

České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering



Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc.

**Nové optické a optoelektronické polymerové planární
integrované obvody a jejich využití pro informatiku**

**New optical and optoelectronic polymer planar integrated
circuits and their application for informatics**

Praha, 2013

Summary

The research and development in the field of the optical polymer integrated circuits (OPIC) are important in utilization new organic materials for planar optical integrated circuits, where in the consequence of high polymer differences and properties it is possible achieve of the structures characteristic optimization of certain structures for selected application. Thereby we can obtain a significant simplification and reduction of technology procedures, which it is OPIC realized.

The focus of the optoelectronic team to research engaged in the sphere of integrated optics and optoelectronics at the Department of Microelectronics FEE CTU in Prague follows and develops works of Doc. Ing. Josef Schröfel, DrSc. in the field of integrated optics.

This work discusses the results of research new polymer integrated optic devices for informatics and technologies of its realization as is electric field and laser beam shaping of polymers. These procedures enable to create structures with polymer waveguides and Bragg gratings submicron dimensions and it can be used for informatics and sensor technique. These polymer technologies were developed at the department of Solid state chemistry at The Institute of Chemical Technology in Prague. The new technologies were utilized for the realization of a polymeric planar optical waveguides, triplex filters and waveguide grating filters at the Department of Microelectronics FEE CTU. Very beneficial was the cooperation with company SQS Vlaknova optika a.s. during solving research tasks in the single mode glass waveguides made by ion exchange used for realization interference polymer cladding waveguide filters with Bragg grating. These polymer devices were utilized in design of integrated optoelectronic modules of planar hybrid WDM receiver and WDM transceiver for optical networks.

Souhrn

Výzkum a vývoj v oblasti technologie optických polymerních integrovaných obvodů (OPIO) je významný ve využití nových organických materiálů pro planární optické integrované obvody, kde v důsledku velké různorodosti polymerů a jejich vlastností lze dosáhnout optimalizace charakteristik dané struktury pro zvolenou oblast použití. Tím získáváme významné zjednodušení a zlevnění technologických postupů při realizaci OPIO.

Zaměření výzkumných prací skupiny optoelektroniky v oblasti integrované optiky a optoelektroniky na katedře Mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické Českého vysokého učení technického (FEL ČVUT) v Praze navazuje a rozvíjí práce, které započal Doc. Ing. Josef Schröfel, DrSc. v oblasti planární integrované optiky. Tato práce se zabývá výsledky výzkumu nových OPIO pro informatiku a technologií jejich realizace, jako je prostorové profilování polymeru vlivem elektrického pole a nebo laserovým svazkem. Tyto metody byly vyvinuty v Ústavu inženýrství pevných látek Vysoké školy chemicko-technologické v Praze a byly využity pro konstrukci polymerových optických planárních vlnodůů a Braggovských mřížek až submikronových rozměrů pro informatiku a senzorovou techniku. Nové technologie realizace OPIO byly využity na katedře Mikroelektroniky FEL ČVUT pro konstrukci polymerových součástí integrované optiky, jako jsou planární optických vlnovody, triplexní filtry a vlnodné Braggovské mřížkové filtry. Velmi přínosná byla rovněž spolupráce s SQS Vlákenná technika a.s. při výzkumu jednovodných skleněných vlnodůů s iontovou výměnou využitých pro realizaci interferenčních polymerních plášťových vlnodných filtrů s Braggovskou mřížkou. Tyto polymerní prvky byly využity při návrhu optické části integrovaných optoelektronických modulů planárního hybridního WDM přijímače a WDM vysílače/přijímače pro optické sítě.

Klíčová slova

Integrované optické a optoelektronické obvody, optické polymerové vlnovody, optické polymerové braggovské mřížky, triplexní filtry, WDM vysílač/přijímač

Keywords

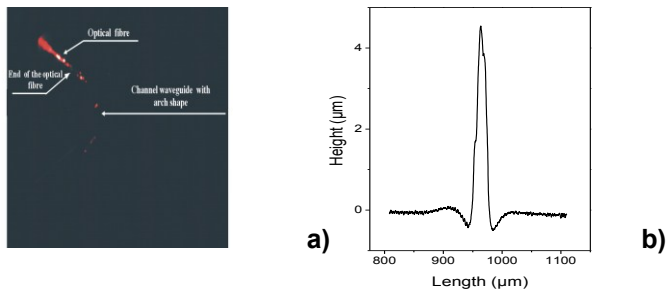
Integrated optical and optoelectronic circuits, optical polymer waveguides, optical polymer bragg gratings, triplex filters, WDM transceiver

Obsah

1. Úvod	1
2. Vybrané polymerní prvky integrované optiky	4
2.1 Planární optické polymerové vlnovody	4
2.2 Planární optický polymerní triplexní člen	11
2.3 Polymerní Braggovské mřížky a vlnovodné filtry	18
3. Hybridní optoelektronický WDM vysílač/přijímač s polymerovým triplexním členem	23
4. Závěr	25
5. Použitá literatura	27
Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc.	30

1. Úvod

Optické polymery jsou materiály vhodné pro realizaci součástí integrované optiky, jako jsou jednovidové, multividové planární vlnovody, optické výkonové děliče, interferenční filtry, Braggovské optické mřížky, směrové vazební členy apod. [1-2]. Jejich rozměry se mohou pohybovat od submikronových rozměrů do stovek mikrometrů. Akrylátové a epoxydové polymery vykazují velmi malé ztráty rozptylem optického záření a také nízké polarizační ztráty v rozsahu vlnových délek 400-1600 nm, které se využívají pro informatiku a sensoriku [3]. Jejich závislost optického útlumu na vlnové délce se pohybuje od 0,01 dB/cm pro vlnové délky 400 nm až po několik dB/cm pro 1600 nm. Jejich útlum na rozdíl od dielektrických materiálů je minimální ve viditelné oblasti spektra a roste s vlnovou délkou, což činí tyto materiály perspektivní pro informační integrované obvody, pracující ve viditelné oblasti (VIR) a blízké infračervené oblasti (NIR) vlnových délek. Již před zahájením spolupráce mezi pracovištěm pro výzkum optických polymerních materiálů VŠCHT a Katedrou mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze na studiu fyzikálních vlastností optických polymerních materiálů a jejich využití pro integrované optické struktury i v jejím průběhu byla na těchto pracovištích publikována řada prací [4-6], týkajících se ovlivňování indexu lomu a povrchové morfologie PMMA (polymethylmethakrylát) optické kvality a kompozitu PMMA+PS (polymethylmethakrylát + polystyren) elektrickým polem a teplotou založených na Taylorově teorii [10] a nebo Marangoniho jevu. Příklad ovlivňování morfologie PMMA elektrickým polem přes kovovou masku je na obr. 1.1 a,b.

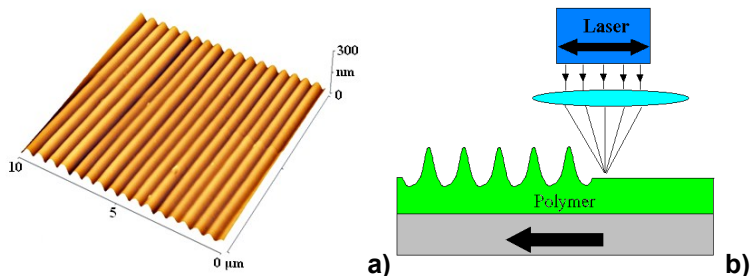


Obr. 1.1 Ovlivňování povrchové morfologie polymeru PMMA elektrickým polem
a) Průchod záření 630 nm obloukovým vlnovodem
b) Profil optického vlnovodu z Talystepu

V rámci ovlivňování PMMA elektrickým polem bylo zjištěno, že v rozsahu působení elektrického pole do 12 kV/cm lze ovlivnit index lomu v rozsahu 1,459 až 1,475. Rovněž probíhá působením elektrického pole změna povrchové morfologie v rozsahu koeficientu povrchové nerovnosti $R_a = 0,12$ až 0,28. Intenzitou elektrického pole za působení zvýšené teploty lze rovněž ovlivnit změnu indexu lomu PMMA. V literatuře [6] je ukázáno, že jde o proces polarizování molekulových řetězců PMMA, který se projevuje zvýšením indexu lomu a to až o $\Delta n \sim 2\%$. Index lomu se však mění se stárnutím struktury. Přimísením nepolárního PS pak lze omezit, případně úplně zastavit tyto změny. Stabilitu indexu lomu PMMA ovlivňují i další faktory, jako teplota, nebo úhel působení elektrického pole.

Vytvoření periodicky profilovaných tenkých vrstev PMMA nebo Epoxy novolak resinu SU 8 (ENR) s využitím tepelného a současně silového působení laserového svazku je založeno na Maragoniho jevu. Struktura polymeru obsahující opticky absorpční dopant (kupř. porfyrin B nebo rhodamin) je podrobena periodickému ohřevu pomocí zaostřeného laserového svazku konfokálního mikroskopu s vlnovou délkou 405 nm, který skenuje plochu až 2000x200 μm . Vzorek struktury s polymerní vrstvou se současně mechanicky pohybuje ve směru skenovaného svazku. Polymerní vrstva je takto periodicky tepelně lokálně ohřívána (dáno rychlostí skenování laserového svazku) na teplotu větší než teplota měknutí T_f . Metoda realizuje polymerní periodické struktury s mikronovými a submikronovými rozměry, což umožní realizaci vlnově selektivní termoopticky profilované Braggovské mřížky a mřížky s dlouhou periodou LPG (long-period grating) pro vlnovodné filtry a reflexní mřížky, využitelné pro informatiku a senzoriku.

Tyto nové fyzikální metody elektrického a tepelného tvarování polymerů elektrickým polem [23] a laserovým svazkem [24] směřují k realizaci speciálních hřebenových vlnovodů a Braggovských nanomřížek, na kterých se skupina optoelektroniky katedry mikroelektroniky FEL ČVUT aktivně podílela ve spolupráci s VŠCHT. Příklad realizovaných struktur a schéma působení skenovaného laserového svazku za současného mechanického pohybu vzorku jsou na obr. 1.2 a, b.



