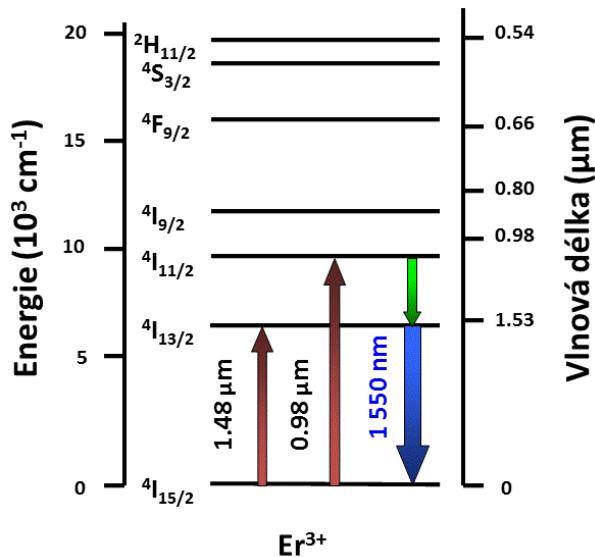


Obrázek 5.1: Schématické znázornění optického zesilovače [123].

Princip spočívá ve stimulované emisi, kdy dopadající foton způsobí, že elektron z vyšší energetické hladiny přejde na hladinu nižší a současně se přebytečná energie uvolní ve formě emitovaného fotonu se stejnou frekvencí a polarizací, jako má původní foton. Tyto dva fotony dále stimulují emisi dalších dvou fotonů atd. Přičemž se stále zachovávají jejich vlastnosti. Výsledkem je koherentní zesílení světla. Aby mohlo dojít k laserovému zesílení, musí být optický zesilovač v nerovnovážném stavu. To znamená, že horní energetická hladina je více obsazena, než hladina spodní. Abychom tohoto inverzního stavu dosáhli, musíme atomy z nižších hladin vybudit vnějším zdrojem. Pro buzení se nejčastěji používá buzení optické, elektrické, chemické nebo absorpční. Vyzařovací vlastnosti optických materiálů s dotací vzácných zemin jsou popisovány pomocí experimentálně teoretické Judd-Ofeltovi teorie [125], [126].

Nejčastěji studovanými ionty vzácných prvků jsou ionty erbia ( $\text{Er}^{3+}$ ), protože optické materiály s dotací  $\text{Er}^{3+}$  iontů mohou být použity jako aktivní vlnovody, které mohou pracovat jako optický zesilovač, nebo zdroj pracující na vlnové délce 1530 nm [127], [128]. Tato vlnová délka je používána v telekomunikačních systémech, protože křemenná optická vlákna, která se používají v páteřních telekomunikačních sítích, mají na této vlnové délce minimální optický útlum.

Jak již bylo řečeno, aby byl optický materiál schopen emitovat optické záření, je nutné dosáhnout inverzního stavu, aby horní energetická hladina byla obsazena více, než hladina spodní. V praxi se používá k dosažení inverzního stavu čtyřhladinový nebo tříhladinový systém. Například systém s křemenným vláknem, který je dotován ionty Er<sup>3+</sup> se při teplotě 300 K chová jako tříhladinový laser [123]. Energetické úrovně přechodů v atomu Er<sup>3+</sup> pro tříhladinový systém je uveden na obr. 5.2 [124].



Obrázek 5.2: Energetické úrovně přechodů v atomu Er<sup>3+</sup>.

Významné přechody jsou zde vyznačeny šipkami. Z tohoto obrázku vyplývá možnost čerpání absorpcí energie v atomu Er<sup>3+</sup>, a to přechodem  $^4\text{I}_{15/2} - ^4\text{I}_{11/2}$  s využitím optického čerpání na vlnové délce 980 nm, nebo lze využít pásu  $^4\text{I}_{13/2}$  a zajistit optické čerpání pomocí zdroje pracujícího na vlnové délce 1480 nm s přechodem mezi úrovněmi  $^4\text{I}_{15/2} - ^4\text{I}_{13/2}$  a následným emisním přechodem  $^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2}$ . Výsledkem je pak generace záření na vlnové délce 1530 nm.

Optické zesilovače s dotací Er<sup>3+</sup>, které pracují na vlnové délce 1530 nm, jsou obvykle buzeny optickými zdroji pracujícími na vlnových délkách 1470 - 1500 nm, nebo 980 nm. Ytterbium (Yb<sup>3+</sup>) má silný absorpční pás na vlnové délce 980 nm. Tato vlastnost umožnuje ionty Yb<sup>3+</sup> použít jako syntetizér pro optické materiály s dotací Er<sup>3+</sup> při optickém buzení na vlnové délce 980 nm [124], [129], [130].

V poslední době je věnována velká pozornost dalším vzácným zeminám, jako např. thulium (Tm<sup>3+</sup>) nebo dysprosium (Dy<sup>3+</sup>). Optické materiály s dotací Tm<sup>3+</sup> mohou mít luminiscenci kolem vlnových délek 1470 nm a 1600-2100 nm [131]. Materiály s dotací

$Tm^{3+}$  iontů mohou tedy hrát důležitou roli jako doplněk k optickým systémům dotovaným  $Er^{3+}$  ionty. Materiály s dotací  $Dy^{3+}$  jsou studovány pro fotoluminiscenci na vlnové délce 1310 nm [132]. Tato vlnová délka se také používá v telekomunikačních systémech, protože páteřní sítě tvořené z křemenných optických vláknových vlnovodů mají na této vlnové délce nejmenší disperzi. Přehled všech vzácných zemin je uveden v Tab. 5.1.

Tabulka 5.1: Přehled vzácných zemin a jejich elektronové konfigurace.

Atomové číslo	n*	Prvek	Elektronová konfigurace	Základní stav
58	1	Cerium - Ce	4f <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>2</sup> F <sub>5/2</sub>
59	2	Praseodymium - Pr	4f <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>3</sup> H <sub>4</sub>
60	3	Neodymium - Nd	4f <sup>3</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>
61	4	Promethium - Pm	4f <sup>4</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>5</sup> I <sub>4</sub>
62	5	Samarium - Sm	4f <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>6</sup> H <sub>5/2</sub>
63	6	Europium - Eu	4f <sup>6</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>7</sup> F <sub>0</sub>
64	7	Gadolinium - Gd	4f <sup>7</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>8</sup> S <sub>7/2</sub>
65	8	Terbium - Tb	4f <sup>8</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>7</sup> F <sub>6</sub>
66	9	Dysprosium - Dy	4f <sup>9</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>6</sup> H <sub>15/2</sub>
67	10	Holmium - Ho	4f <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>5</sup> I <sub>8</sub>
68	11	Erbium - Er	4f <sup>11</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>
69	12	Thulium - Tm	4f <sup>12</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>3</sup> H <sub>6</sub>
70	13	Ytterbium - Yb	4f <sup>13</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>2</sup> F <sub>7/2</sub>

\* Počet elektronů (n) v 4f skořápce tří valenčních iontů vzácných zemin.

## Uhlíkové vrstvy s dotací erbia

Nejdříve bych zde popsal studium optických vlastností tenkých uhlíkových vrstev s dotací erbia. Doc. Ivan Hüttel DrSc. a kolektiv publikovali práce, kde prokázali, že je možno pomocí metody PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition) připravit uhlíkové vrstvy a vrstvy nitridů uhlíku, které vykazují zajímavé optické a mechanické vlastnosti, kterých může být využito v různých součástkách pro integrovanou optiku a fotoniku. Především se podařilo připravit uhlíkové vrstvy s optickým útlumem nižším než 1 dB/cm. Nejlepší vzorky měly optický útlum 0,3 dB/cm pro vlnové délky 632,8 nm [133], [134]. Proto jsme zkoumali možnosti přípravy uhlíkových vrstev s dotací erbia.

Přestože optické materiály s dotací erbia, popřípadě s dotací dalších vzácných zemin jsou studovány velkým počtem vědeckých týmů, tak v případě erbiem dotovaných uhlíkových vrstev tomu tak není. Doposud bylo publikováno jen několik málo prací, které se touto problematikou zabývaly. Baranov [135] a Speranza [136] prezentovali vlastnosti uhlíkové vrstvy s dotací erbia připravené pomocí magnetronového naprašování. Tsai a jeho kolektiv prezentovali fotoluminiscenci na vlnové délce  $1,53 \mu\text{m}$  u uhlíkových vrstev připravených pomocí odpařování metal-organické sloučeniny v aparatuře MOPECVD (Metal-Organic Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition) [137]. Byla také prezentována práce přípravy uhlíkové vrstvy s dotací erbia pomocí pulzní laserové depozice [138]. V posledních letech se začaly objevovat práce, které popisují dotace ionty erbia v grafénových vrstvách [139] a v uhlíkových nanotrubičkách [140].

Pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací iontů  $\text{Er}^{3+}$  jsme použili postupně následující postupy: Nejdříve byl zkoušen postup, kdy uhlíková vrstva byla připravena pomocí metody PACVD, a potom byla provedena difúze pomocí roztoku glycerolu a  $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ . Potom byly zkoušeny technologie tenkých vrstev, kdy dotace erbiem byla prováděna během růstu uhlíkových vrstev. Zkoušeli jsme přípravu uhlíkových vrstev pomocí naprašování, dále pak růst pomocí PACVD a pomocí magnetronového naprašování. Přehled použitých postupů se složením uhlíkových vrstev je uveden v tab. 5.2.

Z tab. 5.2 vyplývá, že se podařilo připravit uhlíkové vrstvy s obsahem erbia. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při přípravě uhlíkových vrstev s dotací erbia pomocí magnetronového naprašování, u těchto vrstev byla změřena fotoluminiscence na vlnové délce 1530 nm (viz obr. 5.3). U vzorků připravených ostatními metodami fotoluminiscence detekována nebyla. Detailní postupy přípravy těchto vzorků a jejich vlastnosti jsou popsány v [30], [118], [141].

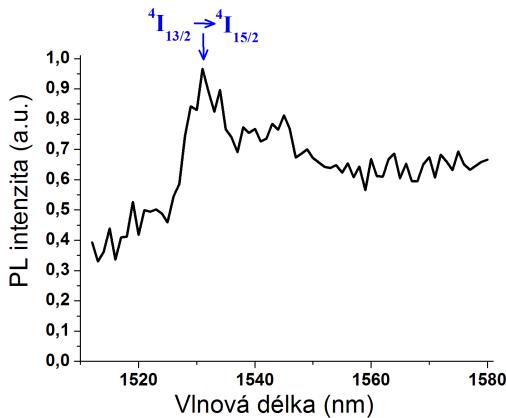
Tabulka 5.2: Použité technologie pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací iontů Er<sup>3+</sup> a jejich složení [30].

metody použité pro přípravu uhlíkových vrstev	C (at%)	H (at%)	O (at%)	Er (at%)
příprava vrstev pomocí naprašování (C target + kovové erbium)	52	45	3	0,02
příprava vrstev pomocí PACVD (CH <sub>4</sub> + Ar + “erbium isopropoxide”)	65	32	3	0
příprava vrstev pomocí PACVD (CH <sub>4</sub> + “erbium tris”) - konfigurace I*	51	27	15	8,7
příprava vrstev pomocí PACVD (CH <sub>4</sub> + “erbium tris”) - konfigurace II*	61	40	5	0,012
dotace vrstev pomocí difúze** (5 ml glycerol + 1 g Er(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> )	55	37	8	0,02-2
příprava vrstev pomocí magnetronového naprašování	73	23	4	0,2-20***

\* Dotace je silně závislá na konfiguraci depozice [30].

\*\* Uhlíkové vrstvy byly připraveny pomocí PACVD.

\*\*\* Obsah Er a Yb iontů závisí na targetu.

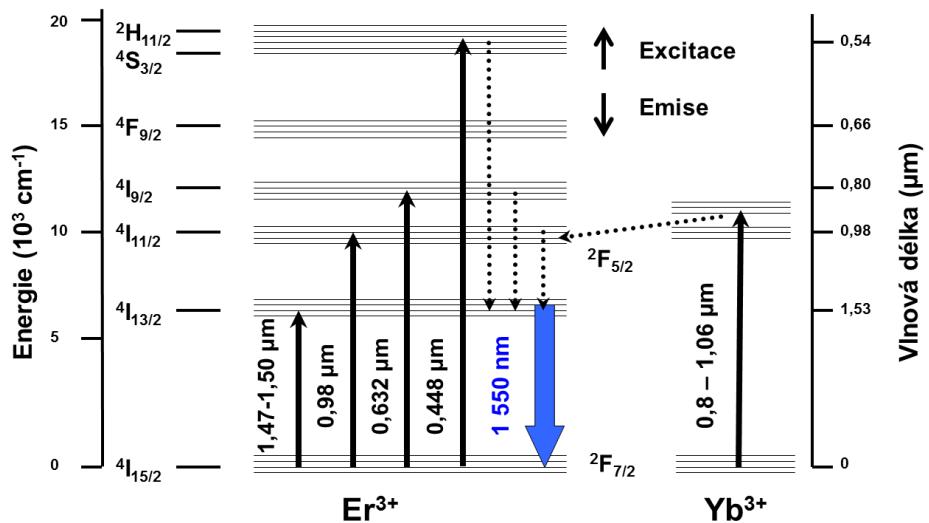


Obrázek 5.3: Luminiscenční spektra uhlíkové vrstvy dotované ionty  $\text{Er}^{3+}$  připravené magnetronovým naprašováním.

## Vrstvy GaN s dotací erbia a erbia/ytterbia

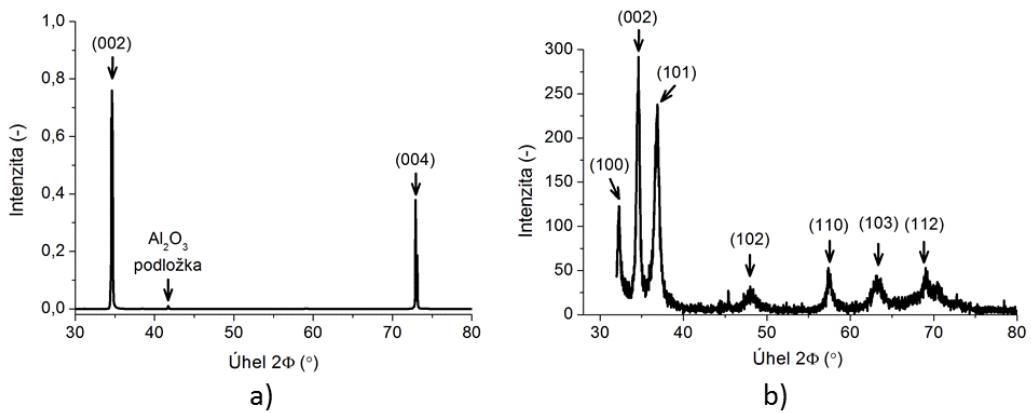
Dále jsme se zabývali studiem vlastností vrstev nitridu gallia (GaN) s dotací vzácných zemin. Nitrid gallia (GaN) je polovodič s přímým přechodem a s velkou šírkou zakázaného pásu (3,4 eV). Ve vědeckých pracích bylo prokázáno, že u polovodičů s dotací vzácných zemin s větší šírkou zakázaného pásu klesá vliv termálního zhášení, proto polovodiče s větší šírkou zakázaného pásu jsou vhodnějšími materiály pro dotaci ionty vzácných zemin, než polovodiče s menší šírkou zakázaného pásu [142].

Jak již bylo řečeno, optické zesilovače s dotací  $\text{Er}^{3+}$  jsou primárně určeny pro vlnové délky 1530 nm. V praxi se používá obvykle buzení optickými zdroji pracujícími na vlnových délkách 1470 - 1500 nm, nebo 980 nm. Optické zdroje pracující na vlnových délkách 1470 - 1500 nm jsou z finančních důvodů méně časté. V případě buzení optickými zdroji pracujícími na vlnové délce 980 nm je optická účinnost díky nepřímému přechodu nižší. Proto se pro zvýšení účinnosti do optických materiálů s dotací iontů  $\text{Er}^{3+}$  přidávají ionty  $\text{Yb}^{3+}$ . Ionty  $\text{Yb}^{3+}$  mají silný absorpční pás na vlnové délce 980 nm. Tato vlastnost umožňuje ionty  $\text{Yb}^{3+}$  použít jako koaktivátor, který zvyšuje intenzitu fotoluminiscence na vlnové délce 1530 nm při čerpání optickým zdrojem 980 nm. Schematicky znázorněné energetické hladiny iontů  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Yb}^{3+}$  jsou uvedeny na obr. 5.4.



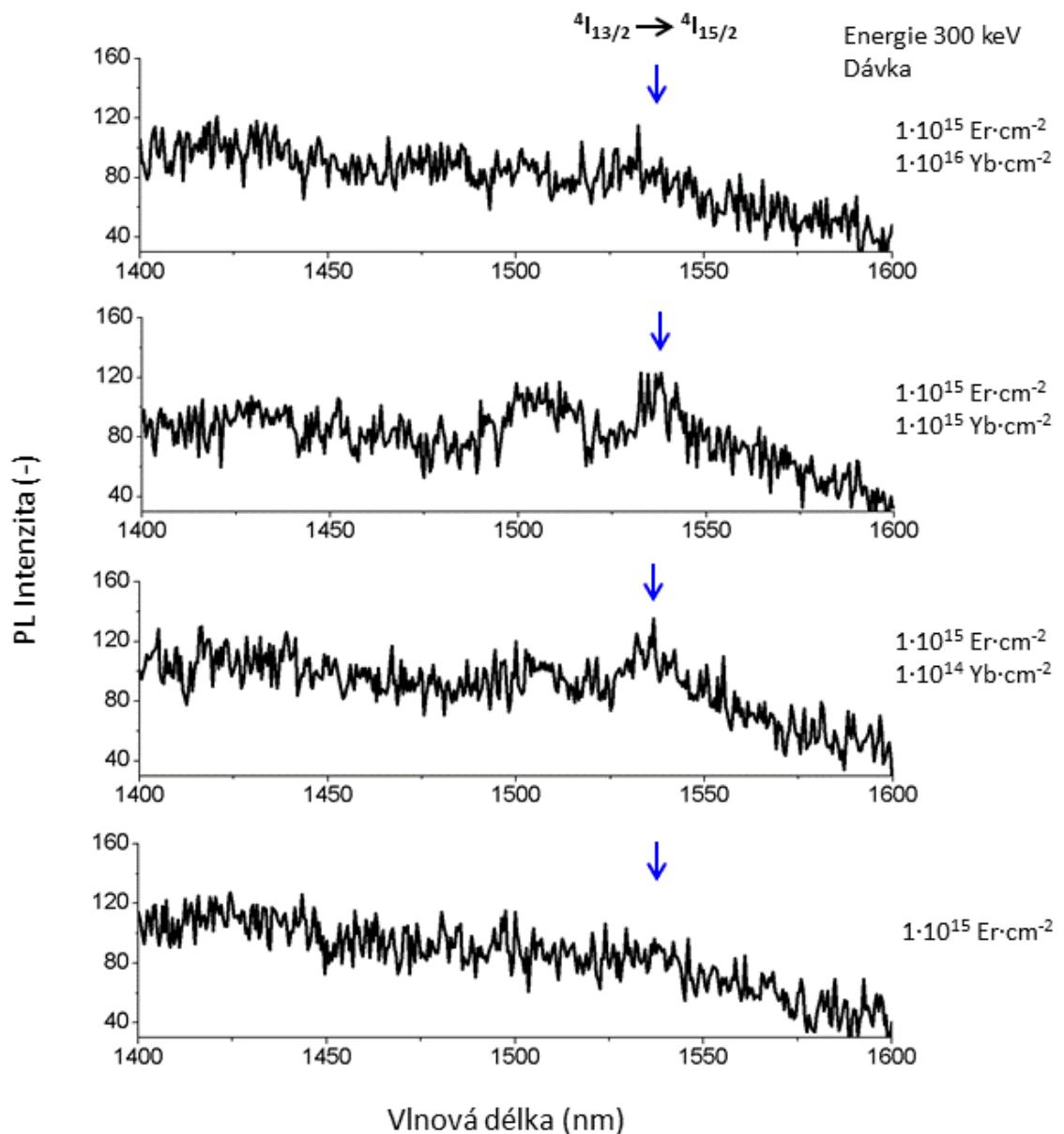
Obrázek 5.4: Energetické hladiny  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Yb}^{3+}$  iontů.

