

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**

**Příprava a studium vlastností optických  
polymerních jednovidových a multivídných  
planárních vlnovodů**

**Květen 2018**

**Student: Bc. Petr Jašek**

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

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 25. 5. 2018

.....  
Podpis studenta

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jašek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **420020**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Studijní obor: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Příprava a studium vlastností optických polymerních jedno- a multividových a multividových planárních vlnovodů**

Název diplomové práce anglicky:

**Fabrication and properties study of polymer single and multi-mode optical planar waveguides**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v planárních optických vlnovodech.
- 2) Navrhněte jedno- a multividový optický polymerní vlnovod.
- 3) Navrhněte mnohavidový optický polymerní vlnovod pro připojení na optická mnohavidová vlákna 50/125  $\mu\text{m}$ .
- 4) Navrhněte optickou výkonovou mnohavidovou rozbočnici.
- 5) Seznamte se technologickými možnostmi pro výrobu navržených struktur.
- 6) Podílejte se na výrobě navržených struktur a změřte jejich vlastnosti.
- 7) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu 50-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. M. Neruda: Optické planární vlnovody, diplomová práce ČVUT 2016.
3. P. Hypš: Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly, diplomová práce ČVUT 2015.
4. R.G. Hunsperger: Integrated Optics, Theory and Technology, Springer 2002.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá návrhem, depozičními testy a diagnostikou optických jednovidových i mnohavidových struktur s polymerními materiály EpoClad, EpoCore a variantami materiálů OrmoClear od německé společnosti Micro Resist Technology GmbH pro vlnové délky 650, 850 a 1310 nm. První část práce stručně popisuje teorii šíření optického záření ve vlnovodu. V další části jsou uvedeny návrhy planárních vlnovodů s materiály OrmoClear na skleněných podložkách, jednovidových hřebenových vlnovodů OrmoClear na podložce Si/SiO<sub>2</sub> a mnohavidových vlnovodů a výkonových rozbočnic 1x2Y s materiály EpoClad/EpoCore na podložkách Si, FR4, PVA. Dále jsou v práci popsány postupy prováděných depozičních testů. V poslední části práce jsou uvedeny použité diagnostické metody a jejich výsledky.

Nejmenší naměřený útlum optického planárního vlnovodu byl -0,19 dB/cm při vlnové délce 632,8 nm u vzorku Sklo/OrmoClear FX. U hřebenových mnohavidových vlnovodů EpoClad/EpoCore byl nejmenší naměřený útlum -0,47 dB/cm při vlnové délce 1300 nm. Nejlepšího poměru výkonového rozdělení, nejnižších vložných ztrát ramen -5,35 a -5,26 dB při vlnové délce 850 nm bylo dosaženo u výkonové rozbočnice s módovým scramblerem u vzorku Si/EpoClad/EpoCore.

## **Klíčová slova:**

optická litografie, laserová litografie, optický planární vlnovod, optický jednovidový vlnovod, optické mnohavidové rozbočnice, polymery

## **Abstarct:**

This thesis examines the design, deposition tests and diagnostics of optical multi-mode and single-mode structures with polymeric materials EpoClad, EpoCore and variants of OrmoClear materials from the German company Micro Resist Technology GmbH for wavelengths of 650, 850 and 1310 nm.

The initial part of the thesis briefly describes the theory of the propagation of radiation in the planar waveguide. This is followed by the presentation of designs of planar waveguides with OrmoClear materials on glass substrate, OrmoClear single-mode rib waveguides on the Si/SiO<sub>2</sub> substrate and multi-mode waveguides and 1x2Y power splitters with EpoClad/EpoCore materials on Si, FR4, PVA substrates. Procedures of the deposition tests are described with the last part of the thesis detailing the diagnostic methods used and their results

The best measured attenuation of the optical planar waveguide was -0.19 dB/cm at a wavelength of 632.8 nm for the Glass/OrmoClear FX sample. In the EpoClad/EpoCore ridge multi-mode waveguides, the smallest measured attenuation was -0.47 dB / cm at a wavelength of 1300 nm. The best power distribution ratio, the lowest insertion loss of -5.35 and -5.26 dB at wavelength 850 nm, was achieved for power splitter 1x2Y with mode scrambler in the sample Si/EpoClad/EpoCore.

## **Keywords:**

optical lithography, laser lithography, optical planar waveguide, optical single-mode waveguide, optical multi-mode splitters, polymers

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za rady, připomínky a čas, který mi věnoval při konzultacích, výrobě vzorků a měřeních.

Dále děkuji panu doc. RNDr. Petru Mikulíkovi, Ph.D. za pomoc při depozičních testech ve výzkumném centru CEITEC a měření na profilometru, panu Ing. Milanu Kučerovi za pomoc při depozičních testech na optickém litografu na Ústavu fyziky kondenzovaných látek přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně.

Ing. Pavle Někviňové, Ph.D. z VŠCHT v Praze za umožnění měření na přístroji jednohranolové vidové spektroskopie Metricon, Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. z Katedry elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze za umožnění měření na profilometru Talystep.

# Obsah

Úvod .....	12
1 Základy šíření optického záření .....	13
1.1 Maxwellovy rovnice .....	13
1.2 Vlnová rovnice a její řešení .....	14
1.3 Odraz a lom vln na rozhraní dvou prostředí .....	18
2 Planární optický vlnovod .....	23
2.1 Princip šíření optického záření v planárním 2D vlnovodu .....	24
2.2 Rozložení intenzity elektrického pole TE v 2D vlnovodu .....	27
2.3 Určení geometrických rozměrů 3D planárního vlnovodu .....	28
3 Optické mnohavidové rozbočnice .....	30
3.1 Mnohavidová optická rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem .....	30
3.2 Mnohavidová rozbočnice s módovým scramblerem .....	31
4 Teoretický návrh a simulace struktur .....	32
4.1 Parametry použitých materiálů pro výpočty a simulace .....	32
4.2 Planární optické vlnovody OrmoClear na skleněné podložce .....	33
4.3 Jednovidové optické vlnovody SiO <sub>2</sub> /OrmoClear .....	34
4.4 Mnohavidové vlnovody EpoClad/EpoCore .....	36
4.5 Optické mnohavidové rozbočnice EpoClad/EpoCore .....	39
5 Návrh litografických masek .....	45
5.1 Návrh masky pro optický litograf .....	45
5.2 Návrh motivů pro depoziční testy prováděné laserovým litografem .....	46
6 Depoziční testy navržených struktur .....	48
6.1 Použité materiály pro depoziční testy .....	48
6.2 Příprava planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear .....	49
6.3 Příprava vlnovodů SiO <sub>2</sub> /OrmoClear .....	50
6.4 Depoziční testy struktur EpoClad/EpoCore .....	52
7 Diagnostika vyrobených vzorků .....	55
7.1 Diagnostika planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear .....	55
7.2 Diagnostika jednovidových vlnovodů SiO <sub>2</sub> /OrmoClear .....	62
7.3 Diagnostika struktur s materiály EpoClad/EpoCore .....	67
Závěr .....	74
Přílohy .....	76
A - Foto hřebenových vlnovodů EpoClad/EpoCore .....	76
B - Foto optických výkonových rozbočnic EpoClad/EpoCore .....	77
C - Výkresy pro řezání vzorků EpoClad/EpoCore .....	80
D - Seznam vyrobených vzorků .....	83
E - Seznam příloh uložených na CD .....	85

# Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol/Zkratka	Veličina	Jednotka
E	intenzita elektrického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
B	magnetická indukce	T
D	elektrická indukce	C/m <sup>2</sup>
Q	elektrický náboj	C
$\rho$	hustota náboje	C/m <sup>3</sup>
$\Phi$	magnetický tok	Wb
J	proudová hustota	A/m <sup>2</sup>
$\mu$	permeabilita prostředí	
$\mu_0$	permeabilita vakua	H/m
$\epsilon$	permitivita prostředí	
$\epsilon_0$	permitivita vakua	F/m
$\lambda$	vlnová délka	m
t	čas	s
n	index lomu prostředí	
$n_{ef}$	efektivní index lomu	
$n_s$	index lomu podložní vrstvy	
$n_f$	index lomu vlnovodné vrstvy	
$n_c$	index lomu krycí vrstvy	
$n_{co}$	index lomu rozbočnice	
$n_{cl}$	index lomu okolí rozbočnice	
$c_0$	rychlost světla ve vakuu	m/s
v	rychlost světla v prostředí	m/s
$v_f$	fázová rychlost vlny ve vlnovodu	
$\nabla$	gradient	
$\nabla^2$	Laplaceův operátor	
k	konstanta šíření	
$\omega$	úhlová rychlost	rad/s
<b>k</b>	vlnový vektor	m <sup>-1</sup>
<b>r</b>	radiusvektor	
<b>S</b>	Poyntingův vektor	W/m <sup>2</sup>
$\beta, k_z$	podélná složka vlnového vektoru	
$\vartheta_i$	úhel dopadu	rad
$\vartheta_r$	úhel odrazu	rad
$\vartheta_t$	úhel prostupu	rad

Symbol/Zkratka	Veličina	Jednotka
$\vartheta_c$	kritický úhel	rad
R	činitel odrazu	
$\gamma_c, \kappa_f, \gamma_s$	příčné konstanty	
$h_f$	výška vlnovodné oblasti	m
$w_f$	šířka vlnovodné oblasti	m
$h_s$	výška podložní vrstvy	m
$h_c$	výška krycí vrstvy	m
$\Phi$	fázový posuv při totálním odrazu	rad
$\Omega$	úhel větvení ramen optické rozbočnice	rad
$\alpha$	optický útlum	dB/cm
P	optický výkon	W
p	počet TM vidů	
m	počet TE vidů	
PVA	Polyvinylalkohol	
TE	transverzálně elektrické	
TM	transverzálně magnetické	
UV	ultrafialové	



# Seznam obrázků

Obr. 1.1: TEM vlna (převzato z [2]).....	17
Obr. 1.2: Vztahy mezi E, H, S.....	17
Obr. 1.3: Dopad vlny na rozhraní dvou prostředí (převzato z [2]).....	18
Obr. 1.4: Snellův zákon lomu.....	19
Obr. 1.5: Kolmá polarizace (převzato z [2]).....	19
Obr. 1.6: Kolmá polarizace (převzato z [2]).....	20
Obr. 1.7: Totální odraz.....	20
Obr. 2.1: Obecný planární vlnovod.....	23
Obr. 2.2: 3D planární vlnovody: a) kanálkový, b) kanálkový s krycí vrstvou, c) difuzní kanálkový, d) zapaštěný kanálkový, e) žebrový (převzato z [2]).....	23
Obr. 2.3: Planární vlnovody: a) se skokovou, b) s gradientní změnou indexu lomu (převzato z [2]).....	23
Obr. 2.4: 2D Planární optický vlnovod.....	24
Obr. 2.5: Princip příčné rezonance (převzato z [2]).....	25
Obr. 2.6: Geometrické rozměry planárního vlnovodu.....	28
Obr. 3.1: Výkonová rozbočnice tvaru Y podle pana D. R. Beltramiho (převzato z [4]).....	30
Obr. 3.2: Jednotlivé části optické rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.....	31
Obr. 3.3: Jednotlivé části optické rozbočnice s módovým scramblerem.....	31
Obr. 4.1: Indexy lomu materiálů v závislosti na vlnové délce.....	32
Obr. 4.2: Planární vlnovod Sklo/Polymer.....	33
Obr. 4.3: Optický vlnovod Si/SiO <sub>2</sub> /OrmoClear.....	34
Obr. 4.4: Simulace rozložení intenzity TE <sub>0</sub> módu ve vlnovodu s materiály OrmoClear.....	35
Obr. 4.5: Varianty vlnovodů EpoClad/EpoCore.....	36
Obr. 4.6: Výsledek simulace rozložení intenzity 23. TE vidu ve vlnovodu EpoClad/EpoCore pro 850 nm.....	37
Obr. 4.7: Detail poklesu intenzity evanescentní vlny na 23. TE vidu ve vlnovodu EpoClad/EpoCore pro 850 nm.....	38
Obr. 4.8: Rozbočnice EpoClad/EpoCore s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.....	39
Obr. 4.9: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 650 nm.....	40
Obr. 4.10: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 850 nm.....	41
Obr. 4.11: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 1310 nm.....	42
Obr. 4.12: Rozbočnice EpoClad/EpoCore s módovým scramblerem.....	43
Obr. 4.13: Simulace rozložení výkonu v rozbočnici s módovým scramblerem pro parametry uvedené v tab. 4.6.....	44
Obr. 5.1: Rozložení sekcí na navržené masce pro optický litograf.....	45
Obr. 5.2: Detail středu jedné sekce masky pro optický litograf (rozměry v μm).....	46
Obr. 5.3: Návrh pro laserový litograf, Si/SiO <sub>2</sub> wafer 2“.....	47
Obr. 5.4: Detail návrhu pro laserový litograf, Si/SiO <sub>2</sub> podložka 25x25 mm.....	47
Obr. 6.1: Postup depozičního testu vzorků Sklo/OrmoClear.....	50
Obr. 6.2: Postup depozičního testu vzorku s materiály SiO <sub>2</sub> /OrmoClear.....	51
Obr. 6.3: Postup depozičního testu vzorků s materiály EpoClad/EpoCore.....	53
Obr. 6.4: Optický litograf použitý při depozičních testech v čistých prostorách na PŘF MU v Brně.....	54
Obr. 7.1: a) Princip měření indexu lomu objemových vzorků, b) ukázka typického průběhu měřené intenzity fotodetektoem. (převzato z [12]).....	55
Obr. 7.2: Princip měření optických planárních vlnovodů [12].....	56
Obr. 7.3: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear.....	56
Obr. 7.4: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear FX.....	57
Obr. 7.5: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear HI01 XP.....	57

Obr. 7.6: Průměr všech naměřených hodnot indexu lomu podložních sklíček planárních vlnovodů.....	58
Obr. 7.7: Porovnání hodnot indexu lomu materiálů planárních vlnovodů.....	58
Obr. 7.8: Princip měření optického útlumu planárních vlnovodů, [13] a [14].....	59
Obr. 7.9: Příklad výstupu z měření optického útlumu planárního vlnovodu OrmoClear (1035B). .....	59
Obr. 7.10: Spektrometr Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR (převzato z [15]).....	61
Obr. 7.11: Naměřené absorpce záření v závislosti na vlnové délce u materiálů OrmoClear.....	61
Obr. 7.12: Mikroskop Olympus BX60 v laboratoři nanolitografie Katedry mikroelektroniky ČVUT FEL.....	62
Obr. 7.13: Detail vlnovodů SiO <sub>2</sub> /OrmoClear vz. 884 vyrobených podle masky viz obr. 5.4.....	63
Obr. 7.14: Detail vyvolaných vlnovodů SiO <sub>2</sub> /OrmoClear vz. 888.....	63
Obr. 7.15: Špatně exponovaný a vyvolaný vzorek vlnovodů SiO <sub>2</sub> /OrmoClear 891.....	64
Obr. 7.16: Detail špatně vyvolaných vlnovodů vz. SiO <sub>2</sub> /OrmoClear 884.....	64
Obr. 7.17: Princip skenování povrchu profilometrem [13].....	65
Obr. 7.18: Měřicí pracoviště s Dektak 150 v čistých prostorách na PřF MU v Brně.....	65
Obr. 7.19: Naměřený profil vlnovodů na vzorku 877 OrmoClear FX.....	66
Obr. 7.20: Naměřený profil vlnovodů na vzorku 888 OrmoClear FX.....	66
Obr. 7.21: Kamera Artcam s optikou Olympus C-mount Zoom optics 7x.....	67
Obr. 7.22: Foto kvalitně vyrobených vzorků EpoClad/EpoCore.....	68
Obr. 7.23: Foto špatně vyrobených vzorků EpoClad/EpoCore.....	69
Obr. 7.24: Princip metody měření optického útlumu vlnovodu metodou dvou délek.....	70
Obr. 7.25: Ukázka měření optické výkonové rozbočnice.....	73

## Seznam tabulek

Tab. 4.1: Odečtené hodnoty indexu lomu pro simulace a výpočty.....	33
Tab. 4.2: Vypočtené hodnoty jednovidových vlnovodů s OrmoClear HI01 XP.....	34
Tab. 4.3: Vypočtené hodnoty jednovidových vlnovodů s OrmoClear FX.....	34
Tab. 4.4: Simulované hodnoty pro EpoClad/EpoCore.....	37
Tab. 4.5: Rozměry optimalizovaných rozbočnic s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.....	43
Tab. 4.6: Rozměry optimalizované rozbočnice EpoClad/EpoCore s módovým scramblerem... ..	43
Tab. 7.1: Naměřené hodnoty optického útlumu planárních vlnovodů.....	60
Tab. 7.2: Průměrné hodnoty optického útlumu všech planárních vlnovodů.....	60
Tab. 7.3: Nejnižší hodnoty optického útlumu ze všech planárních vlnovodů.....	60
Tab. 7.4: Naměřený optický útlum vlnovodů Si/PVA/EpoClad/EpoCore u vzorku č. 820.....	71
Tab. 7.5: Naměřený optický útlum vlnovodů Si/EpoClad/EpoCore u vzorku č. 1004.....	71
Tab. 7.6: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1004 – Si/EpoClad/EpoCore.....	72
Tab. 7.7: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1073 – Si/PVA/EpoClad/EpoCore.....	72
Tab. 7.8: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1076 - Si/EpoClad/EpoCore.....	72

# Úvod

S rozvojem informačních technologií, zejména v oblasti cloudových datových uložišť, služeb, technologií přenosu obrazu ve vysokém rozlišení, sociálními sítěmi a sběru diagnostických dat stále rostou požadavky na vyšší přenosové rychlosti a schopnost přenášet velké datové toky. Z tohoto důvodu jsou dnes již všechny páteřní komunikační vedení a uzly realizovány jen pomocí technologie optických vláknových vlnodů, které mají oproti metalickým vedením značné výhody, jakými jsou například šířka pásma, útlum signálu na vzdálenost a odolnost proti rušení. Pro připojení koncových uživatelů stále převládají metalické nebo rádiové spoje z důvodu využití stávajících technologií. Jsou to například technologie rádiového přenosu Wi-Fi, metalická telefonní vedení s technologií xDSL a koaxiálních vedení. Technologický postup v připojení i koncových uživatelů pomocí optiky je však velmi pomalý z důvodů vysokých cen inženýrských prací a stavebních povolení.

Obecně se technologie připojení pomocí optických vláken dělí na čtyři základní rozdělení podle cílového místa zavedení vlákna a přechodu zpět na metalické vedení: FTTH – Fiber To The Home (optické vlákno do domu), FTTB – Fiber To The Building (optické vlákno k hranici budovy), FTTC – Fiber To The Cabinet (optické vlákno do přípojky pro danou oblast). Pokud jde o samotná optická vlákna, prvky pro přepínání a směrování, je obecně technologie komunikace po optických vláknech velmi dobře rozvinutá.

Další rozvíjející se oblastí je komunikace po optických vlnovodech propojující mezi sebou například integrované obvody na desce plošného spoje nebo jednotlivé desky plošných spojů v modulárních systémech. Optické spoje pomocí těchto vlnodů jsou obvykle na krátké vzdálenosti v řádu jednotek až desítek centimetrů a nazývají se: ESR (Extra short reach) do 5 cm, USR (Ultra Short Reach) do 1 cm. Z výše uvedených důvodů jsou zkoumány různé materiály z hlediska jejich vhodných optických vlastností, materiálové kompatibility a možnosti jejich implementace pomocí stávajících výrobních procesů, jako je optická nebo laserová litografie, využívaná při výrobě desek plošných spojů. Vhodnými materiály se jeví například různé polymerní látky, pomocí kterých lze realizovat i flexibilní vlnovody.

Tato práce se zabývá návrhem, popisem prováděných depozičních testů a diagnostikou optických jednovidových i mnohavidových struktur s polymerními materiály EpoClad, EpoCore a variantami materiálů OrmoClear od německé společnosti Micro Resist Technology GmbH. Navrhovány, vyráběny a testovány jsou tyto následující struktury: a) planární vlnovody s materiály OrmoClear na skleněných podložkách pro vlnové délky 473; 632,8; 964; 1311 a 1552 nm, b) jednovidové vlnovody OrmoClear na podložkách Si/SiO<sub>2</sub> vyráběné pomocí laserové litografie pro vlnové délky 650, 850 a 1310 nm, c) mnohavidové vlnovody a výkonové rozbočnice 1x2Y s materiály EpoClad/EpoCore pro 850 nm na křemíkové podložce, folii sklolaminátu FR4 a vrstvě PVA pro možnost vytvoření samonosného vlnovodu. Veškeré návrhy těchto struktur jsou ověřovány a optimalizovány pomocí simulačního softwaru BeamPROP od společnosti Rsoft (dnes Synopsys).

V závěru práce jsou shrnuty provedené návrhy a naměřené hodnoty u vyrobených vzorků.

# 1 Základy šíření optického záření

K analýze šíření světla v optickém vlnovodu můžeme přistupovat pomocí několika teoretických přístupů. V prvním z nich chápeme světlo jako přímočaře šířící se paprsky jejichž chod je na sobě nezávislý. Tento popis světla nazýváme paprskovou (geometrickou) optikou. Pomocí tohoto přístupu můžeme vysvětlit základní zákony jako je zákon odrazu a lomu světla.

Druhý, matematicky náročnější a přesný přístup popsal v roce 1865 skotský fyzik James Clerk Maxwell pomocí čtyř rovnic, které nazýváme Maxwellovými rovnicemi. Maxwellovy rovnice přistupují ke světlu jako k elektromagnetickému fenoménu s vlnovou povahou a umožňují podrobné vysvětlení například rozložení energie ve vedené vlně, difrakci, disperzi aj.

Základy uvedené v této kapitole budou následně využity k podrobné analýze šíření světla v planárních vlnovodech popsaných v následujících kapitolách [1][2].

## 1.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice můžeme považovat za nejvýznamnější vědecký pokrok devatenáctého století. Rovnice mohou být napsány v diferenciální nebo integrální formě:

Diferenciální tvar	Integrální tvar	
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	(1.1)

$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_0 + \frac{d\Psi}{dt}$	(1.2)
--	---	-------

$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	(1.3)
-------------------------------	---	-------

$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oiint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q$	(1.4)
----------------------------------	---	-------

Diferenciální tvar Maxwellových rovnic je vhodný pro odvození obecných rovnic popisujících elektromagnetické jevy jako je například vlnová rovnice.

### Materiálové vztahy

Magnetická indukce  $\mathbf{B}$  a elektrická indukce  $\mathbf{D}$  jsou vztaženy k amplitudám  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  přes takzvané materiálové vztahy. Pro lineární a izotropní prostředí jsou:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.6)$$

Lineárním prostředím je takové, kde permitivita  $\varepsilon$  a permeabilita  $\mu$  jsou nezávislé na síle pole. Tato vlastnost je, ale jen při malých intenzitách pole, nebo v rozmezí malých změn intenzit. V izotropním prostředí jsou vlastnosti materiálu nezávislé na směru vektorů intenzit pole. U komponent optických systémů se setkáme takřka výhradně s materiály u nichž se permeabilita rovná permeabilitě vakua ( $\mu = \mu_0$ ) [3].

## Index lomu

V optice se častěji vlastnost prostředí vyjadřuje místo permitivitou spíše indexem lomu  $n$ , který je při zanedbání ztrát definován vztahem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 n^2 \quad (1.7)$$

Jako poměr rychlosti šíření světla ve vakuu  $c_0$  a rychlosti světla v daném prostředí  $v$ :

$$n = \frac{c_0}{v}, \quad (1.8)$$

Index lomu je závislý na vlnové délce, jeho hodnota může se vzrůstající vlnovou délkou růst nebo také klesat. Tato závislost je jednou z příčin tzv. materiálové disperze. Závislost indexu lomu na intenzitě se projevuje až při vyšších intenzitách pole [2].

## 1.2 Vlnová rovnice a její řešení

Vlnovou rovnici lze odvodit přímo z Maxwellových rovnic. Pro přímé odvození vlnové rovnice budeme předpokládat optické prostředí, které je nevodivé ( $\rho = 0$ ,  $\mathbf{J} = 0$ ), lineární ( $\varepsilon$  a  $\mu$  jsou nezávislé na  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$ ) a izotropní. Za těchto podmínek můžeme Maxwellovy rovnice napsat ve tvaru [1]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.12)$$

Provedením operace rotace na obou stranách vztahu 1.9 získáme:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \times \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \frac{-\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.13)$$

Za předpokladu že permeabilita  $\mu$  je nezávislá na čase a poloze můžeme vztah 1.13 dále upravit na:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \left( \nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) \quad (1.14)$$

Protože jsou funkce spojitě, můžeme zaměnit pořadí rotace s časovou derivací:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (1.15)$$

Dosažením vztahu 1.10 do 1.15 a za předpokladu časové nezávislosti permitivity  $\varepsilon$ :

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

Vztah 1.16 je diferenciální rovnice druhého řádu s jednou neznámou  $\mathbf{E}$ . Levou stranu vztahu 1.16 můžeme pomocí vektorové identity dále zjednodušit na:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.17)$$

Pro kartézský souřadný systém můžeme napsat:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \nabla^2 E_x \hat{x} + \nabla^2 E_y \hat{y} + \nabla^2 E_z \hat{z} \quad (1.18)$$

kde  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  a  $\hat{z}$  jsou jednotkové vektory podél tří os. Operátory  $\nabla^2$  na pravé straně vztahu 1.18 jsou skalární a v kartézských souřadnicích definovány takto:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.19)$$

Úpravou vztahu 1.16 podle 1.17 získáme:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) \quad (1.20)$$

Dáme-li do souvislosti vztah  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  na pravé straně 1.20 se vztahy 1.12 a 1.6 můžeme napsat [1]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 = \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{E} + \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{E} \quad (1.21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\mathbf{E} \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \quad (1.22)$$

Dosažením 1.22 do 1.20 získáme:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\nabla \left( \mathbf{E} \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (1.23)$$

Pravá strana vztahu 1.23 není nulová pokud má dané prostředí gradientní permitivitu, pro většinu struktur je ale zanedbatelně malá. Uvažujeme-li homogenní izotropní prostředí bez náboje, můžeme 1.23 upravit do tvaru 1.24 a analogicky můžeme odvodit i pro  $\mathbf{H}$  [1]:

### Obecná vlnová rovnice

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.24)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.25)$$

Vlnová rovnice pro harmonické časové průběhy:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.26)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.27)$$

kde  $k$  je konstanta šíření:

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (1.28)$$

V ideální bezztrátovém dielektriku je konstanta šíření reálná:

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\varepsilon_r} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r} = k_0 n \quad (1.29)$$

Nejjednodušším řešením vlnové rovnice je rovinná uniformní vlna pro níž platí, že vektory  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  leží v rovině kolmé na směr šíření a jsou v ní co do velikosti i směru konstantní. Vlnoplocha je plocha konstantní fáze vlny a je v tomto případě rovinou [2].

### Rovinná uniformní vlna

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 e^{-jk \cdot \mathbf{r}} = \mathbf{E}_0 e^{-jk n_0 \cdot \mathbf{r}} \quad (1.30)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0 e^{-jk \cdot \mathbf{r}} = \mathbf{H}_0 e^{-jk n_0 \cdot \mathbf{r}} \quad (1.31)$$

$\mathbf{k}$  je vlnový vektor:

$$\mathbf{k} = k \mathbf{n}_0 \quad (1.32)$$

$\mathbf{n}_0$  je jednotkový vektor, normálový k vlnoploše.

V kartézské souřadné soustavě lze upravit rovnici 1.32 na:

$$\mathbf{k} = k_x \mathbf{x}_0 + k_y \mathbf{y}_0 + k_z \mathbf{z}_0 \quad (1.33)$$

$\mathbf{r}$  je radiusvektor určující bod ležící na vlnoploše:

$$\mathbf{r} = x \mathbf{x}_0 + y \mathbf{y}_0 + z \mathbf{z}_0 \quad (1.34)$$



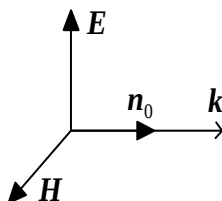
## Transverzálně elektromagnetická vlna

Dosažením rovnic 1.31 a 1.32 do Maxwellových rovnic pro harmonické průběhy a použitím vektorové identity můžeme napsat:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega \varepsilon \mathbf{E}_0 \quad (1.35)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu_0 \mathbf{H}_0 \quad (1.36)$$

Ze vztahů 1.35 a 1.36 vyplývá, že  $\mathbf{H}_0$  je kolmá k vektorům  $\mathbf{E}_0$  a  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{E}_0$  je kolmá k vektorům  $\mathbf{H}_0$  a  $\mathbf{k}$ . Tato vlna se nazývá transverzálně elektromagnetická:



Obr. 1.1: TEM vlna (převzato z [2]).