Obr. 1.2 Ovlivňování povrchové morfologie polymeru PMMA laserovým svazkem
a) Polymerová nanomřížka b) Tepelné profilování polymerové mřížky

Tyto metody byly zkoumány v rámci projektu GAČR [7]. Následně v aplikačním grantu MPO-TIP [8], na kterém v současné době spolupracujeme také s SQS Vláknoová technika a.s. je zkoumáno využití periodických planárních polymerových mřížek Braggovského typu pro vlnovodné polymerové filtry, vlnové distribuční členy a teplotní senzory.

Výzkumné práce skupiny optoelektroniky vedené autorem na Katedře mikroelektroniky byly v oboru integrovaných optických a optoelektronických struktur zaměřeny do oblasti návrhu topologie, technologie přípravy a měření vlastností nových součástek integrované optiky a optoelektroniky využívajících optické polymerové vlnovody, interferenční filtry, optické vlnovodné Braggovské filtry a topologicky složitější triplexní členy na polymerových materiálech polymethylmethacrylátu (PMMA), polymethylmethacrylimidu (PMMI) a epoxy novolak resinu SU-8 (ENR). Tyto práce byly realizovány v úzké spolupráci s kolektivem Doc. Ing. Ivana Hüttela, DrSc z VŠCHT, Ústavu inženýrství pevných látek v rámci výzkumného záměru ČVUT FEL [9] a grantového projektu GAČR [7], jehož byl autor hlavním řešitelem. Současně byl rozvíjen nový směr výzkumu vybraných mikrooptických a planárních hybridních optoelektronických integrovaných obvodů, kde předpokládáme využití prvků integrované polymerové optiky v optických planárních částech těchto integrovaných struktur. Někteří řešení optických a optoelektronických integrovaných struktur jsou přihlášena do patentního řízení nebo byla již patentována [11].

Výzkum struktur integrované optoelektroniky bude zaměřen na realizaci a měření hybridních subsystémů přenosového typu WDM přijímač/vysílač, kde optické části jsou řešeny jako planární polymerové příp. dielektrické integrované optické vlnově selektivní obvody.

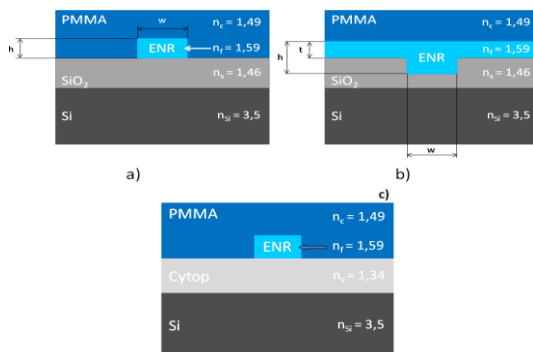
2. Vybrané polymerní prvky integrované optiky

Množství struktur integrované optiky, které jsou využívány v optických a optoelektronických integrovaných informačních systémech a subsystémech jsou v současné době značně široké. Na našem pracovišti byly navrženy planární polymerové prvky integrované optiky, jako jsou různé typy polymerních vlnodů, Y výkonové děliče různých typů 1:N, MMI interferenční děliče (MMI-multimode interference) výkonové i vlnově selektivní, směrové vazební členy, mikrooptické kruhové rezonátory, vlnovodné Braggovské mřížky a triplexní vlnově selektivní členy. Některé z těchto prvků byly realizovány s využitím UV litografie nebo elektronové litografie, některé navržené struktury jsou v realizační fázi. Aplikační oblastí je především informatika a sensorika. Náš záměr byl především veden myšlenkou vytvořit relativně ucelenou řadu součástí využitelných v optických částech místních informačních sítí typu PON (passive optical networks) a v optických částech optoelektronických hybridních integrovaných obvodů, které pracují s vlnovými informačními toky vlnových multiplexů s malým počtem vlnových nosných, označované jako CWDM. V našem případě jde o tři vlnové délky, využívané v optických místních sítích PON-FTTx [12] a to 1310, 1490 a 1550 nm.

2.1 Planární optické polymerové vlnovody

Řešení topologie a technologie optických planárních vlnodů je základním krokem pro realizaci topologicky složitějších struktur. Tyto vlnovody slouží pro propojování dalších optických členů v optických a optoelektronických integrovaných obvodech. Náš výzkum byl zaměřen na návrh a realizaci optických polymerních vlnodů s útlumem srovnatelným s planárními vlnovody na dielektrických materiálech jako je SiO_2 , Si_3N_4 , optická skla nebo LiNbO_3 , s optimalizovanými a stabilními optickými vlastnostmi a snadnou realizací ve výrobě [13]. Geometrické rozměry byly určeny primárně návrhem s využitím modifikované dispersní rovnice [14], ze které lze stanovit příčné rozměry planárního vlnovodu a počet vedených vidů. Navržené rozměry pak byly ověřeny a doladěny simulací v programu BMP od firmy RSoft. V rámci výpočtů a následných simulací, které byly podkladem pro technologický návrh a byly neustále zpřesňovány se ukázalo, že oba příčné rozměry vlnodů, tedy tloušťka h a šířka w , vycházely pro využití typy polymerů a jednovodový (SM) režim v okolí $1\mu\text{m}$ viz tab. 2.1, 2.2. Tato skutečnost nastává v důsledku relativně velkého kontrastu indexu lomu na

rozhraních jádra a pláště polymerových vlnodů $\Delta n \sim 3 - 15 \%$. Vlastní vlnodné struktury byly následně realizovány ve dvou topologických variantách - jako hřebenové planární vlnodvy, obr. 2.1a,c nebo kanálkové vlnodvy, obr. 2.1b. Výchozím materiálem jádra vlnoddu byl vzhledem k výborné dlouhodobé stabilitě parametrů, fotorezistivním vlastnostem a dobrým zkušenostem na kooperujícím pracovišti VŠCHT vybrán v první řadě polymer – Epoxy novolak resin (ENR) NANOTM SU-8 od firmy Micro Resist Technology GmbH [15], variantně byl využit polymethylmethakrylid (PMMI) s obchodním označením Pleximid od firmy Evonik, který má výhodnější parametry z hlediska optického útlumu v NIR oblasti, než např. polymer PMMA. V oddělovací vrstvě byl vedle SiO₂ využit také polymerový materiál Cytop(Cyclic Transparent Optical polymer). Toto materiálové řešení lze zdůvodnit především požadavky na využívané vlnové pásmo NIR (2. a 3. optické telekomunikační okno), kde použité polymery mají v daných oknech útlumová minima, dále vhodnou velikostí kontrastu indexu lomu jádra a pláště vzhledem k omezení počtu vedených vidů na jedné straně a poloměřů ohybu a numerické apertury vzhledem k dosažení dostatečné účinnosti optické vazby na straně druhé.



Obr. 2.1 Polymerové optické planární vlnodvy [16]

- a) Hřebenový vlnod ENR na Si podložce s oddělovací vrstvou SiO₂
- b) Kanálkový vlnod ENR na Si podložce s oddělovací vrstvou SiO₂
- c) Hřebenový vlnod ENR realizovaný na polymerní podložce Cytop

Pro realizaci ENR hřebenových a kanálkových polymerových vlnodů viz obr. 2.1 byla využita UV litografie. Motivy byly vytvořeny na podložkách Si s oddělovací mezivrstvou SiO₂ a variantně na GaAs s oddělovací mezivrstvou SiO₂, nebo s využitím polymerového materiálu CYTOP [19], pouze hřebenová varianta. Při realizaci

kanálových vlnodů byl uplatněn technologický postup Fischbeckův [17], který předpokládá leptání motivu v oddělovací vrstvě, která se následně vyplní polymerem, který tvoří jádro vlnodou. Tato vrstva musí být nanášena ve větší tloušťce, dle hloubky kanálu, přesný technologický postup realizace vlnodů, viz. [18]. Využitím polymeru CYTOP v oddělovací vrstvě jsme sledovali především zjednodušení technologie realizace optických planárních vlnodů o proces termické oxidace křemíku, nebo chemického napařování oddělovací vrstvy SiO₂ na GaAs (PECVD). Jako krycí vrstvy bylo užito polymeru PMMA. Tloušťka oddělovací vrstvy musí zaručit, aby energie evanescentní vlny vyzářená do substrátu byla dostatečně malá (< 0,1%). Monokrystalická podložka GaAs (100) umožňuje relativně snadno vyrobit štípaním kolmou a relativně opticky kvalitní hranu pro polymerovou vstupní a výstupní fasetu vlnodou. U podložky Si je faseta méně kvalitní, a proto jsme v současné době přikročili k realizaci kvalitní fasety RIE selektivním leptáním. Výsledky návrhu, realizace a měření jsou uvedeny rovněž v [19].

K návrhu geometrických rozměrů polymerových optických vlnodů bylo použito 2D aproximace. Pro určení mezních rozměrů vlnodou při šíření jediného vidu v jádře optického vlnodou byly využity vztahy (2.1) – (2.4), které lze snadno odvodit z dispersní rovnice [14].

Pro TE vlnu platí

$$m = \text{Int} \left(\frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right) \quad (2.3)$$

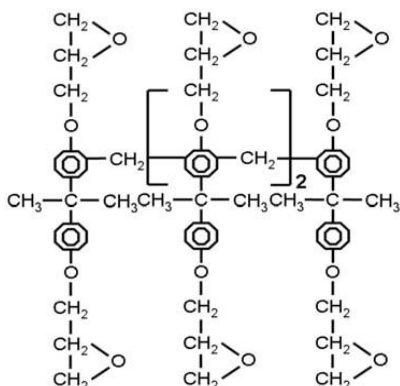
$$h_m = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left(m\pi + \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right) \quad (2.2)$$

Pro TM vlnu platí

$$p = \text{Int} \left(\frac{2}{\lambda_0} h \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \text{arctg} \left(\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^2 \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right) \quad (2.3)$$

$$w_m = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left(p\pi + \arctg \left(\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^2 \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right) \quad (2.4)$$

Epoxy novolak resin - ENR patří do skupiny epoxypolymerů. Tato skupina polymerových fotorezistů vyniká oproti akrylátovým polymerům vysokou teplotní stabilitou, kde teplota skelného přechodu je $T_g = 294^\circ\text{C}$ a fotoindukčními vlastnostmi, umožňujícími zjednodušit fotolitografický proces na pouhou expozici polymerové vrstvy přes masku ultrafialovou lampou. Další výhodou je poměrně vysoký index lomu ve VIR a NIR v rozsahu 1,58 – 1,61. Přijatelné jsou rovněž hodnoty útlumu optické vrstvy v oblasti VIR a v oblasti optických telekomunikačních vlnových délek NIR v rozsahu 0,25 dB až 1,7 dB/cm. I u těchto polymerů byl prokázán termooptický jev řádu $-1,87 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ pro teploty 20 až 70°C a rovněž dvojlom, kde difference indexů lomu TE a TM byly $1-2 \times 10^{-4}$ [15]. Strukturální chemický vzorec ENR je uveden na obr. 2.2.