Struktura vrstev GaN byla analyzována pomocí difrakce rentgenových paprsků XRD (X-Ray Diffraction Analysis). XRD spektra vrstvy GaN připravenou technologií MOCVD jsou uvedena na obr. 5.5a. XRD spektra vrstvy GaN připravené pomocí magnetronového naprašování jsou uvedena na obr. 5.5b. Z obr. 5.5 vyplývá, že vrstva GaN vyrobená pomocí epitaxní technologie MOCVD na podložce  $\text{Al}_2\text{O}_3$  má monokrystalickou strukturu a vrstva GaN vyrobená pomocí magnetronového naprašování na podložku Si má polykrytalickou strukturu.



Obrázek 5.5: XRD spektra vrstev GaN, a) monokrystalická vrstva GaN vyrobená technologií MOCVD, b) polykrytalická vrstva GaN vyrobená technologií magnetronového naprašování.

Luminiscenční spektra vybraných vrstev GaN vyrobených pomocí epitaxní technologie MOCVD a dotovaných ionty  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  pomocí iontové implantace jsou uvedena na obr. 5.6. Iontová implantace byla provedena energií 300 keV a použitá dávka pro implantaci byla pro ionty  $\text{Er}^{3+}$   $1 \cdot 10^{15} \text{ Er} \cdot \text{cm}^{-2}$  a pro ionty  $\text{Yb}^{3+}$  se pohybovala od  $1 \cdot 10^{14} \text{ Yb} \cdot \text{cm}^{-2}$  do  $1 \cdot 10^{16} \text{ Yb} \cdot \text{cm}^{-2}$ .



Obrázek 5.6: Luminiscenční spektra vrstev GaN připravených pomocí epitaxe MOCVD a dotovaných ionty  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  pomocí iontové implantace.

Z obr. 5.6 vyplývá, že byla u vzorků zjištěna jen velmi slabá luminiscence na vlnové délce 1530 nm ( $\lambda = 980$  nm, měření bylo provedeno při pokojové teplotě). Podrobnější popis vlastností těchto vrstev GaN připravených pomocí epitaxe MOCVD a dotovaných pomocí iontové implantace je uveden v [30], [144], [150].

Vzorky vyrobené pomocí magnetronového naprašování byly připravovány v aparatuře Balzers Pfeiffer PLS 160. Depozice byla prováděna na Si podložku a sklo Corning. Jako zdroj gallia byl používán target z gallia nebo target z oxidu gallia ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ). Depozice probíhala v směsné atmosféře z dusíku a argonu. Dotace vrstev byla provedena přímo při depozici, a to pomocí tablet z  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , které byly pro tento účel vyrobeny pomocí lisování, anebo pomocí kovového prášku z prvky Er a Yb. Množství dotace GaN vrstev bylo řízeno zakrytím části plochy targetu. Složení vzorků bylo zjišťováno pomocí analýz RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). Složení vrstev GaN je uvedeno v tab. 5.3. Protože atomové číslo prvků Er a Yb je velice blízké, použité analýzy neumožňují určit množství těchto prvků odděleně, proto je toto množství erbia a ytterbia v tab. 5.3 uvedeno jako celkové detekované množství těchto dvou prvků (v tab. 5.3 označeno RE - Rare Earth).

Luminiscenční spektra vybraných vrstev GaN dotovaných ionty  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ , vyrobených pomocí magnetronového naprašování jsou uvedena na obr. 5.7. Z tohoto obrázku vyplývá pozitivní vliv iontů  $\text{Yb}^{3+}$  na luminiscenční spektra při optickém čerpání na vlnové délce 980 nm. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při nejvyšší dotaci ionty  $\text{Yb}^{3+}$ .

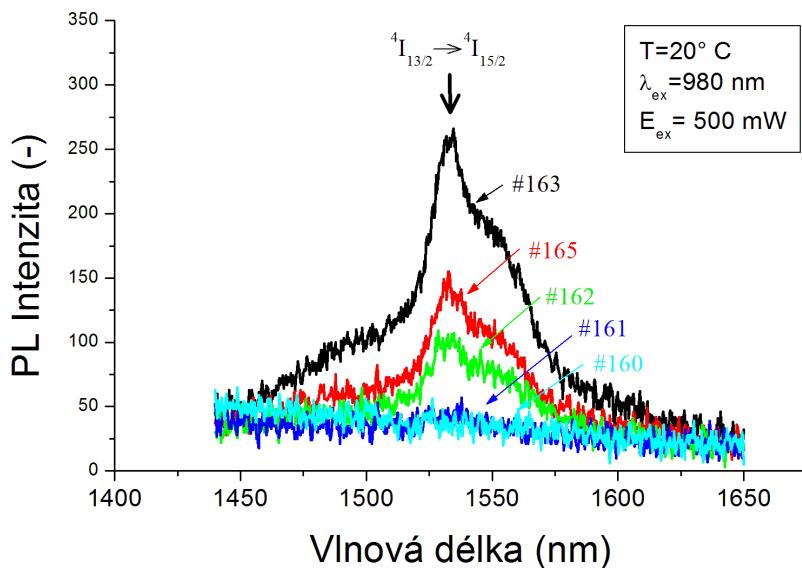
Tabulka 5.3: Složení vzorků GaN s dotací Er<sup>3+</sup> a Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> stanovené analýzou RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis).

vzorek		Ga (at%)	N (at%)	O (at%)	H (at%)	RE (at%)
#160	Referenční vzorek	39,2	14,1	41,5	5,2	0
#111	Er 1 x Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> **	35,3	25,4	30,5	8,6	0,2
#161	Er m <sub>Er</sub> = 0,05g ***	36,8	21,4	34,6	6,0	1,2
#162	Er/Yb m <sub>Er</sub> = 0,05g *** m <sub>Yb</sub> = 0,0997g	33,8	15,5	41,9	6,0	2,8
#165	Er/Yb m <sub>Er</sub> = 0,05g *** m <sub>Yb</sub> = 0,4996g	37,7	11,3	35,6	8,9	6,5
#163	Er/Yb m <sub>Er</sub> = 0,05g *** m <sub>Yb</sub> = 1,0008g	19,4	12,6	35,6	4,7	15,0

\* Vzorek bez dotace Er a Er/Yb (reference).

\*\* Počet vylisovaných tablet Er a Er/Yb (5 mm průměr) umístěných na target.

\*\*\* Hmotnost Er na Yb kovového prášku položeného na target.



Obrázek 5.7: Luminiscenční spektra vrstev GaN připravených pomocí magnetronového naprašování a dotovaných  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  ionty.

Vlastnosti vrstev GaN s dotací  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  vyrobených pomocí magnetronového naprašování jsme popsali v [30], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151].

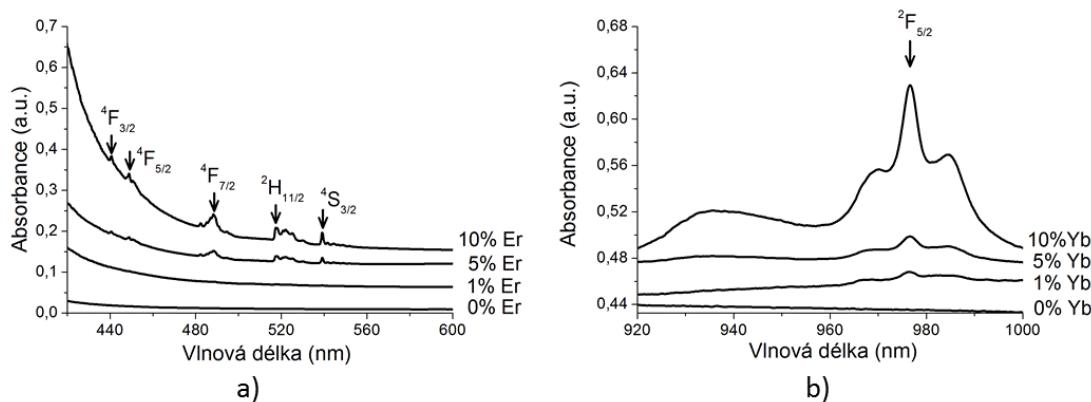
## Polymerní vrstvy s dotací erbia a erbia/ytterbia

Polymerní materiály jsou v poslední době intenzivně studovány řadou výzkumných skupin, protože mají vhodné optické vlastnosti, jednoduchý postup výroby a nižší cenu v porovnání s tradičními optickými materiály, jako jsou optická skla, krystaly, nebo polovodiče [7]. V laboratoři PLANIO jsme se zabývali studiem vlastností epoxidové pryskyřice ENR a polymeru PMMA s dotací iontů  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ , popřípadě dalších vzácných zemin jako  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  apod.

Polymerní ENR vrstvy s dotací aktivních iontů byly vyrobeny metodou rotačního lití (spin-coating). Vrstvy byly připravovány na křemíkových nebo křemenných substrátech. Po nanesení vrstev byly vzorky zahřány na teplotu 90°C po dobu 45 minut, poté byly vytvrzeny pomocí UV světla, a nakonec byly vzorky opět zahřány na teplotu 90°C po dobu 60 minut. Pro dotaci vzácných zemin byly použity chloridy a fluoridy vzácných ze-

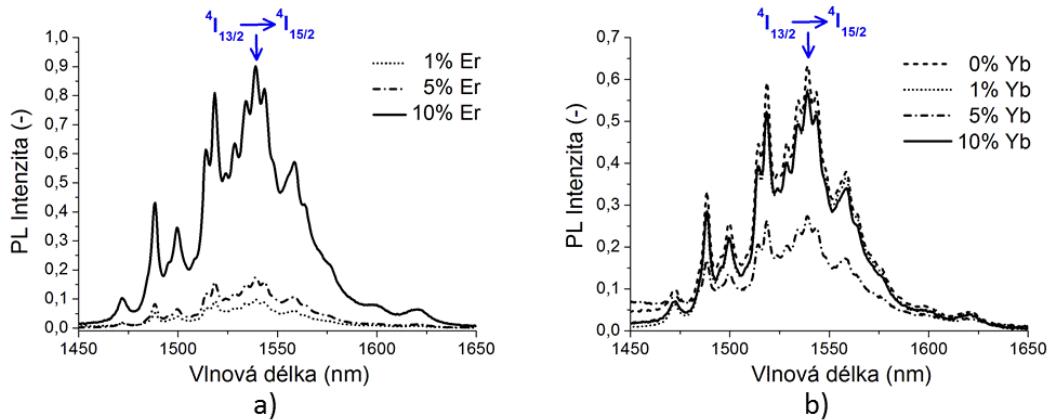
min (Sigma-Aldrich), které byly rozpuštěny v C<sub>5</sub>H<sub>9</sub>NO, nebo C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>OS rozpouštědlech. Množství prvků vzácných zemin v polymeru se pohybovalo od 1,0 do 10,0 at.%.

Absorpční spektra byla měřena pomocí spektrometru Varian co. v rozsahu vlnových délek od 250 nm do 800 nm a pomocí spektrometru UV-VIS-NIR UV-3600 Shimadzu v rozsahu vlnových délek od 700 nm do 1800 nm. Absorpční spektra polymeru ENR s dotací Er<sup>3+</sup> jsou zobrazena na obr. 5.8a. Z obr. 5.8a vyplývá, že u vzorků s dotací 10,0 at.% Er<sup>3+</sup> bylo pozorováno pět pásů, které odpovídají iontu Er<sup>3+</sup>, a to <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> (441 nm), <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> (448 nm), <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub> (488 nm), <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> (517 nm) a <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> (539 nm). Další pásy, které by odpovídaly tomuto iontu nebyly pozorovány. Absorpční spektra polymeru ENR s dotací Yb<sup>3+</sup> v rozsahu vlnových délek od 920 nm do 1000 nm jsou zobrazena na obr. 5.8b, kde je vidět silný pás na vlnové délce 977 nm, který odpovídá přechodu ytterbia <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>. Z absorpčních spekter vyplývá, že se zvyšující se dotací jsou přechody, které odpovídají vzácné zemině, výraznější.



Obrázek 5.8: Absorpční spektra polymeru ENR, a) s dotací Er<sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Er<sup>3+</sup> iontů (1 at%) a Yb<sup>3+</sup> iontů.

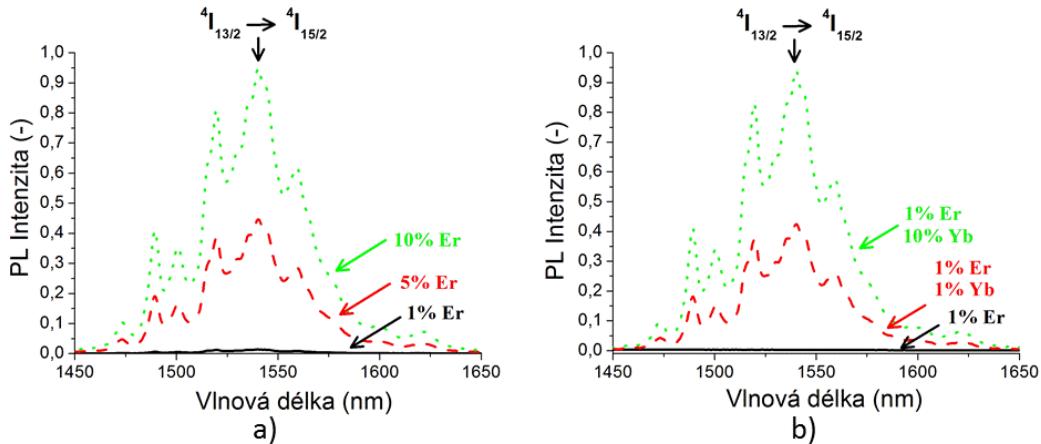
Fotoluminiscenční (PL) spektra polymeru ENR s dotací iontů Er<sup>3+</sup> jsou uvedena na obr. 5.9a a fotoluminiscenční spektra polymeru ENR s dotací 1,0 at.% Er<sup>3+</sup> a kodotací Yb<sup>3+</sup> iontů jsou uvedena na obr. 5.9b ( $\lambda_{ex}$  = 980 nm,  $E_{ex}$  = 500 mW). U všech vzorků byla pozorována luminiscence na vlnové délce 1530 nm odpovídající přechodu Er<sup>3+</sup> (<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>). U vzorků, kde byla použita kodotace ionty Yb<sup>3+</sup>, došlo ke zvýšení PL intenzity. U vzorků s vyšším obsahem než 5 at.% Yb<sup>3+</sup> iontů nedošlo ke zvýšení PL intenzity. Vlastnosti polymeru ENR dotovaného ionty Er<sup>3+</sup> a Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> byly prezentovány v [152], [153], [154], [155].



Obrázek 5.9: Luminiscenční spektra polymeru ENR, a) s dotací  $\text{Er}^{3+}$  iontů, b) s dotací  $\text{Er}^{3+}$  iontů (1 at%) a  $\text{Yb}^{3+}$  iontů.

Jak již bylo zmíněno výše, zabývali jsme se také studiem vlastnosti polymeru PMMA s obsahem iontů  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ . Vzorky byly připravovány na Si a skleněné podložky, kde jako zdroj Er a Yb iontů byly použity chloridy a fluoridy vzácných zemin ( $\text{ErCl}_3$ ,  $\text{YbCl}_3$ , nebo  $\text{ErF}_3$ ,  $\text{YbF}_3$ ), které byly rozpuštěny v  $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}$ , nebo v  $\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$ , a tyto roztoky byly přidány do polymeru PMMA (obsah erbia se pohyboval od 1,0 at.% do 10,0 at.%). Vzorky obsahující 1,0 at.% erbia byly kodotovány ytterbiem, kde množství ytterbia se pohybovalo v rozmezí od 1,0 at.% do 10,0 at.%. U vzorků byly opět měřeny absorpční spektra a u vzorků s větším obsahem vzácných zemin byly pozorovány pásy, které odpovídají iontům erbia a ytterbia.

Fotoluminiscenční spektra vrstev PMMA s dotací iontů  $\text{Er}^{3+}$  jsou uvedena na obr. 5.10a a fotoluminiscenční spektra polymeru PMMA s dotací 1,0 at.%  $\text{Er}^{3+}$  a kodotací  $\text{Yb}^{3+}$  iontů jsou uvedena na obr. 5.10b ( $\lambda_{ex} = 980 \text{ nm}$ ,  $E_{ex} = 500 \text{ mW}$ ).



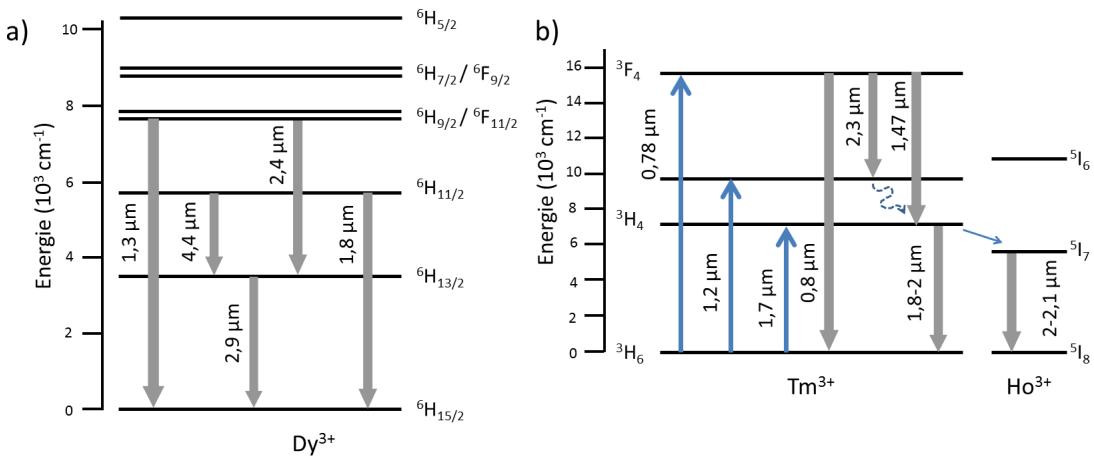
Obrázek 5.10: Luminiscenční spektra polymeru PMMA, a) s dotací  $\text{Er}^{3+}$  iontů, b) s dotací  $\text{Er}^{3+}$  iontů (1 at%) a  $\text{Yb}^{3+}$  iontů.

Z obr. 5.10a 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. 5.10b plyne, že přidáním ytterbia při optickém čerpání 980 nm dojde ke zvýšení intenzity luminiscenčních spekter. Vlastnosti těchto vrstev byly detailněji popsány v [156], [157], [158].