Velikosti  $\mathbf{E}_0$  a  $\mathbf{H}_0$ :

$$E_0 = \frac{\omega \mu_0}{k} H_0 \quad (1.37)$$

$$H_0 = \frac{\omega \varepsilon}{k} E_0 \quad (1.38)$$

Výrazu 1.39 odvozeného z 1.37 a 1.38 říkáme impedance prostředí:

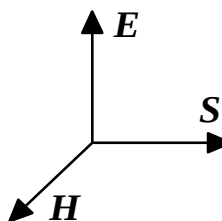
$$Z = \frac{E_0}{H_0} = \frac{\omega \mu_0}{k} = \frac{k}{\omega \varepsilon} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{Z_0}{n} \quad (1.39)$$

kde  $Z_0$  je impedance vakua [2].

Pojem charakterizující transport energie v elektromagnetické vlně je Poyntingův vektor:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.40)$$

kde  $\mathbf{S}$  je okamžitá hodnota hustoty energie ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



Obr. 1.2: Vztahy mezi  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{S}$ .

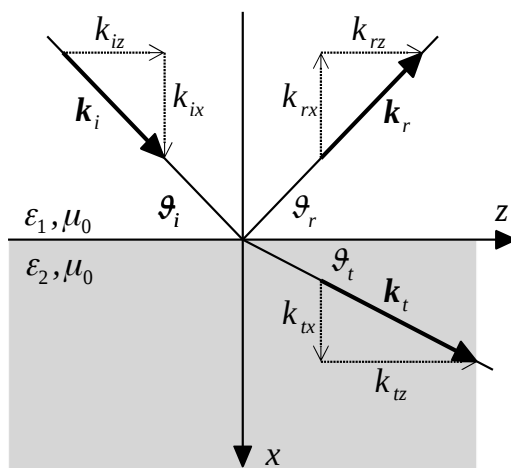
Pro harmonické pole je střední hodnota Poyntingova vektoru:

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \Re[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (1.41)$$

### 1.3 Odraz a lom vln na rozhraní dvou prostředí

Velice důležitou roli pro návrh planárních vlnovodů hraje odraz a lom elektromagnetické vlny na rozhraní dvou prostředí. Situaci odrazu a lomu vlny můžeme popisovat z pohledů geometrické optiky a vlnové optiky nebo jejich kombinací.

Uvažujme situaci podle obr. 1.3. Vlna dopadá na rozhraní pod úhlem  $\vartheta_i$  (i jako incident). Odražená vlna se šíří pod úhlem  $\vartheta_r$  (r jako reflected) a prošlá vlna pod úhlem  $\vartheta_t$  (t jako transmitter). U každé vlny jsou vyznačeny její vlnové vektory a jeho složky do os x a z.



Obr. 1.3: Dopad vlny na rozhraní dvou prostředí (převzato z [2]).

Dopadající a odražená vlna se šíří ve stejném prostředí, můžeme tedy pro velikosti vlnových vektorů napsat:  $\mathbf{k}_i = \mathbf{k}_r = \mathbf{k}_1$ . Prošlá vlna se šíří již v jiném prostředí:  $\mathbf{k}_t = \mathbf{k}_2$ .

Z obrázku obr. 1.3 můžeme tedy odvodit:

$$k_{ix} = k_1 \sin \vartheta_i, \quad k_{rx} = -k_1 \sin \vartheta_r, \quad k_{tx} = k_2 \sin \vartheta_t \quad (1.42)$$

$$k_{iz} = k_1 \cos \vartheta_i, \quad k_{rz} = k_1 \cos \vartheta_r, \quad k_{tz} = k_2 \cos \vartheta_t \quad (1.43)$$

Pro splnění pro tečné složky  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  na rozhraní platí:

$$k_{iz} = k_{rz} = k_{tz} = k_z \quad (1.44)$$

Po dosazení z 1.43 do 1.44 získáme dobře známé Snellovy zákony:

$$k_1 \cos \vartheta_i = k_1 \cos \vartheta_r = k_2 \cos \vartheta_t \quad (1.45)$$

#### Snellovy zákony

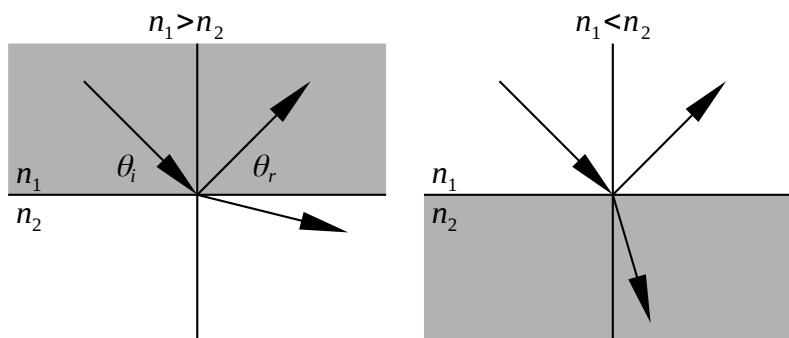
Zákon odrazu:

$$\vartheta_i = \vartheta_r \quad (1.46)$$

Zákon lomu:

$$k_1 \cos \vartheta_i = k_2 \cos \vartheta_t \quad (1.47)$$

Dopadá-li vlna z opticky hustšího prostředí do řidšího láme se od kolmice, při opačném případě ke kolmici viz obr. 1.4.

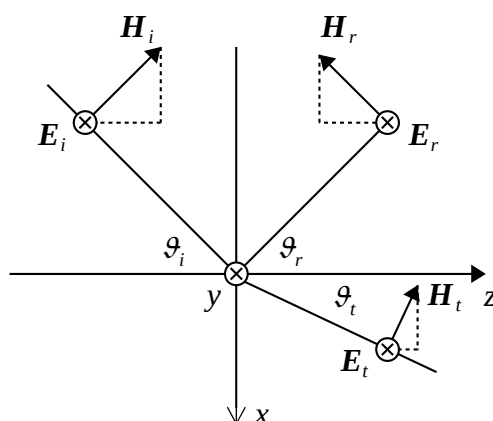


Obr. 1.4: Snellův zákon lomu.

### Polarizace vlny

Polarizaci dopadající vlny rozlišujeme podle orientace vektoru elektrického pole k rovině dopadu, kterou je v našem případě rovina xz.

Kolmá polarizace (TE): vektor intenzity elektrického pole je kolmý na rovinu dopadu xz (viz obr. 1.5).



Obr. 1.5: Kolmá polarizace (převzato z [2]).

Intenzity jednotlivých složek:

$$\mathbf{E}_i = E_{i0} e^{-jk_1(x \sin \vartheta_i + z \cos \vartheta_i)} \mathbf{y}_0 \quad (1.48)$$

$$\mathbf{E}_r = E_{r0} e^{-jk_1(-x \sin \vartheta_r + z \cos \vartheta_r)} \mathbf{y}_0 \quad (1.49)$$

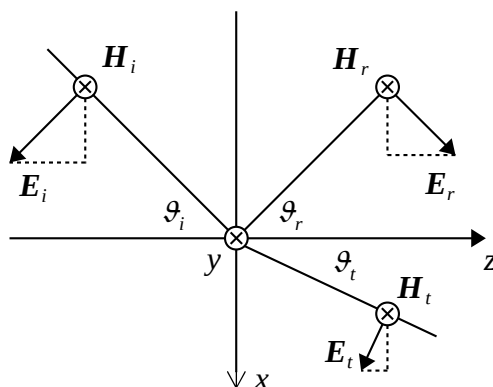
$$\mathbf{E}_t = E_{t0} e^{-jk_2(x \sin \vartheta_t + z \cos \vartheta_t)} \mathbf{y}_0 \quad (1.50)$$

Činitel odrazu pro TE:

$$\begin{aligned} R_{\perp}^E &= \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{Z_2 \sin \vartheta_i - Z_1 \sin \vartheta_t}{Z_2 \sin \vartheta_i + Z_1 \sin \vartheta_t} = \frac{k_{ix} - k_{tx}}{k_{ix} + k_{tx}} = \\ &= \frac{n_1 \sin \vartheta_i - n_2 \sin \vartheta_t}{n_1 \sin \vartheta_i + n_2 \sin \vartheta_t} = \frac{n_1 \sin \vartheta_i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta_i}}{n_1 \sin \vartheta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta_i}} \end{aligned} \quad (1.51)$$

[2]

Rovnoběžná polarizace (TM): vektor intenzity elektrického pole je rovnoběžný s rovinou dopadu xz (viz obr. 1.6).



Obr. 1.6: Kolmá polarizace (převzato z [2]).

Intenzity jednotlivých složek:

$$\mathbf{H}_i = \frac{E_{i0}}{Z_1} e^{-jk_1(x \cos \vartheta_i + z \sin \vartheta_i)} \mathbf{y}_0 \quad (1.52)$$

$$\mathbf{H}_r = \frac{E_{r0}}{Z_1} e^{-jk_1(-x \cos \vartheta_r + z \sin \vartheta_r)} \mathbf{y}_0 \quad (1.53)$$

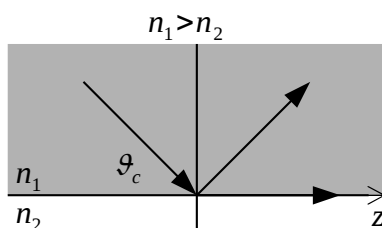
$$\mathbf{H}_t = \frac{E_{t0}}{Z_2} e^{-jk_2(x \cos \vartheta_t + z \sin \vartheta_t)} \mathbf{y}_0 \quad (1.54)$$

Činitel odrazu pro TM:

$$\begin{aligned} R_{\parallel}^H &= \frac{H_{r0}}{H_{i0}} = \frac{Z_1 \sin \vartheta_i - Z_2 \sin \vartheta_t}{Z_1 \sin \vartheta_i + Z_2 \sin \vartheta_t} = \frac{n_2^2 k_{ix} - n_1^2 k_{tx}}{n_2^2 k_{ix} + n_1^2 k_{tx}} = \\ &= \frac{n_2 \sin \vartheta_i - n_1 \sin \vartheta_t}{n_2 \sin \vartheta_i + n_1 \sin \vartheta_t} = \frac{n_2 \sin \vartheta_i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta_i}}{n_2 \sin \vartheta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \cos^2 \vartheta_i}} \end{aligned} \quad (1.55)$$

### Totální odraz

Při průchodu z opticky hustšího do řidšího prostředí se paprsek podle Snellova zákona láme od kolmice viz obr. 1.4, může tedy nastat stav, kdy je úhel  $\vartheta_t = 0$ . Procházející vlna se bude šířit podél rozhraní viz obr. 1.7:



Obr. 1.7: Totální odraz.

Úhel  $\vartheta_i$  při kterém je úhel  $\vartheta_t = 0$  se nazývá kritický úhel  $\vartheta_c$ .

### Kritický úhel

Do Snellova zákona dosadíme za  $\cos(0) = 1$ :

$$n_1 \cos \vartheta_c = n_2 \Rightarrow \vartheta_c = \arccos \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \quad (1.56)$$

### Evanescetní vlna

Po dosažení kritického úhlu můžeme pro vlnu v druhém prostředí (za rozhráním) napsat:

$$E(r) = E_0 \cdot e^{-jk_2(\pm jqx + pz)} = E_0 \cdot e^{-k_2 q x} \cdot e^{-jk_2 p \cdot z} = E_0 \cdot e^{-\gamma x} \cdot e^{-jk_2 p \cdot z} \quad (1.57)$$

kde:

$$\gamma = k_0 \sqrt{n_1^2 \cos^2 \vartheta_i - n_2^2} \quad (1.58)$$

$$p = \cos \vartheta_t = \frac{n_1}{n_2} \cos \vartheta_i > 1 \quad (1.59)$$

Vlna se šíří podél rozhraní fázovou rychlostí:

$$v_{fz} = \frac{\omega}{k_2 p} \quad (1.60)$$

Amplituda této vlny klesá ve směru kolmo od rozhraní podle exponenciály:

$$e^{-\gamma x} \quad (1.61)$$

Vlna soustřeďuje energii u povrchu rozhraní a šíří se menší fázovou rychlostí než odpovídá druhému prostředí  $n_2$ . Tuto vlnu nazýváme evanescentní, povrchovou nebo pomalou [2].

### Fázový posuv při totálním odrazu

Při totálním odrazu vlny dochází ke skokové změně její fáze, která je určena fází činitele odrazu.

$$R_{tot} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{n_1 \sin \vartheta_i - n_2 \sin \vartheta_t}{n_1 \sin \vartheta_i + n_2 \sin \vartheta_t} = |r| e^{j2\phi} \quad (1.62)$$

Po dosažení kritického úhlu je  $\sin \vartheta_t$  ryze imaginární a činitel odrazu můžeme napsat ve tvaru:

$$R_{tot} = \frac{a - jb}{a + jb} \quad (1.63)$$

Pro transverzálně elektrickou polarizaci vlny (TE):

$$\frac{b}{a} = \frac{n_2 \sin \vartheta_t}{n_1 \sin \vartheta_i} \quad (1.64)$$

$$\Phi^{TE} = -2 \operatorname{arctg} \frac{|n_2 \sin \vartheta_t|}{n_1 \sin \vartheta_i} = -2 \operatorname{arctg} \frac{n_2 \sqrt{\cos^2 \vartheta_t - 1}}{n_1 \sin \vartheta_i} \quad (1.65)$$

Pro transverzálně magnetickou polarizaci vlny (TM):

$$\frac{b}{a} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{n_2 \sin \vartheta_t}{n_1 \sin \vartheta_i} \quad (1.66)$$

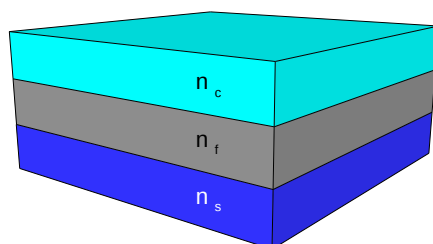
$$\Phi^{TM} = -2 \operatorname{arctg} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{n_2 \sin \vartheta_t}{n_1 \sin \vartheta_i} = -2 \operatorname{arctg} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{n_2 \sqrt{\cos^2 \vartheta_t - 1}}{n_1 \sin \vartheta_i} \quad (1.67)$$

[1][2]

## 2 Planární optický vlnovod

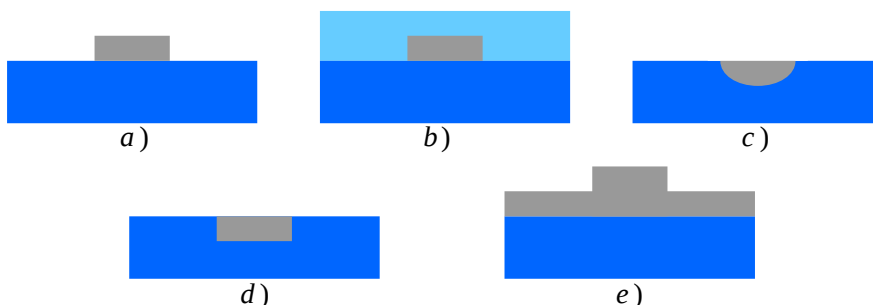
Planární vlnovod je specifickým druhem optického vlnovodu. Na rozdíl od vláknových vlnovodů, které se využívají k přenosu optického záření na velké vzdálenosti (jednotky metrů až tisíce kilometrů) se planární vlnovody využívají zejména pro vedení optického záření na malé vzdálenosti (maximálně jednotky centimetrů) a jako základní stavební prvek dalších optických struktur např. výkonové děliče, modulátory, vazební členy. Slovem planární (rovinný) se rozumí, že vlnovod je vyroben na rovinné podložce (křemíková podložka, sklo, FR4 apod.).

Planární vlnovod je nejčastěji tvořen třemi vrstvami viz obr. 2.1, kdy je na podložní destičku  $n_s$  nanášena transparentní vlnovodná vrstva  $n_f$ . Krycí vrstva  $n_c$  plní u planárních vlnovodů nejčastěji ochrannou funkci nebo přispívá k vlnovodným vlastnostem.



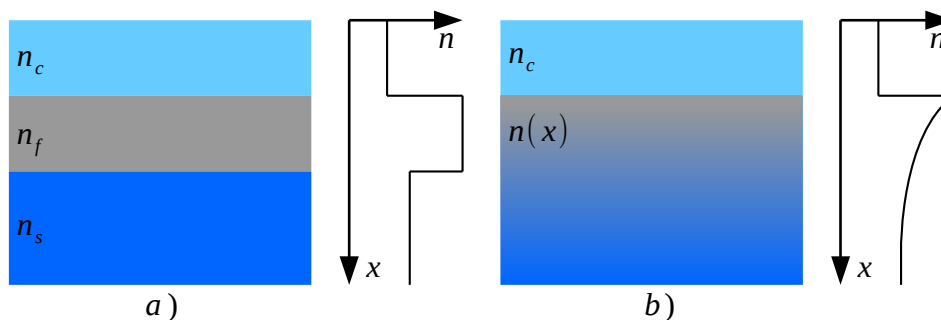
Obr. 2.1: Obecný planární vlnovod.

Pokud je vlnovodná struktura omezena jen v jedné z příčných směrů mluvíme tzv. 2D planárních vlnovodech. Při omezení v obou příčných rozměrech se jedná o 3D planární vlnovod. Protože v praxi je planární vlnovod vždy omezen v obou směrech, je 2D struktura nerealizovatelná, ale její teoretický popis poslouží k popisu těch složitějších. Příklad různých druhů 3D planárních vlnovodů jsou uvedeny na obr. 2.2.



Obr. 2.2: 3D planární vlnovody: a) kanálkový, b) kanálkový s krycí vrstvou, c) difuzní kanálkový, d) zapuštěný kanálkový, e) žebrový (převzato z [2]).

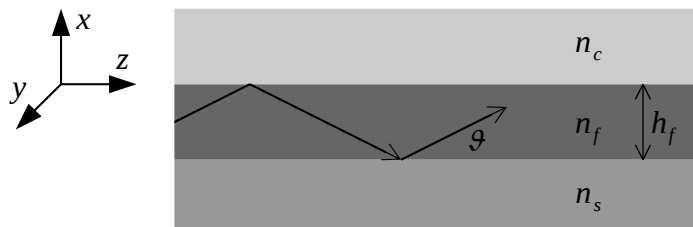
Planární vlnovody dále dělíme podle průběhu indexu lomu mezi vrstvami  $n_f$  a  $n_s$  na: a) obr. 2.3 vlnovody se skokovou změnou indexu lomu, b) obr. 2.3 vlnovody s gradientní změnou indexu lomu.



Obr. 2.3: Planární vlnovody: a) se skokovou, b) s gradientní změnou indexu lomu (převzato z [2]).

## 2.1 Princip šíření optického záření v planárním 2D vlnovodu

Pro základní popis principu šíření optického záření v planárním vlnovodu budeme vycházet z 2D vlnovodu na obr. 2.4. Elektromagnetická vlna je ve vlnovodné vrstvě vedená pokud na obou rozhraních  $n_f - n_s$ ,  $n_f - n_c$  dochází k totálnímu odrazu a pokud je splněna fázová podmínka. Při splnění těchto podmínek vznikne superpozicí vlny ve vlnovodné vrstvě stojatá vlna a po jejích stranách vlna evanescentní.



Obr. 2.4: 2D Planární optický vlnovod.

V optickém vlnovodu budeme značit podélnou složku vlnového vektoru takto:

$$k_z = \beta \quad (2.1)$$

### Efektivní index lomu

Dále definujeme ve vlnovodu efektivní index lomu jako:

$$n_{ef} = \frac{\beta}{k_0}, \quad (2.2)$$

který vyjadřuje, jaký by musel být index lomu volného prostředí, aby se jím šířila vlna stejnou fázovou rychlostí jako ve vlnovodu.

### Fázová rychlost vlny ve vlnovodu

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.3)$$

### Podmínky totálního odrazu

Aby se mohl paprsek vlnovodem šířit musí platit:

$$n_f > n_s \quad n_f > n_c \quad (2.4)$$

Vlnovod nazýváme asymetrickým pokud index lomu  $n_c$  krycí vrstvy se nerovná indexu lomu substrátu  $n_s$ . Opačně při rovnosti indexu lomů jej nazýváme symetrickým.

Pro splnění totálního odrazu na obou rozhraních musí být úhel dopadu  $\vartheta$  menší než jsou kritické úhly na rozhraních:

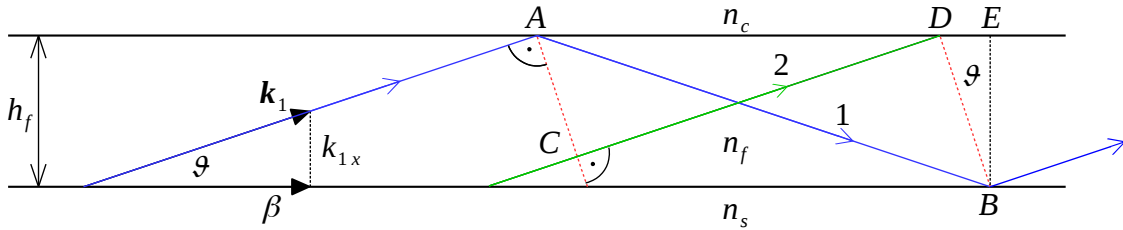
$$\vartheta \leq \vartheta_{c-fs} \quad \vartheta_{c-fs} = \arccos \frac{n_s}{n_f} \quad (2.5)$$



$$\vartheta \leq \vartheta_{c-fc} \quad \vartheta_{c-fc} = \arccos \frac{n_c}{n_f} \quad (2.6)$$

### Fázová podmínka (princip příčné rezonance)

Pro vysvětlení fázové podmínky budeme vycházet ze situace uvedené na obr. 2.5. Na obrázku jsou vyobrazeny dva paprsky modrou a zelenou barvou patřící ke stejné vlnoploše vyznačené červenou barvou. Vlnoplocha je plocha se stejnou fází ve všech jejích bodech. První paprsek se odrazí dvakrát na rozhraní v bodech A a B. Druhý paprsek se šíří přímo z bodu C do D bez odrazu. Aby paprsky tvořily spolu novou vlnoplochu musí být rozdíl jejich fáze celočíselným násobkem  $2\pi$ , kdyby tomu tak nebylo, paprsky (vlny) by spolu destruktivně interferovaly a zanikly.



Obr. 2.5: Princip příčné rezonance (převzato z [2]).

Tuto podmínku můžeme vyjádřit vztahem:

$$k_1 \overline{AB} + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = k_1 \overline{CD} + 2m\pi \quad (2.7)$$

kde  $k_1 \overline{AB}$  a  $k_1 \overline{CD}$  jsou změny fáze způsobené chodem paprsku v daném prostředí.  $\Phi_{fs}$  a  $\Phi_{fc}$  jsou skokové změny fáze způsobené totálním odrazem na rozhraní.

Z pravoúhlých trojúhelníků vyznačených na obrázku můžeme dále napsat:

$$\overline{AB} = \frac{h_f}{\sin \vartheta}, \quad \overline{CD} = \left( \frac{h_f}{\tan \vartheta} - h_f \tan \vartheta \right) \cos \vartheta \quad (2.8)$$

Dosažením 2.8 do 2.7 a následnými úpravami pomocí goniometrických vztahů získáme:

$$k_1 \left( \frac{h_f}{\sin \vartheta} \right) - k_1 \left( \frac{h_f}{\tan \vartheta} - h_f \tan \vartheta \right) \cos \vartheta + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2m\pi \quad (2.9)$$

$$k_1 h_f \left( \frac{1}{\sin \vartheta} - \frac{\cos^2 \vartheta}{\sin \vartheta} + \sin \vartheta \right) + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2m\pi \quad (2.10)$$

$$k_1 h_f \left( \frac{1 - \cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta}{\sin \vartheta} \right) + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2m\pi \quad (2.11)$$

$$k_1 h_f \left( \frac{\sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta - \cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta}{\sin \vartheta} \right) + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2m\pi \quad (2.12)$$

$$k_1 h_f 2 \sin \vartheta + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2m\pi \quad (2.13)$$

[2]

Podle obrázku dále odvodíme příčnou konstantu  $k_{1x}$  (složka vlnového vektoru do příčného směru):

$$\sin \vartheta \frac{k_{1x}}{k_1} \Rightarrow k_{1x} = k_1 \sin \vartheta = \sqrt{k_1^2 - \beta^2} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_f \sin \vartheta = k_0 \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} \quad (2.14)$$

### Disperzní rovnice

Dosazením 2.14 do 2.13 získáme disperzní rovnici.

$$2 h_f k_{1x} + \Phi_{fs} + \Phi_{fc} = 2 m \pi \quad (2.15)$$

Podle rovnice 2.15 se tedy celková změna fáze paprsku putujícího napříč celou strukturou, včetně skokových změn fáze při totálním odrazu na rozhraních, se musí rovnat celočíselným násobkům  $2\pi$ .

Změny fáze  $\Phi_{fs}$  a  $\Phi_{fc}$  (při  $0 \leq \vartheta \leq \vartheta_c$ ) jsou definovány takto (podle odvozených vztahů 1.65 a 1.67):

$$\Phi_{fs} = -2 \operatorname{arctg} \left( p_{fs} \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta - \left(\frac{n_s}{n_f}\right)^2}}{\sin \vartheta} \right) \quad (2.16)$$

$$\Phi_{fc} = -2 \operatorname{arctg} \left( p_{fc} \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta - \left(\frac{n_c}{n_f}\right)^2}}{\sin \vartheta} \right) \quad (2.17)$$

kde pro **TE** polarizaci:  $p_{fs} = p_{fc} = 1$ , pro **TM** polarizaci  $p_{fs} = (\mathbf{n}_f/\mathbf{n}_s)^2$  a  $p_{fc} = (\mathbf{n}_f/\mathbf{n}_c)^2$ .

Disperzní rovnici můžeme po dosazení napsat v následujících tvarech:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} h_f n_f \sin \vartheta - \operatorname{arctg} \left( p_{fs} \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta - \left(\frac{n_s}{n_f}\right)^2}}{\sin \vartheta} \right) - \operatorname{arctg} \left( p_{fc} \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta - \left(\frac{n_c}{n_f}\right)^2}}{\sin \vartheta} \right) = m \pi \quad (2.18)$$

pro  $0 \leq \vartheta \leq \vartheta_c$ ,

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} h_f \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \operatorname{arctg} \left( p_{fs} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right) - \operatorname{arctg} \left( p_{fc} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right) = m \pi \quad (2.19)$$

pro  $n_s \leq n_{ef} \leq n_f$ .

Každému celému číslu  $m$ , pro které mají tyto disperzní rovnice řešení, odpovídá jeden vid vedené vlny [2].

## 2.2 Rozložení intenzity elektrického pole TE v 2D vlnovodu

Při TE polarizaci mají vidy pouze složky intenzit  $E_y$ ,  $H_x$  a  $H_z$ . Budeme předpokládat sinusovou vlnu s úhlovou frekvencí  $\omega$ . Vlnová rovnice pro elektrické pole ve všech třech vrstvách vlnovodu má následující skalární tvar [1]:

$$\nabla^2 E_y + k^2 n_i^2 E_y = 0 \quad (2.20)$$

kde  $n_i = n_f, n_s$ , nebo  $n_c$ .

Řešením vlnové rovnice 2.20 získáme:

$$E_y(x, z) = E_y(x) e^{-j\beta z} \quad (2.21)$$

kde  $\beta$ ; jsou podélné složky vlnového vektoru ve směru osy  $z$ .

Při splnění podmínek pro vedenou vlnu v planárním vlnovodu, uvedenou v předchozí podkapitole, vznikne ve vlnovodné vrstvě stojatá vlna a na rozhraní s krycí a podložní vrstvou vlna evanescentní. Pro jednotlivé oblasti bude tedy průběh intenzity elektrického pole dán vztahy [1]:

$$\begin{aligned} E_y(x) &= A e^{-\gamma_c x} & 0 < x \\ E_y(x) &= B \cos(\kappa_f x) + C \sin(\kappa_f x) & -h_f < x < 0 \\ E_y(x) &= D e^{-\gamma_s(x+h_f)} & x < -h_f \end{aligned} \quad (2.22)$$

kde:

$$\gamma_c = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_c^2} \quad (2.23)$$

$$\kappa_f = \sqrt{k^2 n_f^2 - \beta^2} \quad (2.24)$$

$$\gamma_s = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_s^2} \quad (2.25)$$

A, B, C a D koeficienty amplitud, které mohou být určeny z hraničních podmínek mezi krycí vrstvou a vlnovodem.

Po vztažení všech koeficientů k A získáme:

$$\begin{aligned} E_y(x) &= A e^{-\gamma_c x} & 0 < x \\ E_y(x) &= A \left[ \cos(\kappa_f x) - \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f x) \right] & -h_f < x < 0 \\ E_y(x) &= A \left[ \cos(\kappa_f h_f) + \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f h_f) \right] e^{\gamma_s(x+h_f)} & x < -h_f \end{aligned} \quad (2.26)$$

kde A je amplituda v bodě  $x = 0$  [1].