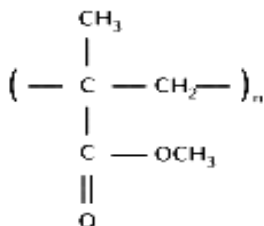


Obr. 2.2 Strukturální vzorec Epoxy Novolak Resinu (ENR) [15]

Vedle ENR byl pro realizaci jader optických planárních vlnovodů pro VIR a NIR odzkoušen také polymerový materiál – Polymethylmethakrylimid (PMMI) s obchodním označením Pleximid [19]. Tento teplotně odolný materiál má teplotu skelného přechodu $T_g = 150^\circ\text{C}$ [23], má dobré optické transparentní vlastnosti a mechanickou pevnost. Hodnota indexu lomu se pohybuje v pásmu VR a NIR rozsahu 1,51 – 1,53, dle individuální modifikace.

Klasickým polymerovým materiálem pro polymerové integrované obvody je PMMA (polymethylmethakrylát) optické kvality. Jelikož

PMMA má velmi dobrou mechanickou odolnost a vhodnou velikost indexu lomu, byl rovněž využit jako krycí plášťová vrstva ENR a PMMI planárních optických vlnovodů, viz dále. PMMA má teplotu skelného přechodu $T_g = 112^\circ\text{C}$ [20]. Hodnota indexu lomu se pohybuje v pásmu VR a NIR rozsahu 1,48 – 1,49. Chemický strukturální vzorec PMMA je uveden na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Strukturální vzorec polymethylmethakrylátu (PMMA)

V oddělovací vrstvě byl také využit polymerový materiál Cytop (Cyclic Transparent Optical polymer), který má velmi nízkou hodnotu indexu lomu 1,340 – 1,337 pro NIR pásmo vlnových délek. Důvodem je nahrazení dielektrické oddělovací vrstvy planárního vlnovodu, která je realizována oxidací Si a má tloušťku 2 až 3 μm polymerovou vrstvou, čímž lze odstranit jednu technologickou vakuovou operaci (termickou oxidací) operací jednodušší realizovanou spin-countingem, a tak realizovat polymerový vlnovod z čistě polymerových funkčních vrstev. Cytop je materiál s posunutou absorpční hranou oproti PMMA z 3,3 μm na 7,7 μm , má nižší optické ztráty ve VIR a je teplotně stabilnější [22]. V nedávné době se objevily polymerové materiály Ormoclad/Ormocore, jejichž index lomu lze chemickou cestou měnit a tím připravit polymerové rozhraní s přesně nastavenou diferencí indexu lomu. Tyto materiály mohou být řešením pro zvětšení příčných rozměrů vlnovodu a tím zhotovení optických polymerových SM vlnovodů optickou UV litografií. V současné době probíhá laboratorní ověřování technologie realizace tenkých vrstev a vlastností těchto materiálů. Mezní hodnoty příčných rozměrů pro jednořadový režim žebrového vlnovodu ENR s pláštěm PMMA a dielektrickou oddělovací vrstvou SiO_2 pro TE_0 , TM_0 vlnu ($m=0$) a vlnové délky 1310 a 1550 nm jsou uvedeny v tab. 2.1. Hodnoty indexů lomu všech využitých materiálů pro 1310 a 1550 nm jsou v tab. 2.2.

Tab. 2.1 Rozměry SM žebrového vlnovodu ENR [16]

Wavelength (nm)	h_0 (μm)	$h_{0,\text{sub}}$ (μm)	$h_{0,\text{clad}}$ (μm)	w_0 (μm)
1310	1,15	1,61	1,89	1,06
1550	1,36	1,91	2,23	1,25

kde h_0 resp. w_0 je tloušťka respektive šířka vlnovodné vrstvy, $h_{0,\text{clad}}$ a $h_{0,\text{sub}}$ jsou tloušťky plášťové a substrátové vrstvy. Byly rovněž zkoumány kritické poloměry zakřivení u tohoto typu vlnovodu. Ze simulací vyplývá, že pro vlnové délky 1310 až 1550 nm, kontrast indexů lomu 0,1 a poloměr ohybu 0,1 mm jsou ztráty pod 10% [35].

Tab. 2.2 Tabulka měřených indexů lomu v závislosti na vlnové délce pro využití materiálu optických planárních vlnovodů [16]

Wavelength (nm)	Cytop	SiO ₂	PMMA	PMMI (8805)	SU8 (ENR)
1310	1,338	1,456	1,478	1,519	1,582
1550	1,337	1,456	1,477	1,518	1,582

Srovnatelné parametry a jednodušší realizaci lze dosáhnout využitím jednovidových kanálkových vlnovodů viz obr. 2.1b. Metodou návrhu těchto vlnovodů jsme se také zabývali v [19]. Základem je známý Fischbeckův návrh [17], využívající kanálek v oddělovací vrstvě t , který je následně zalit polymerovou vrstvičkou definované tloušťky h . Snížení velkého kontrastu indexu lomu u vlnovodů s ENR jádrem bylo dosaženo návrhem jednovidových kanálkových vlnovodů s PMMI jádrem. Výsledky výpočtů pro 3D model PMMI 8813 kanálkový vlnovod s pláštěm PMMA a SiO₂ dielektrickou oddělovací vrstvou pro HE₀₁ vlnu uvádí tab. 2.3. Výsledky návrhu klíčového parametru w jádra vlnovodu vycházely větší o 20 až 25%.

Tab. 2.3 Rozměry SM kanálkového vlnovodu PMMI 8813 [19]

Wavelength (nm)	t (μm)	h (μm)	h_{Sub} (μm)	h_{Clad} (μm)	w (μm)
1310	1,50	2,73	1,95	2,52	1,31
1550	1,78	3,24	2,32	2,98	1,55

Z výsledků návrhu je patrné, že rozměry kanálkového vlnovodu vychází poněkud větší než hřebenový vlnovod s SiO₂ oddělovací vrstvou, protože kontrast indexu lomu oddělovací a vlnovodné vrstvy je menší. Kontrast indexů lomu je $\Delta=0,104$ u rozhraní PMMI/SiO₂ až $\Delta=0,244$ u ENR/SiO₂ pro 1310 nm. Technologické postupy realizace obou typů optických planárních vlnovodů se dosti zásadně liší, jak již bylo naznačeno [21]. U hřebenového vlnovodu byl polymer ENR na substrátu Si/SiO₂ respektive Si/Cytop plošně odstředěn metodou rotačního lití a následně vytvořen motiv integrované struktury běžným UV litografickým procesem s následným odleptáním, kterým byly vytvořeny vlnovody s šířkou hřebene 5 μm až 100 μm a s tloušťkou 2 μm . Vlnovod byl překryt PMMA, který tvořil horní krycí vrstvu. U kanálkových vlnovodů je nejdříve vytvořen ve vrstvě SiO₂ kanálek maskováním a leptáním, na který je opět metodou rotačního lití nanášena vrstva polymeru ENR resp. PMMI a následně ochranná krycí vrstva PMMA. Výpočtem bylo určeno, že v rozsahu vlnových délek 650 až 1550 nm se pro námi realizovaný nejužší vlnovod 5 μm vidové složení mění v rozsahu 3 až 9 vidů TE,TM. Pro stanovení útlumu optických vlnovodů se nejčastěji používá rozptylová metoda, nebo metoda dvou délek. Obě metody byly využity pro stanovení průměrného měrného útlumu vyrobených vzorků.

Výsledky měření ukazují, že průměrné hodnoty měrných útlumů hřebenových a kanálkových vlnovodů Si/SiO₂/ENR/PMMA a GaAs/SiO₂ /ENR/PMMA se pohybují v rozsahu 1dB/cm až 3,2 dB/cm pro vlnové délky v rozsahu 650 nm až 1550 nm [18], [19], [21]. Nejlepší vzorky dosahovaly hodnot kolem 0,5 dB/cm. V případě vlnovodů na substrátech Si/Cytop a GaAs/Cytop se optický útlum pohyboval kolem 5 dB/cm. Vyšší optický útlum v tomto případě je způsoben větší drsností povrchu na rozhraní CYTOP - vlnovod. Výsledky ukazují, že ENR polymer je útlumově optimalizován pro využití v informatice ve vlnových pásmech VIS a NIR. Ukázky vyrobených MM polymerových hřebenových vlnovodů na Si a GaAs substrátu jsou na obr. 2.4. Z obrázku je patrné, že vlnovody jsou kvalitní a bez viditelných poruch.

V práci [25] byly provedeny výpočty týkající se možnosti realizace jednovodových polymerových vlnovodů s čtvercovými průřezy, které rozměrově odpovídají běžným rozměrům telekomunikačních optických vláken 4x4 a 9x9 μm , což by snížilo vazební ztráty a zjednodušilo technologii výroby takových optických planárních vlnovodů. Pro realizaci těchto vlnovodů byly odzkoušeny nové polymerové materiály OrmoClad a OrmoCore, které umožňují jejich mícháním nastavit index lomu OrmoCladu na hodnoty velmi blízké

OrmoCoru a tím zvětšit příčné rozměry vlnovodu pro dosažení jednovodového režimu a využitím ředidel (kupř. Ormothin 08) modifikovat tloušťku vrstev. Bylo vypočítáno, že pro rozsahy vlnových délek 1,3 až 1,55 μm musí být rozdíl indexu lomu $\Delta n = 0,009$ až 0,012 pro příčný rozměr 4x4 μm a $\Delta n = 0,002$ pro příčný rozměr 9x9 μm . Po přikročení k realizaci těchto vlnodů depozičními testy se však objevily technologické problémy, především pokud jde o homogenitu polymerových vrstev, na jejichž odstranění se v současné době pracuje.