## Polymerní vrstvy s dotací dalších vzácných zemin

Kromě polymerních vrstev s dotací iontů  $\text{Er}^{3+}$  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 ( $\text{Pr}^{3+}$ ), thulia ( $\text{Tm}^{3+}$ ), holmia ( $\text{Ho}^{3+}$ ) a dysprosia ( $\text{Dy}^{3+}$ ). Tyto vzácné zeminy byly vybrány z důvodu studia luminiscenčních spekter na jiných vlnových délkách, než jen na vlnové délce 1530 nm, která odpovídá luminiscenci optických materiálů s dotací ionty  $\text{Er}^{3+}$ .

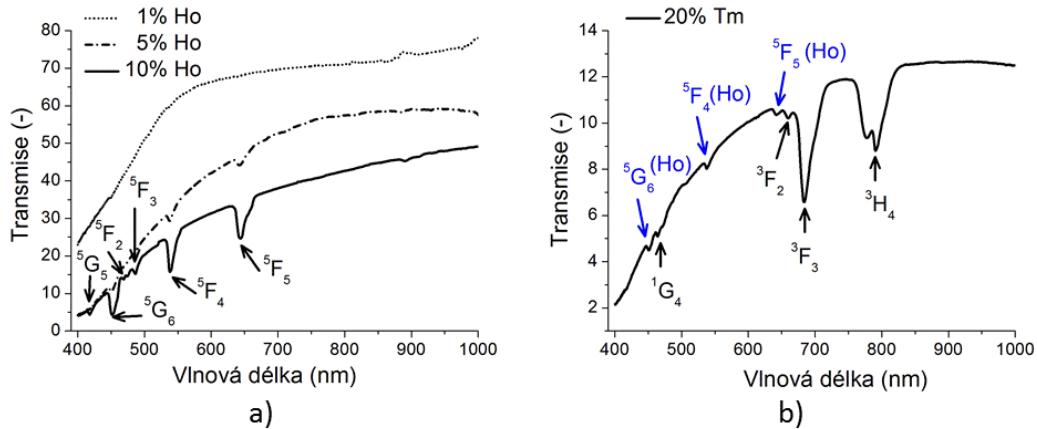
Dotace polymeru ENR trojmocnými ionty  $\text{Dy}^{3+}$  a  $\text{Pr}^{3+}$  byly studovány pro emisi na vlnové délce 1300 nm a optické materiály s dotací  $\text{Tm}^{3+}$  jsou studovány pro emisi na vlnových délkách kolem 1470 nm. Materiály s dotací ionty  $\text{Tm}^{3+}$  vykazují také luminiscenci na vyšších vlnových délkách, a to od 1600 nm do 2100 nm. Ionty  $\text{Ho}^{3+}$  se pak používají jako kodopant k optickým materiálům s dotací  $\text{Tm}^{3+}$ . Schematicky znázorněné energetické hladiny iontů  $\text{Dy}^{3+}$  jsou uvedeny na obr. 5.11a a energetické hladiny pro ionty  $\text{Tm}^{3+}$  a  $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  jsou uvedeny na obr. 5.11b.



Obrázek 5.11: Energetické hladiny iontů, a)  $Dy^{3+}$ , b)  $Tm^{3+}$  a  $Ho^{3+}$ .

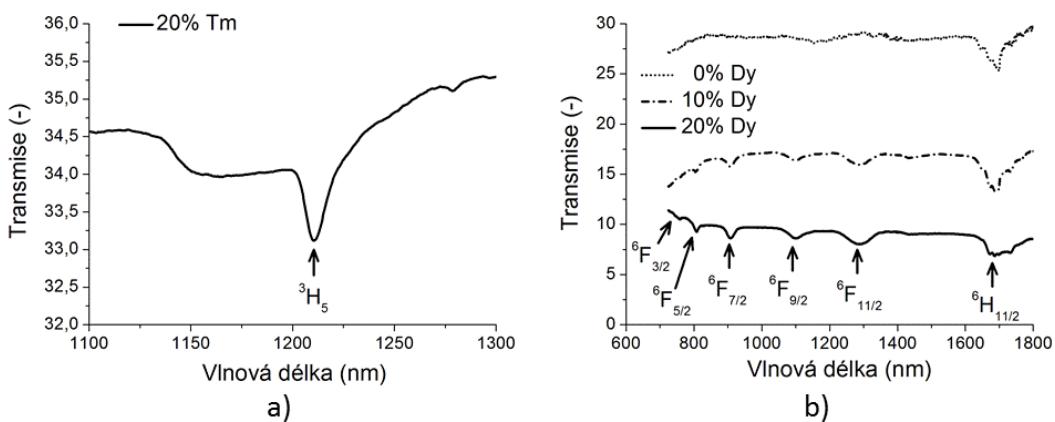
Postup přípravy polymerních vzorků s dotací iontů  $Dy^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$  a  $Tm^{3+}$  byl stejný jako v případě dotace ionty  $Er^{3+}$  a  $Er^{3+}/Yb^{3+}$ .

Transmisní spektra v rozsahu vlnových délek od 400 do 1000 nm pro polymer ENR s dotací iontů  $Ho^{3+}$  jsou uvedena na obr. 5.12a a transmisní spektra pro stejný polymer a stejný vlnový rozsah s dotací ionty  $Tm^{3+}$  (20,0 at.%) a  $Ho^{3+}$  (1,0 at.%) jsou uvedeny na obr. 5.12b. U vzorku s dotací 10,0 at.% iontu  $Ho^{3+}$  jsme pozorovali tři silné pásy, které odpovídají tomuto prvku. Jednalo se o pásy  $^5G_6$  (448 nm),  $^5F_4$  (535 nm) a  $^5F_5$  (639 nm). Kromě těchto tří pásů byly pozorovány ještě tři slabší pásy, a to  $^5G_5$  (415 nm),  $^5F_2$  (466 nm) a  $^5F_3$  (482 nm), které mohou být také přiřazeny k iontům holmia (viz obr. 5.12a). Na obr. 5.12b můžeme vidět kromě tří pásů  $^5G_6$  (448 nm),  $^5F_4$  (535 nm) a  $^5F_5$  (639 nm), které odpovídají iontům  $Ho^{3+}$ , také čtyři pásy, které odpovídají iontům  $Tm^{3+}$ , a to  $^1G_4$  (463 nm),  $^3F_2$  (658 nm),  $^3F_3$  (683 nm) a  $^3H_4$  (790 nm).



Obrázek 5.12: Transmisní spektra polymeru ENR, a) s dotací  $\text{Ho}^{3+}$  iontů,  
b) s dotací  $\text{Ho}^{3+}$  iontů (1,0 at%) a  $\text{Tm}^{3+}$  iontů (20,0 at.%).

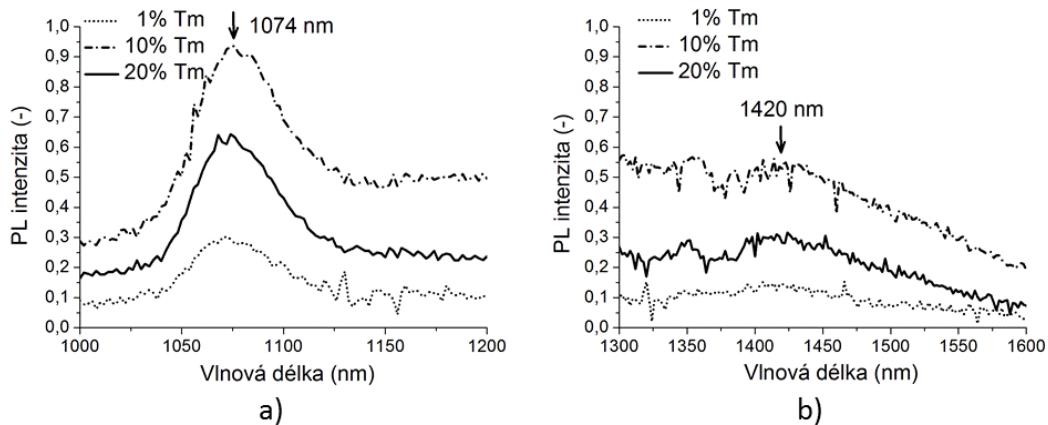
Transmisní spektra pro polymer ENR s dotací iontů  $\text{Tm}^{3+}$  pro vlnový rozsah od 1100 nm do 1300 nm jsou uvedena na obr. 5.13a a je zde jasně vidět na vlnové délce 1212 nm přechod  $^3\text{H}_5$ , který odpovídá iontu  $\text{Tm}^{3+}$ . Na obr. 5.13b jsou uvedena transmisní spektra pro polymer ENR s obsahem iontů  $\text{Dy}^{3+}$ . Pozorovali jsme 6 pásů, které odpovídají iontu  $\text{Dy}^{3+}$ , a to  $^6\text{F}_{3/2}$  (758 nm),  $^6\text{F}_{5/2}$  (807 nm),  $^6\text{F}_{7/2}$  (906 nm),  $^6\text{F}_{9/2}$  (1100 nm),  $^6\text{F}_{11/2}$  (1280 nm) a  $^6\text{H}_{11/2}$  (1685 nm).



Obrázek 5.13: Transmisní spektra polymeru ENR, a) s dotací  $\text{Tm}^{3+}$  iontů,  
b) s dotací  $\text{Dy}^{3+}$  iontů.

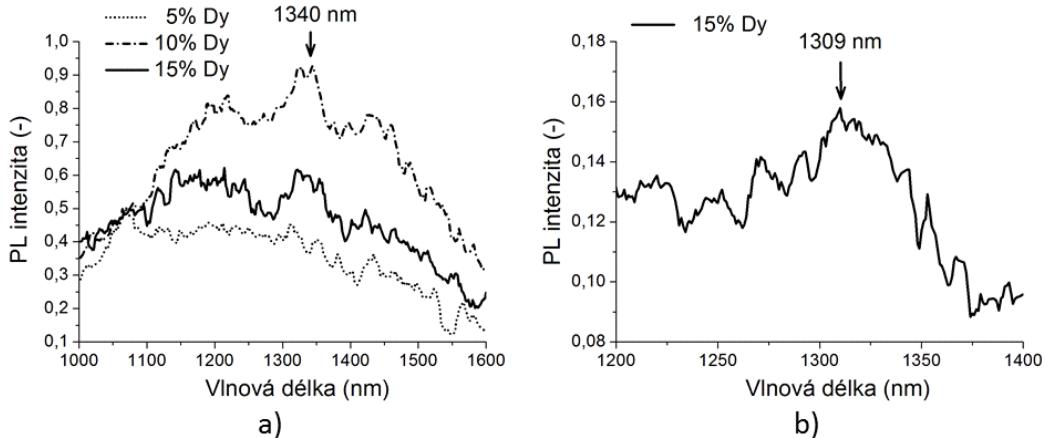
Na obr. 5.14 jsou uvedena luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací iontů  $\text{Tm}^{3+}$  při optickém buzení 632,8 nm (He-Ne laser) při teplotě 4 K. Na obr. 5.14a jsou uvedena

luminiscenční spektra pro rozsah vlnových délek 1000-1200 nm a na obr. 5.14b jsou tato spektra pro vlnové délky 1300-1600 nm. Obr. 5.14a ukazuje maximální intenzitu luminiscence na vlnové délce 1074 nm. Luminiscence na vlnové délce 1074 nm byla pozorována i u vzorků s nízkým obsahem iontů  $Tm^{3+}$  (1,0 at.%). Obr. 5.14b ukazuje jen velmi slabou intenzitu luminiscence na vlnové délce kolem 1420 nm.



Obrázek 5.14: Luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací  $Tm^{3+}$  iontů.

Na obr. 5.15 jsou uvedeny luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací iontů  $Dy^{3+}$  v rozsahu vlnových délek 1000-1600 nm. Obr. 5.15a ukazuje luminiscenci 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  $Dy^{3+} \ ^5H_{9/2} - \ ^5F_{11/2} \rightarrow \ ^5H_{15/2}$ . Tento přechod byl pozorován jen u vzorku s obsahem 10,0 at.% iontů dysprosia. Obr. 5.15b 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.%.

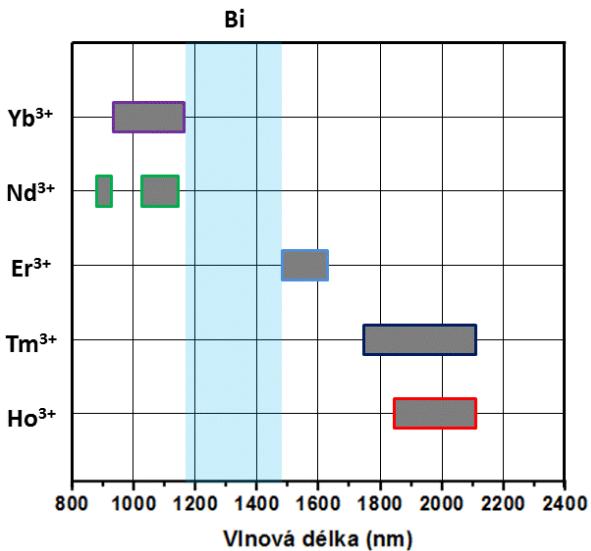


Obrázek 5.15: Luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací  $Dy^{3+}$  iontů,  
a) excitace 632 nm, b) excitace 827 nm.

Vlastnosti polymerních vrstev s dotací iontů  $Tm^{3+}$  a  $Dy^{3+}$  byly popsány v [159], [160], [161].

## 5.2 Optické materiály s dotací bismutu

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 těmito materiály pokrýt, je uvedena na obr. 5.16 [162]. Většina optických komunikačních systémů pracuje v tzv. 2 telekomunikačním okně na vlnové délce 1310 nm. Z obr. 5.16 plyne, že pomocí materiálů s vzácnými zeminami nelze pokrýt spektrální oblast přibližně od 1190 nm do 1490 nm. Výjimku tvoří optické zesilovače (většinou se jedná o fluoridová vlákna) s dotací neodymu ( $Nd^{3+}$ ), popřípadě praseodymu ( $Pr^{3+}$ ), které pracují na vlnové délce 1300 nm. Účinnost těchto vlnovodů je ale velmi omezena silnou absorpcí signálu a silnou fluorescencí na vlnové délce 1050 nm. Proto jsou hledána nová řešení, jak tento problém překonat.



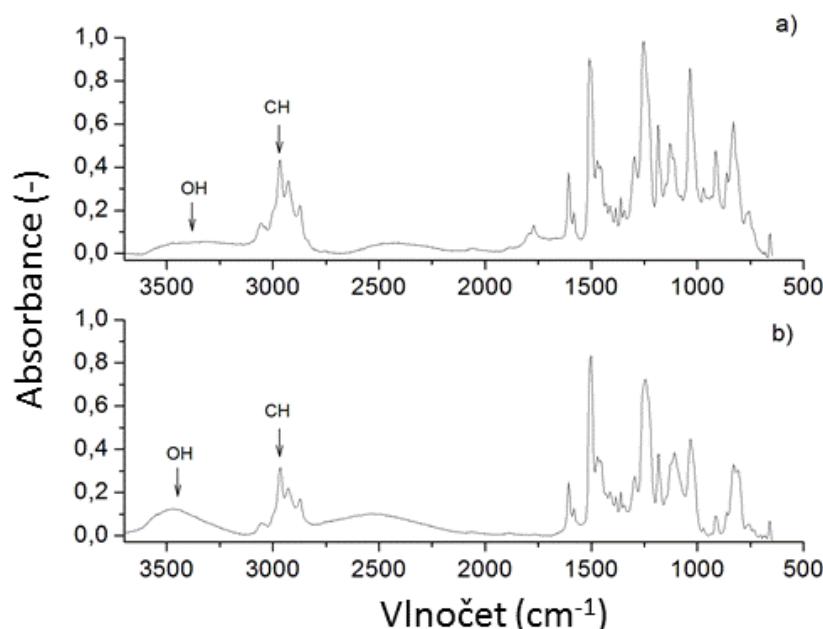
Obrázek 5.16: Spektrální pokrytí optických materiálů s dotací vzácných zemin. Oblast modrého obdélníku označuje rozsah vlnových délek, která může být případně pokryta aktivními materiály s dotací bismutu.

V roce 2001 Fujimoto a Nakatsuka publikovali vědecké práce, kde prokázali, že optické materiály s dotací bismutu mají velice zajímavé optické vlastnosti a mohou být použity k realizaci optických zdrojů a zesilovačů, které pokryjí blízké infračervené pásmo v rozsahu vlnových délek od 1190 nm do 1490 nm [163], [164], [165], [166]. V současnosti jsou studovány vlastnosti optických materiálů s dotací bismutu, které jsou dále kodotovány ionty vzácných zemin, např. ionty ytterbia [167], dysprosia [168], thulia [169] a pod. Takto dotované optické materiály 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 jsem se zabýval studiem optických vlastností polymerních materiálů s dotací bismutu. Není nám známo, že by doposud někdo jiný popsal luminiscenci polymerních materiálů s dotací bismutu.

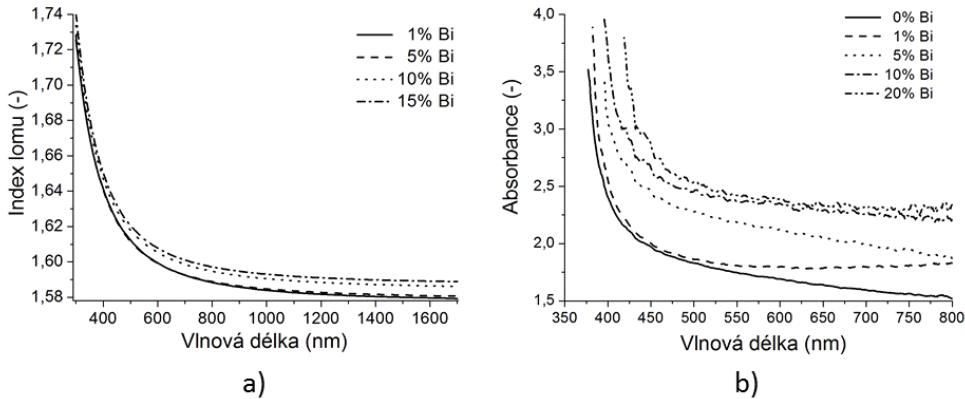
Polymerní vzorky s dotací bismutu byly připravovány stejnými postupy jako polymerní vzorky s dotací vzácných zemin. U polymerních vzorků s dotací bismutu byly změřeny infračervená spektra (IČ) pomocí spektrometru Bruker IFS 66/v. Výsledek měření pro polymer epoxidové pryskyřice ENR s dotací bismutu je uveden na obr. 5.17. Na obr. 5.17a jsou uvedena IČ spektra pro polymer ENR bez dotace a na obr. 5.17b jsou

uvadena IČ spektra pro vzorek, který obsahoval 20,0 at.% bismutu. Důvodem 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 (20,0 at.% Bi) je jen zanedbatelný rozdíl. Fyzikální interpretace IČ spekter byla detailněji popsána v [170].