Konstantu  $\beta$  určíme pomocí hraničních podmínek kdy  $x = -h_f$  tj. mezi vlnovodnou vrstvou a podložní vrstvou (substrátem) [1]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial E_y}{\partial x} \right|_{x=-h_f} &= A [\kappa_f \sin(\kappa_f h_f) - \gamma_c \cos(\kappa_f h_f)] = \\ &= A \left[ \cos(\kappa_f h_f) + \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f h_f) \right] \gamma_s \end{aligned} \quad (2.27)$$

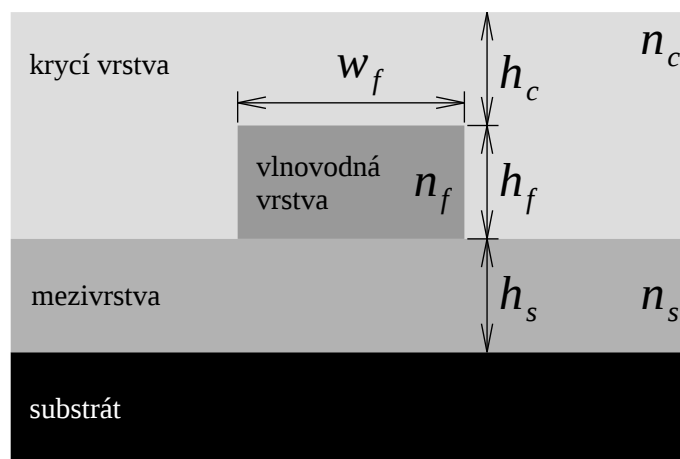
po zjednodušení:

$$\tan(h_f \kappa_f) = \frac{\gamma_c + \gamma_s}{\kappa_f \left( 1 - \frac{\gamma_c \gamma_s}{\kappa_f^2} \right)} \quad (2.28)$$

Ze vztahu 2.28 je možné vypočítat právě koeficient  $\beta$  [1].

## 2.3 Určení geometrických rozměrů 3D planárního vlnovodu

Analýza šíření elektromagnetické vlny v 3D planárním vlnovodu je nesrovnatelně složitější. Pro zjednodušení výpočtu rozdělíme 3D vlnovod na dva 2D vlnovody a výpočet tedy provedeme ve dvou krocích pro příčné směry  $x$  a  $y$ . K teoretickému návrhu, simulacím a následné výrobě vlnovodu potřebujeme znát jeho geometrické rozměry, při daných použitých materiálech, které jsou šířka  $w_f$  a výška  $h_f$  vlnovodné vrstvy, minimální výšky  $h_s$  mezivrstvy  $h_c$  krycí vrstvy viz. Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Geometrické rozměry planárního vlnovodu.

U výpočtu rozměrů šířky  $w_f$  a výšky  $h_f$  vlnovodné vrstvy, pro požadovaný počet vedených vidů, budeme vycházet z disperzní rovnice 2.19.

Kritická výška vlnovodné vrstvy  $h_f$  při které je daný TE vid veden:

$$h_f = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left( m\pi + \arctg \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \quad (2.29)$$

Při mezním stavu kdy  $n_{ef} = n_s$  [2].

Kritická šířka vlnovodné vrstvy  $w_f$  při které je daný TM vid veden:

$$w_f = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left[ p\pi + \arctg \left( \frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right] \quad (2.30)$$

Při mezním stavu kdy  $n_{ef} = n_s$ .

Kde  $m, p$  je celé vidové číslo 0, 1, 2, 3 ...

V některých případech naopak známe rozměry  $h_f$  a  $w_f$ , ale potřebujeme určit počet vedených vidů  $m$  a  $p$  v daném vlnovodu [2].

**Počet TE vidů  $m$ :**

$$m = \text{Int} \left( \frac{2}{\lambda} h_f \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \quad (2.31)$$

**Počet TM vidů  $p$ :**

$$p = \text{Int} \left[ \frac{2}{\lambda} w_f \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctg \left( \frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) \right] \quad (2.32)$$

Minimální výšku mezivrstvy  $h_s$  a krycí vrstvy  $h_c$  určíme z poklesu intenzit elektrického pole evanescentní vlny šířící se v těchto vrstvách na rozhraních z vlnovodnou vrstvou. Budeme hledat takový rozměr vrstev, při kterém klesne intenzita evanescentní vlny na 1% původní hodnoty. Budeme vycházet ze vztahů 2.26 pro průběh intenzity elektrického pole v jednotlivých vrstvách. Amplitudu  $A$  zvolíme jednotkovou, protože nás zajímá jen její pokles.

Minimální výšku krycí vrstvy  $h_{cmin}$  určíme řešením vztahu:

$$0,01 = e^{-\gamma_c h_{cmin}} \quad (2.33)$$

Minimální výšku mezivrstvy  $h_{smin}$  obdobně:

$$0,01 = \left[ \cos(\kappa_f h) + \frac{\gamma_c}{\kappa_f} \sin(\kappa_f h) \right] e^{\gamma_s (h_{smin} + h)} \quad (2.34)$$

I když je většina energie vedena v nultém dominantním vidu musíme při výpočtu minimálních výšek  $h_{cmin}$  a  $h_{smin}$  u mnohavidových vlnovodů brát v úvahu všechny vedené vidy. Z tohoto důvodu byly všechny mnohavidové návrhy pouze simulovány.

Výška mezivrstvy a krycí vrstvy je kritická zejména při návrhu vlnovodu pro vedení optického záření s vlnovou délkou 1300 nm a podložní křemíkovou vrstvou, která je pro tuto vlnovou délku transparentní. V tomto případě by hrozilo vyvázání záření do této podložní vrstvy.

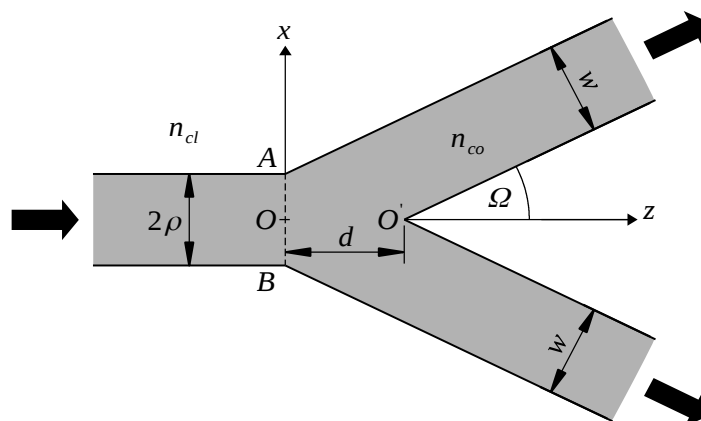
### 3 Optické mnohavidové rozbočnice

Optická mnohavidová rozbočnice slouží k dělení výkonu optického záření. Její využití je například v distribuci optických datových sítí, měřících pracovištích při měření optického útlumu, kde je potřeba přesně rozdělit výkon zdroje optického záření na dvě poloviny pro měřící větve a druhou jako referenční větev.

Tato práce se zabývá návrhem, simulací a prováděním depozičních testů rozbočnice 1x2Y, která dělí výkon na dvě poloviny ve variantách s postupně rozšiřujícím se vlnovodem (taperem) a módovým scramblerem.

#### 3.1 Mnohavidová optická rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem

Základní teorie návrhu této mnohavidové výkonové rozbočnice 1x2Y vychází z článku pana D. R. Beltramiho [4], který v něm odvodil vztahy pro rozměry rozbočnice tvaru Y se skokovou změnou indexu lomu viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Výkonová rozbočnice tvaru Y podle pana D. R. Beltramiho (převzato z [4]).

Minimální úhel mezi ramenem a osou rozbočnice:

$$\Omega \leq \frac{\theta_c D}{D+1} \quad (3.1)$$

kde pro kritický úhel  $\theta_c$  platí:

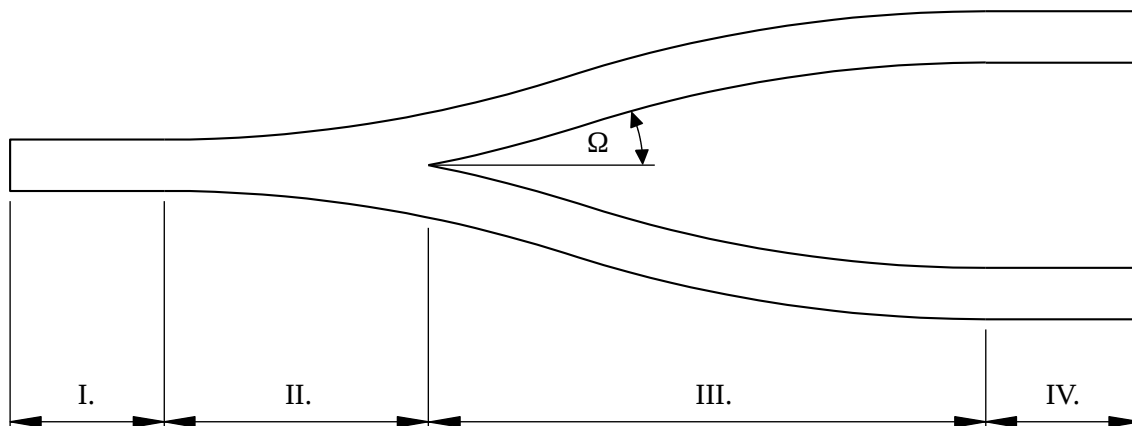
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}}{n_{co}^2}\right) \quad (3.2)$$

pro D platí:

$$D = \frac{d \sin(\Omega)}{\rho(2 - \cos(\Omega))} \quad (3.3)$$

kde d je délka střední části rozbočnice,  $n_{co}$  index lomu rozbočnice,  $n_{cl}$  index lomu okolí [4].

Při návrhu budeme vycházet ze tvaru rozbočnice uvedeného na obr. 3.2. Rozbočnice je rozdělena na čtyři části: I. vstupní vlnovod, II. postupně rozšiřující se vlnovod, III. s-bend a IV. výstupní vlnovody.

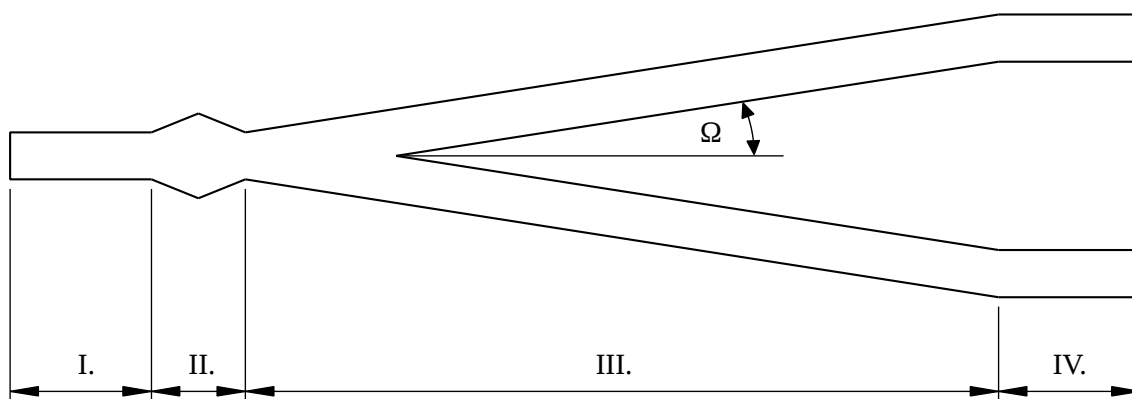


Obr. 3.2: Jednotlivé části optické rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.

### 3.2 Mnohavidová rozbočnice s módovým scramblerem

Tento druh rozbočnice publikovaný týmem vedeným Gao Yangou [5] má vložený mezi vstupní vlnovod a zbytek rozbočnice módový scrambler, který zajistí lepší navázání výkonu do obou ramen. Rozvětvení vlnovodu za scramblerem může být lineární nebo kosinové.

Tvar této rozbočnice je uveden na obr. 3.3. Rozbočnice se skládá z těchto částí: I. vstupní vlnovod, II. módový scrambler, III. lineárně rozšiřující se vlnovod, IV. výstupní vlnovody.



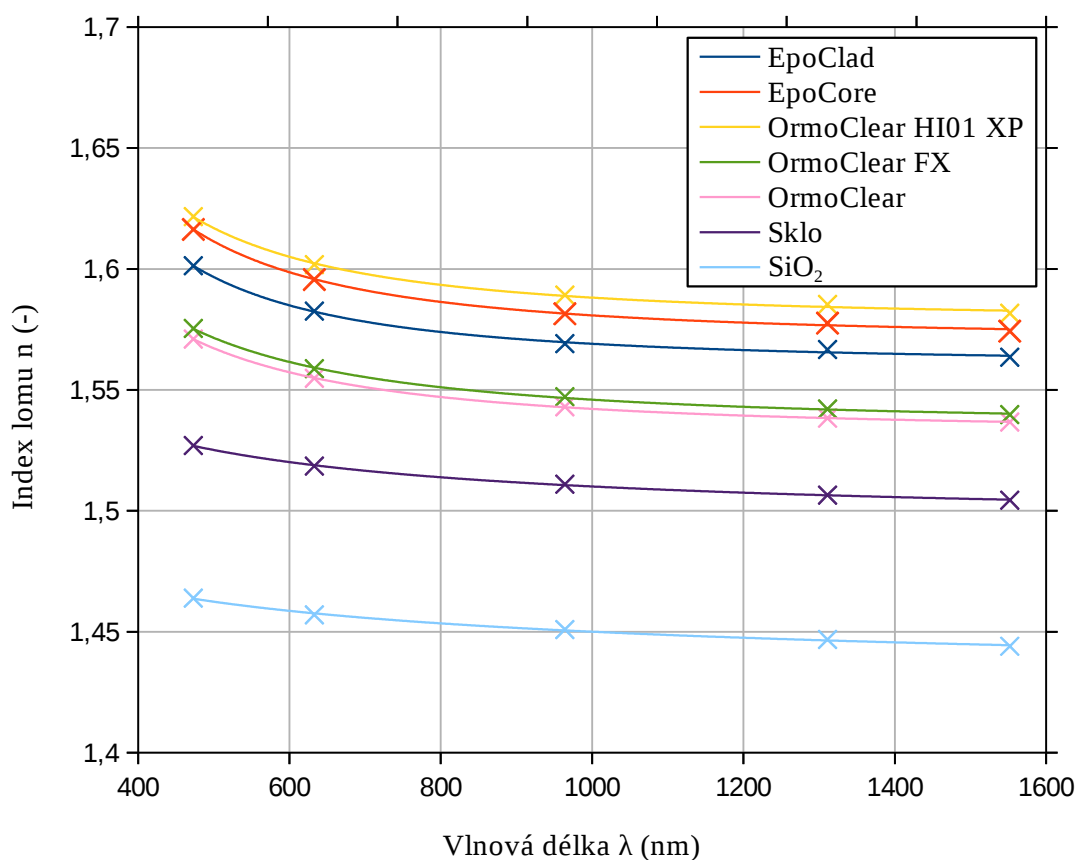
Obr. 3.3: Jednotlivé části optické rozbočnice s módovým scramblerem.

## 4 Teoretický návrh a simulace struktur

V první části kapitoly jsou uvedené parametry použitých materiálů potřebné pro teoretické výpočty a simulace. Další části kapitoly již uvádějí vybrané materiálové složení struktur, jejich navržené a simulované rozměry. V poslední kapitole jsou navržené struktury rozvrženy na plochu litografických masek použitých při provádění depozičních testů. Simulace byly prováděny pomocí softwaru BeamPROP<sup>TM</sup> od společnosti RSoft (dnes SYNOPSYS), který využívá simulační metodu šíření optického svazku (BMP – Beam propagation method). Součástí softwaru je i nástroj MOST, který umožňuje provádět parametrické simulace, z jejichž výsledků vybereme optimální řešení. Výpočty podle vztahů uvedených v teoretické části byly prováděny pomocí softwaru Maple<sup>TM</sup> a LibreOffice Calc. Zdrojové kódy jsou uvedeny v příloze a na CD.

### 4.1 Parametry použitých materiálů pro výpočty a simulace

Potřebným parametrem pro výpočty a simulace rozměrů struktur je index lomu použitých materiálů, který je závislý na vlnové délce. Výrobce dodává ke každému polymernímu materiálu datový list ve kterém jsou uvedeny hodnoty indexu lomu pro dané vlnové délky, ty se ale mohou s výrobním procesem mírně lišit. Z tohoto důvodu byly vyrobeny některé vzorky speciálně jen pro měření indexu lomu. Hodnoty indexu lomu všech použitých materiálů jsou patrné z následujícího obrázku 4.1. Body vyznačené křížky jsou naměřené hodnoty při vlnových délkách 473; 632,8; 964; 1311 a 1552 nm.



Obr. 4.1: Indexy lomu materiálů v závislosti na vlnové délce.



Jedná se o polymerní materiály EpoCore, EpoClad a varianty OrmoClear od německé společnosti Micro Resist Technology GmbH, dále podložní laboratorní sklíčka, Si podložky s vrstvou SiO<sub>2</sub>.

Pro výpočty a simulace byly z proložení odečteny indexy lomu pro vlnové délky 650, 850 a 1310 nm, protože se tyto vlnové délky používají v optických komunikačních sítích (komunikační okna).

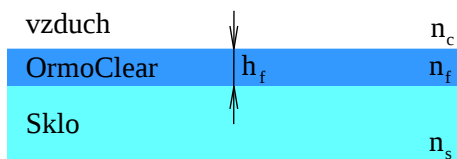
Tab. 4.1: Odečtené hodnoty indexu lomu pro simulace a výpočty.

Materiál	Index lomu materiálu při dané vlnové délce		
	650 nm	850 nm	1310 nm
EpoCore	1,5945	1,5846	1,5767
EpoClad	1,5811	1,5724	1,5655
OrmoClear HI01 XP	1,6011	1,5917	1,5843
OrmoClear FX	1,5581	1,5495	1,5419
OrmoClear	1,5539	1,5455	1,5383
Podložní sklo	1,5182	1,5127	1,5064
SiO <sub>2</sub>	1,4571	1,4525	1,4464

## 4.2 Planární optické vlnovody OrmoClear na skleněné podložce

Vzorky mají strukturu podle obr. 4.2 a byly připravovány z důvodu měření hodnot indexu lomu a optického útlumu. Tyto naměřené hodnoty byly dále použity pro návrh jednovodových optických vlnovodů SiO<sub>2</sub>/OrmoClear.

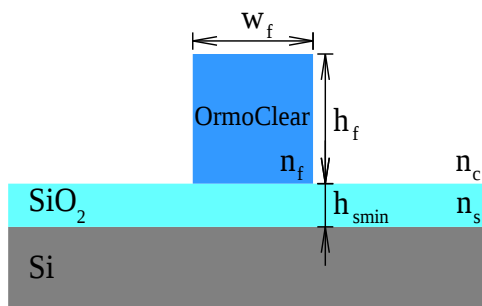
Na skleněné podložní sklíčko byly nanášeny polymery OrmoClear o síle vrstvy  $h_f$  několika desetin milimetru, sloužící zde jako vlnovodná vrstva, jelikož mají všechny větší index lomu než skleněné podložní sklíčko viz 4.1.



Obr. 4.2: Planární vlnovod Sklo/Polymer.

### 4.3 Jednovidové optické vlnovody SiO<sub>2</sub>/OrmoClear

Nosným substrátem těchto vzorků jsou křemíkové destičky s vrstvou oxidu SiO<sub>2</sub> o tloušťce 3 μm na které jsou nanášeny materiály OrmoClear a pomocí laserové litografie vyrobeny hřebenové vlnovody. Průřez navrhovaným vlnovodem je na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Optický vlnovod Si/SiO<sub>2</sub>/OrmoClear.

Z naměřených hodnot indexů lomu jednotlivých materiálů ze skupiny OrmoClear vyplývá, že OrmoClear HI01 XP má velký index lomu oproti OrmoClear a OrmoClear FX, které jsou si velmi podobné. Z těchto důvodů byl návrh proveden jen pro OrmoClear HI01 XP a OrmoClear FX viz následující tabulky.

Tab. 4.2: Vypočtené hodnoty jednovidových vlnovodů s OrmoClear HI01 XP.

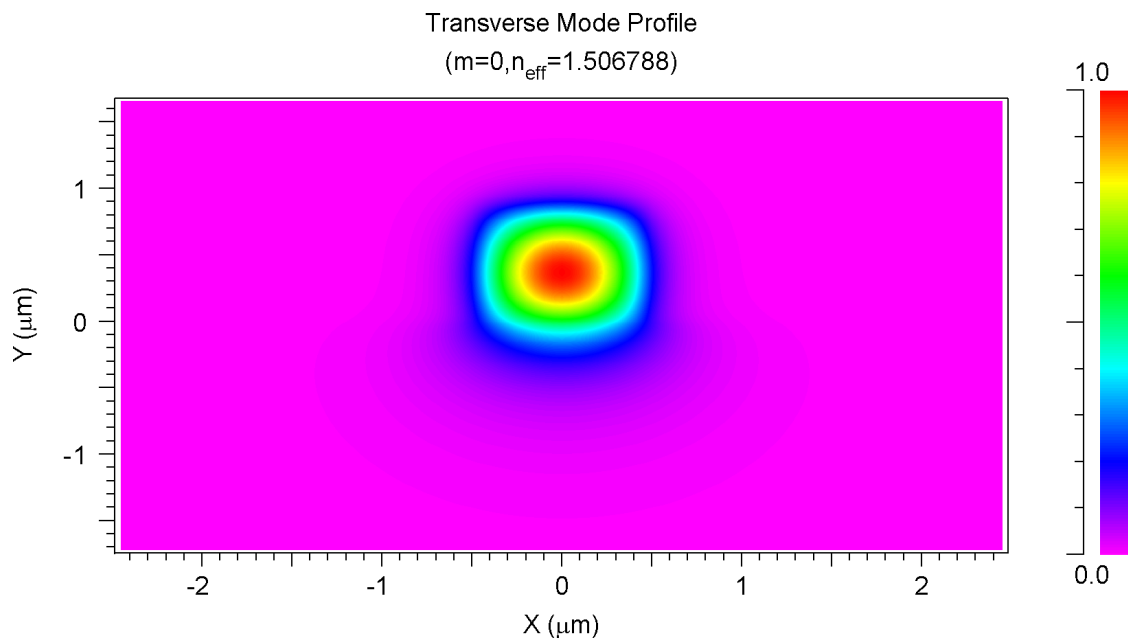
$\lambda$ (nm)	$h_{smin}$ (μm)	$h_f$ (μm)	$w_f$ (μm)
650	1,62	0,64	0,69
850	2,16	0,86	0,92
1310	3,36	1,34	1,44

Tab. 4.3: Vypočtené hodnoty jednovidových vlnovodů s OrmoClear FX.

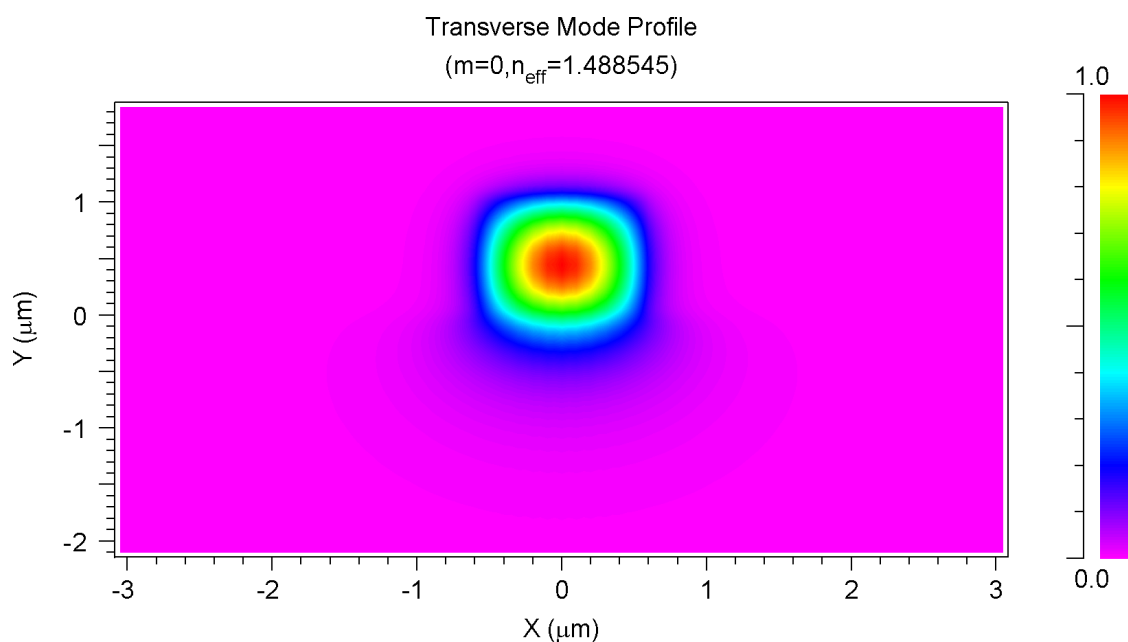
$\lambda$ (nm)	$h_{smin}$ (μm)	$h_f$ (μm)	$w_f$ (μm)
650	1,99	0,79	0,84
850	2,67	1,06	1,12
1310	4,16	1,65	1,75

K dispozici byl substrát Si s SiO<sub>2</sub> vrstvou  $h_s = 3 \mu\text{m}$ , pro který již nejsou splněny podmínky  $h_s > h_{smin}$  při vlnové délce 1310 nm viz tab. 4.2 a 4.3.

Výsledky simulací ze softwaru BeamPROP normované intenzity módu  $TE_0$  ve vlnovodu pro materiály OrmoClear HI01 XP a OrmoClear FX při vlnové délce jsou na následujících obrázcích.



a) OrmoClear HI01 XP při  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ,  $n_f = 1,5917$ ,  $n_s = 1,4525$ ,  $n_c = 1$ .



b) OrmoClear FX při  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ,  $n_f = 1,5495$ ,  $n_s = 1,4525$ ,  $n_c = 1$ .

Obr. 4.4: Simulace rozložení intenzity  $TE_0$  módu ve vlnovodu s materiály OrmoClear.

Z důvodu vysokého indexu lomu materiálu OrmoClear HI01 XP je tento materiál vhodný při použití s podložní vrstvou  $\text{SiO}_2$  pro struktury s velkou hustotou integrace.

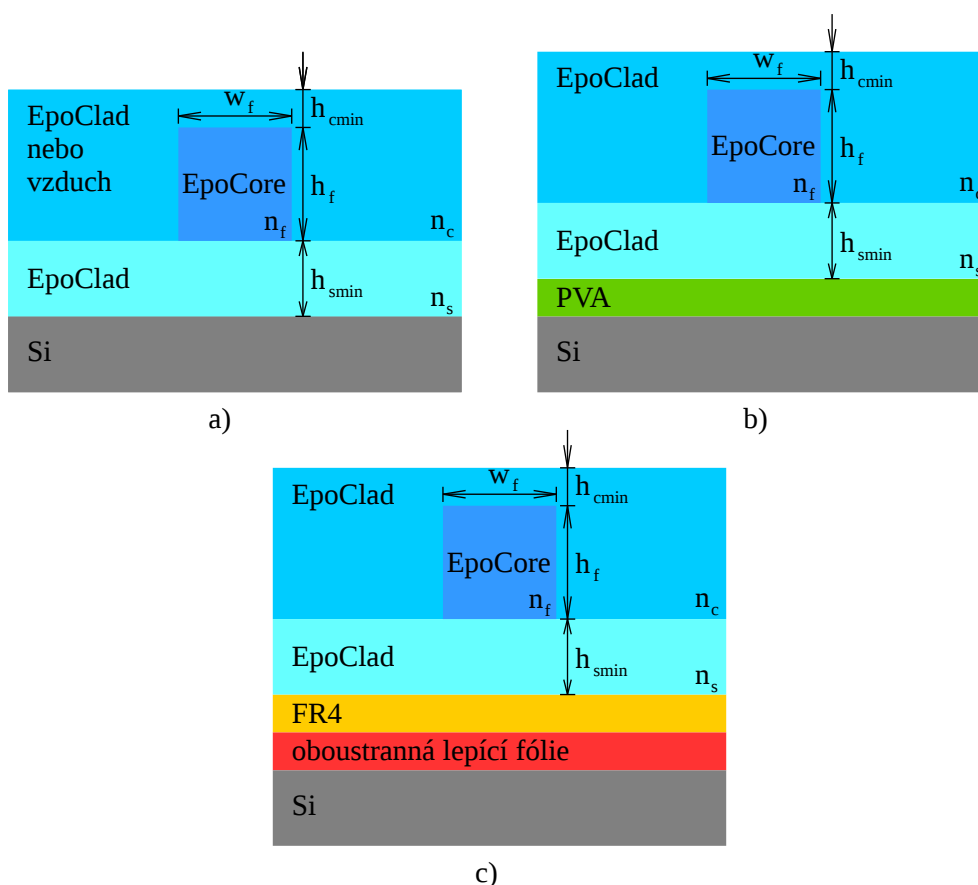
## 4.4 Mnohavidové vlnovody EpoClad/EpoCore

Tento typ vlnovodů má pro jádro použit materiál EpoCore a jako podložní a krycí vrstvu materiál EpoClad. Jedná se tedy o symetrický vlnovod. Struktury těchto vlnovodů jsou patrné z následujícího obrázku 4.5.