Obr. 2.4 Fotografie realizovaných ENR hřebenových vlnodů [21]

- a) 10 x 10 μm na křemíku, oddělovací vrstva SiO_2 , bez krycí vrstvy
- b) 5 x 5 μm na GaAs, oddělovací vrstva Cytop, krycí vrstva PMMA

2.2 Planární optický polymerní triplexní člen

V souvislosti s řešením grantového projektu [7] se náš výzkum vedle planárních optických vlnodů, realizovaných na polymerních materiálech, zabýval návrhem vybraných větvených struktur integrované optiky, jako jsou optické výkonové a vlnově selektivní děliče a také optické planární triplexní členy (WDM triplexery). Důvodem byla myšlenka řešení optické části hybridních optoelektronických struktur, navržených a některých také realizovaných v naší laboratoři, jako je mikrooptický WDM přijímač, nebo WDM transceiver na planární formu [13]. Tyto planární integrované optické členy mohou nahradit mikrooptické prvky, jakým jsou kupř. TFF (Thin Film Filter), nebo VHGT (Volume Holographic Grating Triplexer) objemová dvousystémová holografická optická mřížka [26] a.p.

Nově navržené SM řešení planárního WDM triplexního členu kombinuje vlnově selektivní multimódový interferenční filtr (MMI filtr),

navržený pro vlnové délky 1490 a 1550 nm se směrovým vazebním členem (DC členem), který zajišťuje zavedení vlnové délky 1310 nm ve zpětném směru. Toto řešení využívá vysokou směrovost a vlnovou selektivitu, kterou směrový vazební prvek vykazuje.

Multimódový interferenční člen může pracovat jako optický výkonový dělič, nebo vlnově selektivní MMI filtr. Princip činnosti multimódového interferenčního výkonového děliče nebo MMI filtru je založen na principu zrcadlení vstupního optického pole, které se opakuje v periodických záznejových vzdálenostech L_π od vstupu do interferenční oblasti a to v jednom nebo vícenásobných mnohačetných zrcadleních až k jejímu konci. Předpokládejme 2D zobrazení v příčné ose x . Pak podmínku fázové rezonance v interferenční oblasti lze vyjádřit fázovou disperšní rovnicí (2.5),

$$k_{xm}^2 + \beta_m^2 = k_0^2 n_{eff}^2 \quad (2.5)$$

kde k_{xm} je průmět modulu vlnového vektoru m -tého vidu optické vlny do příčného směru vlnovodu ztotožněného s osou x a β_m fázová konstanta šíření m -tého vidu, n_{eff} je efektivní index lomu.

Vyjáďřeme záznejovou vzdálenost L_π která odpovídá vzdálenosti, na které dva nejnižší vidy, šířící se v interferenční oblasti s fázovými konstantami β_0 a β_1 , tvoří záznej s fázovým rozdílem π . Po jednoduché úpravě dostaneme vztah (2.6), pro směrový vazební člen resp. vztah, který nám váže délku a šířku interferenční oblasti u MMI členu [28].

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4n_{eff}W_e^2}{3\lambda_0} \quad (2.6)$$

kde W_e je efektivní šířka interferenční oblasti pro základní vid β_0 , β_1 je fázová konstanta dalšího vyššího vidu, n_{eff} je efektivní index lomu, λ_0 je vlnová délka ve vakuu.

Pokud vyjádříme záznejovou vzdálenost m -tého vidu $\beta_m - \beta_1$, lze usoudit [28], že zobrazovací vzdálenost zrcadlení L_I pro konstruktivní interferenci je trojnásobkem záznejové vzdálenosti L_π , pak délka interferenční oblasti L_I pro dvě vlnové délky λ_1 a λ_2 musí vyhovovat rovnici (2.7)

$$L_I = p(3L_{\pi,\lambda_1}) = q(3L_{\pi,\lambda_2}) \quad (2.7)$$

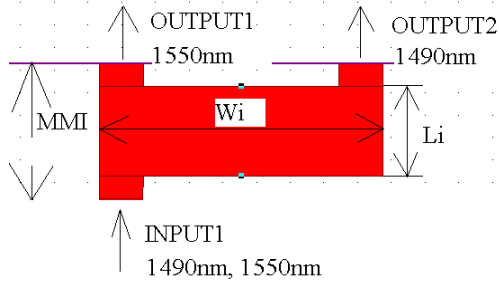
kde p a q jsou celá nezáporná čísla. Pokud chceme, aby filtr byl co nejkratší, což se projevuje příznivě na velikosti přeslechů vlnových délek, musí být parametry p a q co nejmenší.

Pomocí koeficientů p a q jsme definovali parametr zkrácení k_{MMI} , jako nejmenší společný násobek, kterým lze vynásobit záznejové

vzdálenosti L_π tak, aby interferenční délka byla společná pro obě vlnové délky. Tato závislost je formulována v rovnicích (2.8).

$$k_{MMI} = \frac{9L_{\pi,\lambda_1}L_{\pi,\lambda_2}}{L_I} = \frac{3L_{\pi,\lambda_1}}{q} = \frac{3L_{\pi,\lambda_2}}{p} \quad (2.8)$$

Výpočty a simulace byly provedeny pro technologické řešení MMI filtru viz. obr. 2.5 se substrátem Si/SiO₂, s jádrem ENR a pláštěm PMMA [27]. V simulovaných rozměrových tabulkách je efektivní šířka interferenční oblasti W_e , která platí pouze pro vid β_0 , nahrazena symbolem W_I .



Obr. 2.5 Topologické návrhové schéma MMI filtru 1x2

Výsledky optimalizovaných simulací rozměrů MMI filtrů 1x2 viz obr. 2.5 pro vlnové délky 1490 a 1550 nm a parametrů vložného útlumu $A_{V1,k}$ (dB) vztah (2.9) a přeslechů $A_{P1,k}$ (dB) vztah (2.10) v programu BMP RSoft, kde $k = 1,2$ označuje číslo výstupu na MMI filtru a $i = 1$ označuje číslo vstupu, jsou uvedeny v tab. 2.4, kde h a w je výška a šířka hřebenových vlnovodů viz obr. 2.1a.

$$A_{Vi,k} = 10 \log \frac{P_k}{P_i} \quad (2.9)$$

$$A_{Pi,k} = 10 \log \frac{P_k}{P_i} \quad (2.10)$$

kde P_i je vstupní optický výkon a P_k je výstupní optický výkon. Struktura MMI filtru 1490 nm a 1550 nm realizovaná elektronovou litografií je na obr. 2.6. Optické vlnovody mají laterální šířku 1,1 μm . Jde o první testovací vzorek.

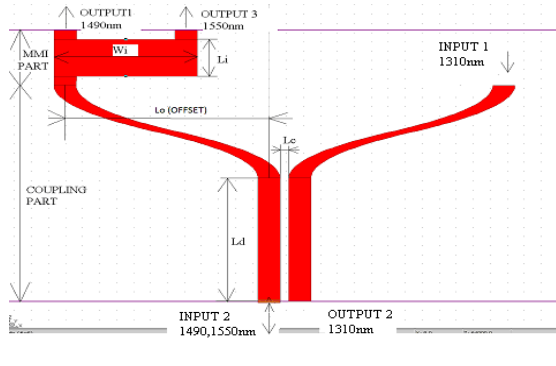
Tab. 2.4 Výsledky simulací rozměrů, parametrů vložného útlumu $A_{V1,k}$ a přeslechů $A_{P1,k}$, kde $k=1,2$ MMI filtru 1x2 pro vlnové délky 1490 a 1550 nm [30]

h (μm)	w (μm)	W_i (μm)	L_i (μm)
1,2	1,1	8,5	2696
1490 nm $A_{V1,2}$ (dB)	1490 nm $A_{P1,1}$ (dB)	1550 nm $A_{V1,1}$ (dB)	1550 nm $A_{P1,2}$ (dB)
1,19	20	1,80	17



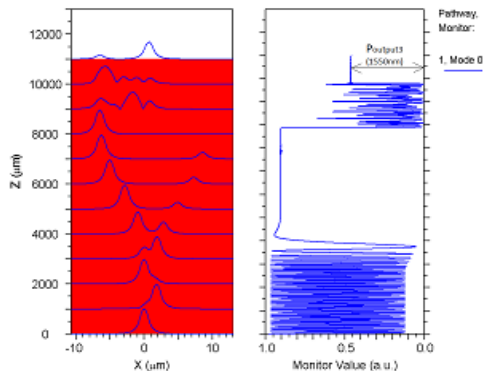
Obr. 2.6 Fotografie MMI filtru 1490 a 1550 nm realizovaného na substrátu Si/SiO_2 , s jádrem ENR a pláštěm PMMA elektronovou litografií. Optické vlnovody mají šířku 1,1 μm .

Jako hlavní úkol v oblasti návrhu bylo, vytvořit topologický a technologický návrh WDM triplexeru. Simulací v programu BMP R Soft, byly optimalizovány rozměry triplexního planárního členu s MMI filtrem 1x2 a směrovým vazebním členem vzhledem k minimálním hodnotám vložnému útlumu $A_{V_{i,k}}$ (dB), přeslechů $A_{P_{i,k}}$ (dB) a optimální velikosti offsetové délky L_o , kde index $i=1,2$ odpovídá číslu vstupu přenosového parametru v logaritmicke míře a $k=1L,1P,2,3$ odpovídá číslům výstupu parametru v logaritmicke míře (symbol L označuje levou stranu triplexeru, P označuje pravou stranu). Planární WDM triplexer pro vlnové délky 1310, 1490 a 1550 nm se substrátem Si/SiO_2 , s polymerovým jádrem ENR a pláštěm PMMA je na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Topologické návrhové schéma WDM triplexeru [30].

Na obr 2.8 je zobrazena simulace rozložení optického pole ve WDM triplexeru pro $\lambda_3 = 1550$ nm.



Obr. 2.8 Simulace prostorového rozložení optického pole v rovině XZ a amplitudy v optické cestě WDM triplexeru [30].