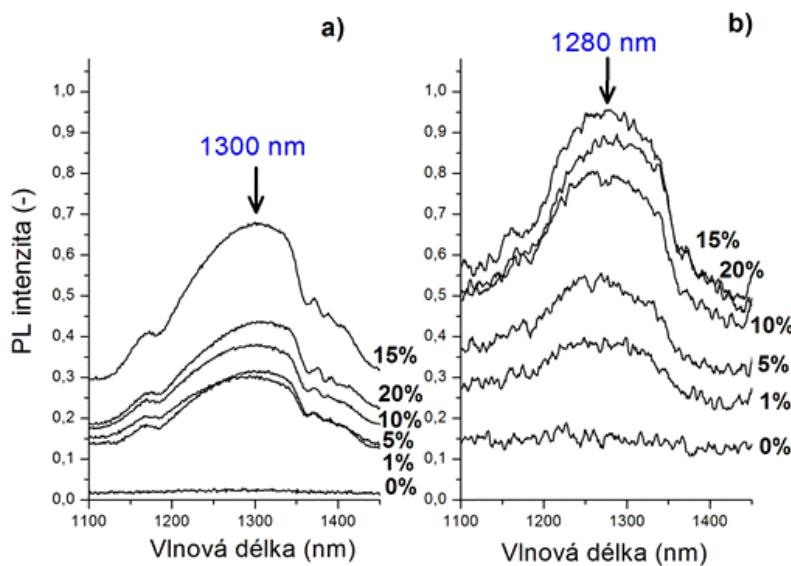
Obrázek 5.17: Infračervená spektra pro vzorek z epoxidové pryskyřice ENR, a) referenční vzorek (bez dotace Bi), b) vzorek s dotací bismutu (20 at.% Bi).

U polymeru s dotací bismutu byl také měřen vliv dotace na změnu hodnoty indexu lomu a změnu absorpčních spekter. Index lomu byl měřen pomocí elipsometru (VASE, J.A. Woollam & co.) a měření bylo provedeno v rozsahu vlnových délek od 300 nm do 1600 nm. Výsledek měření je uveden na obr. 5.18a. Z obr. 5.18a je zřejmé, že zvýšením obsahu bismutu došlo ke zvýšení hodnot indexu lomu. Absorpční spektra byla měřena pomocí spektrometru Varian Cary v rozsahu vlnových délek od 350 nm do 800 nm. Z měření vyplynulo, že s rostoucí úrovní dotace se absorpční hrana posouvá k vyšším vlnovým délkám (viz obr. 5.18b).



Obrázek 5.18: Výsledky měření pro polymer ENR s dotací bismutu,  
a) závislost indexu lomu na vlnové délce, b) absorpční spektra.

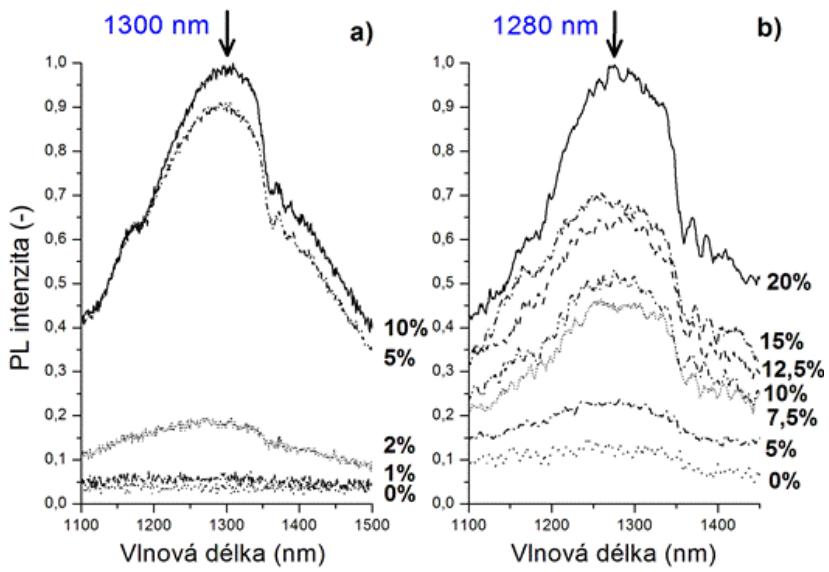
Fotoluminiscenční spektra byla měřena za použití polovodičového laseru POL 4300 s excitační vlnovou délkou 980 nm (250 mW), a nebo pomocí laseru pracujícím na vlnové délce 808 nm (250 mW). Měření bylo prováděno za pokojové teploty. Luminiscenční spektra polymeru ENR s různou výší dotace bismutu jsou uvedena na obr. 5.19. Na obr. 5.19a jsou luminiscenční spektra pro čerpací vlnovou délku 980 nm a na obr. 5.19b jsou luminiscenční spektra pro čerpací vlnovou délku 808 nm. Maximum intenzity na vlnové délce 1300 nm (obr. 5.19a) a 1280 nm (obr. 5.19b) odpovídá luminiscenci 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 díky koncentračnímu zhášení. Tento jev byl pozorován a popsán u optických materiálů s dotací vzácných zemin [119], [127].



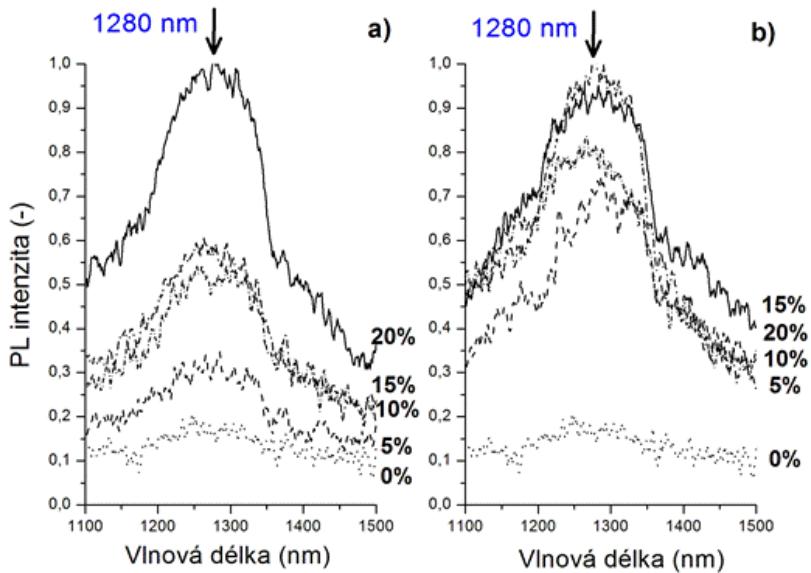
Obrázek 5.19: Fotoluminiscenční spektra pro polymer ENR s dotací bismutu, a)  $\lambda_{ex} = 980$  nm, b)  $\lambda_{ex} = 808$  nm.

Fotoluminiscenční spektra polymeru ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) a kodotací ionty ceru ( $Ce^{3+}$ ) jsou uvedena na obr. 5.20. Na obr. 5.20a jsou uvedena opět luminiscenční spektra pro čerpací vlnovou délku 980 nm a na obr. 5.20b jsou luminiscenční spektra pro čerpací vlnovou délku 808 nm. Maximum intenzity na vlnové délce 1300 nm (obr. 5.19a) a 1280 nm (obr. 5.19b) opět odpovídá luminiscenci iontů bismutu. Zajímavostí je, že jev koncentrační zhášení nebyl pozorován ani u vzorku s dotací 20,0 at.% ionty  $Ce^{3+}$ . Z obr. 5.19 a obr. 5.20 také vyplývá, že maximum intenzity luminiscenčních spekter se při nižší excitaci vlnové délce posouvá k nižší vlnové délce.

Fotoluminiscenční spektra polymeru ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) a s kodotací ionty  $Dy^{3+}$  jsou uvedena na obr. 5.21a a s kodotací ionty ytria jsou uvedena na obr. 5.21b. Fotoluminiscenční spektra byla měřena při excitaci 808 nm při pokojové teplotě.



Obrázek 5.20: Fotoluminiscenční spektra pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty Ce<sup>3+</sup>, a)  $\lambda_{ex}=980$  nm, b)  $\lambda_{ex}=808$  nm.

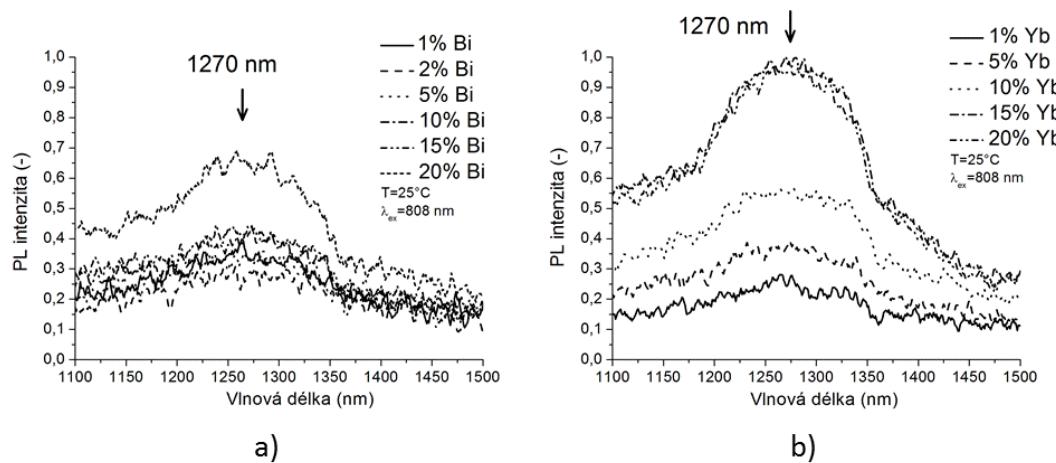


Obrázek 5.21: Fotoluminiscenční spektra ( $\lambda_{ex}=808$  nm) pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty, a) Dy<sup>3+</sup>, b) Y.

Z obr. 5.21a plyne, že intenzita se zvyšuje s rostoucí koncentrací kodopantu a ma-

ximální intenzita luminiscence byla zjištěna u vzorku obsahujícího nejvyšší koncentraci (20,0 at.%) iontů  $Dy^{3+}$ . V případě kodotace ionty ytria byla maximální intenzita zjištěna při koncentraci 15,0 at.% (obr. 5.21). 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 [171], [172].

Kromě studia vlastnosti epoxidové pryskyřice ENR s dotací iontů bismutu, jsme také studiovali vlastnosti polymeru poly(methylmethacrylimide) (PMMI). Polymer PMMI byl opět dotován ionty bismutu, popřípadě také kodotován ionty ytterbia. Fotoluminiscenční spektra polymeru PMMI s různou koncentrací bismutu jsou uvedena na obr. 5.22a. Fotoluminiscenční spektra polymeru PMMI s dotací bismutu (1,0 at.%) a s kodotací ytterbiem jsou uvedena na obr. 5.22b. Fotoluminiscenční spektra byla měřena při excitaci 808 nm při pokojové teplotě. V případě vzorků PMMI s dotací bismutu byla luminiscence velmi slabá a maximální intenzita byla zjištěna při maximální koncentraci bismutu 20,0 at.% (viz obr. 5.22a). V případě kodotace ionty  $Yb^{3+}$  byl výsledek mnohem lepší. Maximální intenzita luminiscence byla pozorována při koncentraci 15,0 at.%, při vyšší koncentraci ytterbia (20,0 at.%) se intenzita luminiscence již nezvýšila (viz obr. 5.22b). Vlastnosti polymeru PMMI dotovaného ionty bismutu byly popsány v [173].



Obrázek 5.22: Fotoluminiscenční spektra ( $\lambda_{ex}= 808$  nm) pro polymer PMMI, a) s dotací bismutu, b) s dotací bismutu (1,0 at.%) a s kodotací ionty  $Yb^{3+}$ .

# Kapitola 6

## Závěry, možnosti využití výsledků a další směr výzkumu

Předložená práce by měla doložit, že výzkum fotonických struktur v laboratoři PLANIO na Katedře mikroelektroniky na Fakultě elektrotechnické na ČVUT v Praze má dlouholetou tradici. Výzkum zde probíhá systematicky více než 20 let a autor předkládané práce zde působí více než 10 let. Za tuto dobu bylo dosaženo řady zajímavých vědeckých výsledků a autor této práce doufá, že svojí vědeckou činností k tomuto rozvoji také ale spoň malou částí přispěl.

Na závěr bych zde chtěl zdůraznit nejzajímavější dosažené výsledky a nastínit případné další směry, kudy se bude naše výzkumná činnost dále ubírat. V práci jsou uvedeny návrhy planárních optických vlnovodů, které jsou základním stavebním prvkem pro fotonické struktury. V současnosti je největší pozornost věnována návrhu optických planárních vlnovodů z polymerních materiálů. Byla navržena řada planárních a žebrových optických vlnovodů, které využívají nové perspektivní polymerní materiály. Byly navrženy jednovidové vlnovody z epoxidové pryskyřice ENR, polymeru Ormocore a WIR. Většina těchto vlnovodů byla z důvodu snadné integrace navržena tak, aby bylo možné dané optické struktury realizovat na podložkách z křemíku. Návrhy těchto struktur byly prováděny pomocí specializovaného softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> od firmy RSoft Design Group, Inc. Navržené optické vlnovody byly potom vyráběny pomocí optické a elektronové litografie a nejlepší vyrobené vlnovody měly optický útlum nižší než 1 dB/cm. Předpokládáme, že zkušenosti získané při návrhu a výrobě optických planárních vlnovodů budou využity pro realizaci složitějších fotonických struktur.

Dále byly navrženy struktury s mnohavidovými vlnovody, které byly určeny k distribuci optického signálu ze standartních POF vláken s průměrem jádra vlnovodu 980  $\mu\text{m}$ .

Tyto návrhy probíhaly opět pomocí programu BeamPROP<sup>TM</sup>, a nebo pomocí metody Ray tracing pomocí programu Opticad. Byly vyrobeny struktury optických mnohavidových rozbočnic s dělícím poměrem 1x2, nebo 1x4, které byly realizovány na podložce z polymeru PMMA. Byly také navrženy a realizovány struktury na podložce ze silikonového gelu s vlnovodnými vrstvami z UV polymerů NOA. Byly také navrženy a realizovány struktury s jedním vstupním a třemi výstupními optickými vlnovody, kde symetrické dělení optického signálu je zajištěno vložením obdélníkové oblasti s nižší hodnotou indexu lomu, než je index lomu vlnovodné vrstvy. Na toto technické řešení byla v roce 2013 podána patentová přihláška pod číslem PV2013-56. Tyto mnohavidové pasivní struktury mohou být využity pro přenos dat pomocí optického signálu v lokálních počítačových sítích na palubě letadel, lodí, automobilů, popřípadě v systémech FTTH.

V laboratoři PLANIO byly také navrhovány složitější struktury, jako například optické odbočnice a demultiplexory, které využívají principu mnohavidové interference. Tyto návrhy probíhaly opět za pomoci programu BeamPROP<sup>TM</sup>. Byly navrženy optické děliče výkonu s jedním vstupním a se třemi výstupními vlnovody. Dále byla navržena struktura optického demultiplexoru pro vlnové délky 650 nm/1310 nm, 1490 nm/1550 nm apod. Byly také navrhovány polymerní optické mikrorezonátory, které byly provedeny pomocí specializovaného programu FullWAVE<sup>TM</sup>. Tyto mikrorezonátory byly navrhovány tak, aby mohly být použity jako vlnově selektivní filtry pro vlnové délky 1490 nm a 1555 nm. Pro takto navržené struktury byly prováděny depoziční testy výroby pomocí optické a elektronové litografie.

Nejsložitější fotonickou strukturou, která je v současnosti navrhována, je optický triplexer. Tato struktura pracuje se třemi přenosovými pásy, a to se dvěma pásy  $1490 \pm 5$  nm a  $1555 \pm 5$  nm pro přenos dat k uživateli a jedním vlnovým pásem k přenosu dat od uživatele  $1310 \pm 50$  nm. První návrh optického triplexeru je založen na rozdelení optických signálů pomocí objemové holografické mřížky. Tento návrh byl zapsán v roce 2010 jako vynález na Úřadu pro průmyslové vlastnictví pod číslem 302146. Další dva návrhy optického triplexeru využívají planární řešení. V prvním případě je rozdelení jednotlivých vlnových délek provedeno pomocí dvou struktur vlnových děličů, pracujících na principu mnohavidové interference, zapojených za sebou. Jedna struktura s multividovou interferencí vydělí vlnové délky 1490 nm a 1555 nm a druhá struktura s multividovou interferencí současně umožní připojení vlnové délky 1310 nm. Druhé planární řešení optického triplexeru je složeno z jednoho směrového vazebního členu, který umožní připojení signálu 1310 nm, a struktury s multividovou interferencí, která umožní rozdelení signálu 1490 nm a 1555 nm. Struktura optického triplexeru se směrovým vazebním členem je původní a

nebyla dosud popsána.

Poslední typ optického triplexeru, který byl navržen, využívá kombinaci polymerních optických mikrorezonátorů. Byla navržena struktura, kdy vydělení pásma 1555 nm je zajištěno strukturou s trojitými sériově vázanými mikrorezonátory. Vydělení pásma 1490 nm je pak realizováno strukturou s dvojitými paralelně vázanými mikrorezonátory. Celá struktura je také navržena tak, aby umožnila přenos pásma 1310 nm, aniž by se jednotlivá pásma vzájemně ovlivnila. Tento návrh optického triplexeru složeného z polymerních mikrorezonátorů je také původní a nebyl dosud popsán.

Kromě pasivních fotonických struktur se zabýváme studiem optických materiálů s dotací aktivních iontů, kde by tyto materiály mohly být použity k realizaci optických zdrojů, zesilovačů, nebo konvertorů vlnových délek. Připravovali jsme uhlíkové vzorky a vrstvy gallia nitridu, které jsme dotovali ionty  $\text{Er}^{3+}$ , popřípadě ionty  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ . Dále jsme dotovali polymerní vrstvy, a to nejen ionty  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Yb}^{3+}$ , ale také dalšími vzácnými zeminami, jako např.  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  apod. Materiály s dotací  $\text{Er}^{3+}$  a  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  byly studovány pro možnou fotoluminiscenci na vlnové délce 1530 nm. Materiály s dotací dalších vzácných zemin jako  $\text{Dy}^{3+}$  a  $\text{Tm}^{3+}$  byly studovány pro fotoluminiscenci na dalších vlnových délkách, a to především na 1300 nm a 1500 nm.

Zvláštní pozornost byla věnována dotaci polymerních vrstev ionty bismutu. Tato problematika je velice aktuální a v současnosti se jí věnuje řada vědeckých týmů. Materiály s dotací bismutu mohou být použity k realizaci optických zdrojů a zesilovačů, které pracují na vlnové délce 1300 nm. Optické materiály, které jsou současně dotovány ionty Bi a  $\text{Er}^{3+}$  mohou být použity jako optické zesilovače, které pokryjí celé telekomunikační pásmo ve spektrální šířce od 1260 nm do 1650 nm. Podařilo se připravit polymerní vrstvy s dotací Bi, které vykazovaly luminiscenci na vlnové délce kolem 1300 nm. Polymerní vrstvy s dotací bismutu byly dále kodotovány dalšími aktivními ionty, jako např.  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$  a Y. U těchto vzorků byla pozorována zvýšená intenzita luminiscence, způsobená kodotací těmito iontů.

Přestože v současnosti je výzkum v laboratoři PLANIO zaměřen primárně na fotonické struktury z nových perspektivních polymerních materiálů, tak je předpoklad, že bude v budoucnu pokračovat také výzkum fotonických struktur z nových druhů optických skel, popřípadě z polovodičových materiálů. Přestože předpokládáme, že polymerní fotonické struktury budou hrát v budoucnu stále větší roli, tak fotonické struktury z nových typů optických skel a polovodičových materiálů polymerní struktury úplně nenahradí.