Vrstva vlnovodu je u všech variant stejná. Jednotlivé varianty se liší pouze nosnými vrstvami. Nejjednodušší varianta obr. 4.5 a) má vlnovod po výrobě a nařezání pevně spjat s křemíkovou deskou a nelze oddělit.

U varianty obr. 4.5 b) je mezi křemíkovou deskou a vlnovod vložena velmi tenká vrstva PVA, která je rozpustná ve vodě. To umožňuje po výrobě a nařezání vrstvu PVA rozpustit a oddělit vlnovod od desky. Takto vzniklý vlnovod je flexibilní a nazývá se samonosný. Využití těchto vlnovodů je například při úhlových optických spojích mezi deskami plošných spojů v elektronice.

Třetí varianta obr. 4.5 c) má vlnovod vytvořený na 100  $\mu\text{m}$  tenké folii sklolaminátu FR4, která je přilepena ke křemíkové desce pomocí kancelářské oboustranné fólie. Takto vyrobený vlnovod může spojit například dva integrované obvody na desce plošného spoje, kde se sklolaminát FR4 hojně používá. Vlnovod lze po zahřátí a použití skalpelu také oddělit od křemíkové desky. Flexibilita tohoto vlnovodu je však omezena pružností vrstvy FR4.



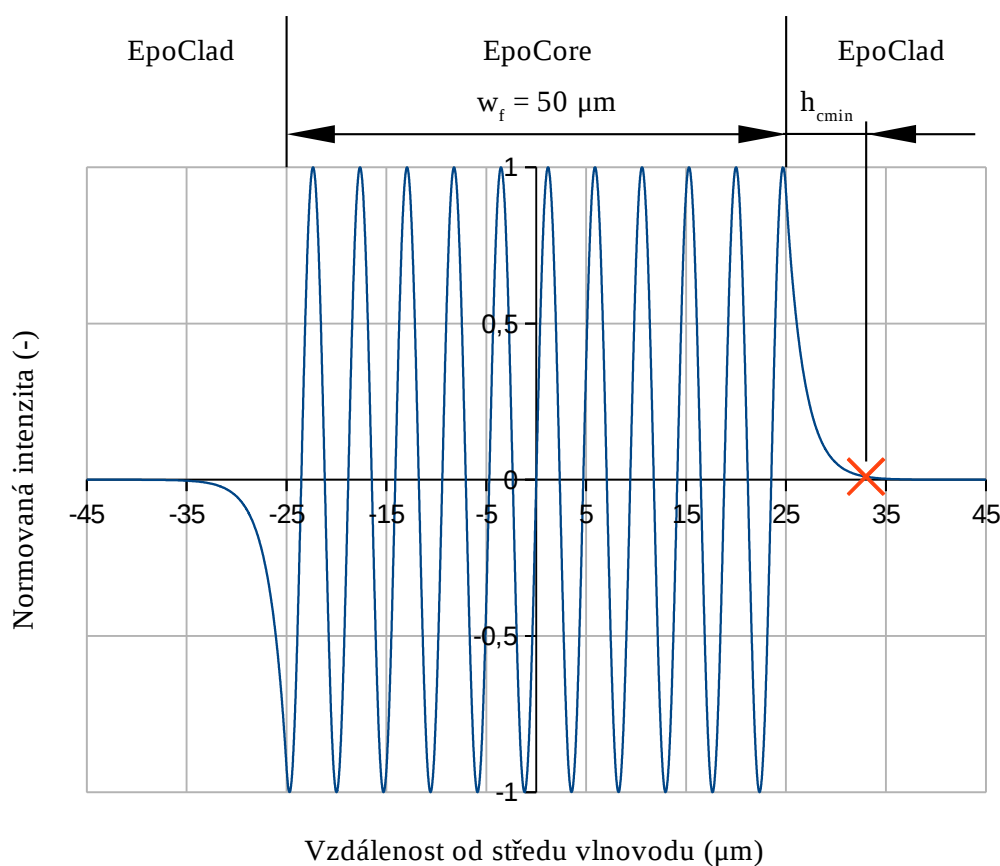
Obr. 4.5: Varianty vlnovodů EpoClad/EpoCore.

Rozměry kanálku vlnovodu jsou 50x50  $\mu\text{m}$  z důvodu kompatibility se standardními optickými vláknovými vlnovody 50/125  $\mu\text{m}$ . Simulované minimální tloušťky jednotlivých vrstev vlnovodu vrstev jsou uvedeny v tab. 4.4.

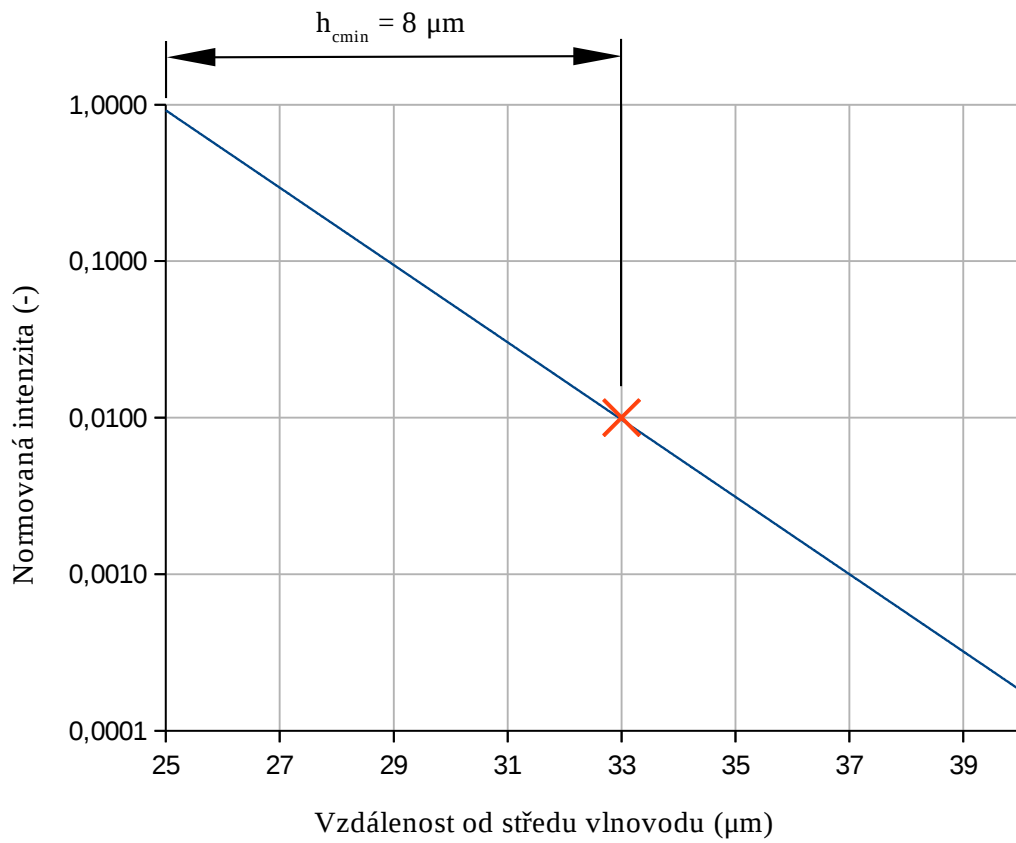
Tab. 4.4: Simulované hodnoty pro EpoClad/EpoCore.

$\lambda$ (nm)	$h_{\text{smin}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$h_{\text{cmin}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$h_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$w_f$ ( $\mu\text{m}$ )	Počet vidů TE (-)
650	15,2	15,2	50	50	32
850	8,0	8,0	50	50	24
1310	29,4	29,4	50	50	15

Hodnota minimální tloušťky podložní a krycí vrstvy je odvozena z rozložení intenzity elektrického pole nejvyššího vedeného vidu. Je to vzdálenost, kdy intenzita evanescentní vlny poklesne na 1% hodnoty od rozhraní s jádrem viz následující obrázky. Červený křížek na obr. 4.6 a 4.7 značí vzdálenost kdy klesne energie evanescentní vlny na 1%.



Obr. 4.6: Výsledek simulace rozložení intenzity 23. TE vidu ve vlnovodu EpoClad/EpoCore pro 850 nm.



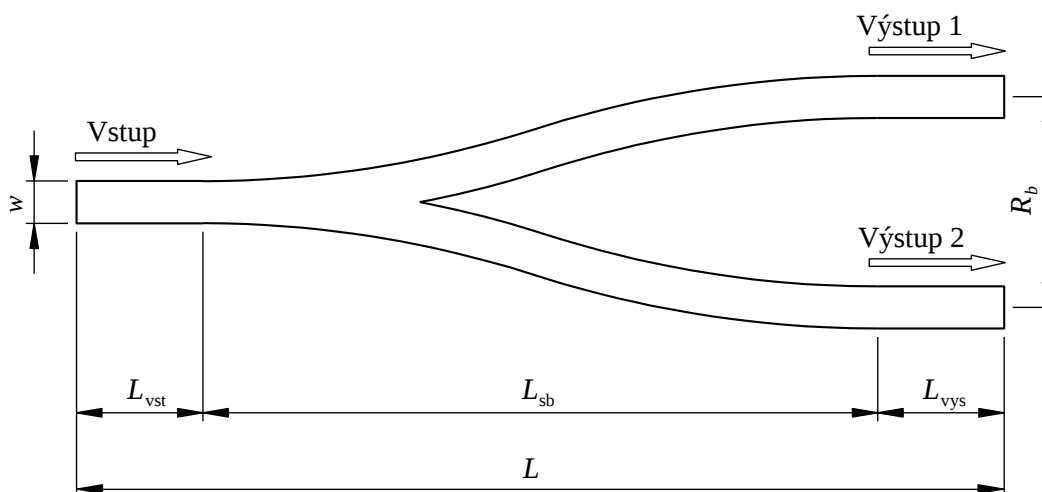
Obr. 4.7: Detail poklesu intenzity evanescentní vlny na 23. TE vidu ve vlnovodu EpoClad/EpoCore pro 850 nm.

## 4.5 Optické mnohavidové rozbočnice EpoClad/EpoCore

Pro optimalizaci výkonových rozbočnic je vhodný softwarový balíček MOST v programu BeamPROP<sup>TM</sup>, který umožňuje nalézt optimální rozměry. Pro správné výsledky simulace je důležité vhodně zvolit simulační krok pro metodu BMP, kterou software implementuje. Při nevhodném nastavení simulačních parametrů a počtu simulací může simulace trvat velmi dlouho a s nepřesnými výsledky. Všechny navrhované rozbočnice mají pro vlnovodnou vrstvu použitý materiál EpoCore a pro podložní a krycí vrstvu materiál EpoClad.

### Optimalizace optické výkonové rozbočnice EpoClad/EpoCore s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.

Na obrázku 4.8 je uvedena navrhovaná výkonová rozbočnice s postupně rozšiřujícím (taperovaným) se vlnovodem a její rozměry. Šířka  $w$  vstupních a výstupních vlnovodů je opět  $50\ \mu\text{m}$  z důvodu kompatibility s komerčními vláknovými optickými vlnovody  $50/125\ \mu\text{m}$ . Rozteč výstupních vlnovodů  $R_b$   $250\ \mu\text{m}$  je taktéž dána podle rozměrů komerčních konektorů. Délky vstupních a výstupních vlnovodů byly zvoleny  $300\ \mu\text{m}$ .



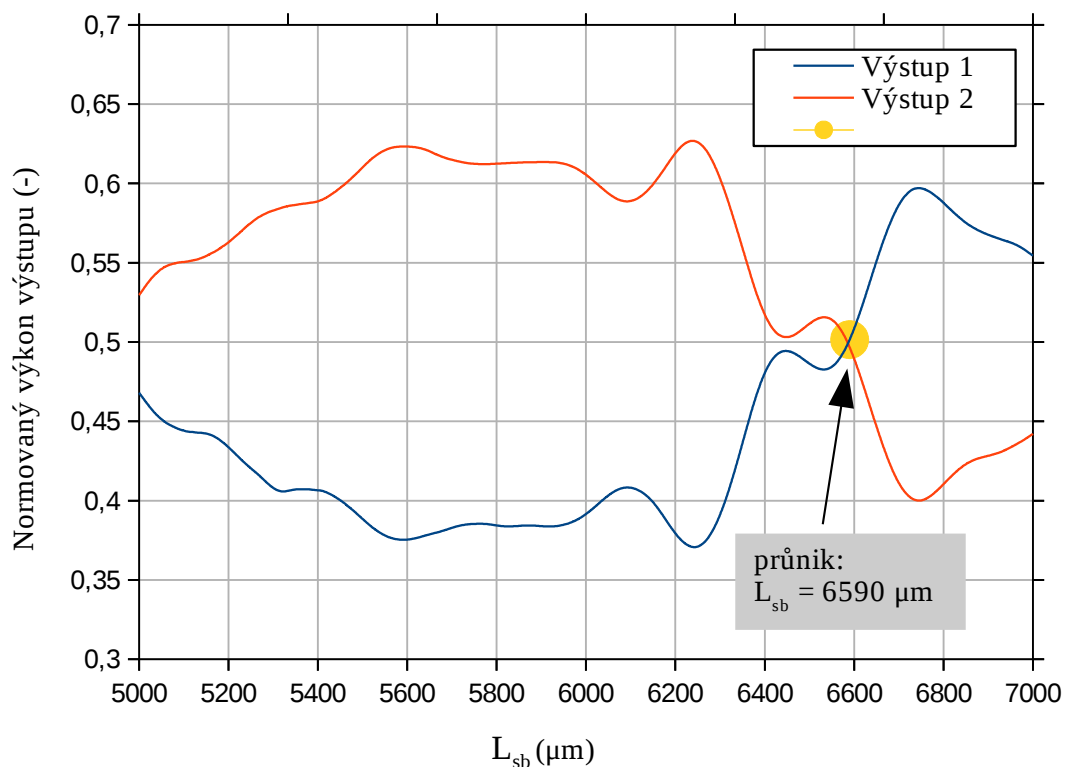
Obr. 4.8: Rozbočnice EpoClad/EpoCore s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.

Optimalizace probíhala tedy jen u rozměru  $L_{sb}$  pro nejlepší výkonové rozdělení do jednotlivých výstupů rozbočnice. Pro správné výsledky simulace je důležité zajistit, aby co nejvíce simulačních kroků BMP proběhlo právě v oblasti  $L_{sb}$ , kde se nachází postupně rozšiřující se vlnovod a dochází zde k výkonovému dělení. Z tohoto důvodu jsou rozměry  $L_{vst}$  a  $L_{vys}$  nastaveny jen na  $300\ \mu\text{m}$ . Kdyby se například při stejném simulačním kroku zvolily rozměry  $L_{vst}$  a  $L_{vys}$  v řádu tisíců mikrometrů byly by výsledky značně zkreslené.

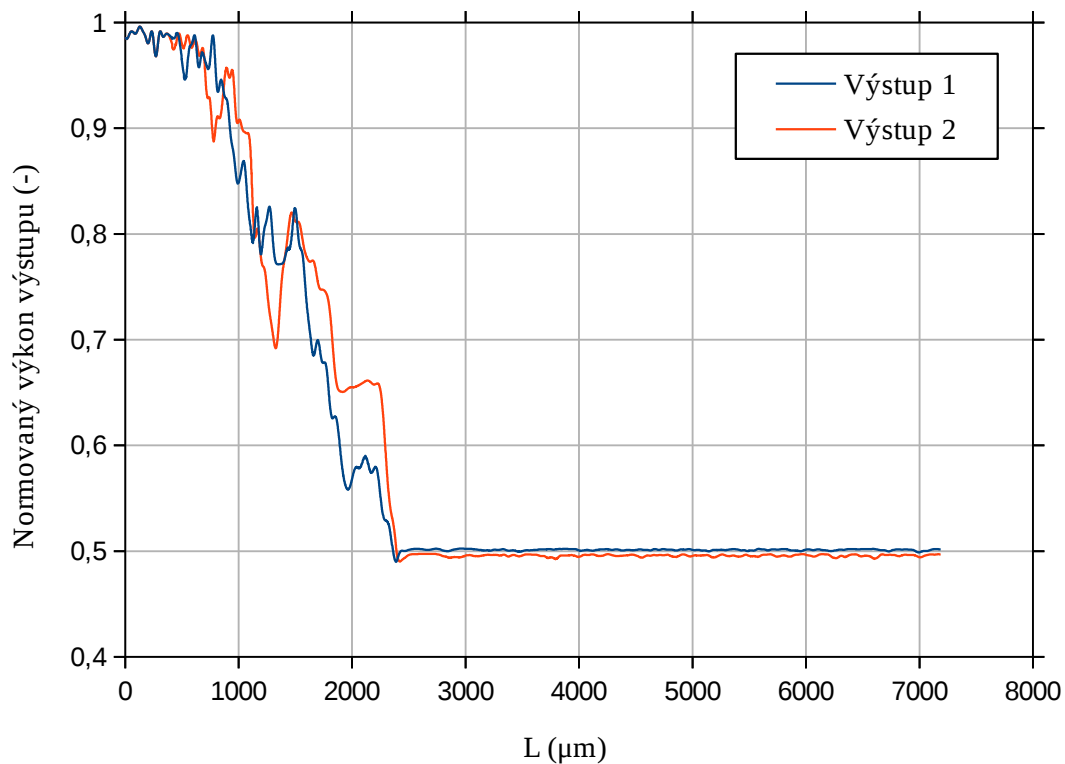
Výsledkem simulací jsou křivky závislosti výstupního normovaného výkonu jednotlivých výstupů na délce střední části  $L_{sb}$ . Při vykreslení obou křivek do jednoho grafu hledáme takovou délku  $L_{sb}$ , kde se obě křivky protínají. Průnik znamená stejný výkon do obou výstupů. Hodnot, kde se křivky protínají může být více a vybereme tedy tu, kde jsou nejmenší výkonové ztráty a nejkratší délka  $L_{sb}$ .

Po zjištění požadovaných délek  $L_{sb}$  pro všechny vlnové délky  $650$ ,  $850$  a  $1310\ \text{nm}$  je dobré ověřit výsledky provedením samotné simulace bez optimalizačního nástroje.

Na následujících obrázcích jsou uvedeny výsledky simulací pro všechny vlnové délky 650, 850 a 1310 nm a jejich ověření. Zmíněné průniky křivek jsou v obrázcích zvýrazněny žlutým kolečkem.



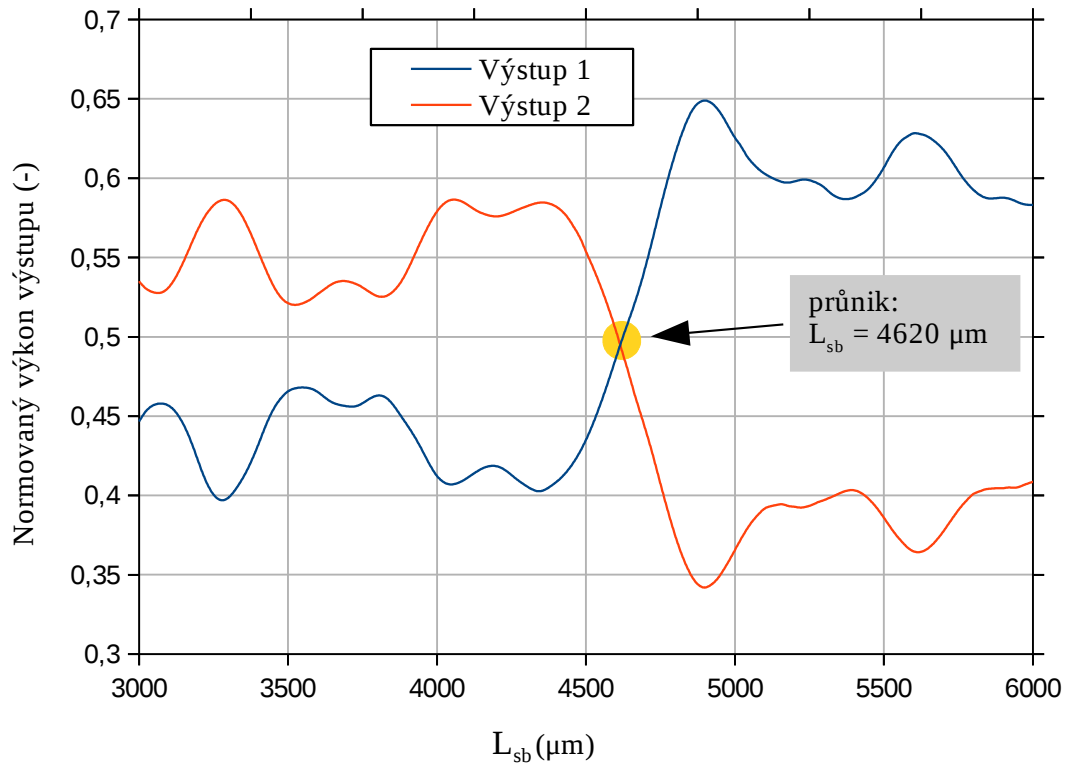
a) Nalezení optimální délky  $L_{sb}$  pomocí balíčku MOST.



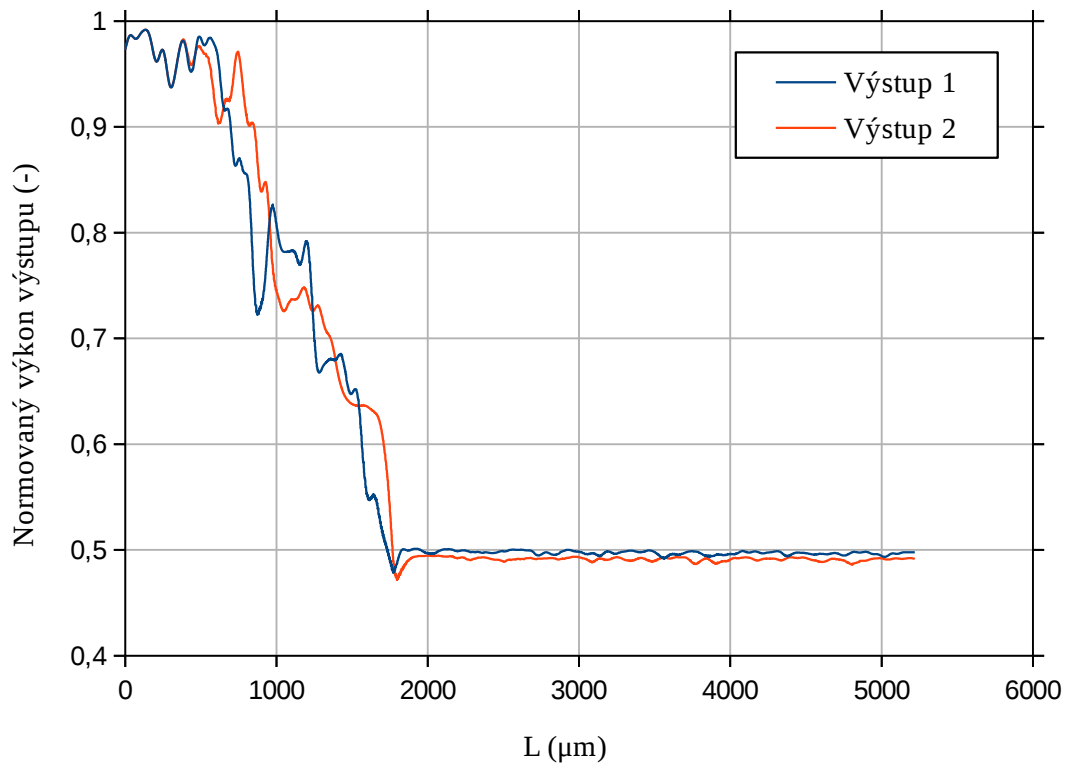
b) Simulace rozložení výkonu v celé rozbočnici pro  $L_{sb} = 6590 \mu\text{m}$ .

Obr. 4.9: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 650 nm.



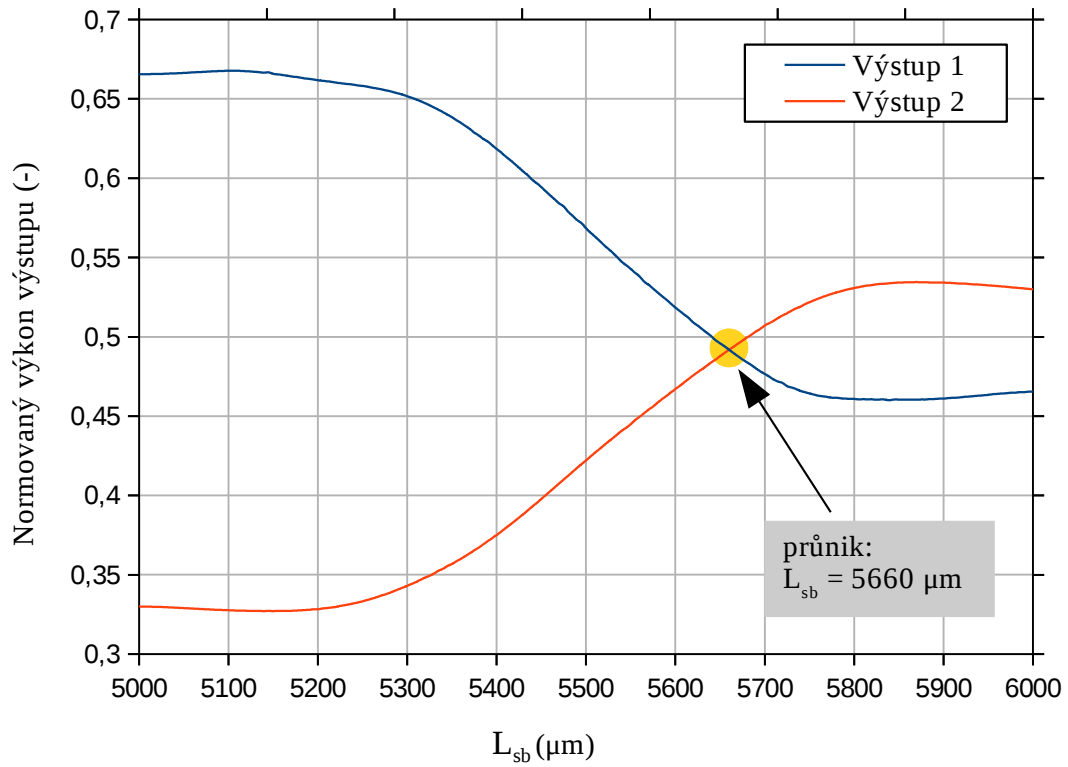


a) Nalezení optimální délky  $L_{sb}$  pomocí balíčku MOST.

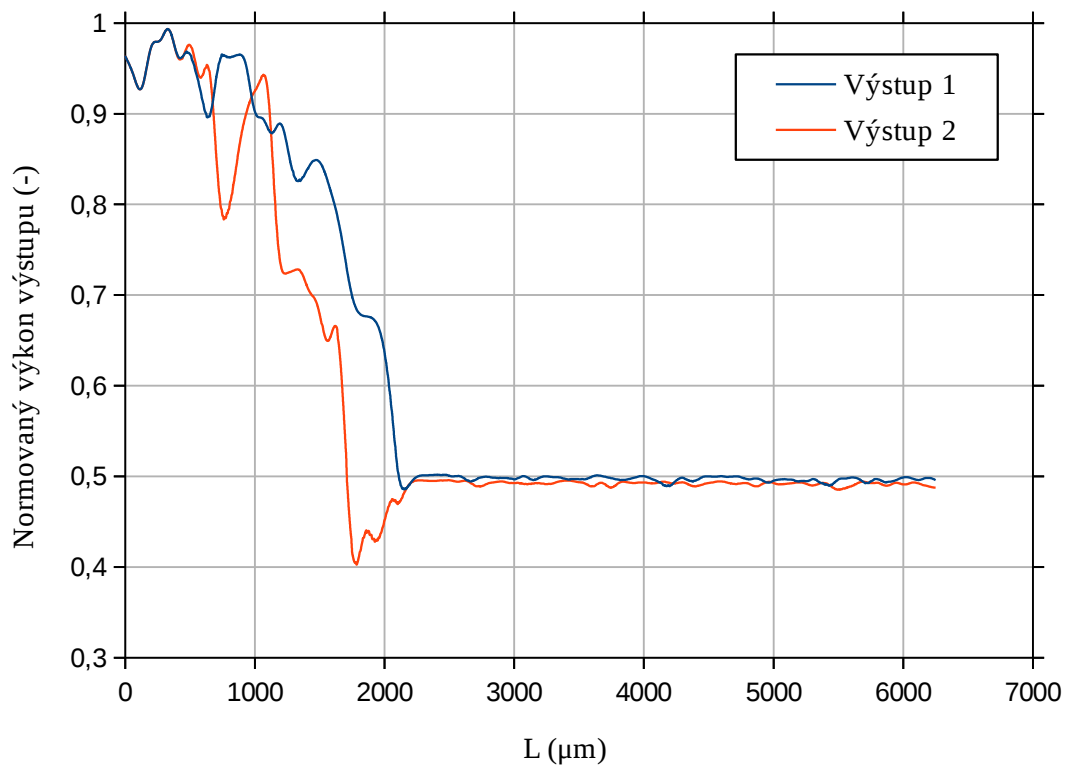


b) Simulace rozložení výkonu v celé rozbočnici pro  $L_{sb} = 4620 \mu\text{m}$ .