Hodnoty amplitudy optického pole byly využity pro stanovení vložného útlumu a přeslechů. Šířka $w = 1,2 \mu\text{m}$ a výška $h = 1,2 \mu\text{m}$ hřebenových vlnodů jsou voleny tak, aby se optickými vlnodými šířil pouze základní vid pro vlnové délky $\lambda_1 = 1310$ nm, $\lambda_2 = 1490$ nm a $\lambda_3 = 1550$ nm. Délka části označené jako „coupling part“ byla optimalizována na 5 mm. Další rozměry jsou výsledkem optimalizovaných simulací rozměrů planárního WDM triplexeru vzhledem k minimálním hodnotám vložného útlumu a přeslechů $A_{V1,k}$ a $A_{P1,k}$. S ohledem na geometrické rozměry optických vlnodů bylo

předpokládáno, že WDM triplexer bude realizován elektronovou litografií. Optimalizované parametry simulované v programu BMP RSoft pro vlnové délky 1310, 1490 a 1550 nm jsou uvedeny v tab. 2.5, 2.6. Označení geometrických parametrů je patrné z obr. 2.7.

Tab. 2.5 Výsledky optimalizovaných simulací rozměrů WDM triplexeru [30]

w (μm)	h (μm)	L_1 (μm)	W_1 (μm)
1,2	1,2	1912	8,4
L_d (μm)	L_c (μm)	L_0 (μm)	
2804	1,2	6	

Tab. 2.6 Výsledky simulací vložného útlumu $A_{V_i,k}$ a přeslechů $A_{P_i,k}$ WDM triplexeru pro offset $L_0 = 6 \mu\text{m}$ [30]

1310 nm $A_{V1,2}$ (dB)	1310 nm $A_{P1,1}$ (dB)	1310 nm $A_{P1,3}$ (dB)
1,18	36,4	36,4
1490 nm $A_{V2,1}$ (dB)	1490 nm $A_{P2,3}$ (dB)	1490 nm $A_{P2,1}$ (dB)
1,63	24,8	23,05
1550 nm $A_{V2,3}$ (dB)	1550 nm $A_{P2,1L}$ (dB)	1550 nm $A_{P2,1P}$ (dB)
3,13	24,35	23,38

V práci [30] byly porovnány hodnoty individuálně optimalizovaných prvků MMI filtru a DC členu s optimalizovanou simulací WDM triplexeru jako celku, viz tab. 2.6. Z porovnání vyplývá, že celkově optimalizovaný triplexer má nižší hodnoty přeslechů a srovnatelné hodnoty vložných útlumů v příchozím směru, což je důležité z hlediska citlivosti WDM transceiveru na přijímané optické signály. Pokud zvyšujeme offset v rozsahu $L_0 = 6 - 7,5 \mu\text{m}$ mění se hodnoty vložného útlumu v rozsahu 3 až 12 dB. Dochází zde k rychlému navýšení vložného útlumu v důsledku optických ztrát vyzařováním na ohybech a optickým útlumem na propojovacích vlnovodech MMI a DC prvků WDM triplexeru, pokud naopak snižujeme offset pod

hodnotu 6 μm , zvyšují se hodnoty přeslechů mezi MMI filtrem a DC směrovým vazebním členem, tedy výše uvedená hodnota offsetu je hodnotou optimální. Z výsledků simulací dále vyplývá, porovnáme-li hodnoty individuálně optimalizovaných prvků MMI filtru viz tab. 2.4 a hodnoty optimalizované simulace WDM triplexeru viz tab. 2.5, že rozměry MMI filtru, navázaného optickým vlnovodem na směrový vazební člen, jsou tímto propojením ovlivněny a to především pokud jde o interferenční délku L_I . Dále simulace ukazují, že koeficienty p a q nevycházejí celočíselně, což je způsobeno především zjednodušujícími předpoklady, které jsme použili při odvození vztahu (1.2). Vztah obsahuje efektivní šířku interferenční oblasti W_e , která je polarizačně a vidově závislá v důsledku různé hloubky vniku vidů na rozhraních interferenční oblasti, jak popisuje Goos-Hahnchenův posuv [28]. Další zjednodušení vyplývá z toho, že efektivní šířka platí pouze pro základní vid s konstantou šíření β_o .

Ze simulací vyplynuly tyto aproximované hodnoty parametrů p , q a koeficientu zkrácení interferenční oblasti k_{MMI} vztah (1.4) z vypočtené zánějové délky L_{π} pro $\lambda_1 = 1490$ a $\lambda_2 = 1550$ nm u MMI filtru vřazeného do WDM triplexního členu, tab. 2.7.

Tab. 2.7 Hodnoty délky interferenční oblasti L_I , koeficientů p a q a koeficientu zkrácení k_{MMI} pro vypočtené zánějové délky L_{π} MMI filtru [30]

L_I (μm)	$3L_{\pi,\lambda_1}$ (μm)	$3L_{\pi,\lambda_2}$ (μm)	p (-)	q (-)	k_{MMI} (-)
1912	308,4	296,5	6,2	6,45	47,82

Z výsledků je patrné, že dochází k významnému zkrácení délky MMI filtru, které se zvyšuje vřazením filtru do WDM triplexeru 1,4 krát.

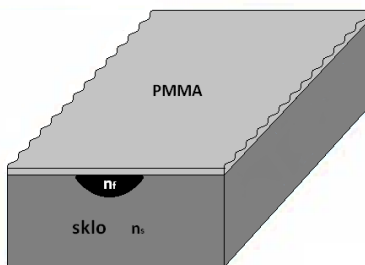
Variantně v našem výzkumu předpokládáme užití dielektrických materiálů jako je sklo pro konstrukci WDM triplexeru a to hlavně z důvodu možnosti realizace triplexeru běžnou UV litografií. Publikován již byl návrh a simulace vlnovodné struktury a MMI děliče v programu BMP s kanálovými difuzními vlnovody na skle s výměnou iontů $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$, kde lze dosáhnout SM režimu pro rozměry $w = h = 4$ μm při kontrastu indexu lomu $\Delta n = 3\%$ [29]. Rovněž fasety vlnovodů lze realizovat v optické kvalitě pouhým leštěním a při zanoření kanálku na cca 30 μm lze provést i efektivní vazbu na optické vlákno. Tyto práce byly publikovány ve spolupráci s SQS Vlákenná technika a.s.

2.3 Polymerní Braggovské mřížky a vlnovodné filtry

Rozpracování optické planární části WDM transceiveru v rámci výzkumných prací na grantu [8] vedlo na dvě řešení. První varianta řeší optickou část jako SM vlnově selektivní integrovaný polymerový triplexní obvod, viz kap. 2.2. Ve druhé variantě je optická planární část navržena jako integrovaný obvod s planárními MM optickými výkonovými děliči a optickými vlnovodnými filtry s Braggovskými polymerovými mřížkami. Tato druhá varianta vznikla ve spolupráci s VŠCHT.

Pro realizaci vlastních optických vlnovodných filtrů, byly zvoleny dvě technologické varianty, z nichž první využívala kanálkového optického vlnovodu na křemičitém skle s výměnnou iontů, na kterém byla z lícové strany vytvořena PMMA mřížka metodou laserového tepelného tváření [24], viz. kap. 1. Druhá varianta využívá polymerní hřebenový optický vlnovod na substrátu Si/SiO₂, jádrem ENR a pláštěm PMMA, viz. kap. 2.1, kde optická mřížka je vytvořena prostorovou profilací hřebene vlnovodu opět metodou tepelného tváření.

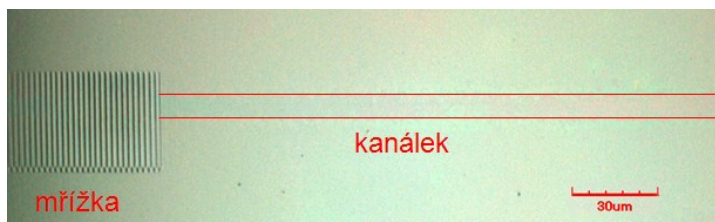
Základ vlnovodného filtru podle první varianty tvoří optický difuzní slabě zanořený kanálkový vlnovod na skleněném substrátu 11T (sodnovápenaté křemičité sklo). Tento vlnovod byl připraven v SQS Vlákňová optika a.s. technologií výměny iontů, viz obr. 2.9.



Obr. 2.9 Optická mřížka PMMA na skle s kanálkovým vlnovodem připraveným výměny iontů $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ (n_r je index lomu jádra vlnovodu, n_s je index lomu substrátu) [31]

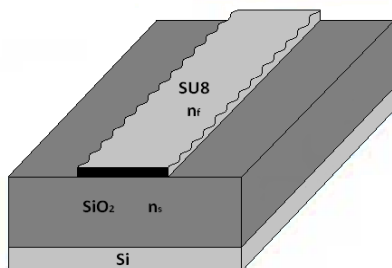
Na tuto skleněnou podložku s vytvořeným kanálkovým vlnovodem byla metodou rotačního lití deponována vrstva PMMA objemově dotovaná vhodnou koncentrací meso-tetrafenylporfyrinu. Polymer ENR nelze kvůli vysoké hodnotě indexu lomu u vlnovodných filtrů tohoto typu využít. Připravená polymerní vrstva tloušťky cca 2-3 μm

byla podrobena periodickému tepelnému tváření pomocí zaostřeného laserového svazku konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu Olympus LEXT s pracovní vlnovou délkou odpovídající absorpčnímu pásu dotujícího barviva (405 nm). Polymerní vrstva byla takto periodicky tepelně lokálně ohřívána (dáno rychlostí skenování laserového svazku) na teplotu větší než teplota měknutí T_f . Při současném mechanickém pohybu podložky dochází k silovému působení vlivem rozdílného povrchového napětí ve vyhřáté a tuhnoucí oblasti polymeru a tím k periodické změně tloušťky vrstvy a vzniku optické mřížky. Mřížková konstanta je lineární funkcí rychlosti mechanického posuvu. Polymerová optická difrakční mřížka, která je součástí lícového pláště vlnovodu, ovlivňuje šíření záření v difuzním vlnovodu vazbou na optickou evanescentní vlnu, která z jádra vlnovodu vystupuje a interaguje s optickou mřížkou. Snímek dielektrického kanálového vlnovodu s realizovanou PMMA optickou mřížkou je na obr. 2.10. Perioda mřížky $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ a délka mřížky $L = 150 \mu\text{m}$.