# Literatura

- [1] J. ČTYROKÝ, I. HÜTTEL, J. SCHRÖFEL, L. ŠIMKOVÁ: *Integrovaná optika*, SNTL Praha 1986.
- [2] S.E. MILLER: *Integrated Optics: An Introduction*, The Bell. System Technical Journal, vol. 46, No.7, September 1969.
- [3] J. SCHRÖFEL, K., NOVOTNÝ: *Optické vlnovody*, 1986, SNTL, Praha.
- [4] R.G. HUNSPERGER: *Integrated Optics, Theory and Technology*, 2002, Springer.
- [5] H. KOGELNIK: *An introduction to integrated Optics*, IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, vol. 23. No. 1, p. 2-16, 1975.
- [6] B.L. BOOTH: *Low loss channel waveguides in polymers*, Journal of Lightwave Technology, vol. 7, p. 1445-1453, 1989.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] G.T. REED: *Silicon on Photonics*, John Wiley&Sons Ltd 2008.
- [10] L. PAVESI, D.J. LOCKWOOD: *Silicon Photonics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- [11] S.I. NAJAFI: *Introduction to Glass Integrated Optics*, Artech House Publishers 1992.
- [12] C.H. HENRY, G.E. BLONDER, R.F. KAZARINOV: *Glass wave-guides on silicon for hybrid optical packaging*, Journal of Lightwave Technology, vol. 7, p. 1530-1539, 1998.

- [13] E.E.L. FRIEDRICH, M.G. OBERG, B. BROBERG ET AL.: *Hybrid integration of Semiconductor-lasers with Si-based single-mode ridge wave-guides*, Journal of Lightwave Technology, vol. 10, p. 336-340, 1992.
- [14] Y. YAMADA, A. TAKAGI, I. OGAWA, ET AL.: *Silica-based optical wave-guide on terraced silicon substrate as hybrid integration platform*, Electron Letters, vol. 29, p. 444-446, 1993.
- [15] P.N. PRASAD: *Nanophotonics*, Wiley-Interscience, 2004.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] W.R. JAMROZ, R. KRUZELECKY, E.I. HADDAD: *Applied microphotonics*, Taylor&Francis Group 2006.
- [19] L. ELDADA: *Polymer integrated optics: promise vs. practicality*, Organic Photonic Materials and Devices IV, Bernard Kippelen, Donal D. Bradley, Editors, Proceedings of SPIE, vol. 4642, p. 11-22, 2002.
- [20] L. ELDADA AND L. W. SHACKLETTE: *Advances in polymer integrated optics*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 6, p. 54-68, 2000.
- [21] L. ELDADA: *Optical communication components*, Review of scientific instruments, vol. 6, p. 54-68, 2004.
- [22] R.L. ESPINOLA, R.U. AHMAD, F. PIZZUTO, ET AL.: *A study of high-index-contrast 90 degrees waveguide bend structures*, Optics Express, vol. 8, no. 9, p. 517-528, 2001.
- [23] Y. KOKUBUN: *High index contrast optical waveguides and their applications to microring filter circuit and wavelength selective switch*, IEICE Transactions on Electronics, vol. E90C, p. 1037-1045, 2007.
- [24] A. MELLONI, R. COSTA, G. CUSMAI, F. MORICHETTI: *The role of index contrast in dielectric opitcal waveguides*, International Journal of Materials and Product Technology, vol. 34, p. 421-437, 2009.

- [25] P. RABIEI, H. W. STEIER, C. ZHANG, L. R. DALTON: *Polymer micro-ring filters and modulators*, International Journal of Lightwave Technology, vol. 20, no. 11, p. 1968-1975, 2002.
- [26] TECHNICKÝ DATASHEET DOSTUPNÝ NA: [www.bellexinternational.com](http://www.bellexinternational.com)
- [27] I. HÜTTEL: *Technologie materiálů pro elektroniku a optoelektroniku*, 2000, Skripta VŠCHT, Praha.
- [28] J. STEJSKAL: *Laboratorní zařízení pro přípravu tenkých vrstev vysokoteplotních supravodičů na bázi směsných oxidů metodou chemické depozice z plynné fáze*, Chemické Listy, vol. 93, p. 36-39, 1999.
- [29] J. STEJSKAL, J. LEITNER: *Nitridy hliníku, gallia a india jako perspektivní materiály v elektronice*, Chemické Listy, vol. 96, p. 311-320, 2002.
- [30] V. PRAJZLER: *The research of technology used for fabrication of active and passive waveguides on semiconductor base*, PhD. Thesis ČVUT 2007.
- [31] M. NERUDA: *Návrh optické planární mnohavidové rozbočnice*, Bakalářská práce ČVUT 2012.
- [32] P.N. KIEN: *Návrh mnohavidové optické rozbočnice*, Diplomová práce ČVUT 2012.
- [33] 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, p. 1202-1207, 2012.
- [34] M. MYSLÍK: *Příprava polymerních vrstev pro integrovanou optiku a studium jejich vlastností*, Bakalářská práce ČVUT 2006.
- [35] M. MYSLÍK: *Měření optických vlastností polymerních vrstev*, Diplomová práce ČVUT 2007.
- [36] O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Pattern Formation in PMMA Film Induced by Electric Field*, Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics, vol. 47, p. 1131-1135, 2009.
- [37] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. TŮMA, ET AL.: *Design, Fabrication and Measurement Polymethylmethacrylate Optical Waveguides Prepared by Modification of*

*Surface Profile by Applying Electric Field*, ElectroScope, vol. 2010, no. 3, p. 1-5, 2010.

- [38] O. LYUTAKOV, J. TŮMA, V. PRAJZLER, ET AL.: *Preparation of rib channel waveguides on polymer in electric field*, Thin Solid Films, vol. 519, no. 4, p. 1452-1457, 2010.
- [39] K. NOVOTNÝ: *Optická komunikační technika*, 1998, Skripta ČVUT, Praha.
- [40] V. PRAJZLER, M. VARGA, P. NEKVINDOVÁ, ET AL.: *Design and investigation of properties of nanocrystalline diamond optical planar waveguides*, Optics Express, vol. 21, no 7, p. 8409-8416, 2013.
- [41] E.D. PALIK: *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, Boston, 1985.
- [42] T. SHARDA, T. SOGA, T. JIMBO: *Optical properties of nanocrystalline diamond films by prism coupling technique*, Journal of Applied Physics vol. 93, p. 101-105, 2003.
- [43] P. DJEMIA, C. DUGAUTIER, T. CHAUVEAU, ET AL.: *Mechanical properties of diamond films: A comparative study of polycrystalline and smooth fine-grained diamonds by Brillouin light scattering*, Journal of Applied Physics vol. 90, 3771, 2001.
- [44] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV , I. HÜTTEL ET AL.: *Designed and fabrication of ENR polymer rib optical waveguides*, Electronic Devices and Systems (EDS09) IMAPS CS International Conference 2009, Proceedings, 2th to 3th September, Brno., p. 455-460, 2009.
- [45] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Designed and fabrication of ENR polymer rib optical waveguides*, ElectroScope, vol. 2009, p. 67-71, 2009.
- [46] T. VESELÝ: *Příprava a studium vlastností polymerních vrstev pro integrovanou optiku*, Diplomová práce ČVUT 2010.
- [47] M. MOKRÁŇ: *Analýza a návrh nových polymerních planárních fotonických struktur*, Diplomová práce ČVUT 2012.
- [48] P.N. KIEN: *Návrh planárního mnohavidového polymerního optického vlnovodu*, Bakalářská práce ČVUT 2009.

- [49] R. SVOBODA: *Návrh nových fotonických struktur pro sítě PON*, Bakalářská práce ČVUT 2011.
- [50] H. TŮMA: *Návrh 1x3 optické polymerní planární rozbočnice*, Bakalářská práce ČVUT 2011.
- [51] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Polymer optical waveguides for hybrid photonics applications*, 15th Microoptics Conference (MOC09) Tokyo Japan, Oct. 25-29, 2009 paper no. J30, p. 184-185, 2009.
- [52] G. FISCHBECK, R. MOOSBURGER, M. TOPPER, ET AL.: *Design concept for singlemode polymer waveguides*, Electronics Letters, vol. 32, no. 3, p. 212-213, 1996.
- [53] E. MERCATILI: *Slab-coupled waveguides*, Bell System Technical Journal, vol. 53, no. 4, p. 645-647, 1974.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] R.A. SOREF, J. SCHMIDTCHEN, K. PETERMANN: *Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 27, no. 8, p. 1971-1974, 1991.
- [58] J. BÁRNA: *Návrh polymerního optického vlnovodu*, Bakalářská práce ČVUT 2009.
- [59] J. Klapuch: *Návrh nového polymerního optického vlnovodu*, Bakalářská práce ČVUT 2009.
- [60] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. TŮMA, ET AL.: *New Technique for Preparation of Epoxy Novolak Resin Polymer Waveguides*, 15th Microoptics Conference (MOC09) Tokyo Japan, Oct. 25-29, 2009 paper no. J29, p. 182-183, 2009.

- [61] O. BARKMAN: *Návrh optických kanálkových difuzních rozbočnic na skleněných podložkách*, Diplomová práce ČVUT 2012.
- [62] O. BARKMAN, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER: *Design and modeling of multimode interference power splitters made by ion exchange in glass*, In 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012 Proceedings. Praha: Agentura Action M, 2012, p. 50-52, 2012.
- [63] O. BARKMAN, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER: *Optical splitters based on self-Imaging effect in multi-mode waveguide made by Ion exchange in glass*, Radioengineering, přijato k publikování v 2013.
- [64] T.C. SUM, A.A. BETTIOL, S.V. RAO, ET AL.: *Proton beam writing of passive polymer optical waveguides*, In Proceedings of the SPIE, vol. 5347, Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics II, edited by Eric G. Johnson, Gregory P. Nordin, p. 160-169, 2004.
- [65] J. GREXA: *Teoretický návrh optické odbočnice*, Diplomová práce ČVUT 2010.
- [66] V. PRAJZLER, J. GREXA, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of Y-branch optical polymer waveguides*, Electronic Devices and Systems (EDS11) IMAPS CS International Conference 2011, Proceedings, 22th to 23th June, Brno, p. 246-251, 2011.
- [67] S. BANBA, H. OGAWA: *Novel symmetrical three-branch optical waveguide with equal power division*, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 2, no. 5, p. 188-190, 1992.
- [68] T.J. WANG, C.F. HUANG: *Wide-angle 1x3 optical power divider in LiNbO<sub>3</sub> for variable power splitting*, IEEE Photonics Technology Letters, 2003. vol. 15, no. 10, p. 1401-1403, 2003.
- [69] M. HURANA, M. BELANGER, G.L. YIP: *Passive 3-branch optical power divider by K<sup>+</sup> -ion exchange in glass*, Electronics Letters, vol. 21, no.12. p. 535-536, 1985.
- [70] T. YABU, M. GESHIRO, N. MINAMI, S. SAWA: *Symmetric three-branch optical power divider with a coupling gap*, Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 9, p. 1693 - 1699, 1999.
- [71] V. PRAJZLER, H. TŮMA, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK: *Design and modeling of the symmetric 1x3 optical polymer planar power divider*, Proceedings EDS12 IMAPS CS

International Conference 2012, Electronic Devices and Systems, June 28-29, 2012  
Brno Czech Republic. p. 1-6, 2012.

- [72] V. PRAJZLER, H. TŮMA, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK: *Design and modeling of the symmetric three branch polymer planar optical power dividers*, Radioengineering, vol. 22, no. 1, p. 233-239, 2013.
- [73] D.R. BELTRAMI, J.D. LOVE, F. LADOUCEUR: *Multimode planar devices*, Optical and Quantum Electronics, vol. 31, p. 307-326, 1999.
- [74] J.D. LOVE A.W. SNYDER: *Optical Waveguide Theory*, Chapman and Hall, 1983.
- [75] 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, p. 1202-1207, 2012.
- [76] V. PRAJZLER, M. NERUDA, J. ŠPIRKOVÁ: *Properties of planar large core polymer optical 1x2 and 1x4 splitters connectable to plastic optical fiber*, Radioengineering přijato k publikování v 2013.
- [77] L.B. SOLDANO, E.C.M. PENNINGS: *Optical multi-mode interference devices based on self-imaging - principles and applications*, Journal of Lightwave Technology, vol. 13, no. 4, p. 615-627, 1995.
- [78] L.B. SOLDANO, E.C.M. PENNINGS: *Optical multi-mode interference devices based on self-imaging - principles and applications*, Journal of Lightwave Technology, vol. 13, no. 4, p. 615-627, 1995.
- R.M. Jenkins, D.R. Wight, et al.: Novel 1-to-N way integrated optical beam-splitters using symmetrical mode mixing in GaAs/AlGaAs multimode wave-guides. Applied Physics Letters, vol. 61, no. 15, pp. 1754-1756, (1992).
- [79] Y. SHI, D. DAI: *Design of a compact multimode interference coupler based on deeply-etched SiO<sub>2</sub> ridge waveguides*, Optics Communications, vol. 271, no. 2, p. 404-407, 2007.
- [80] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HUTTEL, ET AL.: *Design of polymer wavelength splitter 1310 nm/1550 nm based on multimode interferences*, Radioengineering, vol. 19, no. 4, p. 606-609, 2010.

- [81] V. PRAJZLER, V. JURKA, V. JEŘÁBEK: *Modeling of the Multimode Polymer Interference Optical Wavelength 1490/1555 nm Demultiplexer*, 17th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2012), 2-6 July, 2012, at the BEXCO Convention Center in Busan, Korea, vol. 19, no. 4, p. 631-632, 2012.
- [82] M. BLAHUT, D. KASPRZAK: *Multimode interference structures-properties and applications*, Optica Applicata, vol. 34, No. 4. p. 573-587, 2004.
- [83] M. BLAHUT, D. KASPRZAK: *Self-imaging effects in curved gradient index multimode interference structures made by  $K^+$  -  $Na^+$  ion exchange*, Optica Applicata, vol. 39, No. 3. p. 445-458, 2009.
- [84] S. DAS, D. GERAGHTY, S. HONKANEN, N. PEYGHAMBARIAN: *MMI splitters by ion-exchange in glass*, Integrated Optics Devices IV Book Series: Proceedings of the SPIE, vol. 3936, p. 239-247, 2000.
- [85] B.R. WEST, D.V. PLANT: *Optimization of non-ideal multimode interference devices*, Optics Communications, vol. 279, no. 1, p. 72-78, 2007.
- [86] O. BARKMAN, V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK, P. NEKVINDOVÁ: *Design and modeling of multimode interference power splitters made by ion exchange in glass*, Proceedings EDS12 IMAPS CS International Conference 2012, Electronic Devices and Systems, June 28-29, 2012 Brno Czech Republic. p. 273-278, 2012.
- [87] D.G. RABUS: *Integrated Ring Resonators*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [88] K. VAHALA: *Optical Microcavities*, World Scientific Pub Co Inc. 2005.
- [89] E. STŘÍLEK: *Návrh optického polymerního mikrorezonátoru*, Diplomová práce ČVUT 2011.
- [90] V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK , O. LYUTAKOV, ET AL.: *Epoxy novolak resin optical microring resonator*, Electronic Devices and Systems (EDS11) IMAPS CS International Conference 2010, Proceedings, 22th to 23th June, Brno, p. 240-245, 2010.
- [91] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, V. JEŘÁBEK: *Design of epoxy novolak resin 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.

- [92] V. PRAJZLER, E. STRILEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Design and modelling of the integrated polymer microring resonators on silicon substrate*, 2nd International Conference on Photonics, 17-19 October 2011, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, p.19-23, 2011.
- [93] V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Design and modeling of the ENR polymer microring resonators add/drop filter for wavelength division multiplexing*, ElectroScope Online Journal, ročník 2011 Číslo IV, p. 1-5, 2011.
- [94] V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Polymer optical microring filter for passive optical network applications*, IQEC/CLEO Pacific Rim, The International Quantum Electronics Conference, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, 28 August - 1 September 2011, p. 1297-1299.
- [95] C. DECUSATIS: *Handbook of Fiber Optic Data Communication : A Practical Guide to Optical Networking*, Third Edition. USA : Elsevier, 2008.
- [96] 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/T-REC-G.983.3/en>.
- [97] ITU-T G.984.3. *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specication*. Geneva : ITU-T, 03/2008: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3/en>.
- [98] D. MAREŠ: *Vlastnosti objemové holografické triplexní mřížky Braggova typu využívající hybridní integrované technologie*, Bakalářská práce ČVUT 2010.
- [99] M. KAGAMI, T. YAMASHITA: *Polymer optical waveguide devices for low-cost WDM module*, Linear, Nonlinear, and Power-Limiting Organics, vol. 4106, p. 11-12, 2000.
- [100] S. BIDNYK, A. BALAKRISHNAN: *Monolithically-integrated SOI-based planar lightwave filter for passive optical network applications*, Group IV Photonics - 3rd IEEE International Conference, vol. 4, p. 120, 2006.
- [101] J.H. SONG, J.H. LIM, R.K. KIM, ET AL.: *Bragg grating-assisted WDM filter for integrated optical triplexer transceivers*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, no. 12, p. 2607-2609, 2005.

- [102] S. YAOCHENG: *Design of a polarization insensitive triplexer using directional couplers based on submicron silicon rib waveguide*, Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 11, p. 1443, 2009.
- [103] S.H. FAN, D. GUIDOTTI: *A novel compact polymeric wavelength triplexer designed for 10Gb/s TDM-PON based on cascaded-step-size multimode interference*, Electronic Components and Technology Conference - ECTC 59th, p. 220, 2009
- [104] S.H. FAN, D. GUIDOTTI, H.C. CHIEN, G.K. CHANG: *Compact polymeric four-wavelength multiplexers based on cascaded step-size MMI for 1G/10G hybrid TDM-PON applications*, Optics Express, vol. 16, no. 17, p. 12664-12669, 2008.
- [105] Y.T. HAN, Y.J. PARK, S.H. PARK, ET AL.: *Fabrication of a TFF-attached WDM-type triplex transceiver module using silica PLC hybrid integration technology*, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, 2006.
- [106] A. JUNMING, L. JIAN, L. JUNYI, ET AL.: *Novel triplexing-filter design using silica-based direction coupler and an arrayed waveguide grating*, Optical Engineering, vol. 48, no. 1, 014601, 2009.
- [107] V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER ET AL.: *Design and construction of a WDM transceiver with VHGT using hybrid integration technology*, Physica Status Solidi C, vol. 8, no. 9, p. 2938–2941, 2011.
- [108] V. JEŘÁBEK, J. ARMAS, V. PRAJZLER: *Hybrid microoptical WDM receiver for PON communication*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, vol. 10, no. 10, p. 95-100, 2012.
- [109] V. JEŘÁBEK, J. ARMAS, D. MAREŠ, V. PRAJZLER: *Microoptical and Microwave Design and Construction of a Micromodules for WDM Receiver*, 23rd Conference and Exhibition on Optical Communications 2011 Scientific Section Proceedings, October 20 - 21, 2011, Prague - Czech Republic, p. 9-13, 2011.
- [110] V. JEŘÁBEK: *Výzkum vybraných optoelektronických a optických integrovaných struktur pro informatiku*, Habilitační práce ČVUT 2012.
- [111] 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.