Obr. 4.10: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 850 nm.



a) Nalezení optimální délky  $L_{sb}$  pomocí balíčku MOST.



b) Simulace rozložení výkonu v celé rozbočnici pro  $L_{sb} = 5660 \mu\text{m}$ .

Obr. 4.11: Výsledek optimalizace a ověření rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem pro 1310 nm.

Celkové rozměry všech optimalizovaných rozbočnic jsou uvedeny v následující tabulce:

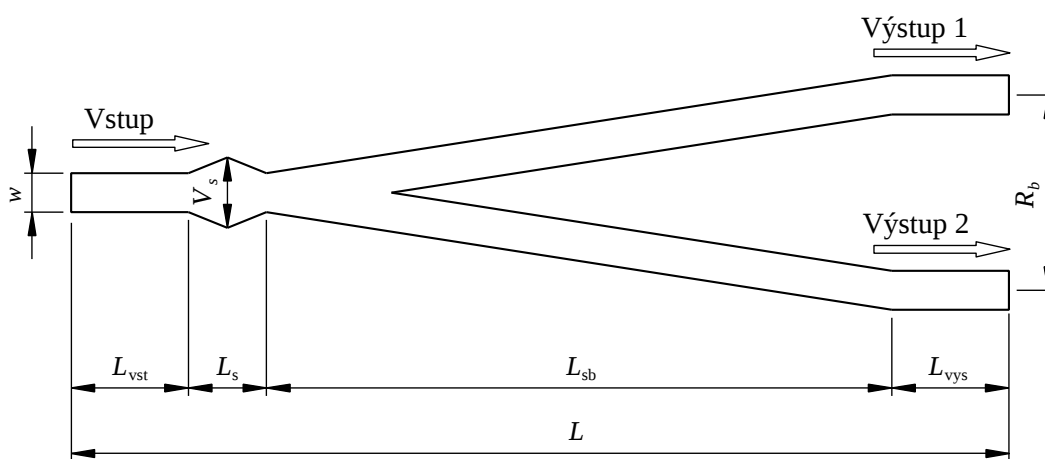
Tab. 4.5: Rozměry optimalizovaných rozbočnic s postupně rozšiřujícím se vlnovodem.

$\lambda$ (nm)	$L_{vst}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{sb}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{vys}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_b$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_1$ (-)	$P_2$ (-)
650	300	6590	300	250	50	0,502	0,497
850	300	4620	300	250	50	0,498	0,492
1310	300	5660	300	250	50	0,492	0,492

$P_1$  a  $P_2$  jsou normované výkony na výstupech rozbočnice ku vstupnímu výkonu. Z grafů a tabulky je patrné, že nejlepší výsledky simulací jsou pro vlnové délky 850 a 1310 nm.

### Optimalizace výkonové rozbočnice EpoClad/EpoCore s módovým scramblerem

Tvar a rozměry této rozbočnice vycházejí z obrázku 4.12. Počáteční rozměry pro tuto rozbočnici vychází z diplomové práce [6], kde autor prováděl také optimalizace pomocí simulačního softwaru BeamPROP a Most, ale pro jiné indexy lomu. Tyto optimalizované hodnoty sloužily jako počáteční parametry pro optimalizace s novými indexy lomu uvedených v tab. 4.1.



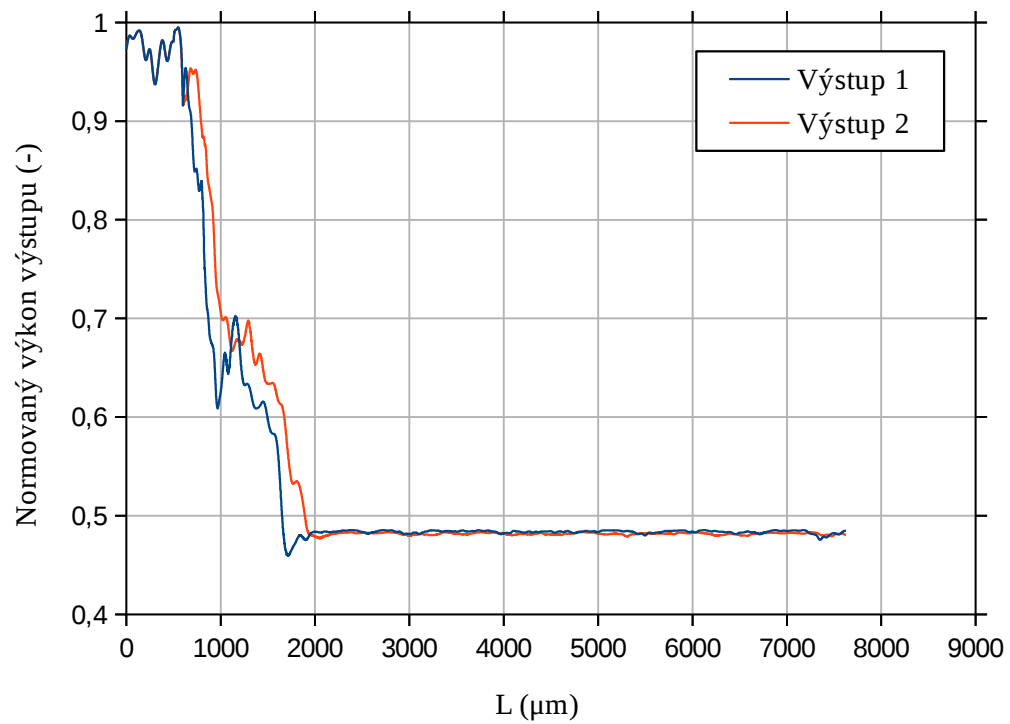
Obr. 4.12: Rozbočnice EpoClad/EpoCore s módovým scramblerem.

Rozměry  $w$ ,  $L_{vst}$ ,  $L_{vys}$  a  $R_b$  byly pevně nastaveny ze stejných důvodů jako u rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem. Vzhledem k tomu, že se při optimalizaci mění parametry  $L_{sb}$ ,  $L_s$  a  $V_s$  ve všech kombinacích trvají jednotlivé simulace velmi dlouho. Z těchto důvodů byla rozbočnice optimalizována jen pro vlnovou délku 850 nm.

Tab. 4.6: Rozměry optimalizované rozbočnice EpoClad/EpoCore s módovým scramblerem.

$\lambda$ (nm)	$L_{vst}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{sb}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{vys}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_b$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_1$ (-)	$P_2$ (-)
850	500	50	6530	500	250	60	50	0,484	0,482

Optimalizované rozměry s novými indexy lomu se liší od rozměrů uvedených v [6] zejména v délkách  $L_{in}$ ,  $L_{sb}$  a  $L_{out}$ . Dále se jen nepatrně zlepšil výstupní výkon. Výkonové rozložení optimalizované rozbočnice je na následujícím obrázku 4.13.



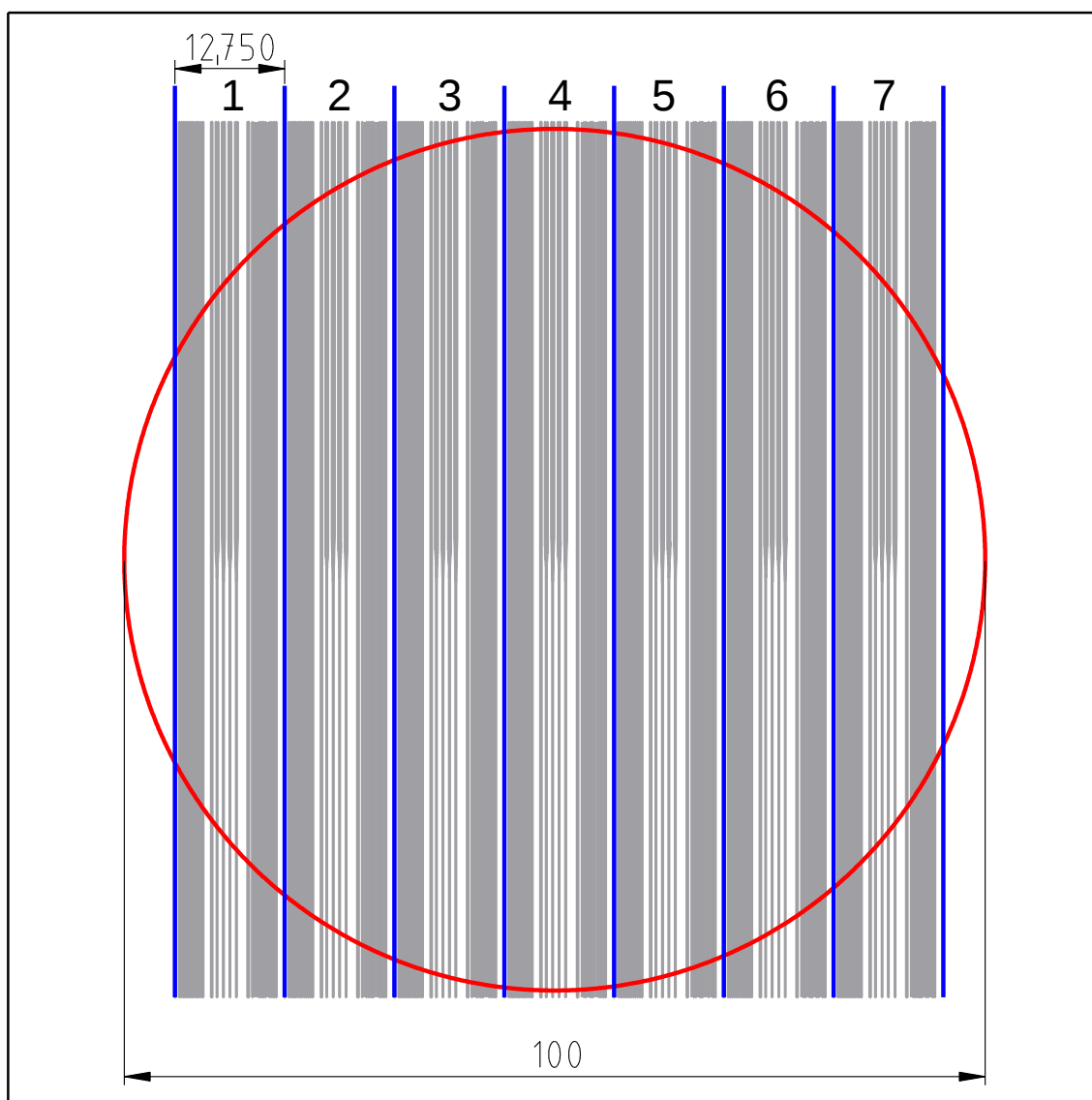
Obr. 4.13: Simulace rozložení výkonu v rozbočnici s módovým scramblerem pro parametry uvedené v tab. 4.6.

## 5 Návrh litografických masek

Navržené struktury v předchozí kapitole se vyráběly pomocí litografického procesu ve velkých skupinách na podložních sklíčkách, křemíkových 4" nebo 2" podložkách (waferech) a křemíkových destičkách 25x25 mm s vrstvou SiO<sub>2</sub>.

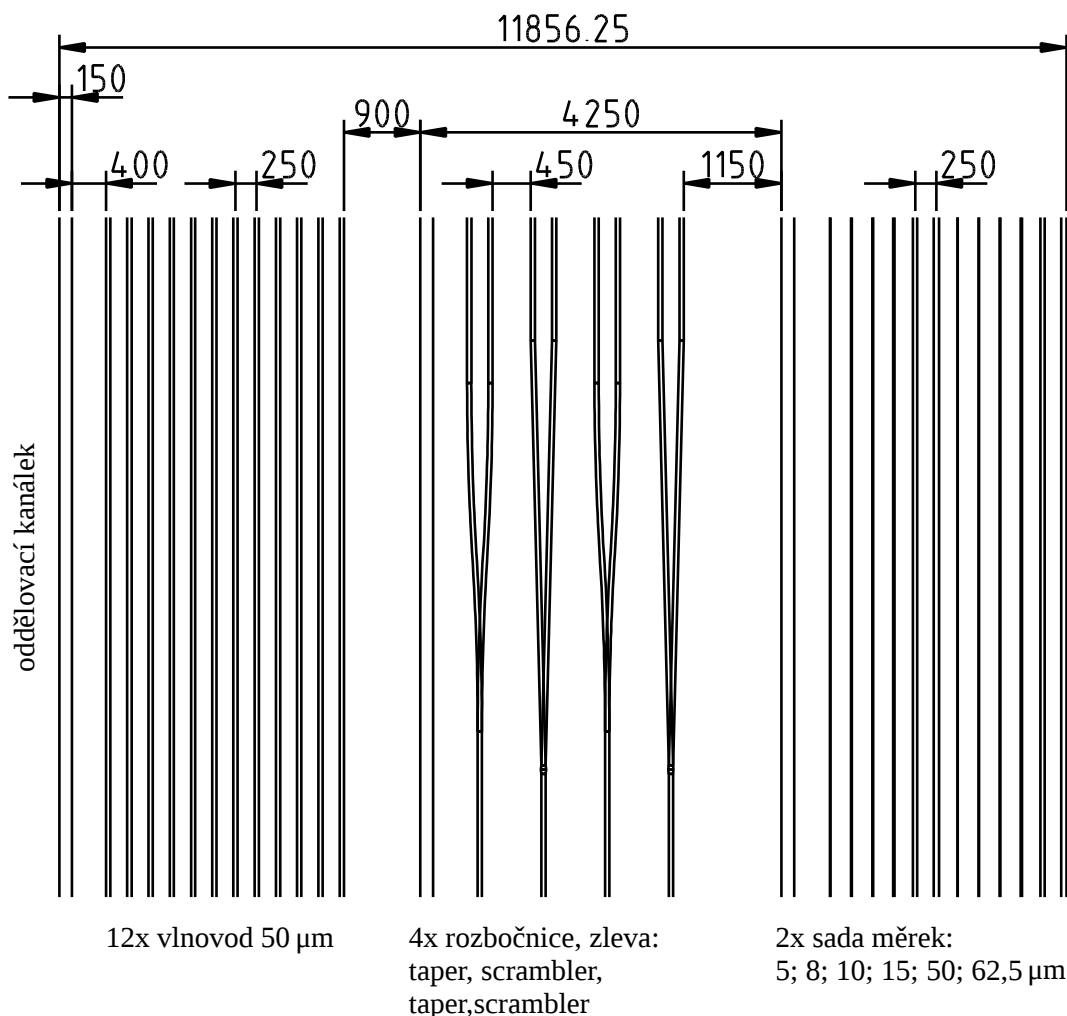
### 5.1 Návrh masky pro optický litograf

Struktury s materiály EpoClad/EpoCore byly vyráběny na 4" (100 mm) Si waferech a osvětčovány přes masku s navrženými strukturami pomocí optického UV litografu (PERKIN-ELMER 300HT Micralign). Zdrojem záření v optickém litografu je rtuťová nízkotlaká výbojka. Rozlišení použitého litografu je v řádu jednotek mikrometrů. Optický UV litograf využívá standardizované skleněné masky na kterých je tenká chromová vrstvička navržených motivů v měřítku 1:1. K výrobě této litografické masky je potřeba dodat rozvržení motivů ve formátu GDS2. Rozvržení masky je uvedené na následujícím obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Rozložení sekcí na navržené masce pro optický litograf.

Červený kruh zobrazuje velikost 4" podložky (waferu). Maska je rozdělena na 7 stejných sekcí. Jedna tato sekce dále obsahuje další 3 podsekcce vlnovodů, výkonových rozbočnic a měrek viz obr. 5.2. Měrky slouží ke zpětné analýze rozlišení litografu a posouzení kvality vzorku.

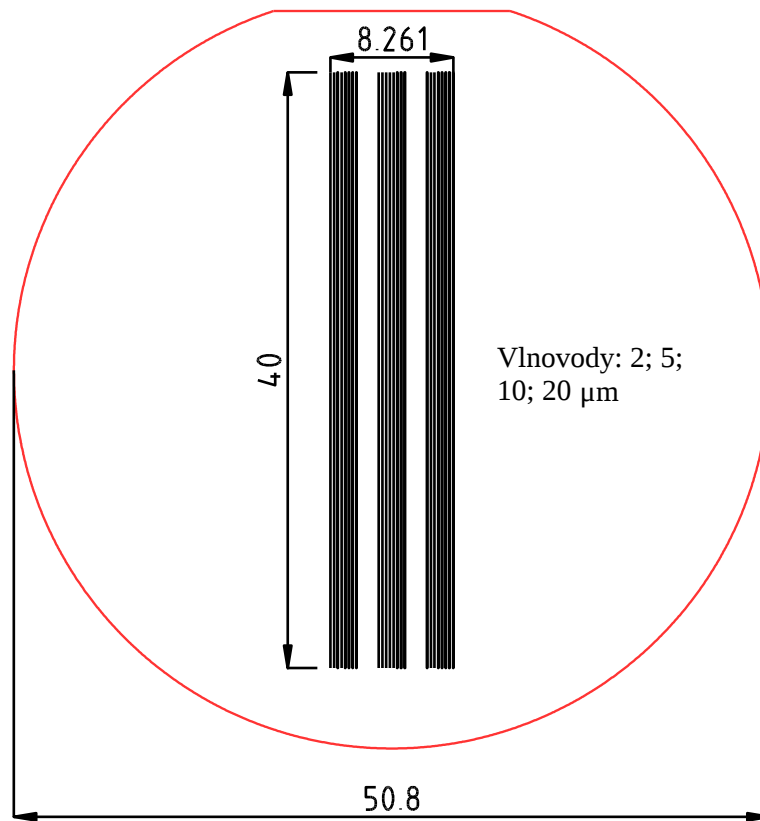


Obr. 5.2: Detail středu jedné sekce masky pro optický litograf (rozměry v μm).

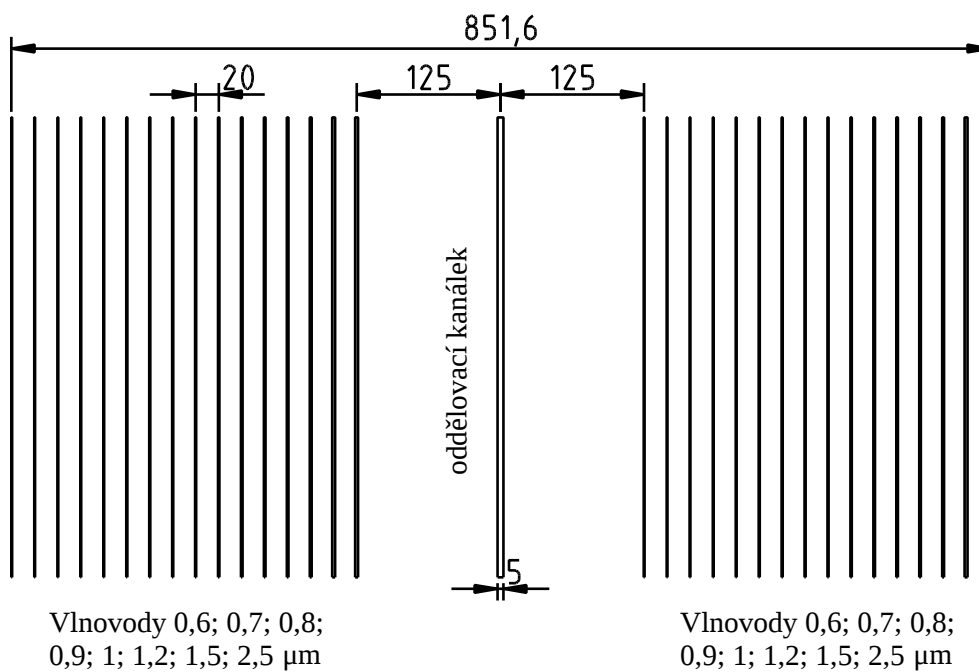
## 5.2 Návrh motivů pro depoziční testy prováděné laserovým litografem

Pro výrobu vlnovodů s materiály OrmoClear o rozměrech desetin a jednotek mikrometrů již rozlišení optického litografu nestačilo. Z tohoto důvodu se vzorky exponovaly pomocí laserového litografu (Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH DWL 66FS). Laserový litograf exponuje navržené struktury pomocí laseru, který je přes soustavu čoček fokusován přímo na vzorek. Při samotné expozici je vzorek umístěn na posuvné podložce ve všech osách, se kterou posouvá řídicí software podle zadaných dat struktur ve formátu GDS2, pod stacionárním fokusovaným paprskem laseru. Laserový litograf umožňuje expozici vzorků libovolné velikosti a tvarů omezenou jen velikostí posuvné podložky. Z možnosti expozice rovnou ze zadaných dat ve formátu GDS2 vedlo k návrhu různých rozložení struktur na exponovaném vzorku. Všechny používané návrhy jsou na přiloženém CD. Složitost návrhu rozložení struktur a jejich počet má zásadní vliv na dobu expozice.

Následující obrázky 5.3 a 5.4 ukazují příklady vybraných struktur.



Obr. 5.3: Návrh pro laserový litograf, Si/SiO<sub>2</sub> wafer 2".



Obr. 5.4: Detail návrhu pro laserový litograf, Si/SiO<sub>2</sub> podložka 25x25 mm.

## 6 Depoziční testy navržených struktur

Depoziční testy struktur probíhaly v laboratoři nanolitografie Katedry mikroelektroniky ČVUT FEL, laboratořích čistých prostor Ústavu fyziky kondenzovaných látek Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně a vědeckého centra CEITEC VUT.

Při depozičních testech vzorků se postupovalo podle doporučených postupů uvedených v datasheetech ke každému materiálu. Tyto doporučené postupy se dále během testů optimalizovaly vzhledem k technologickým možnostem.

### 6.1 Použité materiály pro depoziční testy

#### **Křemíkový substrát**

Desky (wafery s fazetou) normalizovaných rozměrů 4“ (100 mm) nebo 2“ (50 mm) z monokrystalu křemíku využívané ve výrobě integrovaných obvodů. Povrch waferu je vybroušen a vyleštěn s velmi vysokou přesností. Pro menší vzorky je možné wafer rozřezat pomocí diamantové pily na menší čtverce.

#### **Si podložky s vrstvou SiO<sub>2</sub>**

Jedná se o Si podložku na které je oxidací kyslíkem vytvořena 3 μm tenká transparentní vrstva oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub>. Vzhledem k vysoké ceně výroby SiO<sub>2</sub> vrstvy byly 4“ podložky nařezány na menší čtverce 25 x 25 mm.

#### **Skla**

Standardní mikroskopická podložní sklíčka o rozměrech 26 x 76 x 1,1 mm. Dále čtvercová skla 50 x 50 x 3mm a kulatá skla o průměru 70 mm.

#### **FR4**

Sklolaminát impregnovaný epoxidovou pryskyřicí používaný ve výrobě desek plošných spojů. Tloušťka laminátu 0,1mm s velmi jemnou strukturou vláken.

#### **Polyvinylalkohol (PVA)**

Polymerní látka využívaná jako rozpustná podložní vrstva pro výrobu samonosných vlnodů. V pevné formě bílá krystalická látka. Pro výrobu se rozpouští v demineralizované vodě při poměru 1 g na 25 ml vody.

#### **Polymery EpoClad a EpoCore**

Polymerní látky vyvinuté společností Micro Resist Technology GmbH. Přesné chemické složení polymerů je výrobním tajemstvím. Polymery jsou optimalizovány pro nejmenší útlum (0,2dB/cm) při vlnové délce 850 nm a vysokou odolnost proti tlaku a teplotě (> 230 °C). EpoCore je určený pro jádra vlnodů a EpoClad jako podložní nebo krycí vrstva [7].

#### **Polymery OrmoClear<sup>®</sup>**

OrmoClear<sup>®</sup> je název pro skupinu polymerů od společností Micro Resist Technology GmbH pro výrobu struktur s rozlišením do 100 nm. Přesné chemické složení polymerů je výrobním tajemstvím. Jednotlivé verze polymerů (FX, HI01 XP ...) se liší indexem lomu a změnou objemu. Polymery jsou po vytvrzení velmi dobře flexibilní a odolné krátkodobě vůči teplotě až 270°C [8].

#### **OrmoPrime<sup>®</sup> (MCC primer 80/20)**

Speciální látka používaná k ošetření povrchu substrátů pro zajištění lepší přilnavosti polymerů OrmoClear.



## **Vývojka OrmoDev®**

Látka používaná k rozpouštění výše uvedených polymerů při litografickém procesu [9].

## **6.2 Příprava planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear**

Depoziční testy těchto vzorků byly prováděny z důvodu následného měření jejich indexu lomu a optického útlumu. Tyto naměřené hodnoty byly použity pro návrh jednovodových vlnovodů SiO<sub>2</sub>/OrmoClear.

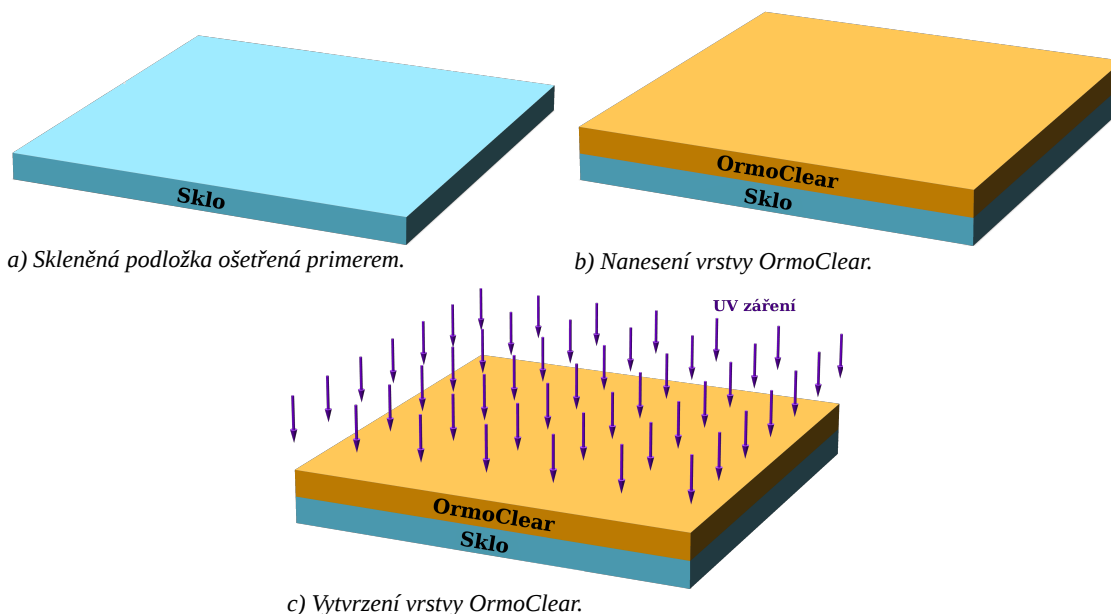
Vzorky mají jako podložní vrstvu použité různé druhy skel, na které byly nanášeny jednotlivé polymery OrmoClear, OrmoClear FX a OrmoClear HI01 XP.

### **Postup výroby vzorku:**

- 1) Rotační čištění podložního sklíčka pomocí acetonu a následně isopropylakoholu při otáčkách 3000 ot/min do vysušení.
- 2) Ošetření povrchu skla primerem OrmoPrime po dobu 60 s. Následné odstranění zbytku pomocí rotace 3000 ot/min po dobu 60 s viz obr. 6.1 a).
- 3) Zahřátí vzorku na teplotu 105-115°C po dobu 1-3 minuty a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.
- 4) Rotační lití vrstvy polymeru OrmoClear při 1000 ot/min po dobu 2 minut viz obr. 6.1 b).
- 5) Zahřátí vzorku na teplotu 80°C po dobu 2 minut a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.
- 6) Osvícení celého vzorku pod UV osvitkou (4x25W UV zářivka) po dobu 10 až 20 minut viz obr. 6.1 c).
- 7) Zahřátí vzorku na teplotu 130°C po dobu 10 minut, následné pozvolné zvýšení teploty na 150°C a ponechání vzorku na této teplotě 3h.