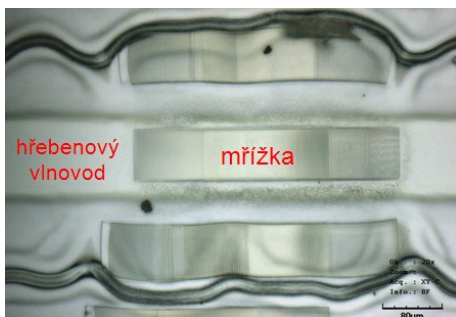
Obr. 2.10 Fotografie difuzního kanálového vlnovodu na skleněné podložce s PMMA optickou Braggovskou mřížkou [31]

Druhá technologická varianta vlnovodného filtru využívá prostorově profilovanou optickou difrakční mřížku realizovanou na hřebenovém polymerovém vlnovodu ENR vytvořeném na substrát Si/SiO_2 . Polymerová vrstva je nanášena opět pomocí rotačního lití na substrát, na kterém je tepelným optickým profilováním laserovým paprskem na konfokálním mikroskopu viz kap. 1 vytvořena optická mřížka. Optický vlnovod je pak realizován na této mřížce UV litografickým procesem po přesném sesazení masky s realizovanou mřížkou obr. 2.11.



Obr. 2.11 Optická mřížka na hřebenovém polymerovém vlnovodu ENR na Si/SiO₂ (n_f je index lomu jádra vlnovodu, n_s je index lomu substrátu) [31]

Detail hřebenu ENR optického vlnovodu s mřížkou je zobrazen na obr. 2.12. Ze snímku lze vypořadovat dobře litograficky sesazenou mřížku s hřebenem optického vlnovodu uprostřed snímku. Perioda mřížky $\Lambda = 2,75 \mu\text{m}$ a délka mřížky $L = 450 \mu\text{m}$.



Obr. 2.12 Snímek detailu hřebenu s mřížkou na vlnovodu ENR [31]

Pro nastavení mřížkové konstanty vlnovodných filtrů byly provedeny výpočty mřížkové konstanty ze vztahů pro 1. až 3. difrakční řád Braggovy reflexe odvozené z Braggových difrakčních rovnic. Účinné vyvázání optické vlny z planárního optického vlnovodu, šířící se podle osy z , je určeno podmínkou fázové rezonance mezi fázovou konstantou vedené optické vlny β_v , fázovou konstantou difraktované optické vlny β_d a fázovou konstantou mřížky $K = 2\pi/\Lambda$, kde Λ je mřížková konstanta. Rovnice fázové rezonance (2.9) pak váže konstanty šíření vedené a prostorové difraktované vlny,

$$\beta_d = \beta_i + qK \quad \text{kde } q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2.9)$$

kde q je řád vyzařování optické mřížky, K je mřížkový vektor, daný (2.10).

$$K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.10)$$

Pro mřížkovou konstantu Λ pak lze odvodit za předpokladu, že $\beta_d = -\beta_i$ a úhel vyzařování zpětné reflexe $\theta_{-1} = 90^\circ$ (2.11).

$$\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{eff}} |q| \quad (2.11)$$

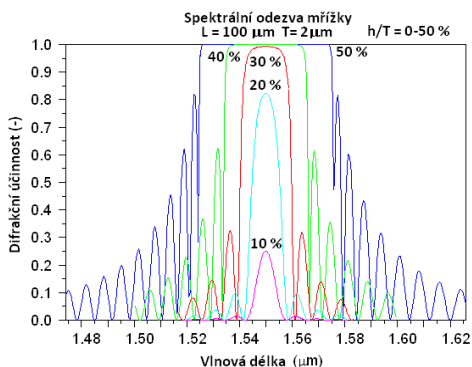
Nevýhodou využití reflexí vyšších řádů je zvýšení vložného útlumu filtru snížením transmise energie přes filtr o vyzařování nižších difraktovaných řádů z mřížky. Pro mřížku využívanou ve 2. řádu reflexe je vyzařování energie z 1. řádu do 1 dB [31]. Vypočtené mřížkové konstanty Λ pro první až třetí difrakční řád ukazuje tab. 2.8.

Tab. 2.8 Vypočítané hodnoty mřížkových konstant Λ pro 1. až 3. difrakční řád, PMMA mřížky, kde $n_{eff} = 1,477$ a ENR mřížky, kde $n_{eff} = 1,57$ pro $\lambda = 1550$ nm [33]

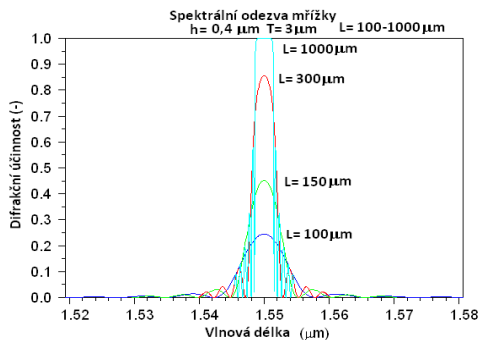
Typ mřížky	PMMA	ENR
$\Lambda_{1.\text{řád}}$ [nm]	517	500
$\Lambda_{2.\text{řád}}$ [nm]	1034	1000
$\Lambda_{3.\text{řád}}$ [nm]	1551	1500

Různé případy difrakčního vyzařování na polymerových mřížkách PMMA a ENR vytvořených na Si/SiO₂ s využitím Braggových difrakčních rovnic včetně mřížkových konstant a difrakční úhlů jsou vypočítány a podrobně rozebrány v habilitační práci autora. Z výpočtů vyplývá, že vzhledem k technologickým možnostem metody tepelného a mechanického tváření polymerů, viz kap.1, která umožňuje realizovat mřížkové konstanty hodnot $>0,7 \mu\text{m}$ (odpovídá vlnovým délkám nad $2,168 \mu\text{m}$) je možno pro realizaci vlnovodných filtrů pro telekomunikační pásmo využít pouze 2. a vyšší řády Braggovské reflexe. První řád padá pro námi zvolené materiály do oblasti vlnových délek středního infračerveného pásma a nemůže proto být využit. S využitím 2. a vyšších řádů je spojeno vyzařování nižších řádů, které zvyšuje vložný útlum vlnovodných filtrů. Dle výpočtů tento útlum představuje hodnotu 1- 4 dB [31].

Dále byly provedeny simulace závislosti difrakční spektrální účinnosti a spektrální pološířky $FWHM$ periodické Braggovské transmisní vlnovodné mřížky na geometrických konstantách vlnovodného filtru v programu GratigMODETM od fy. RSoft. Tento program slouží primárně pro simulaci mřížek reflexního typu s reflexí 1. řádu, bez vyzařování ve vyšších řádech. V případě optických mřížek s primární funkcí jako vlnovodný filtr, kde je využita Braggova reflexe v 2. řádu lze výsledky, co do závislosti maxima a pološířky $FWHM$ pásma difrakční účinnosti na změny délky mřížky L a procentního poměru hloubky modulace h/T , vztáhnout i na mřížky vlnovodné. Konstanta T je tloušťka vlnovodné vrstvy jádra. Typické závislosti jsou vyneseny na obr. 2.13 a obr. 2.14 [31].

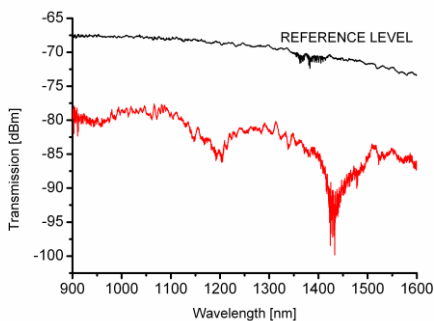


Obr. 2.13 Spektrální závislost relativní difrakční účinnosti η v závislosti na vlnové délce λ , kde parametrem je poměr h/T (kde h je prostorové promodulování mřížky, T je výška hřebenového optického vlnovodu a L je délka mřížky) [31]



Obr. 2.14 Spektrální závislost relativní difrakční účinnosti η v závislosti na vlnové délce λ , kde parametrem je délka mřížky L vlnovodné vrstvy. Tloušťka vlnovodné vrstvy je $T = 3 \mu\text{m}$, hloubka modulace je $h = 0,4 \mu\text{m}$ [31]

Ze simulací vyplývá, že velikost promodulování mřížky pro dosažení 80% difrakční účinnosti musí být minimálně 20% a délka mřížky musí být minimálně 300 μm pro výše uvedené rozměrové parametry. V současné době probíhá měření transmisních a reflexních spektrálních charakteristik vyrobených vzorků první a druhé technologické varianty v naší laboratoři. Měření spektrální transmisní charakteristiky jednoho z prvních vzorků vlnovodného filtru druhé varianty. Perioda mřížky $\Lambda = 2,75 \mu\text{m}$ a délka mřížky $L = 450 \mu\text{m}$, $T=1 \mu\text{m}$, $h = 0,1 \mu\text{m}$ je na obr. 2.15. Z průběhu je patrné, že difrakční účinnost $\eta_{\text{max}} > 90 \%$.



Obr. 2.15 Měřená optická transmisní spektrální charakteristika ENR vlnovodného filtru druhé varianty s pólem pro $\lambda = 1430 \text{ nm}$

Ze simulací a měření vyplývá, že u první technologické varianty je třeba provést optimalizaci tloušťky vrstvy, velikosti promodulování plášťové vrstvy a délky mřížky pro zajištění dostatečné interakce mezi vedenými vlny a evanescentní vlnou v plášti mřížky. Pro první technologickou variantu jsou optimální hodnoty $T=0,5 \mu\text{m}$, $h = 0,1 \mu\text{m}$ a $L=5000 \mu\text{m}$ pro dosažení 96% difrakční účinnosti. U druhé varianty dochází k přímé interakci vedené vlny a mřížky, realizované přímo na jádře vlnovodu. Proto lze dosáhnout stejné hodnoty difrakční účinnosti pro délku mřížky $L=500 \mu\text{m}$ při stejné hodnotě promodulování. Hodnota T není kritická jako u první varianty.

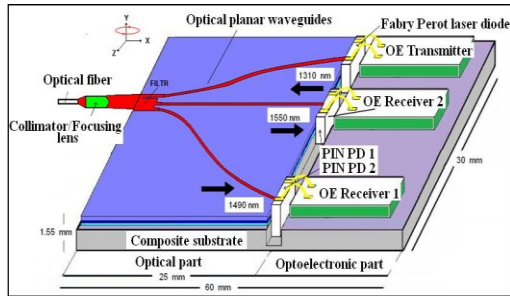
3. Hybridní optoelektronický WDM vysílač/přijímač s polymerovým triplexním členem

Výzkumné práce realizované na Katedře mikroelektroniky v oblasti optických integrovaných obvodů se soustředily na návrh technologie, topologie, realizaci a měření součástí integrované optiky realizovaných na vybraných sklech a polymerních materiálech.