- [112] Z. BRYCHTA: *Dotace dielektrických podložek laserově aktivními ionty z vnějšího zdroje*, Diplomová práce ČVUT 1999.
- [113] V. PRAJZLER: *Příprava a výzkum vlastností optických vlnovodů na bázi uhlíku a jejich sloučenin*, Diplomová práce ČVUT 2001.
- [114] V. DRAHOŠ: *Výzkum dielektrických planárních vlnovodů pro laserové aplikace*, Diplomová práce ČVUT 2002.
- [115] M. ŠVRČEK: *Aktivní optické kanálkové vlnovody ve skleněných podložkách*, Diplomová práce ČVUT 2004.
- [116] P. ČAPEK: *Erbium doped planar waveguides in dielectric materials*, PhD. Thesis ČVUT 2004.
- [117] P. ČAPEK, M. MÍKA, J. OSWALD ET AL.: *Effect of divalent cations on properties of Er<sup>3+</sup>-doped silicate glasses*, Optical Materials, vol. 27, no. 2, p. 331–336, 2004.
- [118] 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.
- [119] 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.
- [120] Y.Q. WANG, A.J. STECKL: *Three-color integration on rare-earth-doped GaN electroluminescent thin films*, Applied Physics Letters, vol. 82, no. 4, p. 502-504, 2003.
- [121] E. LALLIER: *Rare-earth-doped glass and LiNbO<sub>3</sub> wave-guide lasers and optical amplifiers*, Applied Optics, vol. 31, no. 25, p. 5276-5282, 1992.
- [122] A.J. STECKL, J.M. ZAVADA: *Photonics applications of rare-earth-doped materials*, MRS Bulletins, vol. 24, no. 9, p. 16-20, 1999.
- [123] B.E.A. SALEH, M.C. TEICH: *Základy fotoniky*, Matfyzpress, Praha, 1994.
- [124] M.J.F. DIGONNET: *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*, Marcel Dekker Inc 2001.
- [125] B.R. JUDD: *Optical absorption intensities of rare-earth ions*, Physical Review, vol. 127, no. 3, p. 750-761, 1962.

- [126] G.S. OFELT: *Intensities of crystal spectra of rare-earth ions*, Journal of Chemical Physics, vol. 37, p. 511-520, 1962.
- [127] A. POLMAN: *Erbium implanted thin film photonic materials*, Journal of Applied Physics, vol. 82, no. 1, p. 1-39, 1997.
- [128] P.G. KIK, A. POLMAN: *Erbium-doped optical waveguide amplifiers on silicon*, MRS Bulletin, 1998, vol. 23, no. 4, p. 48-54, 1998.
- [129] C.E. CHRYSSOU, F. DI PASQUALE, C.W. PITTS: *Improved gain performance in Yb<sup>3+</sup>-sensitized Er<sup>3+</sup>-doped Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) channel optical waveguide amplifiers*, Journal of Lightwave Technology, vol. 19, no.3, p. 345-349, 2001.
- [130] C. STROHHOFER, A. POLMAN: *Relationship between gain and Yb<sup>3+</sup> concentration in Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> doped waveguide amplifiers*, Journal of Applied Physics, vol. 90, no. 9, p. 4314-4320, 2001.
- [131] T. KASAMATSU, Y. YANO, T. ONO: *1.49 μm m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for WDM transmission systems.*, Journal of Lightwave technology, vol. 20, no. 10, p. 1826-1838, 2002.
- [132] B.N. SAMSON, J.A.M. NETO, R.I. LAMING, D.W. HEWAK: *Dysprosium doped Ga:La:S glass for an efficient optical-fiber amplifier operating at 1.3 μm*, Electronics Letters, vol. 30, no. 19, p. 1617-1619, 1994.
- [133] J. GUROVIČ, I. HÜTTEL, M. SKALSKÝ, J. ČTYROKÝ: *Uhlíkové optické planární vlnovody*, Optické komunikace 2007, Praha, sborník příspěvků, str. 148-151.
- [134] I. HÜTTEL, J. GUROVIČ, F. ČERNÝ, J. POSPÍŠIL: *Carbon and carbon nitride planar waveguides on silicon substrates*, Diamond and Related Materials, vol. 8, no. 2-5, str.628-630, 1999.
- [135] A.M. BARANOV, V.V. SLEPTSOV, A.A. NEFEDOV, ET AL.: *Erbium photoluminescence in hydrogenated amorphous carbon*, Erbium photoluminescence in hydrogenated amorphous carbon, Physics Status Solidi b, Vol. 234, no.2, p. R1-R3, 2002.
- [136] G. SPERANZA, L. CALLIARI, M. FERRARI, ET AL.: *Erbium doped thin amorphous carbon films prepared by mixed CVD sputtering*, Applied Surface Science, vol. 238, p. 117-120, 2004.

- [137] R.Y. TSAI, L. QIAN, H. ALIZADEH, N.P. KHERANI: *Room-temperature photoluminescence in erbium-doped deuterated amorphous carbon prepared by low-temperature MO-PECVD*, Optics Express, vol. 17, no. 23, p. 21098-21107, 2009.
- [138] Y.M. FOONG, J. HSIEH, X. LI, ET AL.: *The study on the effect of erbium on diamond-like carbon deposited by pulsed laser deposition technique*, Journal of Applied Physics, vol. 106, no. 6, article number: 064904, 2009.
- [139] H. ZHANG, D.Y. TANG, L.M. ZHAO, ET AL.: *Large energy mode locking of an erbium-doped fiber laser with atomic layer graphene*, Optics Express, vol. 17, no. 20, p. 17630-17635, 2009.
- [140] A.G. ROZHIN, Y. SAKAKIBARA, S. NAMIKI, ET AL.: *Sub-200-fs pulsed erbium-doped fiber laser using a carbon nanotube-polyvinylalcohol mode locker*, Applied Physics Letters, vol. 88, no.5, 2006.
- [141] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, 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.
- [142] P.N. FAVENNEC, H. LHARIDON, M. SALVI, D. MOUTONONNET, Y. LEGUILLOU: *Luminescence of erbium implanted in various semiconductors - IV-materials, III-V-materials and II-VI materials*, Electronics Letters, vol. 25, no. 11, p. 718-719, 1989.
- [143] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of  $Er^{3+}$  +  $Yb^{3+}$*  In Advances in Thin-Films Coatings for Optical Applications III. Bellingham: SPIE, 2006, p. 62860K-1-62860K-10.
- [144] 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.
- [145] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. SCHROFEL, ET AL.: *Properties of erbium-doped gallium nitride films prepared by RF magnetron sputtering*, In Microwave and Optical Technology 2003. Washington: SPIE, 2004, p. 294-297.
- [146] V. PRAJZLER, J. SCHROFEL, I. HÜTTEL, ET AL.: *Raman spectra of erbium doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, In European Microelectronics and Packaging Symposium. Brno: VUT v Brně, FEI, 2004, vol. 1, p. 577-582.

- [147] V. PRAJZLER: *Investigation of properties of rare earth doped gallium nitride layers*, In POSTER 2005, Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2005,
- [148] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Gallium nitride thin films containing rare earth ions fabricated by magnetron sputtering*, In nanoSmat2005 - International Conference on Surface, Coatings and Nanostuctured Materials. Aveiro: University of Aveiro, 2005, p. P202-P204.
- [149] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Photoluminescence study of ( $Er^{3+} + Yb^{3+}$ ) doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, In Infrared Photoelectronics, Bellingham: SPIE, 2005, vol. 5957, p. 232-240.
- [150] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Rare earth doped gallium nitride layers for photonics applications*, In Photonics, Devices, and Systems III. Bellingham: SPIE, 2006, p. 618018-618018F6.
- [151] V. PRAJZLER, Z. BURIAN, I. HÜTTEL, ET AL.: *Properties of erbium and ytterbium doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, Acta Polytechnica, vol. 46, no. 6/2006, p. 49-55, 2007.
- [152] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of epoxy novolak resin polymer co-doped with  $Er^{3+}$  and  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  ions*, In The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Seoul: IEEE CLEO/Pacific Rim, 2007, p. 1132-1133.
- [153] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Photoluminescence of  $Er^{3+}$  and  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  doped epoxy novolak resin*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 2, no. 2, p. 236-241, 2007.
- [154] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Spectroscopic and photoluminescence study of epoxy novolak resin polymer doped with  $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  and  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  ions*, In The 42nd IUPAC World Polymer Congress [CD-ROM]. Taipei: National Taiwan University, 2008.
- [155] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Spectroscopy properties of epoxy novolak resin doped with rare earth ions*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 4, no. 5, p. 318-323, 2009.

- [156] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Optical properties of PMMA polymer doped with Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions*, Journal of Physics: Conference Series, no. 100, p. 1-4, 2008.
- [157] 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.
- [158] 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.
- [159] V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optical properties of Dy<sup>3+</sup> doped Epoxy Novolak Resin*, In Proceedings of SPIE 7061 - Novel Optical Systems Design and Optimization XI. Bellingham, 2008, p. 706119-1-706119-8.
- [160] V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Spectroscopy properties of epoxy novolak resin doped with rare earth ions*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 4, no. 5, p. 318-323, 2009.
- [161] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optical and spectroscopic properties of polymer layers doped with rare earth ions*, Advance in Lasers and Electro-optics, Vukovar: In-Tech, p. 59-68, 2010.
- [162] I.A. BUFETOV, E.M. DIANOV: *Bi-doped Fiber lasers*, Laser Physics Letters, vol. 6, no. 7, p. 487-504, 2009.
- [163] Y. FUJIMOTO, M. NAKATSUKA: *Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass*, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 40, p. L279-L281, 2001.
- [164] Y. FUJIMOTO, M. NAKATSUKA: *Optical amplification in bismuth-doped silica glass*, Applied Physics Letters, vol. 82, no. 19, p.3325-332, 2003.
- [165] 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.
- [166] M.Y. PENG, J.R. QIU, D.P. CHEN, ET AL.: *Bismuth- and aluminum-codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification*, Optics Letters, vol. 29, no. 17, p. 1998-2000, 2004.

- [167] 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.
- [168] 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 chalcohalide glasses*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 90, no. 11, p. 3670-3672, 2007.
- [169] 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.
- [170] 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.
- [171] 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.
- [172] 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.
- [173] V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. OSWALD, ET AL.: *Optical properties of Poly(Methylmethacrylimide) doped with bismut ions*, In book of abstract 20th International Conference on Advanced Laser Technologies. Bern: University of Berne, 2012, p. 346-347.

## **Příloha A**

**Práce autora s bezprostředním  
vztahem k řešené problematice**

## A.1 Patenty, užitné vzory, funkční vzory

### Vynálezy, na kterých se autor podílel

- V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, K. BUŠEK, J.A. ARGINIEGA: *Integrovaný optoelektronický transceiver pro účastnickou stranu sítě PON-FTTH.* Úřad průmyslového vlastnictví, PV 302146. 2010-10-04.
- V. PRAJZLER, R. MAŠTERA: *Optická planární mnohavidová rozbočnice.* Úřad průmyslového vlastnictví, žádost o zápis č. PV 2013-56, podána 2013-29-01.

### Užitné vzory, na kterých se autor podílel

- V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, K. BUŠEK, J.A. ARGINIEGA: *Integrovaný optoelektronický transceiver pro účastnickou stranu sítě PON-FTTH.* Patent Úřad průmyslového vlastnictví, PUV 20719. 2010-02-16.
- V. PRAJZLER, R. MAŠTERA: *Optická planární mnohavidová rozbočnice.* Úřad průmyslového vlastnictví, PUV 25454, 2013-30-05.
- V. PRAJZLER, R. MAŠTERA, Z. BURIAN: *Optická planární mnohavidová rozbočnice.* Úřad průmyslového vlastnictví, PUV 25535, 2013-17-06.
- V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK: *Optická planární mnohavidová rozbočnice.* Úřad průmyslového vlastnictví, PUV 25538, 2013-17-06.

## Funkční vzory, na kterých se autor podílel

- V. PRAJZLER, P.N. KIEN, V. JEŘÁBEK: *Mnohavidový 1x2 Y optický dělič s dutými kanálkovými vlnovody.* Funkční vzorek ČVUT - 184956, 2011.
- V. PRAJZLER, P.N. KIEN: *Mnohavidový 1x2 Y optický polymerní dělič pro optický internet.* Funkční vzorek ČVUT - 186391, 2011.
- V. PRAJZLER, M. NERUDA: *Planární mnohavidový optický polymerní 1x2 Y vazební člen.* Funkční vzorek ČVUT - 197275, 2012.
- V. PRAJZLER, M. NERUDA: *Planární optický polymerní mnohavidový vazební člen 1x4 Y.* Funkční vzorek ČVUT - 197276, 2012.
- V. PRAJZLER, R. MAŠTERA: *Optický polymerní 1x2 Y vazební člen s velkým průměrem vlnovodné vrstvy.* Funkční vzorek ČVUT - 205279, 2013.
- R. MAŠTERA, V. PRAJZLER: *Kompaktní optická polymerní planární mnohavidová 1x2 Y rozbočnice.* Funkční vzorek ČVUT - 205280, 2013.
- R. MAŠTERA, V. PRAJZLER: *Optická polymerní mnohavidova plnární 1x2 výkonová rozbočnice.* Funkční vzorek ČVUT - 205281, 2013.

## A.2 Publikace

### Samostatná část v mezinárodní monografii

1. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, J. OSWALD, V. JEŘÁBEK: *Optical and spectroscopic properties of polymer layers doped with rare earth ions*, Advance in Lasers and Electrooptics, Edited by C.A.Carlaxo, Vukovar: In-Tech, 2010, pp. 59-68, ISBN 978-953-307-088-9.
2. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, K. BUŠEK: *Design and construction transceiver module using polymer PLC hybrid integration technology*, New, Advanced Technologies, Edited by A. Lazinica, Vukovar: In-Tech, 2010, pp. 153-162, ISBN 978-953-307-067-4.

### Publikace v impaktovaných časopisech

1. V. PRAJZLER, M. VARGA, P. NEKVINDOVÁ, ET AL.: *Design and investigation of properties of nanocrystalline diamond optical planar waveguides*, Optics Express, vol. 21, no 7, pp. 8409-8416, 2013.
2. V. PRAJZLER, H. TŮMA, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK: *Design and modeling of the symmetric three branch polymer planar optical power dividers*, Radioengineering, vol. 22, no. 1, Part II, pp. 233-239, 2013.
3. O. LYUTAKOV, J. TŮMA, I. HUTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Polymer surface patterning by laser scanning*, Applied Physics B-lasers and Optics, vol. 110, no. 4, pp. 539-549, 2013.
4. O. BARKMAN, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER: *Optical splitters based on self-imaging effect in multi-mode waveguide made by ion exchange in glass*, Radioengineering, vol. 22, no. 1, Part II, pp. 352-356, 2013.
5. 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, pp. 710-715, 2012.
6. O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, J. SIEGEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *The manipulation of carbon nanotubes on a polymer surface using a laser beam*, Journal of Materials Science, vol. 47, no. 11, pp. 4585-4588, 2012.

7. 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, pp. 1202-1207, 2012.
8. V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK: *Design of the novel wavelength triplexer using multiple polymer microring resonators*, Radioengineering, vol. 21, no. 1, pp. 258-263, 2012.
9. V. PRAJZLER, J. Klapuch, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design, fabrication and properties of rib poly(methylmethacrylimide) optical waveguides*, Radioengineering, vol. 20, no. 2, pp. 479-485, 2011.
10. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HUTTEL, ET AL.: *Design of polymer wavelength splitter 1310 nm/1550 nm based on multimode interferences*, Radioengineering, vol. 19, no. 4, pp. 606-609, 2010.
11. 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, pp. 1608-1612, 2010.
12. O. LYUTAKOV, J. TŮMA, V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, ET AL.: *Preparation of rib channel waveguides on polymer in electric field*, Thin Solid Films, vol. 519, no. 4, pp. 1452-1457, 2010.
13. 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, pp. 1814-1817, 2009.
14. O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Pattern formation in PMMA film induced by electric field*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, vol. 47, no. 12, pp. 1131-1135, 2009.
15. V. PEŘINA, V. PRAJZLER, J. SCHRÖFEL, ET AL.: *Properties of RF magnetron sputtered gallium nitride semiconductors doped with erbium*, Surface and Interface Analysis, vol. 36, no. 8, pp. 952-954, 2004.
16. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, P. NEKVINDOVÁ, ET AL.: *Erbium doping into thin carbon optical layers*, Thin Solid Films, vol. 433, no. 1–2, pp. 363–366, 2003.

## **Publikace v mezinárodních recenzovaných časopisech**

1. V. JEŘÁBEK, J.A. ARMAS, V. PRAJZLER: *Hybrid microoptical WDM receiver for PON communication*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 95-100, 2012.
2. 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, pp. 2942-2945, 2011.
3. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Design and construction of a WDM transceiver with VHGT using hybrid integration technology*, Physica Status Solidi C, vol. 8, no. 9, pp. 2938-2941, 2011.
4. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Spectroscopy properties of epoxy novolak resin doped with rare earth ions*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 4, no. 5, pp. 318-323, 2009.
5. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Experimental method for verifying the bistability and theoretical model of the semiconductor laser diode made by the rate equations*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 3, no. 1, pp. 45-53, 2008.
6. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Optical properties of PMMA polymer doped with Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions*, Journal of Physics: Conference Series, no. 100, pp. 1-4, 2008.
7. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Photoluminescence of Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> doped epoxy novolak resin*, International Journal of Microwave and Optical Technology, vol. 2, no. 2, pp. 236-241, 2007.
8. V. PRAJZLER, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK, ET AL.: *Implantation of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions into GaN*, WSEAS Transactions on Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 262-267, 2006.

## **Původní články v českých vědeckých a odborných časopisech**

1. V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Design and modeling of the ENR polymer microring resonators add/drop filter for wavelength division multiplexing*, ElectroScope, ročník 2011 Číslo IV, pp. 1-5, 2011.

2. V. PRAJZLER, T. VESELÝ, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optické planární vlnovody z pryskyřice epoxy novolak resin*, Slaboproudý obzor, roč. 67, č. 4, str. 11-15, 2011.
3. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. TŮMA, ET AL.: *Design, fabrication and measurement polymethylmethacrylate optical waveguides prepared by modification of surface profile by applying electric field*, ElectroScope, vol. 2010, no. 3, pp. 1-5, 2010.
4. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, K. BUŠEK, ET AL.: *Design and construction of a WDM transceiver VHGT using hybrid integration technology*, ElectroScope, vol. 2010, no. 3, pp. 1-4, 2010.
5. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Designed and fabrication of ENR polymer rib optical waveguides*, ElectroScope, vol. 5, no. 3, pp. 67-71, 2009.
6. V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Optical properties of erbium and erbium/ytterbium doped polymethylmethacrylate*, Acta Polytechnica, vol. 48, no. 5, pp. 14-21, 2009.
7. V. PRAJZLER, Z. BURIAN, V. JEŘÁBEK, ET AL.: *Properties of erbium doped hydrogenated amorphous carbon layers fabricated by sputtering and plasma assisted chemical vapor deposition*, Acta Polytechnica, vol. 48, no. 1, pp. 36-42, 2008.
8. V. PRAJZLER, Z. BURIAN, I. HÜTTEL, ET AL.: *Properties of erbium and ytterbium doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, Acta Polytechnica, vol. 46, no. 6/2006, pp. 49-55, 2007.