Poslední bod postupu výroby byl prováděn u některých vzorků ve dvou variantách, kdy jeden vzorek byl zahříván při atmosférickém tlaku (vzorek A) a druhý uvnitř vývěvy (vzorek B).

Zásadní kroky depozičního testu vzorků Sklo/OrmoClear je uvedena na následujícím obrázku.



Obr. 6.1: Postup depozičního testu vzorků Sklo/OrmoClear.

### 6.3 Příprava vlnodů $\text{SiO}_2$ /OrmoClear

Využití laserového litografu umožnilo expozici vzorků různých velikostí od 25 x 25 mm po 2“ a 4“. Substrátem byl vždy Si s vrstvou  $\text{SiO}_2$  sloužící jako podložní vrstva vlnodů. Depoziční testy těchto vzorků se prováděly pro různé nastavení expozice laserového litografu a všechny druhy materiálů OrmoClear.

#### Postup výroby vzorku:

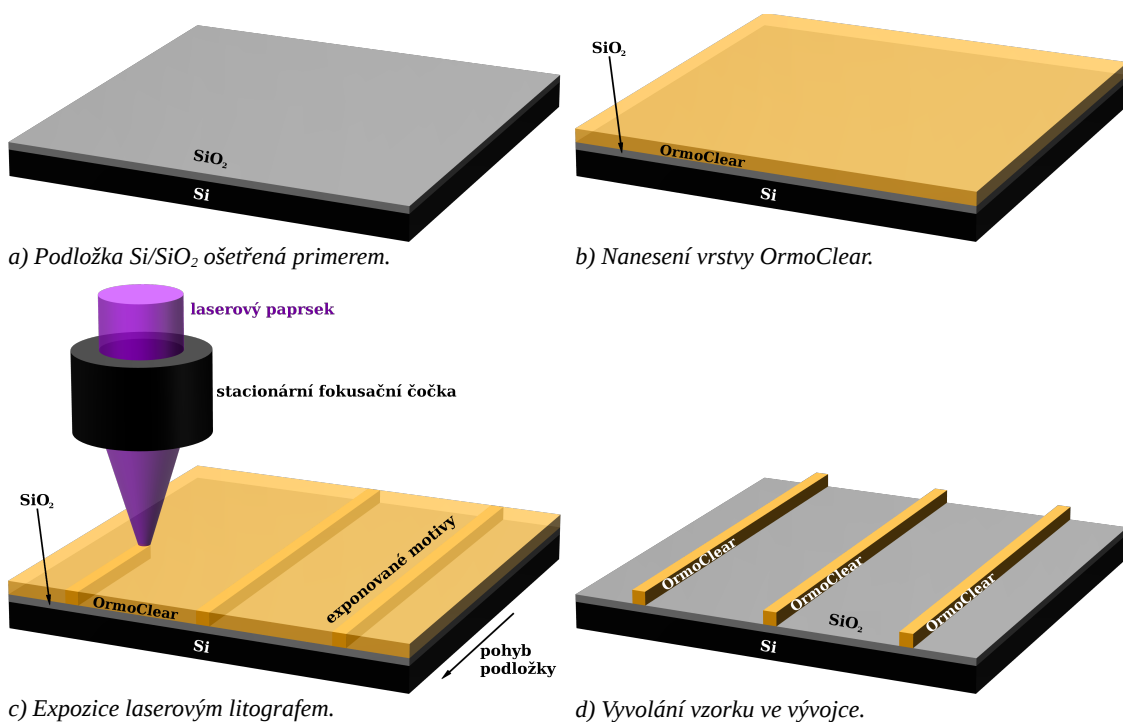
- 1) Rotační čištění podložky Si/ $\text{SiO}_2$  pomocí acetonu a následně isopropylalkoholu při otáčkách 3000 ot/min do vysušení.
- 2) Ošetření povrchu vzorku primerem OrmoPrime po dobu 60 s. Následné odstranění zbytku pomocí rotace 3000 ot/min po dobu 60 s viz obr. 6.2 a).
- 3) Zahřátí vzorku na teplotu 105-115°C po dobu 1-3 minuty a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.
- 4) Rotační lití vrstvy polymeru OrmoClear při 3000-6000 ot/min po dobu 2 minut obr. 6.2 b).
- 5) Zahřátí vzorku na teplotu 80°C po dobu 2 minut a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.
- 5) Expozice struktur pomocí laserového litografu (Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH DWL 66FS) obr. 6.2 c).

6) Zahřátí vzorku na teplotu 130°C po dobu 10 minut a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.

11) Vyvolání vzorku ve vývojce OrmoDev po dobu 60 s viz obr. 6.2 d).

12) Zahřátí vzorku na teplotu 150°C po dobu 3 hodin a následné pozvolné vychladnutí na pokojovou teplotu.

Jednotlivé kroky přípravy vycházejí z doporučení od výrobce uvedených v [9].



Obr. 6.2: Postup depozičního testu vzorku s materiály SiO<sub>2</sub>/OrmoClear.

## 6.4 Depoziční testy struktur EpoClad/EpoCore

Tyto vyrobené vzorky mají tři verze (viz obr. 4.5) lišící se substráty. Depoziční testy probíhaly jen na 4“ Si waferech z důvodu vakuového uchycení do optického litografu. Uvedený postup výroby je pro vzorek se substrátem Si/PVA.

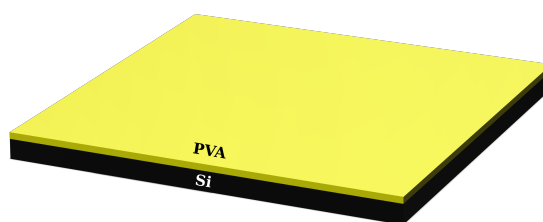
### Postup výroby vzorku:

- 1) Rotační čištění křemíkové podložky pomocí acetonu a následně isopropylakoholu při otáčkách 3000 ot/min do vysušení.
  - 2) Rotační lití vrstvy PVA při 560 ot/min po dobu 5 minut a následně uložení vzorku při pokojové teplotě na dobu minimálně 72 hodin z důvodu odpaření vody z PVA viz obr. 6.3 b).
  - 3) Rotační lití podložní vrstvy polymeru EpoClad při 1000 ot/min po dobu 5 minut viz obr. 6.3 c).
  - 4) Zahřátí vzorku na plotně při 50°C po dobu 10 minut, poté zvyšování teploty s rampou 10°C/min na 90 °C a ponechání při této teplotě opět po 10 minut. Následně pozvolné chladnutí vzorku opět na pokojovou teplotu.
  - 5) Expozice celé vrstvy EpoClad pod UV zářením (4x25W UV zářivka) po dobu 5 minut viz obr. 6.3 d).
  - 6) Zahřátí vzorku stejně jako v bodu 4).
  - 7) Rotační lití podložní vrstvy polymeru EpoCore při 550-560 ot/min po dobu 5 minut viz obr. 6.3 e).
  - 8) Zahřátí vzorku stejně jako v bodu 4).
  - 9) Expozice přes masku v optickém litografu PERKIN-ELMER 300HT Micralign viz obr. 6.4 a viz obr. 6.3 f). Doba osvitu se mění podle stáří rtuťové výbojky v rozmezí od 11 do 13 minut automatiky řídicí jednotkou litografu.
  - 10) Zahřátí vzorku stejně jako v bodu 4).
  - 11) Vyvolání vzorku ve vývojce OrmoDev po dobu 2 minut nebo déle podle stavu vyvolání vzorku viz obr. 6.3 g).
  - 12) Zastavení vývojky ponořením do isopropylakoholu a následným důkladným oplachem demineralizovanou vodou.
  - 13) Rotační sušení.
  - 14) Nanesení a vytvrzení krycí vrstvy EpoClad: provedení bodů 3), 4), 5) a 6) viz obr. 6.3 h).
  - 15) Řezání vzorku na požadované sekce. Výkresy pro řezání vzorků jsou uvedeny v příloze C.
- Jednotlivé kroky přípravy vycházejí z doporučení od výrobce uvedených v [10] a [11].

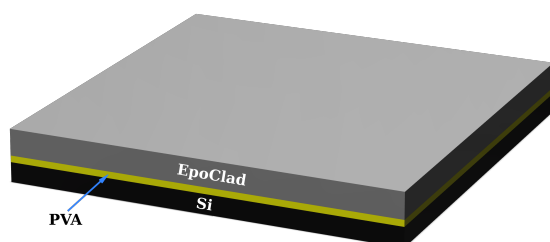
Zjednodušený postup výroby popisující kritické kroky výroby je na následujících obrázcích.



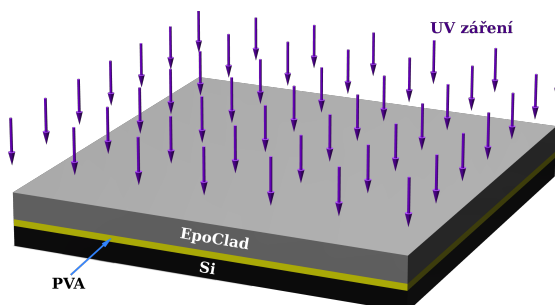
a) Si podložka.



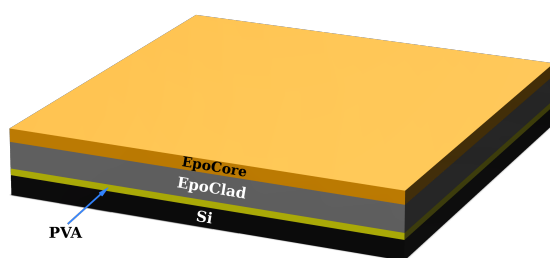
b) Nanosení vrstvy PVA.



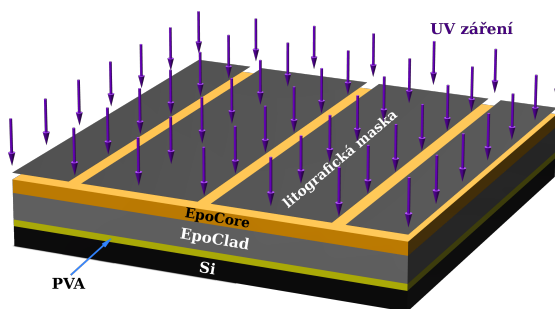
c) Nanosení podložní vrstvy EpoClad.



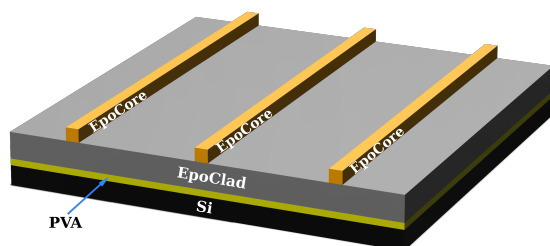
d) Vytvrzení podložní vrstvy EpoClad.



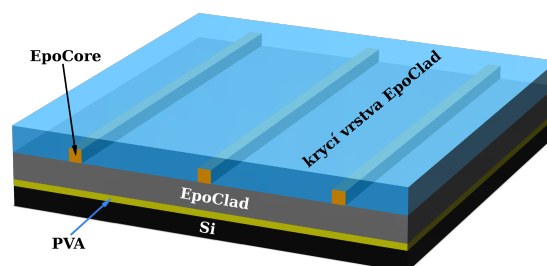
e) Vytvrzení vrstvy EpoCore.



f) Expozice vlnodů přes masku.

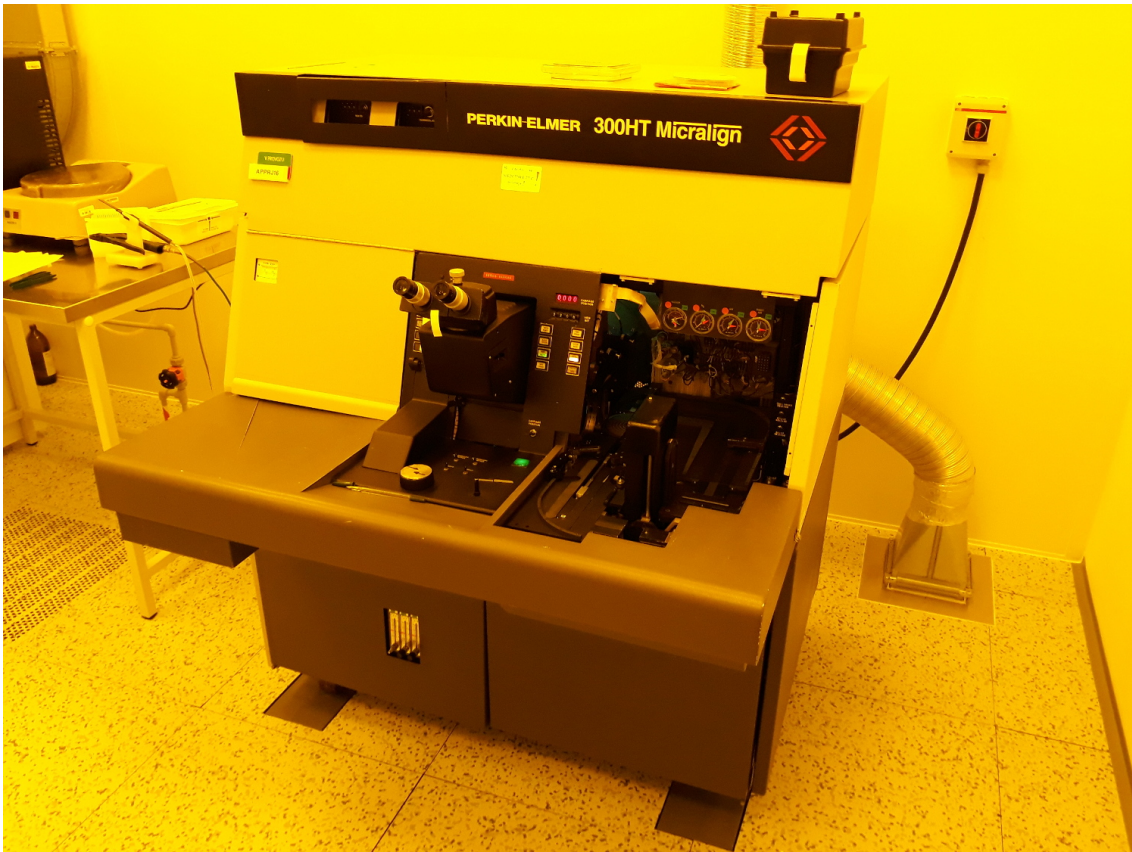


g) Vyvolání vzorku ve vývoje.



h) Nanosení krycí vrstvy EpoClad.

Obr. 6.3: Postup depozičního testu vzorků s materiály EpoClad/EpoCore.



*Obr. 6.4: Optický litograf použitý při depozičních testech v čistých prostorách na PŘF MU v Brně.*

## 7 Diagnostika vyrobených vzorků

Kapitola shrnuje použité diagnostické metody a jejich výsledky pro vyrobené vzorky planárních vlnovodů materiály OrmoClear na skleněné podložce, jednovidových vlnovodů SiO<sub>2</sub>/OrmoClear a mnohavidových struktur s materiály EpoClad/EpoCore.

### 7.1 Diagnostika planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear

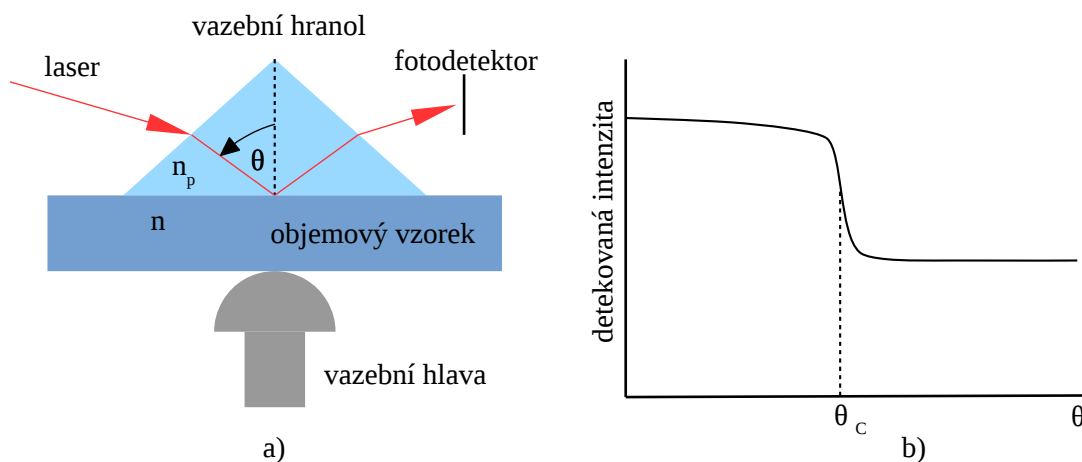
U těchto vzorků byl měřen index lomu, optický útlum a transmisní spektra v závislosti na vlnové délce.

#### Měření indexu lomu

Měření indexu lomu probíhalo na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze pomocí refraktometru Metricon 2010.

Refraktometr umožňuje měřit index lomu tenkých vrstev i objemových vzorků. V případě měření vyrobených vzorků Sklo/OrmoClear, kdy byla tloušťka od desítek mikrometrů až po desetiny milimetrů, bylo měření prováděno metodou pro objemové vzorky.

Princip měření indexu lomu u objemových vzorků je znázorněn na obr. 7.1 a) vychází z principu měření kritického úhlu totálního odrazu od rozhraní dvou materiálů. Vazební hranol o známém indexu lomu  $n_p$  je v kontaktu s měřeným materiálem a dopadá na něj paprsek ze stacionárního laseru. Hranol a měřený vzorek se otáčí vůči stacionárnímu paprsku laseru. Detektor detekuje záření odražené z důvodu totálního odrazu na rozhraní hranol/materiál až do kritického úhlu. Překročení kritického úhlu se detekuje poklesem intenzity na fotodetektoru viz obr. 7.1 b) [12].

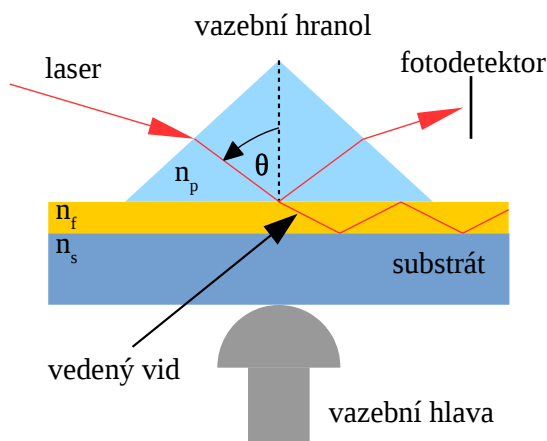


Obr. 7.1: a) Princip měření indexu lomu objemových vzorků, b) ukázka typického průběhu měřené intenzity fotodetektorem. (převzato z [12]).

Při známém indexu lomu hranolu  $n_p$  tedy můžeme dopočítat index lomu měřeného vzorku  $n$  podle následujícího vztahu:

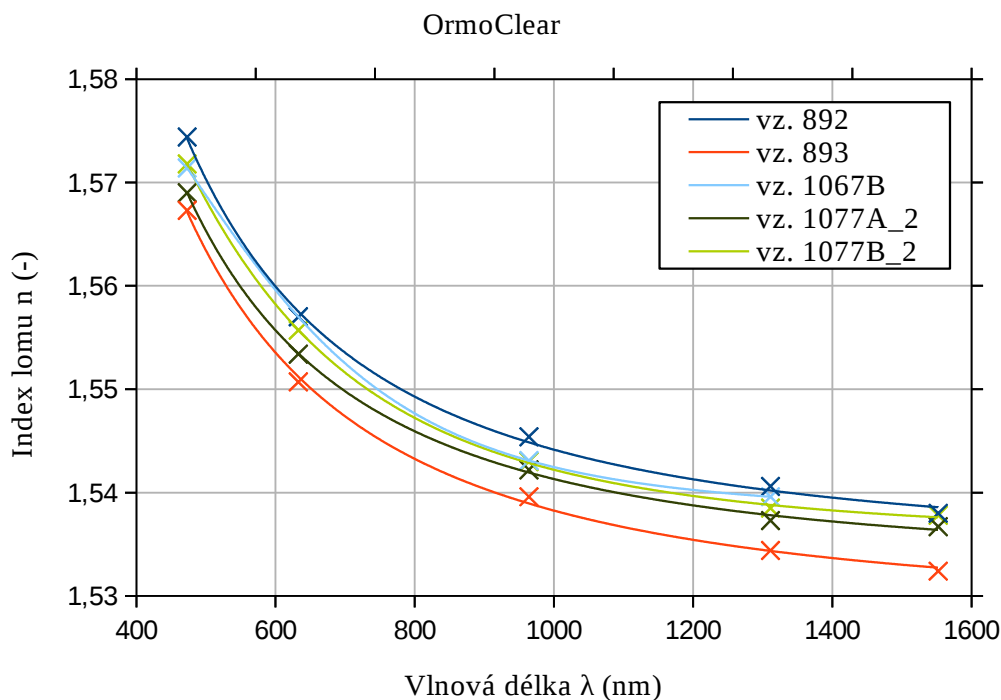
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n}{n_p}\right) \quad (7.1)$$

Stejný postup lze použít i pro měření indexu lomu tlustých vrstev. V případě tlusté vrstvy vytváří kritický úhel rozhraní hranolu/vrstva horní hranici úhlu, ve kterém se mohou vyskytovat vedené vidy ve vrstvě. Při zvětšování tloušťky vrstvy stejného indexu lomu se úhel při kterém nastává vedení prvního vidu vrstvou asymptoticky blíží kritickému úhlu definovaným vztahem 7.1. Při aproximaci, kdy budeme uvažovat úhel vedení prvního vidu ve vrstvě za kritický úhel  $\Theta_c$ , se dopustíme chyby měření méně než 0.004 pro vrstvu 3  $\mu\text{m}$ , 0.001 pro 5  $\mu\text{m}$  a 0.0003 pro 10  $\mu\text{m}$ . Tento přístup lze tedy aplikovat s dobrou přesností pro měření indexu materiálů o tloušťce od několika mikrometrů až po tloušťku objemových materiálů. Tato metoda měření se nazývá jednohranolová vidová spektroskopie. Tento způsob měření indexu lomu tlustých vrstev je znázorněn na následujícím obrázku 7.2 . Celý měřicí proces je plně automatizovaný [12].



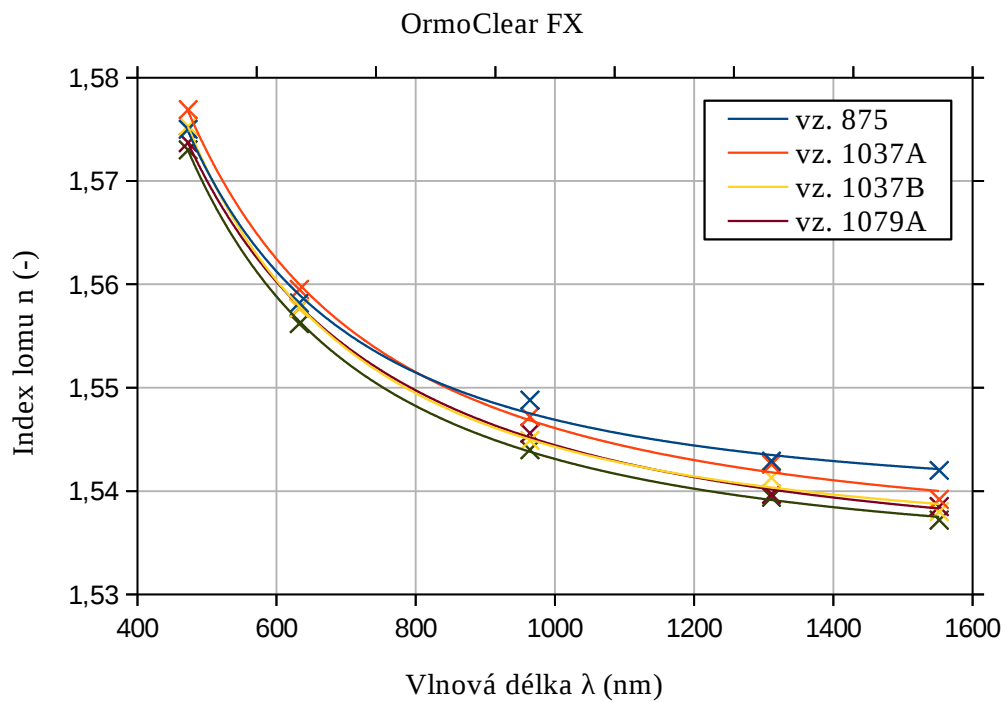
Obr. 7.2: Princip měření optických planárních vlnodů [12].

Měření indexu lomu vzorků planárních vlnodů probíhalo na vlnových délkách 473; 632,8; 964; 1311; 1552 nm pro všechny druhy materiálů OrmoClear a podložních sklíček pod vlnodnými vrstvami. Naměřené hodnoty na jednotlivých vlnových délkách byly proloženy a průměrovány viz následující obrázky 7.3 až 7.7.

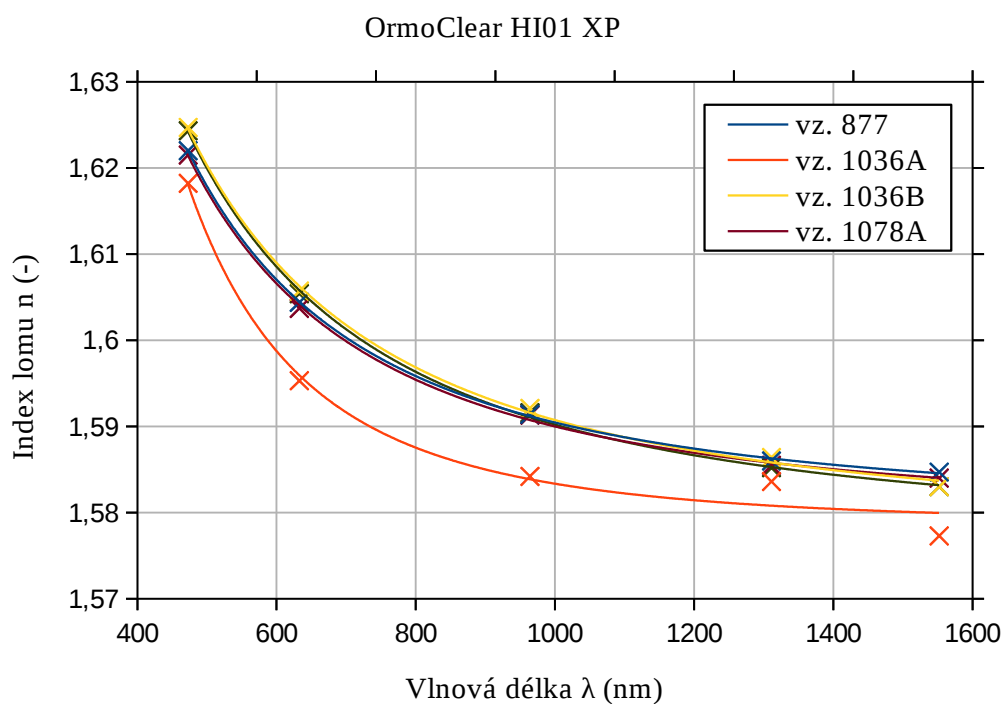


Obr. 7.3: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnodů Sklo/OrmoClear.

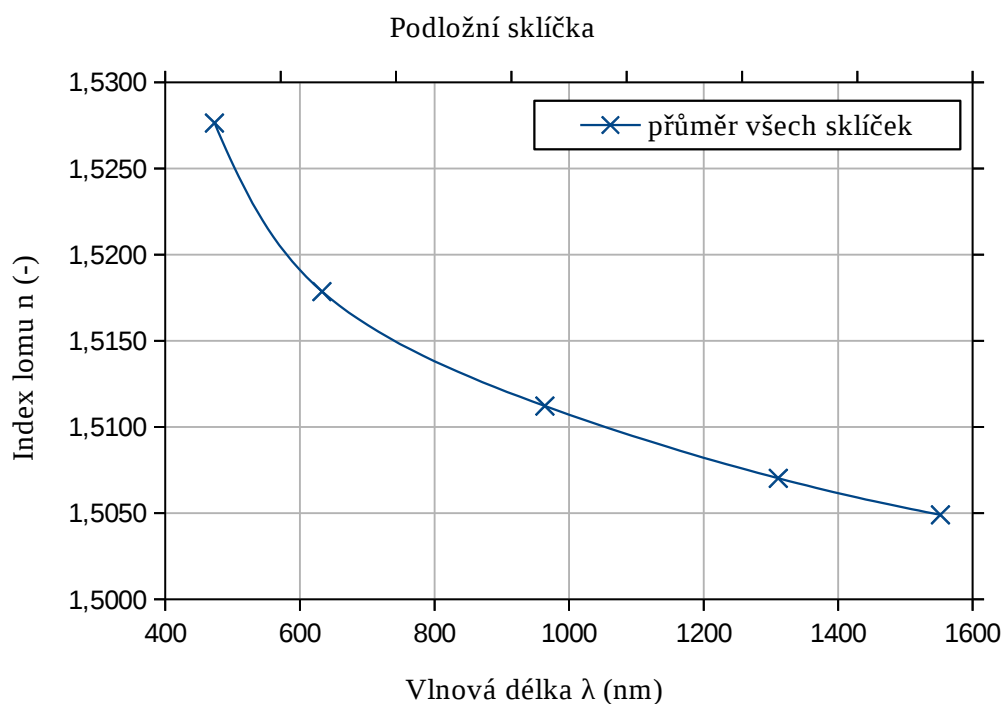




Obr. 7.4: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear FX.