Současně je rozvíjen nový směr výzkumu mikrooptických a planárních hybridních optoelektronických integrovaných obvodů a subsystémů, ve kterých předpokládáme využití prvků integrované optiky. Jde zejména o hybridní integrované optoelektronické struktury (HIOS) přenosového typu jako je WDM vysílač, WDM přijímač a po jejich sloučení na jedné podložce také WDM vysílač/přijímač. Tyto subsystémy se obecně skládají z integrované části optické, optoelektronické a elektronické. Jednotlivé části pak vykazují různé provedení integrace. Optická část může být navržena buď s využitím mikrooptických prvků [32] a nebo prvky planární integrované optiky [13]. Tato část je pak navázána na integrovanou optoelektronickou a elektronickou sekci. Logickým pokračováním výzkumných prací v oblasti WDM HIOS přenosového typu byl návrh mikrooptický a následně planární verze WDM vysílače/přijímače. Předmětem této kapitoly je především ukázat výsledky topologického a technologického návrhu tohoto subsystému.

Nové topologické a technologické systémové řešení WDM vysílače/přijímače vzniklo v rámci řešení grantu [7] a výzkumného záměru [9] a bylo postupně publikováno v [13], [26], [32] a následně i patentováno [11]. Pro ověření optoelektronické a elektronické přijímací části byla navržena, postupně realizována a odměřena mikrooptická hybridní integrovaná varianta WDM přijímače, resp. WDM vysílače/přijímače, kde optická část využívá dvousystémovou objemovou holografickou mřížku VHGT (Volume Holographic Grating Triplexer) a soustavu kolimačních mikročoček [32]. Mikrooptický WDM přijímač byl předmětem PhD závěrečné práce mého doktoranda J. A. Arciniegy.

Naše výzkumné práce pokračovaly návrhem uspořádání planárního řešení WDM vysílače/přijímače pro informační sítě do 2.5 Gb/s obr. 3.1, které vychází z patentované topologie uspořádání optické a optoelektronické části, kde optická část využívá planární polymerový WDM triplexer. Optická část je rozpracována v rámci výzkumných prací na grantu [8] ve dvou variantách. První varianta řeší optickou část jako SM vlnově selektivní optický integrovaný polymerový obvod (variantně také na SiO₂ resp. optických sklech), realizovaný spojením směrového vazebního členu DC a MMI filtru, kapitola 2.2. Ve druhé variantě je optická planární část navržena jako integrovaný obvod s optickými výkonovými děliči a optickými vlnovodnými filtry s Braggovskými polymerovými mřížkami, viz kap. 2.3. Dílčí práce byly publikovány v [29-31], [33]. Optoelektronickou část tvoří soustava dvou mikrovlnných OE přijímačů a OE vysílač s modulačními a podpůrnými elektronickými obvody [34].



Obr. 3.1 Planární hybridní integrovaný WDM transceiver [26]

Naše práce byly v současné etapě zaměřeny na topologický a technologický návrh optické části WDM vysílače/přijímače, kterou představuje planární WDM triplexní filtr realizovaný na polymerových materiálech ENR a PMMA. Jednovidová varianta je tvořena MMI filtrem pro rozbočení záření vlnových délek 1490 nm a 1550 nm z přichozího směru, navázaného na dva mikrovlnné OE přijímače. Záření 1310 nm OE vysílače je navázáno pře směrový vazební člen na odchozí směr WDM vysílače/přijímače. Celkový návrh WDM triplexního filtru viz obr. 2.7 byl zpracován v publikaci [30]. Při návrhu, provedeném simulací v program BPM, byly zjištěny klíčové rozměry WDM triplexeru. Ze simulací vyplývají také optické přenosové parametry WDM triplexeru jako optický vložný útlum a útlum přeslechů na příslušných bránách, viz kap. 2.2. Tyto parametry svědčí o využitelnosti tohoto prvku v informačních obvodech optické části WDM vysílače/přijímače. Systémové a obvodové řešení mikrovlnného OE přijímače a OE vysílače bylo publikováno v řadě publikací, např. [13], [26], [32], [34].

4. Závěr

Výzkum skupiny optoelektroniky na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze v oblasti optických a optoelektronických polymerových integrovaných obvodů má několik významných oblastí:

- 1) Byly topologicky a technologicky navrženy, realizovány a odměřeny jednovidové optické planární vlnovody hřebenového a kanálkového typu a vlnovody s omezeným počtem vidů, realizované na akrylátových (PMMA) a epoxidových (ENR) polymerových materiálech. Výsledky měření ukazují, že průměrné hodnoty měrných útlumů hřebenových a kanálkových

vlnovodů se složením vrstev Si/SiO₂/ENR/PMMA a GaAs/SiO₂/ENR/PMMA se pohybují v rozsahu 3,2 dB/cm až 1dB/cm pro vlnové délky 650 nm až 1550 nm. Nejlepší vzorky dosahovaly hodnot kolem 0,5 dB/cm. V případě vlnovodů na substrátech Si/Cytop a GaAs/Cytop se optický útlum pohyboval kolem 5 dB/cm.

- 2) Pro optickou část nových hybridních integrovaných optoelektronických subsystémů (HIOS) přenosového typu byla navržena nová topologie jednovidového planárního WDM triplexního filtru, využívajícího ENR/PMMA polymerové optické vlnovody, která kombinuje optický MMI člen a směrový vazební člen. Topologie tohoto WDM triplexního filtru byla optimalizována z hlediska vložného útlumu a přeslechů programem BMP RSoft pro vlnové délky využívané v informatice 1310, 1490 a 1550 nm s hodnotami vložného útlumu 1,2 až 3,1 dB a přeslechy 23,1 až 36,4dB. Tyto hodnoty pak ukazují, že WDM triplexní filtr je využitelný v optické části nového navrženého HIOS WDM vysílače/přijímače pro místní informační sítě.
- 3) Byl vytvořen topologický a technologický návrh dvou typů vlnovodných filtrů s polymerovou Braggovskou mřížkou, využitelných pro informatiku a sensoriku. Braggovská mřížka je realizována novou technologií laserového tvarového profilování polymerů PMMA a ENR založenou na Marangoniho jevu, vyvinutou na spolupracujícím pracovišti VŠCHT. První varianta vlnovodného filtru využívá prostorově profilovanou Braggovskou mřížku, realizovanou na PMMA plášti difuzního skleněného kanálkového vlnovodu, u druhé varianty je Braggovská mřížka vytvořena na jádře hřebenového ENR polymerového vlnovodu. Ze simulací vlastností a měření realizovaných vzorků vyplývá, že u první technologické varianty je třeba provést optimalizaci tloušťky vrstvy, velikosti promodulování plášťové vrstvy a délky mřížky pro zajištění dostatečné interakce mezi vedenými vlny v jádře a evanescentní vlnou v plášti mřížky. Optimální hodnoty tloušťky pláště je $T = 0,5 \mu\text{m}$, promodulování $h = 0,1 \mu\text{m}$ a délky mřížky $L=5000 \mu\text{m}$ pro dosažení 96% difrakční účinnosti. U druhé varianty dochází k přímé interakci vedené vlny a mřížky, realizované přímo na jádře vlnovodu. Proto lze dosáhnout stejné hodnoty difrakční účinnosti pro délku mřížky $L=500 \mu\text{m}$ při stejné hodnotě promodulování. Hodnota T není kritická jako u první varianty.

- 4) Byl proveden návrh nového topologického a technologického řešení planárního HIOS WDM vysílače/přijímače pro informační sítě do 2,5 Gb/s, které vychází z patentované topologie uspořádání optické a optoelektronické části, kde optická část využívá navržený planární polymerový WDM triplexní filtr složený z MMI členu a směrového vazebního členu. Pro ověření funkce optoelektronické a elektronické přijímací části byla navržena, postupně realizována a odměřena mikrooptická hybridní integrovaná varianta WDM přijímače, kde optická část využívá dvousystémovou objemovou holografickou mřížku VHGT.

5. Literatura

- [1] B. L. Booth, „Low loss channel waveguides in polymers“, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, 1998, p.1445-1453.
- [2] J. F. Viens, C. L. Calender, J. P. Noad, L. Eldada, “Polymer-based waveguide devices for WDM application”, *Proc. SPIE*, vol. 3799C, 1999.
- [3] L. Eldada, L. W. Shacklette, “Advances in Polymer Integrated Optics”, *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr.*, vol. 6, 2000, 54-59.
- [4] V. Švorčík, I. Hüttel, P. Paláček, „Polymethylmetacrylate optical waveguides prepared in electrical field“, *Materials Letters*, vol.61, 2007, s. 953-955.
- [5] O. Lyutakov, I. Hüttel, V. Švorčík, “Thermal stability of refractive index of polymethylmetacrylate layers prepared under electric field”, *J. Mater Sci: Mater Electron.*, vol. 18, 2007, s. 457-461.
- [6] Lyutakov, V. Švorčík, I. Hüttel, J. Siegel, N. Kasálková, P. Slepíčka, “Refractive index of polymethylmetacrylate oriented by fluid temperature under electric field”, *J. Mater Sci: Mater Electron.*, vol. 19, 2008, s. 1064-1068.
- [7] V. Jeřábek, I. Hüttel, „Nové součástky integrované optiky zhotovené planární hybridní technologií“, GAČR 102/06/0424, 2006-2008.
- [8] Z. Švitorka, V. Jeřábek, I. Hüttel, „Výzkum a vývoj technologie polymerních optických vlnově selektivních prvků pro informatiku a senzoriku“, MPO-TIP FR-TI3/797, 2011-2013.
- [9] Výzkumný záměr FEL ČVUT, „Výzkum perspektivních informačních technologií“, MSM 6840770014, 2005-2011.
- [10] G. Taylor, „Studies in Electrohydrodynamics. I. The Circulation Produced in a Drop by Electrical Field“, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 291, No. 1425. 1966, pp. 159-166.
- [11] Patent V. Jeřábek, V. Prajzler, K. Bušek, J. Armas Arciniega, „Integrovaný optoelektronický transceiver pro účastnickou stranu sítě typu PON-FTTH“, České vysoké učení v Praze Fakulta elektrotechnická, Úřad průmyslového vlastnictví, Praha, ČR. Číslo patentu 302 146, 2010.
- [12] A. Brilliant, „Digital And Analog Fiber Optic Communications for CATV and FTTx Applications“, SPIE Press and J. Wiley, Bellingham, Washington. 2008.
- [13] V. Jeřábek, Ivan Hüttel, Václav Prajzler, V. Karel Bušek, „Design and Construction Transceiver Module Using Polymer PLC Hybrid Integration Technology“, *New, Advanced Technologies*, Edited by A. Lazinic, Vukovar: In-Tech, 2010, pp. 153-162.