### **Příspěvky na mezinárodních konferencích**

1. V. PRAJZLER, R. MAŠTERA, V. JEŘÁBEK: *Design, fabrication and properties of optical large core polymer planar 1x2 splitter*, The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), CLEO-PR&OECC/PS 2013, June 30th-July 4th 2013 at Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, Paper No:TuPL-13, přijato k prezentaci.
2. V. PRAJZLER, V. JURKA, V. JEŘÁBEK, ET AL.: *Modeling of the multimode polymer interference optical wavelength 1490/1555 nm demultiplexer*, In 17th Opto-Electronics and Communications Conference. Seoul: IEEE CLEO/Pacific Rim, 2012, pp. 631-632, ISBN 978-1-4673-0977-6.

3. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. OSWALD, ET AL.: *Optical properties of Poly-(Methylmetacrylimide) doped with bismut ions*, Acta Polytechnica, In Book of abstract 20th International Conference on Advanced Laser Technologies, Bern: University of Berne, 2012, pp. 346-347.
4. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of the polymer lyaers doped with an organic ionic dyes for photonics applications*, In Proceedings of Electronic Devices and Systems EDS 2012. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2012, vol. 1, pp. 7-11, ISBN 978-80-214-4539-0.
5. V. PRAJZLER, H. TŮMA, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Design and modeling of the symmetric 1x3 optical polymer planar power divider*, In Proceedings of Electronic Devices and Systems EDS 2012. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2012, vol. 1, pp. 1-6, ISBN 978-80-214-4539-0.
6. D. MAREŠ, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER: *Design and properties of planar polymer waveguide bragg grating filter*, In 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012 Proceedings. Praha: Agentura Action M, 2012, pp. 64-68.
7. V. JEŘÁBEK, J. ARMAS, K. BUŠEK, D. MAREŠ, V. PRAJZLER: *Microoptical collimation system for WDM receiver with a bragg volume gratings*, In Proceedings of Electronic Devices and Systems EDS 2012. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2012, vol. 1, pp. 349-354.
8. O. BARKMAN, V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK: *Design and modeling of multimode interference power splitters made by ion exchange in glass*, In Proceedings of Electronic Devices and Systems EDS 2012. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2012, vol. 1, pp. 273-278, ISBN 978-80-214-4539-0.
9. O. BARKMAN, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER: *Design and modeling of multimode interference power splitters by ion exchange in glass*, In 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012 Proceedings. Praha: Agentura Action M, 2012, pp. 50-52, ISBN 978-80-86742-36-6.
10. V. PRAJZLER, J. GREXA, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of Y-branch optical polymer waveguides*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, pp. 246-251, ISBN 978-80-214-4303-7.

11. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of epoxy novolak resin optical waveguides for demultiplexers based on multimode interference and optical ring resonators*, In Advances in Optics Photonics Spectroscopy & Applications VI. Ho Chi Minh City: Vietnam National University, 2011, vol. 1, pp. 49-54, ISSN 1859-4271.
12. V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Design and modelling of the integrated polymer microring resonators on silicon substrate*, In The 2nd International Conference on Photonics 2011. Piscataway: IEEE Photonics Society, 2011, pp. 19-23, ISBN 978-1-61284-263-9.
13. V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Polymer optical microring filter for passive optical network applications*, In International Quantum Electronics Conference / Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Sydney: IEEE, 2011, pp. 1297-1299, ISBN 978-0-9775657-7-1.
14. V. PRAJZLER, E. STŘÍLEK, E. LYUTAKOV, ET AL.: *Epoxy novolak resin optical microring resonator*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, pp. 240-245, ISBN 978-80-214-4303-7.
15. V. PRAJZLER, H. TŮMA, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of 1 x 3 polymer optical power divider*, In Book of abstract PHOTONICS PRAGUE 2011. Praha: Agentura Action M, 2011, p. 79. ISBN 978-80-86742-30-4.
16. O. BARKMAN, P. NEKVINDOVÁ, V. PRAJZLER: *Design and modeling of the single mode optical glass waveguides for passive photonics structures*, In 23rd Conference and Exhibition on Optical Communications 2011 - Scientific Section Proceedings. Praha: Action M, 2011, pp. 5-8, ISBN 978-80-86742-32-8.
17. V. JEŘÁBEK, J.A. ARGINIEGA, D. MAREŠ, V. PRAJZLER: *Microoptical and microwave design and construction of a micromodules for WDM receiver*, In 23rd Conference and Exhibition on Optical Communications 2011 - Scientific Section Proceedings. Praha: Action M, 2011, pp. 9-13.
18. V. JEŘÁBEK, J.A. ARGINIEGA, D. MAREŠ, V. PRAJZLER: *WDM hybrid microoptical transceiver with bragg volume grating*, In Proc. of SPIE Vol. 8306. Bellingham (stát Washington): SPIE, 2011, pp. 83060T-1-83060T-7.

19. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, J.A. ARGINIEGA, D. MAREŠ: *The microoptical and microwave design and construction of a WDM receiver with bragg volume grating using hybrid integration technology*, In 13th International Symposium on Microwave and Optical Technology - ISMOT 2011. Prague: Carolina's Agency, 2011, pp. 101-105.
20. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of polymer optical waveguides for wavelength demultiplexers based on multimode interference and optical ring resonators*, In The 6 International Conference on Photonics & Applications. Ho Chi Minh City: Vietnam National University, 2010, p. 137.
21. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Design of polymer 1 x 3 multimode interference optical power splitter operating at 650 nm and 1310 nm*, In Microoptics Conference 2010, MOC2010, Taipei: IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 257-258.
22. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Simple fabrication of Epoxy Novolak Resin optical waveguides on silicon substrate*, In Fourth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 49.
23. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. TŮMA, ET AL.: *Optical PMMA waveguides fabricated by modification of refractive index applying electric field*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2010, vol. 1, pp. 254-259, ISBN 978-80-214-4138-5.
24. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, J.A. ARGINIEGA, ET AL.: *Návrh a realizace WDM transceiveru realizovaného hybridní technologií*, In Optické komunikace 2010. Praha: Agentura Action M, 2010, str. 57-62, ISBN 978-80-86742-29-8.
25. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, K. BUŠEK, ET AL.: *Design and construction of a WDM transceiver VHGT using hybrid integration technology*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2010, vol. 1, pp. 121-125, ISBN 978-80-214-4138-5.
26. 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, pp. 301-302, ISBN 978-1-4244-3830-3.

27. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, ET AL.: *Designed and fabrication of ENR polymer rib optical waveguides*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2009 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2009, vol. 1, pp. 455-460, ISBN 978-80-214-3933-7.
28. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, J. TŮMA, ET AL.: *New technique for preparation of epoxy novolak resin polymer waveguides*, In The Fifteenth Microoptics Conference. Tokyo, Japan, 2009, pp. 182-183, ISBN 978-4-86348-037-7.
29. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Polymer optical waveguides for hybrid photonics applications*, In The Fifteenth Microoptics Conference. Tokyo, Japan, 2009, pp. 184-185, ISBN 978-4-86348-037-7.
30. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Design and construction WDM type triplex optical receiver module using system multimode polymeric PLC hybrid integration technology*, In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2009 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2009, vol. 1, pp. 437-442, ISBN 978-80-214-3933-7.
31. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *WDM planární optoelektronický polymerový přijímač*, In Optické komunikace. Praha: Agentura Action M, 2009, str. 55-61, ISBN 978-80-86742-28-1.
32. K. BUŠEK, V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, ET AL.: *Vlnově selektivní optická rozbočnice se soustavou planárních optických polymerních vlnovodů*, In Optické komunikace. Praha: Agentura Action M, 2009, str. 1-5, ISBN 978-80-86742-28-1.
33. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, O. LYUTAKOV, ET AL.: *Fabrications and properties of multi-mode epoxy novolak resin polymer optical waveguides*, In The Fourteenth Microoptics Conference - Technical Digest. Tokyo 102-0073, JAPAN : The Optical Society of Japan, The Japan Society of Applied Physics, 2008, pp. 158-159.
34. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Investigation of band gap of Dy doped GaN layers using the transmittance measurement*, In Electronics Devices and Systems Proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, pp. 460-465, ISBN 978-80-214-3717-3.
35. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Spectroscopic and photoluminescence study of epoxy novolak resin polymer doped with Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>*

*ions*, In The 42nd IUPAC World Polymer Congress. Taipei: National Taiwan University, 2008.

36. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Investigation properties of GaN layers doped with Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> + Yb<sup>3+</sup> ions using the transmittance measurement*, In Proceedings of SPIE Photonics, Devices, and Systems IV - Volume 7138. Bellingham: SPIE, 2008, vol. 7138, pp. 71381B-1-71381B-6, ISSN 0277-786X.
37. V. PRAJZLER, V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optical properties of Dy<sup>3+</sup> doped epoxy novolak resin*, In Proceedings of SPIE 7061 - Novel Optical Systems Design and Optimization XI. Bellingham (stát Washington): SPIE, 2008, pp. 706119-1-706119-8, ISBN 978-0-8194-7281-6.
38. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Construction of a VHGT attached WDM type triplex transceiver module using polymer PLC hybrid integration technology*, In Proceedings of the 14th Conference on Microwave Techniques. Prague: Czechoslovakia Section IEEE, 2008, pp. 221-223, ISBN 978-1-4244-2137-4.
39. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Design and construction of a VHGT attached WDM type triplex transceiver module using polymer PLC hybrid integration technology*, In Photonics Prague 2008, The 6th International Conference on Photonics, Devices and Systems. Praha: Agentura Action M, 2008, pp. 43-44, ISBN 978-80-86742-25-0.
40. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Design and construction of a VHGT attached WDM type triplex transceiver module using polymer PLC hybrid integration technology*, In Proceedings of SPIE Photonics, Devices, and Systems IV - Volume 7138, Bellingham: SPIE, 2008, vol. 7138, pp. 713814-1-713814-5, ISSN 0277-786X.
41. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, ET AL.: *Design and construction of a VHGT-attached WDM -type triplex transceiver module using polymer PLC hybrid integration technology*, In Electronics Devices and Systems Proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, pp. 441-446, ISBN 978-80-214-3717-3.
42. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Properties of Er<sup>3+</sup> and Dy<sup>3+</sup> implanted GaN layers*, In Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2007. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, pp. 361-366, ISBN 978-80-214-3470-7.

43. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of epoxy novolak resin polymer co-doped with Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions*, In The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. Seoul: IEEE CLEO/Pacific Rim, 2007, pp. 1132-1133, ISBN 1-4244-1174-2.
44. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Properties of the epoxy novolak resin optical planar waveguides*, In Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2007. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, pp. 367-372, ISBN 978-80-214-3470-7.
45. V. PRAJZLER, O. LYUTAKOV, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of PMMA co-doped with Er<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions*, In Documentation from the IVC-17/ICSS-13 and ICN+T2007 Congress. Stockholm: International Union for Vacuum Science, Technique and Applications, 2007.
46. V. JEŘÁBEK, K. BUŠEK, V. PRAJZLER, ET AL.: *Hybridní fotonické integrované obvody s planárními polymerními optickými vlnovody*, In Optické komunikace 2007. Praha: Agentura Action M, 2007, str. 29-34, ISBN 978-80-86742-21-2.
47. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, K. BUŠEK, ET AL.: *The hybrid photonic integrated circuits with the polymer optical waveguides*, In Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2007. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, pp. 347-350, ISBN 978-80-214-3470-7.
48. V. JEŘÁBEK, V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optické vlastnosti vrstev GaN s dotací Er<sup>3+</sup> + Yb<sup>3+</sup> iontů*, In Optické komunikace 2007. Praha: Agentura Action M, 2007, str. 35-39, ISBN 978-80-86742-21-2.
49. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, E. ALVES, ET AL.: *Properties of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> doped gallium nitride layers*, In MIPRO 2006, 29th International Convention. Chorvatsko: Mipro HU, 2006, pp. 33-38, ISBN 953-233-018-6.
50. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Optical properties of Er<sup>3+</sup> + Yb<sup>3+</sup> doped gallium nitride layers*, In Advances in Thin-Films Coatings for Optical Applications III. Bellingham: SPIE, 2006, pp. 62860K-1-62860K-10, ISBN 0-8194-6365-5.
51. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Modification of refractive index of polymethylmethacrylate by applying electric field*, In Electronic Devices and Sys-

tems - IMAPS CS International Conference 2006. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, pp. 409-414, ISBN 80-214-3246-2.

52. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Properties of sputtered carbon layers containing erbium and ytterbium ions*, In Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2006. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, pp. 403-408, ISBN 80-214-3246-2.
53. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Rare earth doped gallium nitride layers for photonics applications*, In Photonics, Devices, and Systems III. Bellingham: SPIE, 2006, p. 618018-618018F6, ISBN 0-8194-6236-5.
54. V. PRAJZLER, J. ŠPIRKOVÁ, V. JEŘÁBEK, ET AL.: *Implantation of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> ions into GaN*, In Proceedings of the WSEAS International Conference: 5th WSEAS Int.Conf. on MICROELECTRONICS, NANOELECTRONICS, OPTOELECTRONICS (MINO'06). Athens: WSEAS Press, 2006, pp. 262-267, ISBN 960-8457-42-4.
55. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Bistable laser diode with a multiple-divided contact stripe*, In Photonics, Devices, and Systems III. Bellingham: SPIE, 2006, pp. 61800F1-61800F6, ISBN 0-8194-6236-5.
56. V. JEŘÁBEK, J.A. ARCINIEGA, V. PRAJZLER, ET AL.: *Planar lightwave hybrid integration circuits*, In Electronic Devices and Systems - IMAPS CS International Conference 2006. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, pp. 399-402, ISBN 80-214-3246-2.
57. V. JEŘÁBEK, J.A. ARCINIEGA, V. PRAJZLER, ET AL.: *Planární fotonické hybridní integrované obvody*, In Optické Komunikace 2006. Praha: Agentura Action, 2006, str. 41-44, ISBN 80-86742-16-4.
58. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Gallium nitride thin films containing rare earth ions fabricated by magnetron sputtering*, In nanoSmat2005 - International Conference on Surface, Coatings and Nanostuctured Materials. Aveiro: University of Aveiro, 2005, pp. P202-P204, ISBN 973-713-065-0.
59. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Photoluminescence study of (Er<sup>3+</sup> + Yb<sup>3+</sup>) doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, In International Congress on Optics and Optoelectronics. Warsaw: SPIE Europe, 2005, p. 153.

60. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Photoluminescence study of ( $Er^{3+} + Yb^{3+}$ ) doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, In Infrared Photoelectronics. Bellingham: SPIE, 2005, vol. 5957, pp. 232-240, ISBN 0-8194-5964-X.
61. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Properties of erbium doped carbon thin films grown by RF magnetron sputtering*, In Vacuum Electron Ion Technologies. Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, Institut of Electronics ACADEMICIAN EMIL DJAKOV, 2005, p. PB1.
62. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Rare earth doped gallium nitride layers for photonics applications*, In Photonics Prague 2005. Praha: Agentura Action, 2005, p. 101, ISBN 80-86742-08-3.
63. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ, ET AL.: *Rare earth doped gallium nitride fabricated by magnetron sputtering*, In 15th Symposium on Applications of Plasma Processes, 3rd EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing. Bratislava: Comenius University, 2005, pp. 231-232, ISBN 80-223-2018-8.
64. V. PRAJZLER: *Investigation of properties of rare earth doped gallium nitride layers*, In POSTER 2005. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2005.
65. V. JEŘÁBEK, I. HÜTTEL, V. PRAJZLER, ET AL.: *Bistable laser diode with a multiple-divided contact stripe*, In Photonics Prague 2005. Praha: Agentura Action, 2005, p. 163, ISBN 80-86742-08-3.
66. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. SCHRÖFEL, ET AL.: *Properties of erbium-doped gallium nitride films prepared by RF magnetron sputtering*, In Microwave and Optical Technology 2003. Washington: SPIE, 2004, pp. 294-297, ISBN 0-8194-5368-4.
67. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ,, ET AL.: *Magnetron sputtering fabrication of erbium doped gallium nitride thin films*, In 10th Joint Vacuum Conference. Ljubljana: Electrotechnical Society of Slovenia, 2004, vol. 1, p. 78, ISBN 961-90025-5-5.
68. V. PRAJZLER, I. HÜTTEL, J. ŠPIRKOVÁ,, ET AL.: *Carbon planar waveguides for integrated optics*, In Proceedings of Workshop 2004. Prague: CTU, 2004, vol. A, pp. 492-493, ISBN 80-01-02945-X.

69. V. PRAJZLER, M. PRAJER: *Polymer optical planar waveguides*, In POSTER 2004. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2004, p. NS19.
70. V. PRAJZLER, J. SCHRÖFEL, I. HÜTTEL, ET AL.: *Raman spectra of erbium doped gallium nitride layers fabricated by magnetron sputtering*, In European Microelectronics and Packaging Symposium. Brno: VUT v Brně, FEI, 2004, vol. 1, pp. 577-582, ISBN 80-239-2835-X.
71. V. PRAJZLER, J. SCHRÖFEL, I. HÜTTEL, ET AL.: *Er:GaN thin films fabricated by magnetron sputtering*, In Thin Films 2004&Nanotech 2004. Singapore: Nanyang Technological University, 2004, p. 34-OTF-A3.
72. V. PRAJZLER, J. SCHRÖFEL, I. HÜTTEL, ET AL.: *Gallium nitride planar waveguides fabricated by magnetron sputtering*, The Ninth Microoptics Conference, 29.10.2003 - 31.10.2003, Tokyo, Japonsko, p. 148-151, AP031238.
73. V. PRAJZLER, J. ŠPIRKOVÁ, I. HÜTTEL, ET AL.: *Optical properties of erbium-doped gallium nitride films prepared by RF magnetron sputtering*, 9th International Symposium on Microwave and Optical Technology, ISMOT 2003 - Book of Abstracts, 11.08.2003 - 15.08.2003, Ostrava, Česká republika, p. 63.

## **Příloha B**

**Bakalářské a diplomové práce, které  
vznikly pod vedením autora**

Tabulka B.1: Bakalářské práce, které vznikly pod vedením  
Ing. Václava Prajzlera PhD.

Jméno studenta	název bakalářské práce	rok
Martin Myslík	Příprava polymerních vrstev pro integrovanou optiku a studium jejich vlastností.	2006
Miroslava Filingerová	Příprava a měření optických vlastností skleněných vlnovodů.	2007
Jiří Bárna	Návrh polymerního optického vlnovodu.	2009*
Jan Klapuch	Návrh nového polymerního optického vlnovodu.	2009
Pham Ngoc Kien	Návrh planárního mnohavidového polymerního optického vlnovodu.	2009
Hynek Tůma	Návrh 1x3 optické polymerní planární rozbočnice.	2011
Rudolf Svoboda	Návrh nových fotonických struktur pro síť PON.	2011
Miloš Neruda	Návrh optické planární mnohavidové rozbočnice.	2012
Martin Novotný	Modelování a návrh světlovodného vedení pro ekonomické osvětlování budov budoucnosti.	2013
Radek Maštera	Návrh optické planární mnohavidové výkonové 1x2 a 1x3 rozbočnice pro POF vlákna.	2013

---

\* tato bak. práce byla odevzdána k obhajobě a měla kladné posudky, ale student nesplnil studijní povinnosti a nebyl připuštěn k státní závěrečné zkoušce.

Tabulka B.2: Diplomové práce, které vznikly pod vedením  
Ing. Václava Prajzlera PhD.