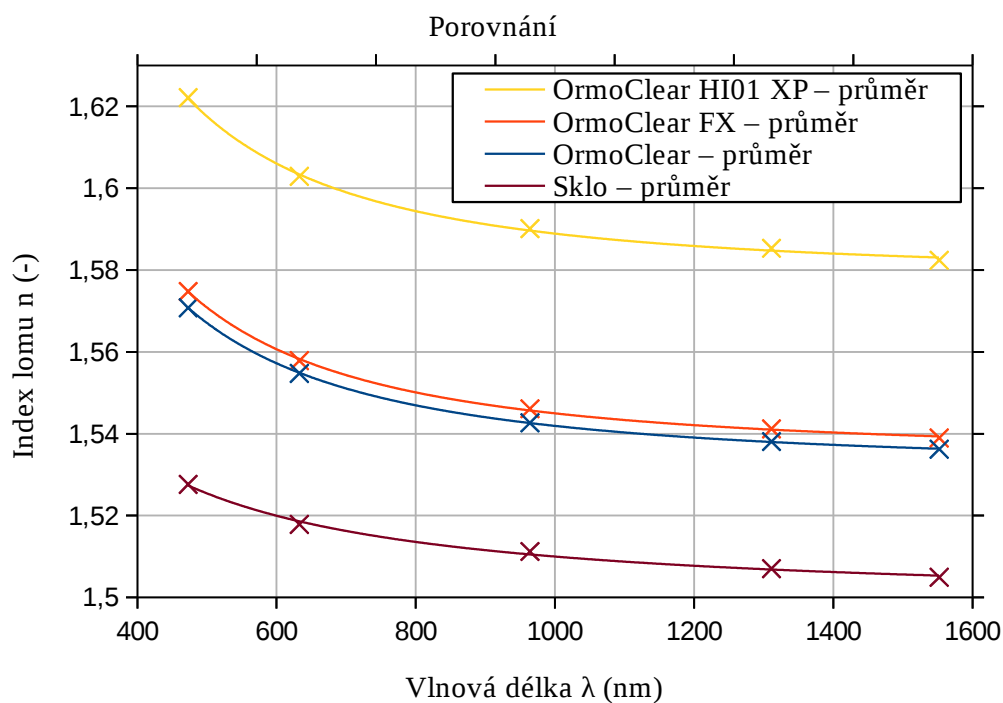


Obr. 7.5: Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear HI01 XP.



Obr. 7.6: Průměr všech naměřených hodnot indexu lomu podložních sklíček planárních vlnodů.

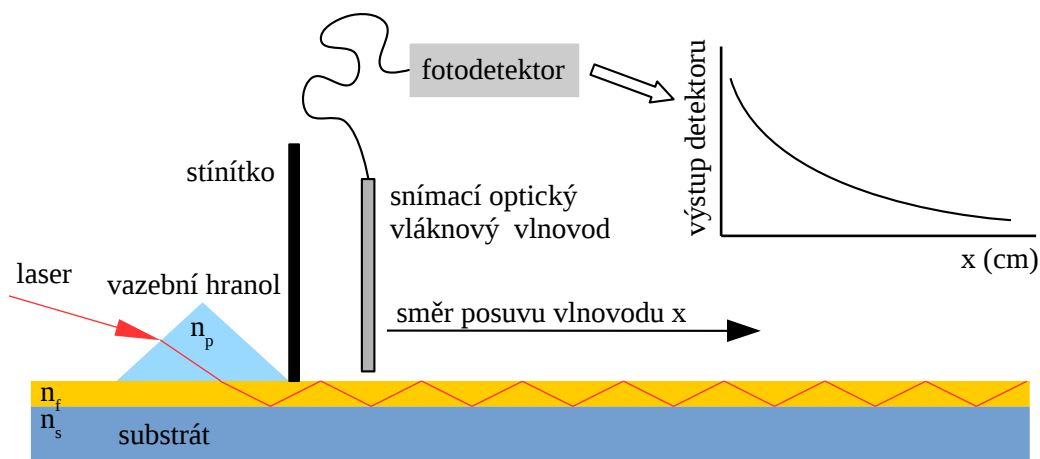
V posledním grafu jsou zobrazeny průměry jednotlivých indexů lomů všech polymerů OrmoClear a podložních sklíček.



Obr. 7.7: Porovnání hodnot indexu lomu materiálů planárních vlnodů.

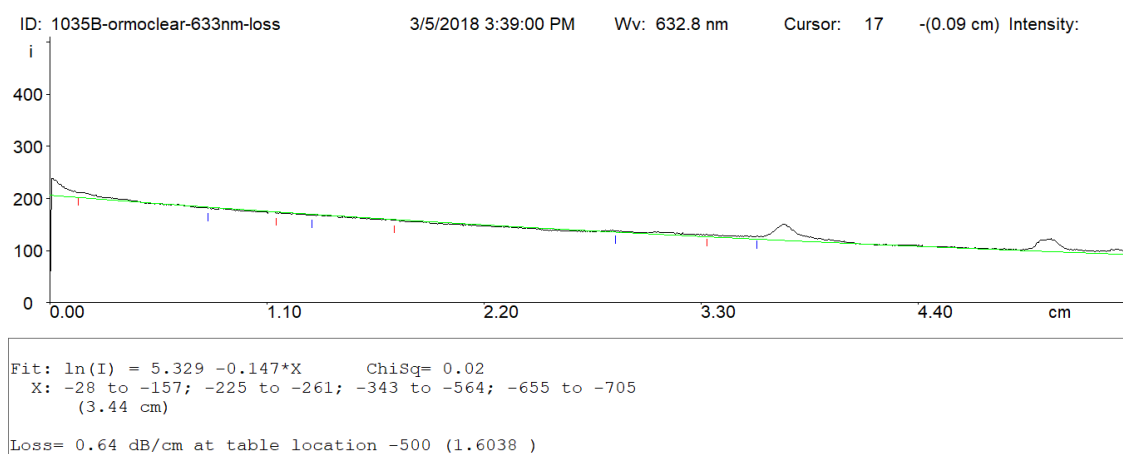
## Měření optického útlumu

Přístroj Metricon 2010 umožňuje také měřit optický útlum planárních vlnovodů metodou snímání optického záření rozptýleného u povrchu vlnovodu. Princip tohoto měření je znázorněn na obrázku 7.8. Do planárního vlnovodu je navázáno optické záření požadované vlnové délky pomocí vazebního hranolu. Snímací optické vlákno těsně skenuje povrch vlnovodu a snímá intenzitu rozptýleného optického záření. Snímaná intenzita se normuje ku intenzitě změřené nejbližší ke stínítku.



Obr. 7.8: Princip měření optického útlumu planárních vlnovodů, [13] a [14].

Pro měření je důležité, aby na vzorku nebyly poruchy a aby měl stejnou tloušťku vlnovodné vrstvy v daném úseku snímání optickým vlnovodem. Správně naměřená křivka má klesající charakter. Příklad výstupu ze softwaru pro zpracování naměřených dat přístrojem Metricon 2010 je na následujícím obrázku. Naměřená křivka útlumu se proloží přímkou a odečte se hodnota útlumu viz následující obrázek 7.9.



Obr. 7.9: Příklad výstupu z měření optického útlumu planárního vlnovodu OrmoClear (1035B).

Naměřené hodnoty a jejich průměry optického útlumu planárních vlnovodů Sklo/OrmoClear jsou pro vlnové délky 473; 632,8; 964; 1311 a 1552 nm uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty optického útlumu planárních vlnovodů.

		Útlum při dané vlnové délce (dB/cm)				
Vzorek	Struktura vzorku	473nm	632,8 nm	964 nm	1311 nm	1552 nm
874	Sklo/OrmoClear FX	-	-0,93	-1,79	-1,82	-2,66
875	Sklo/OrmoClear FX	-	-	-0,62	-	-
876	Sklo/OrmoClear HI01 XP	-	-0,62	-0,46	-	-
877	Sklo/OrmoClear HI01 XP	-	-0,63	-	-	-1,15
893	Sklo/OrmoClear	-	-0,35	-	-0,53	-
1035A	Sklo/OrmoClear	-0,25	-	-0,67	-3,22	-2,21
1035B	Sklo/OrmoClear	-0,24	-0,64	-0,63	-1,85	-2,21
1036A	Sklo/OrmoClear HI01 XP	-0,52	-1,51	-0,87	-0,92	-0,57
1036B	Sklo/OrmoClear HI01 XP	-0,20	-0,60	-0,60	-0,48	-1,16
1037A	Sklo/OrmoClear FX	-0,19	-0,67	-0,50	-1,42	-0,92
1037B	Sklo/OrmoClear FX	-0,20	-1,41	-0,81	-1,87	-2,98

Tab. 7.2: Průměrné hodnoty optického útlumu všech planárních vlnovodů.

		Průměrný útlum všech vzorků při dané vlnové délce (dB/cm)				
Struktura vzorků	473 nm	632,8 nm	964 nm	1311 nm	1552 nm	
Sklo/OrmoClear FX	-0,20	-0,78	-0,93	-1,70	-2,19	
Sklo/OrmoClear HI01 XP	-0,36	-0,84	-0,64	-0,50	-1,08	
Sklo/OrmoClear	-0,25	-0,50	-0,65	-1,87	-2,21	

Tab. 7.3: Nejnižší hodnoty optického útlumu ze všech planárních vlnovodů.

		Nejnižší naměřený útlum při dané vlnové délce (dB/cm)				
Struktura vzorků	473 nm	632,8 nm	964 nm	1311 nm	1552 nm	
Sklo/OrmoClear FX	-0,19	-0,67	-0,50	-1,42	-0,92	
Sklo/OrmoClear HI01 XP	-0,20	-0,60	-0,46	-0,48	-0,57	
Sklo/OrmoClear	-0,24	-0,35	-0,63	-0,53	-2,21	

Pro některé vzorky a vlnové délky se nepodařilo změřit útlum (viz pomlčky v tabulce), protože naměřené průběhy mají rostoucí charakter místo očekávaného klesajícího. Nejmenší naměřený útlum  $-0,19$  dB/cm při vlnové délce 632,8 nm je u vzorku Sklo/OrmoClear FX. Z průměrovaných hodnot vyplývá, že OrmoClear HI01 XP má menší optický útlum i při delších vlnových délkách než zbylé dva materiály OrmoClear. Veškeré naměřené průběhy jsou na přiloženém CD.

## Měření transmisních spekter

Transmise vzorků při různých vlnových délkách byla měřena pomocí spektrometru Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR (viz obr. 7.10) na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Spektrometr umožňuje měřit v rozsahu vlnových délek od 185 do 3300 nm s maximálním rozlišením 0,1 nm. Pro pokrytí celého spektra vlnových délek má spektrometr tři druhy detektorů: fotonásobič pro ultrafialové a viditelné spektrum, InGaAs a chlazený PbS pro blízké infračervené spektrum.

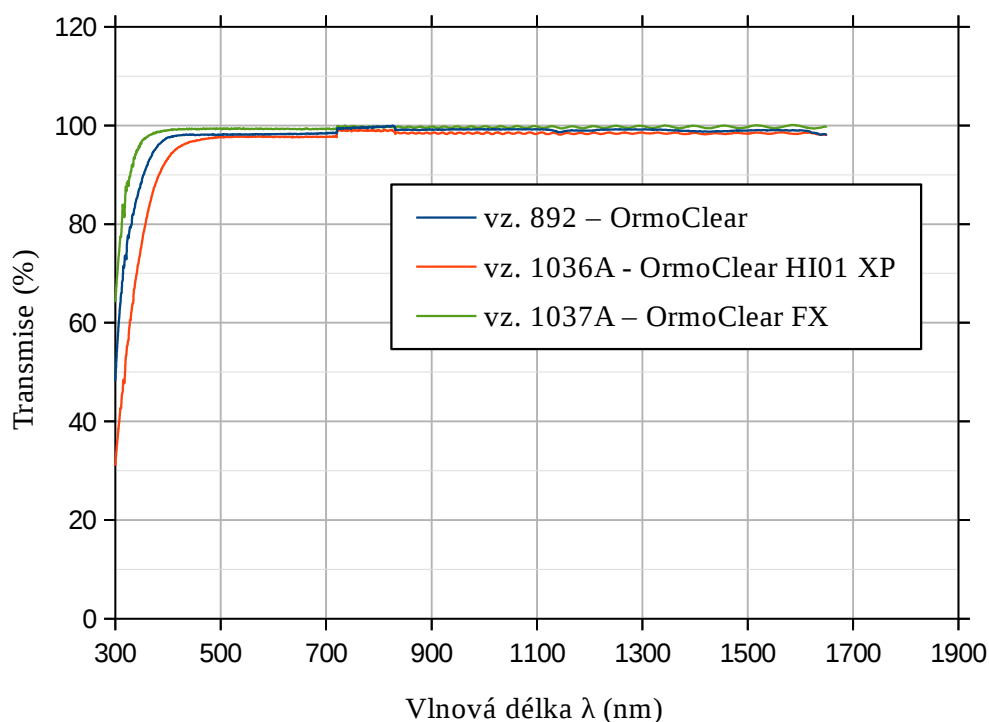
Vysoce výkoný dvojitý monochromátor v přístroji umožňuje měření při velmi nízkých intenzitách světla (0,00005% maxima při 340 nm) [15].

Při měření prochází světlo z širokopásmového zdroje přes dvojitý monochromátor a následně přes měřený vzorek materiálu na fotodetektor, který měří úroveň dopadajícího záření.



Obr. 7.10: Spektrometr Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR (převzato z [15]).

Měření transmise v závislosti na vlnové délce bylo provedeno v rozsahu vlnových délek záření 300 až 1650 nm viz následující obrázek 7.11.



Obr. 7.11: Naměřené absorpce záření v závislosti na vlnové délce u materiálů OrmoClear.

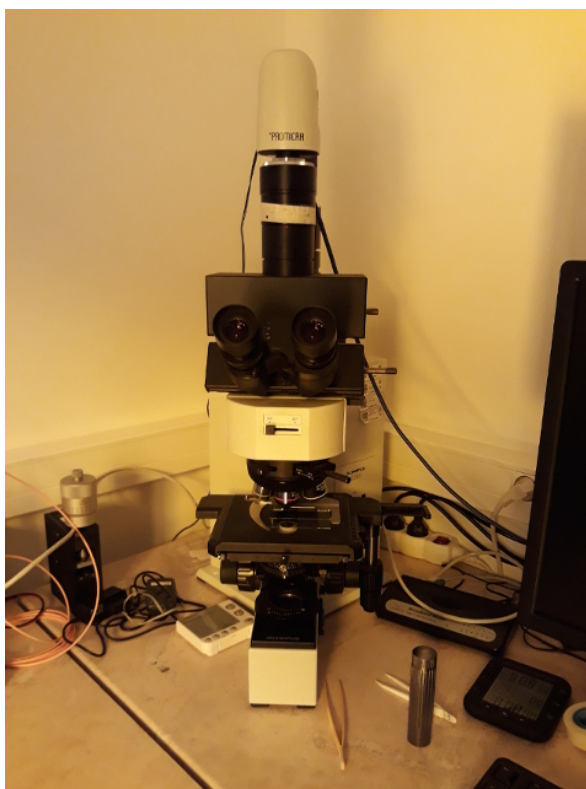
Všechny tři materiály jsou podle naměřených hodnot vhodné pro použití již od vlnových délek 400 nm čímž se potvrzují údaje uvedené výrobcem v datových listech.

## 7.2 Diagnostika jednovidových vlnodů $\text{SiO}_2/\text{OrmoClear}$

Vzorky byly nejprve kontrolovány pod mikroskopem. Následně měřeny jejich profily pomocí profilometru, pro zjištění tloušťky vrstev materiálů OrmoClear v závislosti na otáčkách při jejich rotačním lití na podložku  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ .

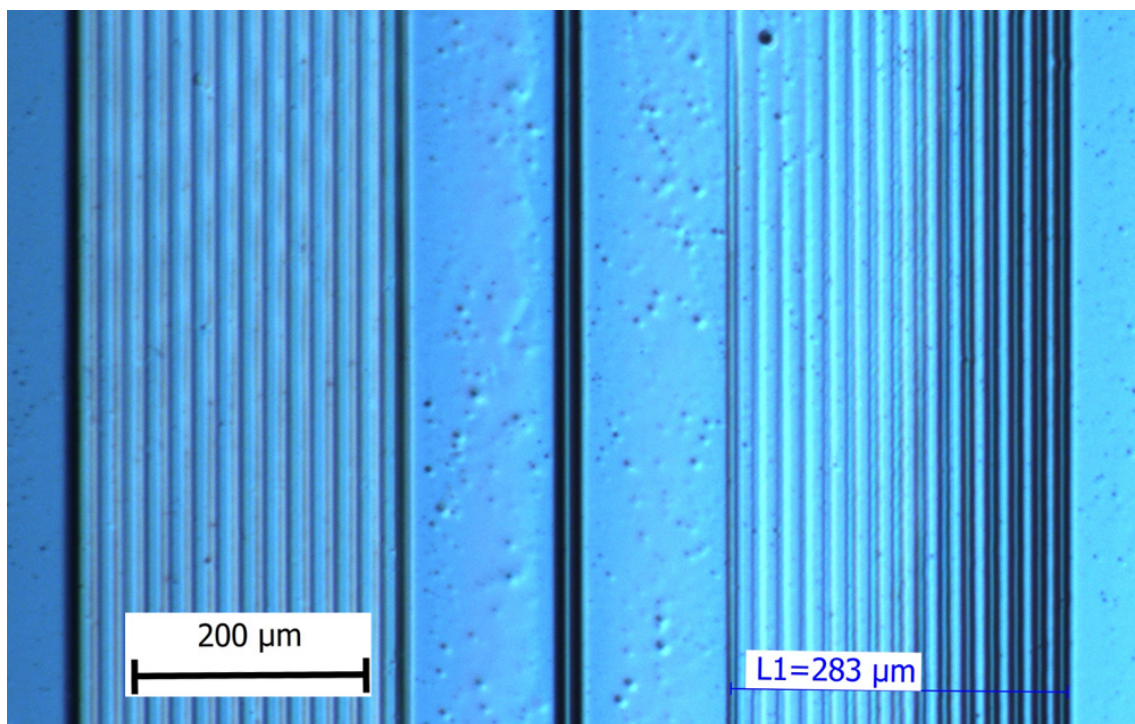
### Optická kontrola

Cílem optické kontroly bylo celkové vyhodnocení kvality vyrobených vzorků. K optické kontrole byl použit mikroskop Olympus BX60 v laboratoři nanolitografie Katedry mikroelektroniky ČVUT FEL v Praze viz obr. 7.12. Součástí mikroskopu je kamera, která umožňuje snímat zobrazené scény a ukládat je do souborů jpeg. Software ke kameře umožňuje měřit geometrické rozměry při nastaveném zvětšení mikroskopu.



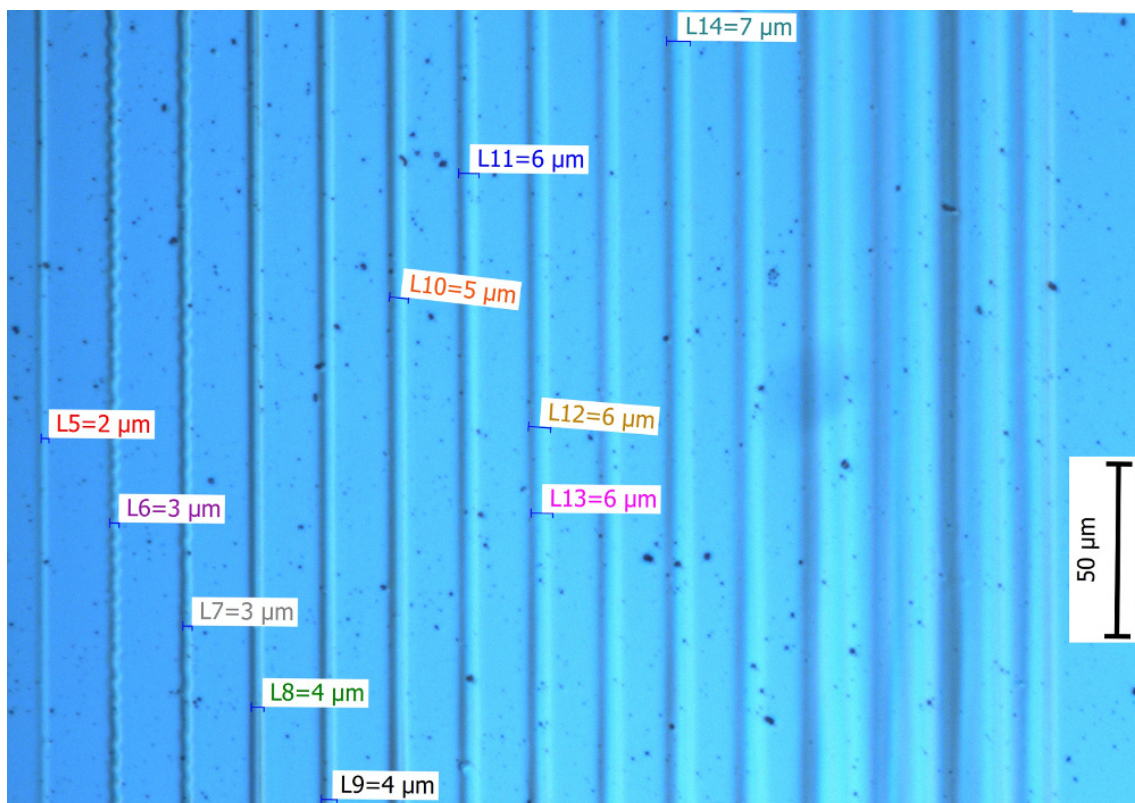
*Obr. 7.12: Mikroskop Olympus BX60 v laboratoři nanolitografie Katedry mikroelektroniky ČVUT FEL.*

Následující sada fotek zobrazuje vybrané podařené i nepodařené vyrobené vzorky.

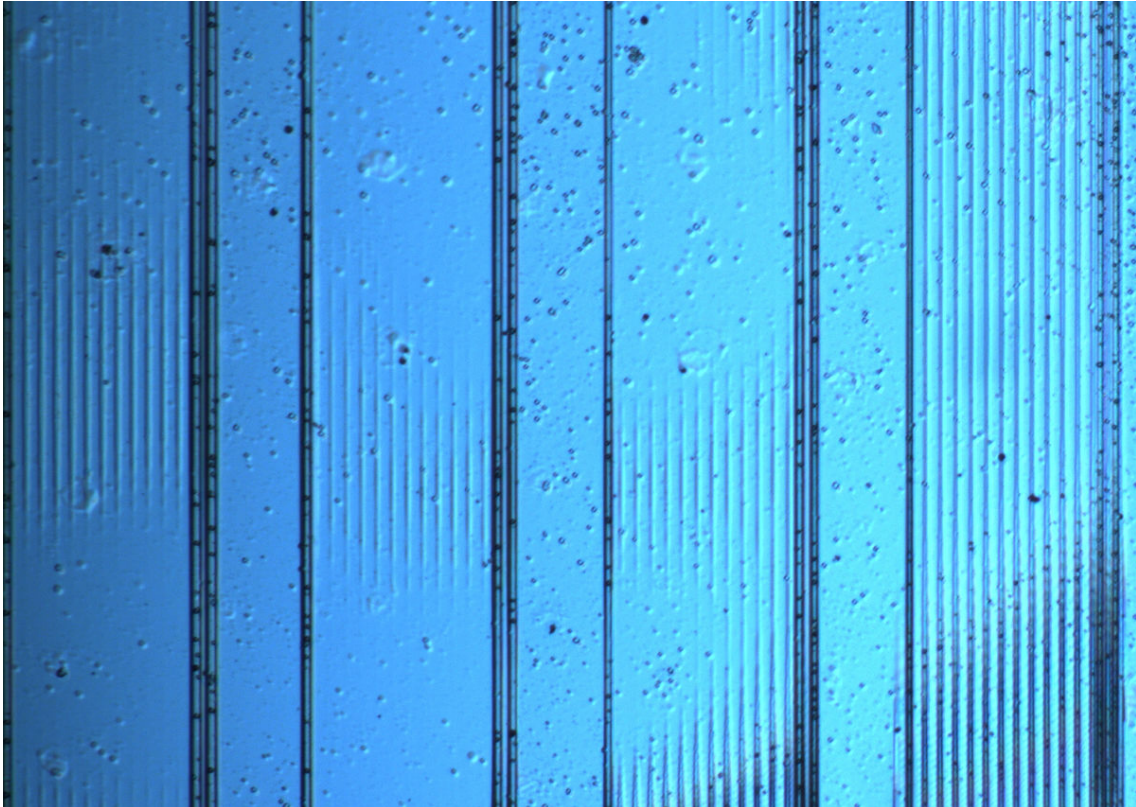


Obr. 7.13: Detail vlnovodů  $\text{SiO}_2/\text{OrmoClear}$  vz. 884 vyrobených podle masky viz obr. 5.4.

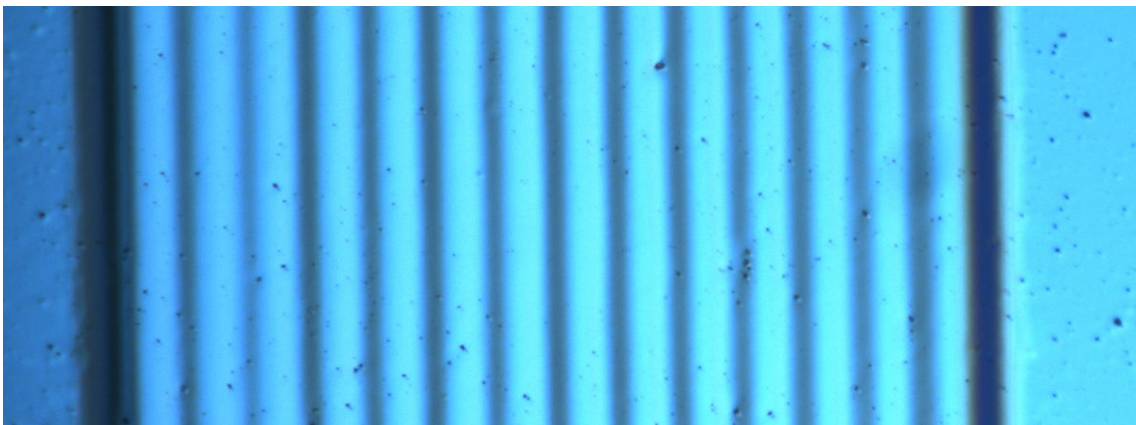
Z obrázku 7.14 je patrné, že nejmenší vyrobený vlnovod, který se podařilo vyvolat, měl šířku 2 μm.



Obr. 7.14: Detail vyvolaných vlnovodů  $\text{SiO}_2/\text{OrmoClear}$  vz. 888.



Obr. 7.15: Špatně exponovaný a vyvolaný vzorek vlnovodů  $\text{SiO}_2/\text{OrmoClear 891}$ .



Obr. 7.16: Detail špatně vyvolaných vlnovodů vz.  $\text{SiO}_2/\text{OrmoClear 884}$ .

Z fotek vyrobených vzorků je patrné, že při použitých otáčkách rotačního lití 3000 až 6000 ot/min je tloušťka vrstev příliš velká pro vlnovody menší než  $2\ \mu\text{m}$  a dojde k jejich utržení nebo rozpuštění ve vývojce.

U všech vyrobených vzorků byla zjištěna velká míra nerovnoměrnosti tlouštěk vlnovodů viz obr. 7.15. Na vzorcích jsou kruhová místa, kde došlo po vyvolání ve vývojce ke kompletnímu odstranění vrstvy vlnovodů, nebo naopak místa kde je vrstva příliš tlustá a vlnovody nejsou dobře vyvolány viz obr. 7.16.