- [14] R. Clifford, J. Pollock, "Fundamentals of optoelectronics", *Igwin Inc.*,1995, Chap. 2.
- [15] K. K. Tung, W. H. Wong, E. Y. B. Pun, "Polymeric Optical Waveguides Using Direct Ultraviolet Photolithography process", *Appl. Phys. A*, A80, 2005, pp. 621-625.
- [16] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Báma, J. Špírkova, P. Nektivodová, V. Jeřábek, „Simple way of fabrication of Epoxy Novolak Resin optical waveguides on silicon substrate“, *Physica Status Solidi(C)*, Vol. 8, No. 9, 2011, pp. 2942-2945
- [17] G. Fischbeck, R. Moosburger, M. Topper, K. Petermann, „Design concept for singlemode polymer waveguides“, *Electronic Letters*, vol. 32, no. 3, 1996, s. 212-213.
- [18] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, T. Veselý, P. Macháč, V. Jeřábek, „Designed and Fabrication of ENR Polymer Rib Optical Waveguides“, *ElectroScope*, 2009, Vol. 5, No. 3, pp. 67-71.
- [19] V. Prajzler, J. Klapuch, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Špírková, P. Nektivodová, V. Jeřábek, „Design, Fabrication and Properties of Rib Poly(methylmethacrylimide) Optical Waveguides“, *Radioengineering*, Vol. 20, No. 2, 2011, pp. 479-485.
- [20] D. Bosc, A. Maalouf, F. Henrio, S. Haesaert, „Strengthened poly(methacrylate) materials for optical waveguides and integrated functions“, *Opt. Mater.*, (2007), doi:10.1016/j.optmat.2007.09.008.
- [21] V. Prajzler, O. Lyutakov, T. Veselý, J. Bárna, I. Hüttel, P. Macháč, V. Jeřábek, „Polymerní optické planární vlnovody z epoxy novolak resinu“, *Slaboproudý obzor*, Vol. 64, No. 1, str. 1-6, 2010.
- [22] H. Y. Liu, G. D. Peng and P. L. Chu, „Thermal stability gratings in PMMA and Cytop polymer fibres“, *Optics Communications*, vol. 204, no. 1, 2002, s. 151-156.
- [23] O. Lyutakov, I. Hüttel, V. Prajzler, V. Jeřábek, A. Jančárek, V. Hnatowitz, V. Švorčík, „Pattern Formation in PMMA Film Induced by Electric Field“, *Journal of Polymer Science-Part B: Polymer Physics*, Vol. 47, No. 12, 2009, pp. 1131–1135.
- [24] O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Siegel, V. Švorčík: Regular surface grating on doped polymer induced by laser scanning, *Applied Physics Letters*, Vol. 95, no. 17, Article Number: 173103.
- [25] M. Mokráň, „Analýza a návrh nových polymerních planárních fotonických struktur, diplomová práce“, České vysoké učení technické, Praha, 2012.
- [26] V. Jeřábek, J. A. Armas, V. Prajzler, „Hybrid Microoptical WDM Receiver for PON Communication“, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 10, No. 2, 2012, s. 95-100.
- [27] V. Prajzler, O. Lyutakov, I. Hüttel, J. Špírkova, V. Jeřábek, „Design of polymer wavelength splitter 1310 nm / 1550 nm based on multimode interferences“, *Radioengineering*, Vol. 19, No. 4, 2010, pp. 606-609.
- [28] B. L. Soldano, E. C. Pennings, „Optical multi-mode interference device based on self-imaging principles and applications“, *J. of Lightwave Technology*, 1995, vol. 13, No. 4, p. 615-627.
- [29] O. Barkman, V. Jeřábek, V. Prajzler, „Optical Splitters Based on Self-Imaging Effect in Multi-Mode Waveguides Made by Ion Exchange in Glass“, *Radioengineering*, Vol. 22, No. 1, 2013, pp. 352-356.
- [30] V. Jeřábek, K. Bušek, V. Prajzler, D. Mareš, R. Svoboda, „The design of polymer planar optical triplexer with MMI filter and directional coupler“, (*bude publikováno v Radioengineering*).

- [31] D. Mareš, V. Jeřábek, V. Prajzler: Design and Properties of Planar Polymer Waveguide Bragg Grating Filter, *24th Conference on Optical Communications 2012*, Conference Proceedings, Prague, 2012, p. 64-68.
- [32] V. Jeřábek, I. Huttel, V. Prajzler, K. Bušek, J. Armas Arciniega, „ Design and construction of a WDM transceiver with VHGT using hybrid integration technology“, *Physica Status Solidi (c)*, WILEY - VCH Verlag Gmb, vol. 8, No. 9, 2011, pp. 2938-2941.
- [33] D. Mareš, V. Jeřábek, V. Prajzler, “Waveguide Bragg grating filters made from optical polymers” (*bude publikováno v Electro Scope*).
- [34] J. Armas, V. Jeřábek, „Microwave Optoelectronic Receiver with MMIC HBT Amplifier“, *WSEAS Transactions on Electronics*, vol. 3, No. 3, 2006, pp. 210-213.
- [35] E. Stříleček, „Návrh optického polymerního mikrorezonátoru“, bakalářská práce FEL ČVUT, Praha, 2011.

Ing. Vítězslav Jeřábek, CSc.

Narozen: 4. 5. 1951 Praha, Česká Republika

Adresa: Ve Smečkách 604/5, 110 00 Praha 1

E-mail: jerabek@fel.cvut.cz

Vzdělání

1966–1970 SPŠD v Praze, obor Sdělovací technika

1970–1975 Ing. (MSc), FEL ČVUT v Praze,
obor Sdělovací technika

1988 CSc. (Ph.D.), FEL ČVUT v Praze,
obor Mikroelektronika

Zaměstnání

1975–1991 Výzkumný ústav pro sdělovací techniku v Praze,
výzkumný a vědecký pracovník v oboru
polovodičových zářičů a integrované optoelektroniky

1991–1998 Dattel a.s., vedoucí oddělení a později ředitel divize
návrhu a konstrukce CATV sítí a integrovaných
optoelektronických modulů pro telekomunikace

1998–2003 GTS a.s., technik pro výstavbu a servis
telekomunikačních sítí

2003–2005 katedra mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze, externí
vědecký pracovník

2005 – dosud katedra mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze,
odborný asistent, vedoucí skupiny optoelektroniky

Obory profesního zájmu

Návrh, konstrukce a měření nových struktur integrované optoelektroniky a optiky pro informatiku, výzkum vlastností fotonických pasivních i aktivních integrovaných struktur na dielektrické a polymerové bázi. Dále se věnuje optickým a optoelektronickým součástkám pro optické multiplexní informační systémy a pro optický processing. V. Jeřábek je vedoucím skupiny optoelektroniky, členem vedení katedry Mikroelektroniky.

Vědeckovýzkumná činnost

Řešitel a spoluřešitel grantů GAČR 102/06/0424, MPO-TIP FR-TI3/797, FRVŠ 2007, spoluřešitel a člen řešitelského kolektivu grantu FRVŠ 2008 a rozvojových projektů MŠMT 2011 a 2013. Recenzent odborných časopisů Photonics Technology Letters, Optical Engineering.

V. Jeřábek je autorem a spoluautorem více než 100 odborných a vědeckých publikací, z toho 11 impaktovaných publikací, 2 samostatných částí v mezinárodní monografii, 26 publikací registrovaných ve WoS.

Pedagogická činnost

Vede a spolupracuje na přednáškách a cvičeních v předmětech bakalářského, magisterského i doktorského studia (Optoelektronika a fotonika, Návrh fotonických obvodů, Součástky integrovaných systémů, Integrovaná optika, Technologie optoelektronických součástek). Je členem komise pro obhajoby bakalářských, diplomových a doktorských prací na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT.

V současné době je vedoucím 3 doktorandů. Vedl 11 bakalářských a diplomových prací a 1 doktorskou práci, které byly úspěšně obhájeny. Přednášel na řadě seminářů a kurzů na téma nové fotonické součástky a subsystémy integrované optoelektroniky a optiky.

- [1] V. Jeřábek, K. Bušek, V. Prajzler, D. Mareš, R. Svoboda: The design of polymer planar optical triplexer with MMI filter and directional coupler. *(bude publikováno v Radionginering)*
- [2] O. Barkman, V. Jerabek, V. Prajzler, "Optical Splitters Based on Self-Imaging Effect in Multi-Mode Waveguide Made by Ion Exchange in Glass", *Radionginering*, Vol. 22, No. 1, 2013, pp. 352-356, (ISSN 1210-2512).
- [3] V. Jeřábek, I. Huttel, V. Prajzler, K. Bušek, J. Armas Arciniega, „ Design and construction of a WDM transceiver with VHGT using hybrid integration technology“, *Physica Status Solidi (c)*, WILEY - VCH Verlag Gmb, vol. 8, No. 9, 2011, 2011, pp. 2938-2941, (ISSN 1610-1634).
- [4] V. Jeřábek, I. Hüttel, "Theoretical Model of the Bistable Semiconductor Laser Diode Based on the Rate Equations", *Radioengineering*, Vol. 20, No. 2, 2011, pp. 486-492, (ISSN 1210-2512).
- [5] O. Lyutakov, I. Hüttel, V. Prajzler, V. Jeřábek, A. Jančárek, V. Hnatowitz, V. Švorčík, „Pattern Formation in PMMA Film Induced by Electric Field“, *Journal of Polymer Science-Part B: Polymer Physics*, Vol. 47, No. 12, 2009, pp.1131–1135, (ISSN 0887-6266).