Jméno studenta	název diplomové práce	rok
Ondřej Hlaváč	Konstrukce zařízení pro měření optického útlumu planárních vlnovodů.	2007
Martin Myslík	Měření optických vlastností polymerních vrstev.	2007
Tomáš Veselý	Příprava a studium vlastností polymerních vrstev pro integrovanou optiku.	2010
Juraj Grexa	Teoretický návrh optické odbočnice.	2010*
Eduard Střílek	Návrh optického polymerního mikrorezonátoru.	2011**
Ondřej Barkman	Návrh optických kanálkových difuzních rozbočnic na skleněných podložkách.	2011
Pham Ngoc Kien	Návrh mnohavidové optické rozbočnice.	2012**
Miroslav Mokráň	Analýza a návrh nových polymerních planárních fotonických struktur.	2012

\* tato dip. práce byla odevzdána k obhajobě a měla kladné posudky, ale student nesplnil studijní povinnosti a nebyl připuštěn k státní závěrečné zkoušce.

\*\* tyto dip. práce obdržely cenu děkana.

# Seznam obrázků

3.1	Aparatura PACVD použitá pro výrobu uhlíkových vrstev. . . . .	12
3.2	Aparatura PACVD použitá pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací erbia. . . . .	12
3.3	Aparatura MOCVD pro výrobu vrstev GaN. . . . .	13
3.4	Aparatura magnetronového naprašování Balzers Pfeiffer PLS 160. . . . .	14
3.5	Postup výroby fotonické struktury pomocí optické litografie (fotonická struktura je vyrobena leptáním vrstvy $\text{SiO}_2$ na podložce Si). . . . .	16
3.6	Postup výroby fotonické struktury pomocí optické litografie (příklad, kdy vlnovodná vrstva je současně fotorezistem). . . . .	16
3.7	Postup výroby polymerních fotonických struktur pomocí elektronové litografie. . . . .	17
3.8	Postup výroby mnohavidových struktur kompatibilních s POF vlákny. . . . .	19
3.9	Výroba polymerního optického vlnovodu působením elektromagnetického pole. . . . .	20
3.10	Vyrobená struktura optické rozbočnice ovlivněním polymerního optického vlnovodu působením elektromagnetického pole, a) fotografie struktury, b) struktura při průchodu signálu 632,8 nm. . . . .	20
4.1	a) Řez strukturou planárního optického vlnovodu, b) řez planárního vlnovodu na Si podložce. . . . .	22
4.2	Příklady planárních optických vlnovodů, a) hřebenový vlnovod, b) žebrový vlnovod, c) kanálkový vlnovod se skokovou změnou indexu lomu, d) difúzní kanálkový vlnovod, e) zanořený difúzní kanálkový vlnovod po druhém stupni iontové výměny. . . . .	22
4.3	Planární optický vlnovod s popisem změny fáze vedeného vidu. . . . .	23

4.4	Příklady navržených struktur optických hřebenových a kanálkových vlnovodů, a) Si/SiO <sub>2</sub> /ENR, b) Si/SiO <sub>2</sub> /ENR/PMMA, c) Si/Cytop/ENR/Cytop, d) Si/Ormoclad/Ormocore/Ormoclad, e) Si/SiO <sub>2</sub> /WIR, f) GaAs/Cytop/ENR kanálkový vlnovod s krycí vrstvou. . . . .	24
4.5	a) Struktura planárního optického vlnovodu s vlnovodnou vrstvou z nano-krystalického diamantu NCD, b) porovnání hodnot indexu lomu planárního vlnovodu NCD vyrobeného v laboratořích na Fyzikálním ústavu AV ČR, v.v.i. s publikovanými hodnotami indexu lomu u vrstev NCD. . . . .	26
4.6	Naměřené hodnoty indexu lomu u vybraných polymerních materiálů a vrstvy SiO <sub>2</sub> pomocí zařízení Metricon. . . . .	28
4.7	Simulace hřebenového vlnovodu struktury Si/SiO <sub>2</sub> /ENR/PMMA pro $\lambda = 1310$ nm [45], a) rozložení profilu indexu lomu, b) výpočet efektivní hodnoty indexu lomu základního modu. . . . .	29
4.8	Obrázky realizovaných struktur polymerních hřebenových vlnovodů, a) Si/SiO <sub>2</sub> /ENR/PMMA [45], b) GaAs/Cytop/ENR/PMMA [51]. . . . .	30
4.9	Struktura žebrového optického vlnovodu, a) s polovodičovou Si vlnovodnou vrstvou [54], b) struktura s polymerní vlnovodnou vrstvou [55]. . . . .	30
4.10	Vypočítané hodnoty efektivního indexu lomu pro základní mody pro polymerní žebrový vlnovod z obr. 4.9b pro různé vlnové délky pomocí programu BeamPROP <sup>TM</sup> [55], a) $\lambda = 650$ nm, b) $\lambda = 850$ nm, c) $\lambda = 1310$ nm, d) $\lambda = 1550$ nm. . . . .	32
4.11	a) Fotografie hřebenového vlnovodu PMMI, b) fotografie struktury při průchodu optického signálu 650 nm. . . . .	33
4.12	Hloubkový profil indexu lomu pro optický planární vlnovod z polymeru PMMA pro 632,8 nm [37], a) TE vidy, b) TM vidy. . . . .	33
4.13	Planární kanálkové vlnovody s difúzním profilem indexu lomu [61], a) jednostupňová difúze b) dvoustupňová difúze. . . . .	34
4.14	Kanálkový vlnovod vyrobený pomocí difúze. . . . .	34
4.15	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 Sylgard/NOA. . . . .	35
4.16	Struktura symetrické 1x2Y optické rozbočnice zobrazující jednotlivé segmenty, ze kterých je složena a která byla použita pro návrh polymerních děličů výkonu [64]. . . . .	36

4.17	Výsledek simulace optimalizované struktury optické polymerní rozbočnice, a) struktura 1x2Y, b) struktura 1x4Y [64]. . . . .	36
4.18	Fotografie vyrobených rozbočnic [66], a) struktura 1x2Y, b) struktura 1x4Y. . . . .	37
4.19	Struktura navrhované 1x3Y symetrické optické rozbočnice [71], [72]. . . . .	38
4.20	Výsledek simulace optimalizované rozbočnice 1x3, a) šíření optického signálu strukturou, b) amplituda optického signálu na výstupu struktury [72]. . . . .	39
4.21	Struktura navrhované 1x2Y symetrické optické rozbočnice s velkým průměrem vlnovodné vrstvy. . . . .	39
4.22	Návrh mnohavidové rozbočnice PMMA/NOA73 v softwaru Opticad 10 [32]. . . . .	41
4.23	Návrh mnohavidové rozbočnice 1x2Y z polymerních materiálů PMMA/NOA1625 v softwaru BeamPROP <sup>TM</sup> ( $\lambda = 650$ nm), a) profil indexu lomu optimali- zované struktury, b) šíření optického signálu strukturou. . . . .	41
4.24	Návrh mnohavidové rozbočnice 1x4Y z polymerních materiálů PMMA/NOA1625 v softwaru BeamPROP <sup>TM</sup> ( $\lambda = 650$ nm), a) profil indexu lomu optimali- zované struktury, b) šíření optického signálu strukturou. . . . .	42
4.25	Fotografie vyrobených optických planárních rozbočnic s POF vlákny, a) struktura 1x2 Y, b) struktura 1x4 Y. . . . .	43
4.26	Výsledek simulace struktury 1x3Y z materiálů PMMA/NOA ( $\lambda = 650$ nm), a) profil indexu lomu, b) šíření optického signálu strukturou. . . . .	44
4.27	Výsledek simulace struktury 1x3Y PMMA/NOA s obdélníkovou oblastí v taperované části ( $\lambda = 650$ nm), a) profil indexu lomu, b) šíření optického signálu strukturou. . . . .	45
4.28	Fotografie vyrobené 1x3 Y struktury s obdélníkovou oblastí v taperované části při průchodu signálu o vlnové délce 635 nm. . . . .	45
4.29	Fotografie vlnově selektivní optické mnohavidové rozbočnice 1x2Y s plas- tovými filtry při průchodu širokopásmového optického signálu. . . . .	46
4.30	Struktura optické rozbočnice s multividovou interferencí se třemi výstupními vlnovody. . . . .	48
4.31	Struktura optické rozbočnice s multividovou interferencí, a) profil indexu lomu z pohledu shora, b) šíření optického signálu strukturou ( $\lambda = 1310$ nm). . . . .	49
4.32	Struktura optického demultiplexoru s multividovou interferencí. . . . .	49
4.33	Šíření optického signálu demultiplexorem 1490x1555 nm, a) $\lambda = 1490$ nm, b) $\lambda = 1555$ nm. . . . .	50
4.34	Fotografie optického demultiplexoru 1490/1555 nm vyrobeného pomocí elektronové litografie. . . . .	50

4.35 Model profilu indexu lomu kanálkových vlnovodů, a) $\lambda = 1310$ nm, b) $\lambda = 1550$ nm [61]. . . . .	51
4.36 a) Simulace šíření optického signálu rozbočnicí s multividovou interferencí se čtyřmi výstupními vlnovody, b) rozdělení energie do výstupních ramen ( $\lambda = 1310$ nm) [61]. . . . .	51
4.37 Struktura optického mikrorezonátoru. . . . .	52
4.38 Princip optického mikrorezonátoru, a) navázání signálu do vstupního vlnovodu, b) část signálu je navázáno do kruhové části mikrorezonátoru, c) vstupující signál rezonuje se signálem v rezonátoru a ze vstupního vlnovodu se navazuje více energie, d) veškerý signál ze vstupního vlnovodu se přenáší do vydělovacího vlnovodu [89]. . . . .	53
4.39 Kruhový rezonátor - princip funkce [87]. . . . .	54
4.40 Definice parametrů a) FSR, b) FWHM. . . . .	55
4.41 Optická vazba mezi vlnovody a kruhovou částí mikrorezonátoru, a) laterální vazba, b) vertikální vazba. . . . .	56
4.42 Struktura mikrorezonátoru Si/Cytop/ENR/Cytop. . . . .	56
4.43 Struktura mikrorezonátoru Si/Cytop/ENR/Cytop. . . . .	57
4.44 Struktura mikrorezonátoru Si/SiO <sub>2</sub> /ENR. . . . .	57
4.45 Výsledek simulace mikrorezonátoru Si/SiO <sub>2</sub> /ENR. . . . .	58
4.46 Struktura se sériově vázanými mikrorezonátory, a) dvojitě vázaná struktura, b) trojitě vázaná struktura. . . . .	58
4.47 Výsledek simulace mikrorezonátorů Si/SiO <sub>2</sub> /ENR, a) dvojitě sériově vázaná struktura, b) trojitě sériově vázaná struktura. . . . .	59
4.48 Přenosová charakteristika trojitěho sériově vázaného mikro-rezonátoru s poloměrem $R = 5,17 \mu\text{m}$ , šírkou mezery $g = 0,1 \mu\text{m}$ , $c = 0,1 \mu\text{m}$ . . . . .	59
4.49 Struktura dvojitěho paralelně vázaného mikrorezonátoru. . . . .	60
4.50 Výsledek simulace dvojitěho paralelně vázaného optického mikrorezonátoru. . . . .	60
4.51 Fotografie vyrobených optických mikrorezonátorů pomocí elektronového litografu Raith eLiNE, a) kruhový mikrorezonátor, b) oválný „racetrack“ mikrorezonátor. . . . .	61
4.52 Fotografie vyrobených optických mikrorezonátorů pomocí elektronového litografu Raith eLiNE, a) kruhový mikrorezonátor, b) oválný mikrorezonátor, c) oválný „racetrack“ rezonátor. . . . .	61
4.53 Fotografie vyrobených sériově vázaných mikrorezonátorů, a) dvojitě vázaná struktura, b) trojitě vázaná struktura. . . . .	62
4.54 Fotografie vyrobených paralelně dvojitě vázaných mikrorezonátorů. . . . .	62

4.55 Spektrum vlnových délek, které používá struktura optického triplexeru v sítích PON. Pásma 1490 nm a 1555 nm je použito pro příjem dat a pásma 1310 nm je použito pro vysílání dat [89]. . . . .	63
4.56 Obecné schéma optického triplexeru [47]. . . . .	64
4.57 Příklady rozdělení optického signálu na jednotlivé vlnové délky [47], [49], [98], a) dělení pomocí optického hranolu, b) dělení pomocí optické mřížky, c) rozdělení signálů pomocí dielektrických filtrů, d) dělení signálů pomocí WDM vlnového multiplexu. . . . .	64
4.58 Optický triplexer realizovaný pomocí vazebního členu a Braggovy mřížky [100]. . . . .	65
4.59 Návrh optického triplexeru využívajícího směrových vazebních členů [102].	65
4.60 Planární řešení optického triplexeru realizovaného pomocí struktur s mnohavidovou interferencí [103]. . . . .	66
4.61 Objemová holografická triplexní mřížka transmisního typu od fy Ondax Inc.	67
4.62 Průchod signálů 1550 nm (vlevo), 1490 nm (vpravo) a 1310 nm (uprostřed) přes VHGT mřížku [98]. . . . .	67
4.63 Schéma návrhu hybridního optoelektronického triplexeru s VHGT mřížkou [98]. . . . .	68
4.64 Fotografie optického přijímače 1490/1550 nm s VHGT mřížkou [109]. . .	68
4.65 Obecné schéma optického triplexeru složeného z mikrorezonátorů. . . . .	69
4.66 Schéma optického triplexeru složeného z vázaných mikrorezonátorů [89], [111]. . . . .	69
4.67 Přenosová charakteristika pro pásmo 1555 nm na výstupním portu 3 [89], [111]. . . . .	70
4.68 Přenosová charakteristika pro pásmo 1490 nm na výstupním portu 4 [89], [111]. . . . .	71
4.69 Přenosová charakteristika pro pásmo 1310 nm na vstupně / výstupním portu 1 [89], [111]. . . . .	71
4.70 Profil indexu lomu struktury optického planárního polymerního triplexeru složeného ze dvou struktur s multividovou interferencí z materiálů z Si/SiO <sub>2</sub> /ENR, a) profil indexu lomu vstupního vlnovodu, b) profil indexu lomu z pohledu shora. . . . .	72
4.71 Výsledek simulace struktury optického planárního triplexeru. . . . .	73

4.72 Profil indexu lomu struktury optického planárního polymerního triplexeru se směrovou vazbou z materiálů z Si/SiO <sub>2</sub> /ENR/PMMA, a) profil indexu lomu vstupního vlnovodu, b) profil indexu lomu z pohledu shora [49]. . . . .	73
4.73 Výsledek simulace struktury optického planárního triplexeru se směrovou vazbou. . . . .	74
 5.1 Schématické znázornění optického zesilovače [123]. . . . .	76
5.2 Energetické úrovně přechodů v atomu Er <sup>3+</sup> . . . . .	77
5.3 Luminiscenční spektra uhlíkové vrstvy dotované ionty Er <sup>3+</sup> připravené magnetronovým naprašováním. . . . .	81
5.4 Energetické hladiny Er <sup>3+</sup> a Yb <sup>3+</sup> iontů. . . . .	82
5.5 XRD spektra vrstev GaN, a) monokrystalická vrstva GaN vyrobená technologií MOCVD, b) polykrytalická vrstva GaN vyrobená technologií magnetronového naprašování. . . . .	82
5.6 Luminiscenční spektra vrstev GaN připravených pomocí epitaxe MOCVD a dotovaných ionty Er <sup>3+</sup> a Er <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup> pomocí iontové implantace. . . . .	83
5.7 Luminiscenční spektra vrstev GaN připravených pomocí magnetronového naprašování a dotovaných Er <sup>3+</sup> a Er <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup> ionty. . . . .	86
5.8 Absorpční spektra polymeru ENR, a) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů (1 at%) a Yb <sup>3+</sup> iontů. . . . .	87
5.9 Luminiscenční spektra polymeru ENR, a) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů (1 at%) a Yb <sup>3+</sup> iontů. . . . .	88
5.10 Luminiscenční spektra polymeru PMMA, a) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Er <sup>3+</sup> iontů (1 at%) a Yb <sup>3+</sup> iontů. . . . .	89
5.11 Energetické hladiny iontů, a) Dy <sup>3+</sup> , b) Tm <sup>3+</sup> a Ho <sup>3+</sup> . . . . .	90
5.12 Transmisní spektra polymeru ENR, a) s dotací Ho <sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Ho <sup>3+</sup> iontů (1,0 at%) a Tm <sup>3+</sup> iontů (20,0 at.%). . . . .	91
5.13 Transmisní spektra polymeru ENR, a) s dotací Tm <sup>3+</sup> iontů, b) s dotací Dy <sup>3+</sup> iontů. . . . .	91
5.14 Luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací Tm <sup>3+</sup> iontů. . . . .	92
5.15 Luminiscenční spektra polymeru ENR s dotací Dy <sup>3+</sup> iontů, a) excitace 632 nm, b) excitace 827 nm. . . . .	93
5.16 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. . . . .	94

5.17 Infračervená spektra pro vzorek z epoxidové pryskyřice ENR, a) referenční vzorek (bez dotace Bi), b) vzorek s dotací bismutu (20 at.% Bi). . . . .	95
5.18 Výsledky měření pro polymer ENR s dotací bismutu, a) závislost indexu lomu na vlnové délce, b) absorpční spektra. . . . .	96
5.19 Fotoluminiscenční spektra pro polymer ENR s dotací bismutu, a) $\lambda_{ex}=980$ nm, b) $\lambda_{ex}=808$ nm. . . . .	97
5.20 Fotoluminiscenční spektra pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty Ce <sup>3+</sup> , a) $\lambda_{ex}=980$ nm, b) $\lambda_{ex}=808$ nm. . . . .	98
5.21 Fotoluminiscenční spektra ( $\lambda_{ex}=808$ nm) pro polymer ENR s dotací bismutu (1,0 at.%) s kodotací ionty, a) Dy <sup>3+</sup> , b) Y. . . . .	98
5.22 Fotoluminiscenční spektra ( $\lambda_{ex}=808$ nm) pro polymer PMMI, a) s dotací bismutu, b) s dotací bismutu (1,0 at.%) a s kodotací ionty Yb <sup>3+</sup> . . . . .	99

# Seznam tabulek

3.1	Přehled nejzajímavějších optických materiálů používaných pro fotonické aplikace [19], [20]. . . . .	8
3.2	Přehled zajímavých polymerních materiálů pro fotonické aplikace [19]. . . . .	9
4.1	Vypočtené rozměry polymerního žebrového vlnovodu s vlnovodnou vrstvou z epoxidové pryskyřice ENR (viz obr. 4.4b). . . . .	29
4.2	Vypočtené rozměry polymerního žebrového vlnovodu s vlnovodnou vrstvou PMMI (viz obr. 4.9b) [55]. . . . .	31
5.1	Přehled vzácných zemin a jejich elektronové konfigurace. . . . .	78
5.2	Použité technologie pro výrobu uhlíkových vrstev s dotací iontů $\text{Er}^{3+}$ a jejich složení [30]. . . . .	80
5.3	Složení vzorků GaN s dotací $\text{Er}^{3+}$ a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ stanovené analýzou RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). . . . .	85
B.1	Bakalářské práce, které vznikly pod vedením Ing. Václava Prajzlera PhD.	XVIII
B.2	Diplomové práce, které vznikly pod vedením Ing. Václava Prajzlera PhD.	XIX