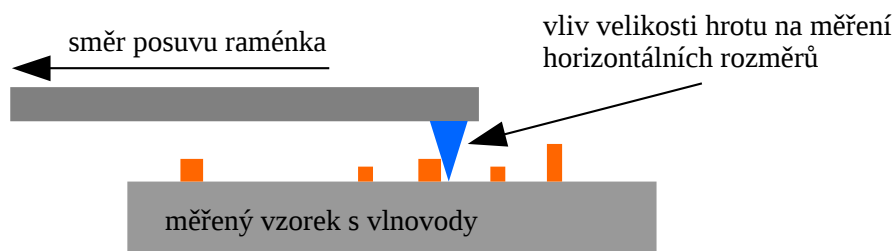
Tyto nerovnosti byly s největší pravděpodobností způsobeny při expozici laserovým litografem, který využívá pro měření vzdálenosti fokusovací hlavy a zaostření metodu měření tlaku vzduchu mezi exponovaným vzorkem a fokusovací hlavou litografu. Z těchto důvodů nebylo u vzorků možné změřit jejich optický útlum.



## Měření profilů vlnovodů

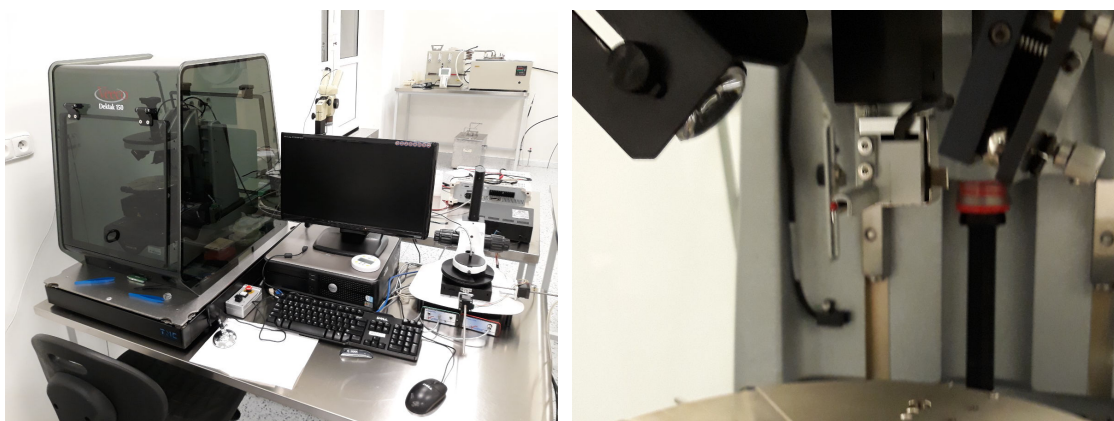
Pro zjištění rozdílů výšek vlnovodů při použitých otáčkách rotačního lití materiálu OrmoClear bylo provedeno měření na profilometrech Veeco Dektak 150 na PřF MU v Brně a Taylor Hobson na Katedře elektrotechnologie ČVUT FEL v Praze.

Princip měření spočívá ve skenování měřeného povrchu vzorku hrotem (stylusem), který přesně kopíruje jeho tvar viz obr. 7.17. Pohyb hrotu, který je na raménku a kopíruje povrch se vyhodnocuje pomocí LVDT transformátoru (linear variable differential transformer). Na hodnoty horizontálních rozměrů má vliv samotná tloušťka použitého skenovacího hrotu, u tohoto měření nás však především zajímají rozměry ve vertikálním směru.



Obr. 7.17: Princip skenování povrchu profilometrem [13].

Měřicí přístroj Dektak 150 (obr. 7.18) je velmi přesný laboratorní profilometr určený k měření povrchu s rozlišovací schopností až jednotek angstromů v závislosti na použitém skenovacím hrotu. Přístroj umožňuje nastavit různé parametry a způsoby měření jako jsou například: přítlačná síla měřicího hrotu na měřený povrch, délka měřeného úseku, rychlost posuvu hrotu, citlivost, rozsah, různé druhy vyměnitelných skenovacích hrotů lišící se tvarem a rádiusem atd. Zaměřování požadovaného místa měření se provádí pomocí kamery se záměrným křížem. Z těchto důvodů je profilometr umístěn v čistých prostorách.



a) Celé měřicí pracoviště s Dektak 150.

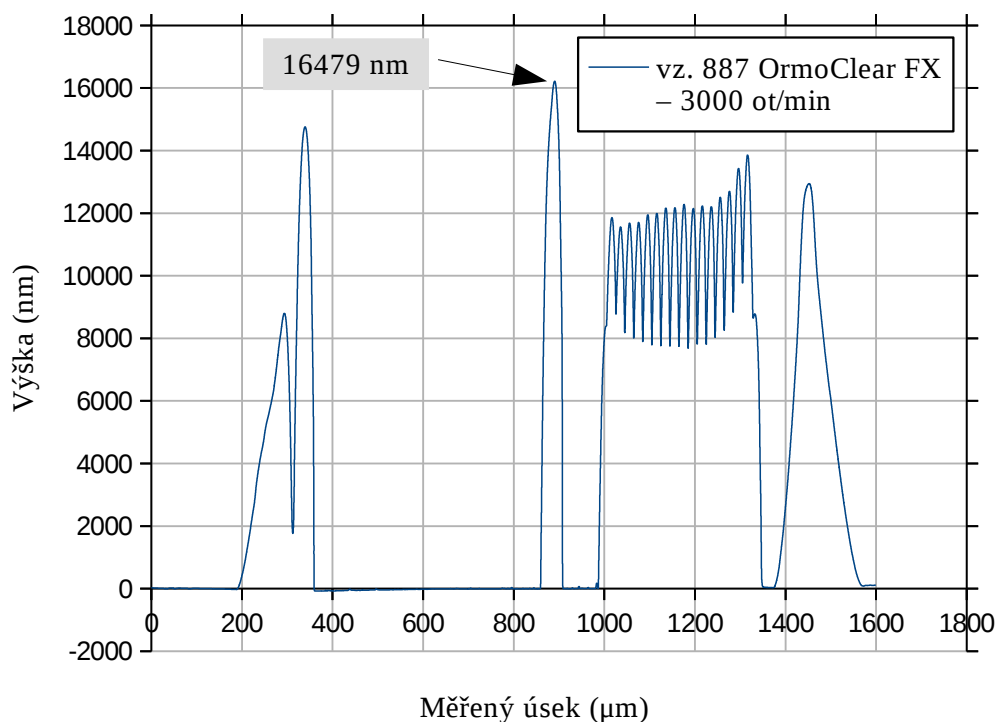
b) Detail skenovacího stylusu.

Obr. 7.18: Měřicí pracoviště s Dektak 150 v čistých prostorách na PřF MU v Brně.

Před měřením je nutné vzorek přibližně vyrovnat do kolmé polohy vůči měřicímu hrotu pomocí mikrometrických posuvů, přesná korekce se provede již pomocí vyhodnocovacího softwaru. Pomocí vyhodnocovacího softwaru můžeme také provádět velmi přesná měření výšek, jejich rozdílů apod.

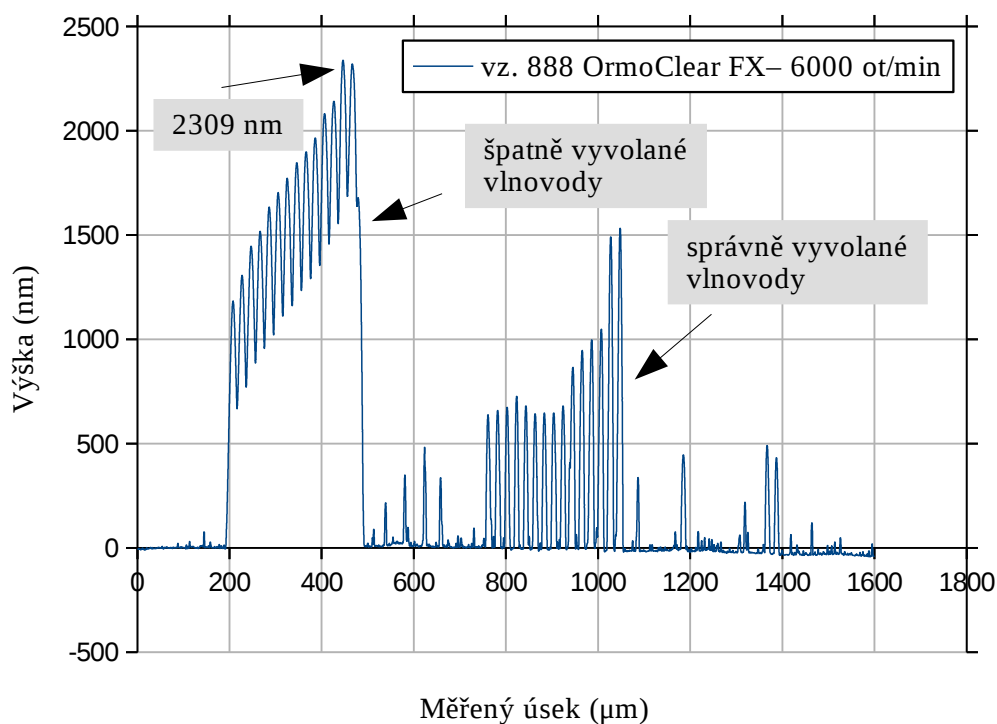
Profilometr Taylor Hobson je levnější varianta s menší přesností a rozlišením používaná zejména v průmyslu například v metalurgii pro vyhodnocení drsnosti povrchů.

Vzhledem k velkému počtu naměřených profilů a výšek vrstev jsou zde uvedeny jen dva příklady pro porovnání vzorků na které byly nanášeny vrstvy OrmoClear FX při 3000 a 6000 ot/min. Na obrázku 7.19 je profil vlnodů vzorku 877 pro nanášení vlnovodné vrstvy při 3000 ot/min. Nejvyšší bod v profilu má výšku **16479 nm**.



Obr. 7.19: Naměřený profil vlnodů na vzorku 877 OrmoClear FX.

Na obrázku 7.20 je profil vlnodů vzorku 888 pro nanášení vlnovodné vrstvy při 6000 ot/min. Nejvyšší bod v profilu má výšku **2309 nm**.



Obr. 7.20: Naměřený profil vlnodů na vzorku 888 OrmoClear FX.

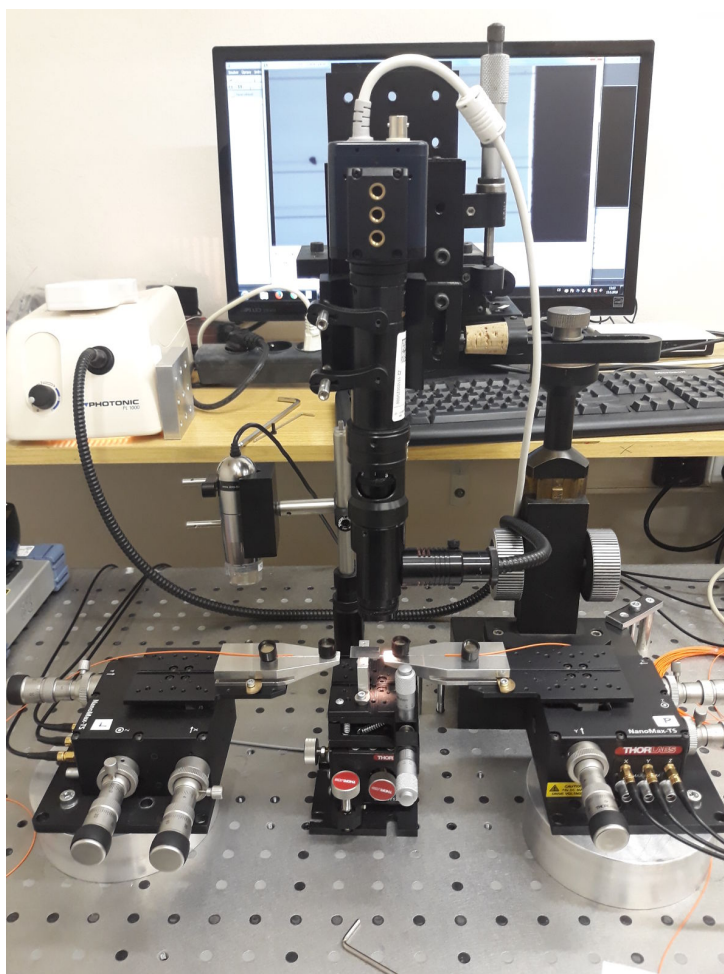
Z naměřených profilů vzorku 877 a 888 na které byly nanášeny vrstvy OrmoClear FX při otáčkách 3000 a 6000 ot/min je patrný velký rozdíl v jejich maximální výšce, který činí cca 14  $\mu\text{m}$ . U vzorků nanášených při 3000 ot/min také nedošlo k řádnému vyvolání vlnovodů z důvodu příliš tlusté vlnovodné vrstvy při dané expozici. Naměřené profily všech vzorků pomocí profilometrů Dektak 150 a Taylor Hobson jsou na přiloženém CD.

### 7.3 Diagnostika struktur s materiály EpoClad/EpoCore

Nejprve byly vzorky kontrolovány pod mikroskopem za účelem výběru nejkvalitněji vyrobených struktur pro následné měření optického útlumu u mnohavidových vlnovodů metodou dvou délek a výkonového dělení u výkonových rozbočnic.

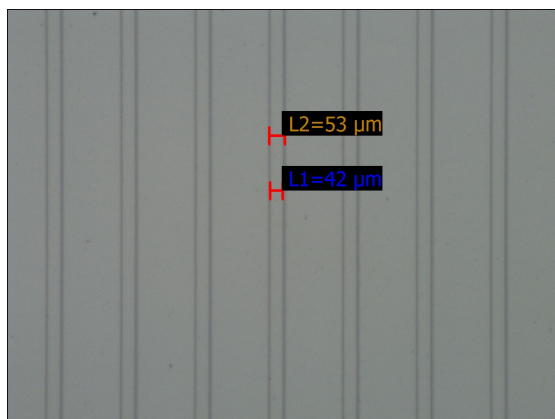
#### Optická kontrola vyrobených struktur

K optické kontrole struktur EpoClad/EpoCore byla použita kamera Artcam s optikou Olympus C-mount Zoom optics 7x v laboratoři PLANIO (Laboratoř planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur) na Katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze viz obr. 7.21. Software dostupný ke kameře umožňuje provádět měření rozměrů při nastaveném zvětšení a snímat fotografie ve formátu jpeg.

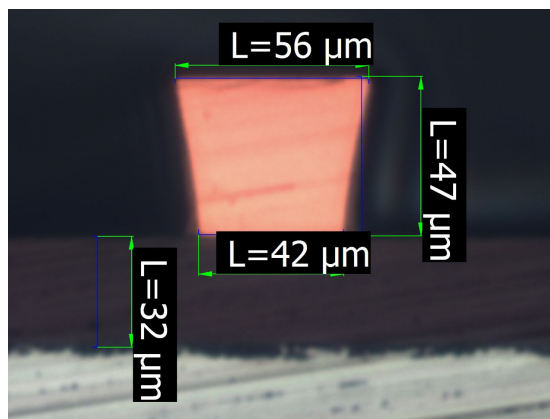


Obr. 7.21: Kamera Artcam s optikou Olympus C-mount Zoom optics 7x.

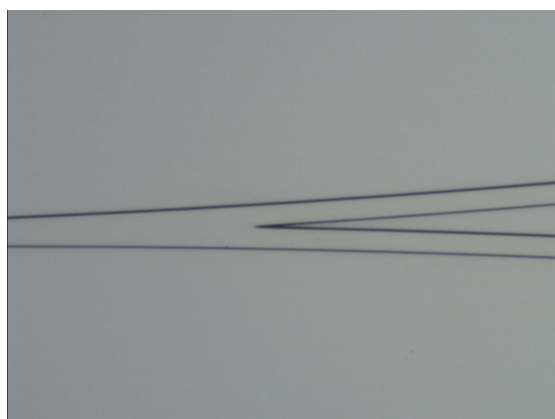
Pro další měření se vybíraly z celého vyrobeného vzorku (4" substrát) jen ty části, které obsahovaly struktury bez zjevných viditelných vad jakými jsou například vzduchové bubliny, prachové částice, přerušování, špatně vyvolané části ve vývojcce a různé nerovnosti ve vlnovodné oblasti. Zvláštní důraz byl kladen na optickou kontrolu vlnovodů v jejich řezu (čela vlnovodu). Při této kontrole byly vyřazeny vzorky, které byly příliš podleptané při procesu vyvolání ve vývojcce nebo porušeny při řezání vzorku na jednotlivé sekce. Následující obrázek 7.22 zobrazuje příklady kvalitních vyrobených vzorků vhodných pro další měření.



a) Mnohavidové vlnovody 50  $\mu\text{m}$ .



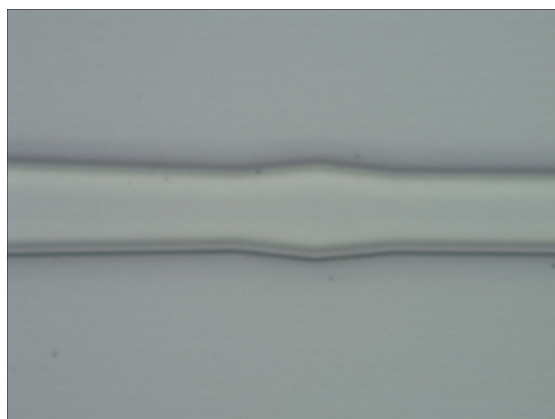
b) Čelo vlnovodu 50  $\mu\text{m}$ .



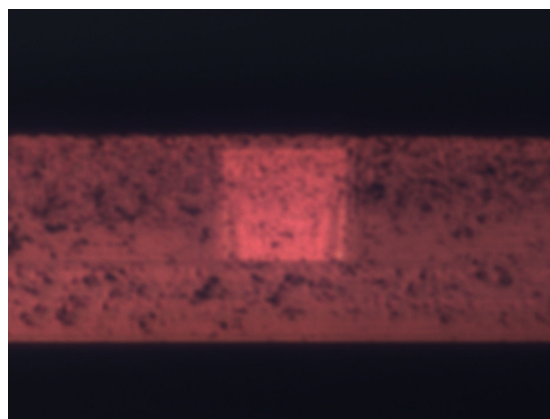
c) Střed rozbočnice.



d) Čela výstupních vlnovodů rozbočnice.



e) Módový scrambler rozbočnice.



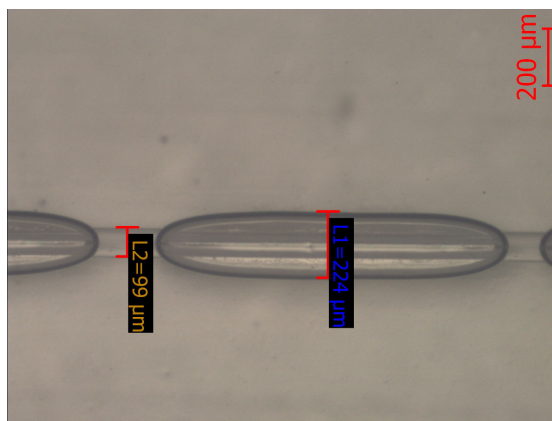
f) Čelo vstupního vlnovodu rozbočnice.

Obr. 7.22: Foto kvalitně vyrobených vzorků EpoClad/EpoCore.

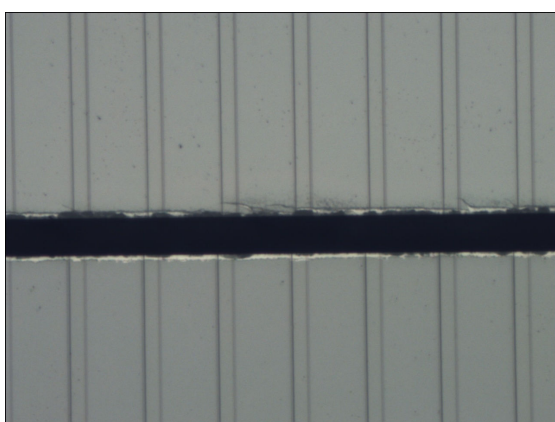
Příklady špatně vyrobených struktur jsou uvedeny na následujícím obrázku 7.23.



a) Přerušovaný vlnovod.



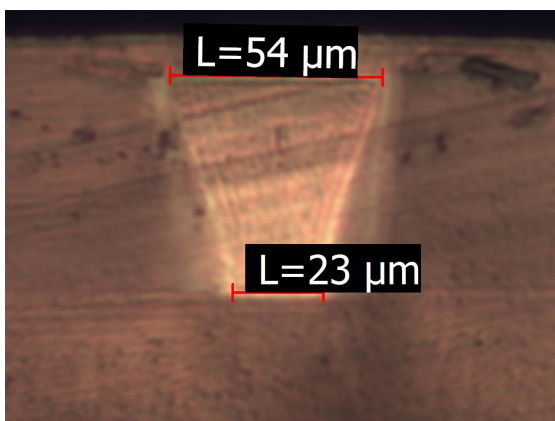
b) Vzduchová bublina na vlnovodu.



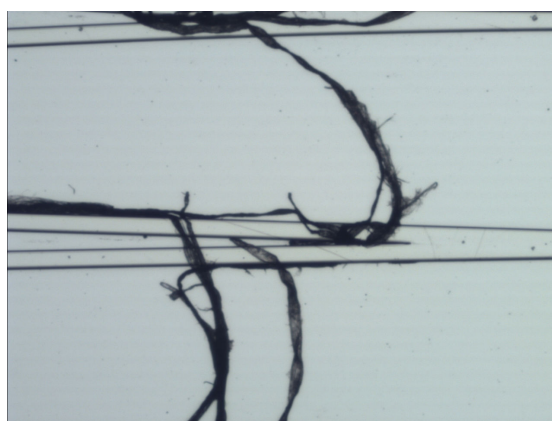
c) Poškozený vlnovod řezáním.



d) Nerovnoměrný tvar vlnovodu.



e) Příliš „podleptaný“ vlnovod.



g) Špatně vyvolaný střed rozbočnice.

Obr. 7.23: Foto špatně vyrobených vzorků EpoClad/EpoCore.

## Měření optického útlumu mnohavidových vlnodů

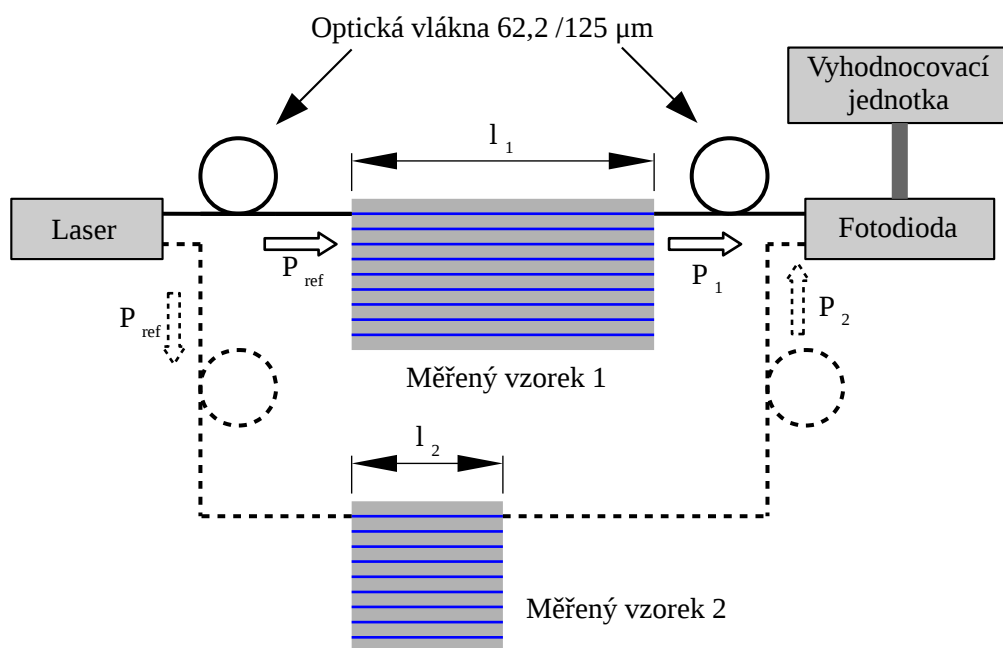
K měření optického útlumu těchto vlnodů byla použita metoda dvou délek viz obr. 7.24. Pro měření optického útlumu touto metodou jsou potřeba dva vzorky o rozdílných délkách  $l_1$  a  $l_2$ . Vzorky musí být ze stejné sekce. Z tohoto důvodu byl navržen výkres pro řezání celé 4“ podložky (waferu) na sekce již s předpokladem využití této metody.

V prvním kroku měření je změřen výkon optického záření laseru prošlého delším vzorkem  $l_1$  ze sekce. V druhém kroku je změřen stejným způsobem výkon optického záření laseru prošlého kratším vzorkem  $l_2$  ze sekce. Měření touto metodou má výhodu v tom, že se vyloučí chyba měření způsobená ztrátou výkonu na vazbě vlákna a čela měřeného vlnodů. Nevýhodou této metody je její časová náročnost.

Optický útlum vlnodů v dané sekci pak vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2} \quad (7.2)$$

kde  $\alpha$  je měrný útlum (dB/cm),  $P_1$  výkon měřený na výstupu delší části,  $P_2$  výkon měřený na výstupu kratší části (dB). Oba měřené výkony  $P_1$  a  $P_2$  se jsou vztaženy k referenčnímu výkonu  $P_{ref}$  změřeného spojením vláken bez vzorku.



Obr. 7.24: Princip metody měření optického útlumu vlnodů metodou dvou délek.

Měření probíhalo na měřicí lavici se stejnou kamerou jako pro optickou kontrolu. Pomocí této kamery a mikrometrických posuvů se nastavovala optická vlákna k čelům vlnodných oblastí z materiálu EpoCore. Jako zdroj záření sloužily teplotně stabilizované lasery o vlnových délkách 650, 850 a 1300 nm od společnosti Safibra. Pro detekci byly použity detektory od společnosti Thorlabs S155C (InGaAs fotodioda: 800 - 1700 nm) a S151C (Si fotodioda: 400 - 1100 nm) připojené k vyhodnocovací jednotce PM200.

Naměřené hodnoty metodou dvou délek optického útlumu vlnovodů vybraných vzorků 820 a 1004 jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 7.4: Naměřený optický útlum vlnovodů Si/PVA/EpoClad/EpoCore u vzorku č. 820.

Vzorek 820	Útlum vlnovodu při dané vlnové délce (dB/cm)			
	Číslo vlnovodu	650 nm	850 nm	1300 nm
1		-2,72	-1,18	-1,02
2		-2,10	-0,75	-0,83
3		-1,92	-0,82	-0,89
4		-2,33	-0,86	-1,00
5		-2,41	-1,01	-1,01
6		-2,06	-0,79	-0,99
7		-2,22	-0,82	-0,91
8		-1,94	-0,76	-0,88
9		-2,14	-0,82	-1,05
10		-2,50	-0,92	-1,11
11		-3,11	-1,27	-1,20
12		-3,30	-1,48	-1,34
<b>Průměr</b>		-2,40	-0,96	-1,02

Tab. 7.5: Naměřený optický útlum vlnovodů Si/EpoClad/EpoCore u vzorku č. 1004.

Vzorek 1004	Útlum vlnovodu při dané vlnové délce (dB/cm)			
	Číslo vlnovodu	650 nm	850 nm	1300 nm
1		-2,23	-2,97	-0,74
2		-2,07	-1,25	-1,07
3		-2,62	-1,36	-0,89
4		-2,17	-0,53	-1,13
5		-2,42	0,68	-1,25
6		-3,34	-1,48	-1,85
7		-3,90	-1,84	-1,17
8		-3,27	-1,57	-1,61
9		-3,39	-1,52	-0,47
10		-3,90	-2,47	-2,53
11		-6,17	-4,08	-4,35
12		-4,66	-2,42	-2,25
<b>Průměr</b>		-3,35	-1,73	-1,61

Nejmenší naměřený útlum hřebenového vlnovodu byl -0,47 dB/cm při vlnové délce 1300 nm u vzorku č. 1004 – Si/EpoClad/EpoCore.

## Měření vložných ztrát ramen optických výkonových rozbočnic

Vložné ztráty ramen optické výkonové rozbočnice jsou vypočítány z poměru změřeného výstupního výkonu na daném výstupu ku vstupnímu výkonu do rozbočnice. Vložné ztráty měřených rozbočnic ze vzorků 1004, 1073 a 1076 jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 7.6: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1004 – Si/EpoClad/EpoCore

vz. 1004		Vložné ztráty ramene optické rozbočnice při dané vlnové délce (dB)					
Rozbočnice		650 nm		850 nm		1300 nm	
Číslo	Typ	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2
1	scrambler	-13,67	-13,67	-8,63	-10,14	-9,33	-10,72
2	taper	-13,67	-12,51	-8,00	-7,69	-8,03	-8,75
3	scrambler	-14,22	-13,67	-8,41	-8,41	-8,33	-8,85
4	taper	-13,67	-12,55	-7,62	-7,62	-8,16	-7,78

Tab. 7.7: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1073 – Si/PVA/EpoClad/EpoCore

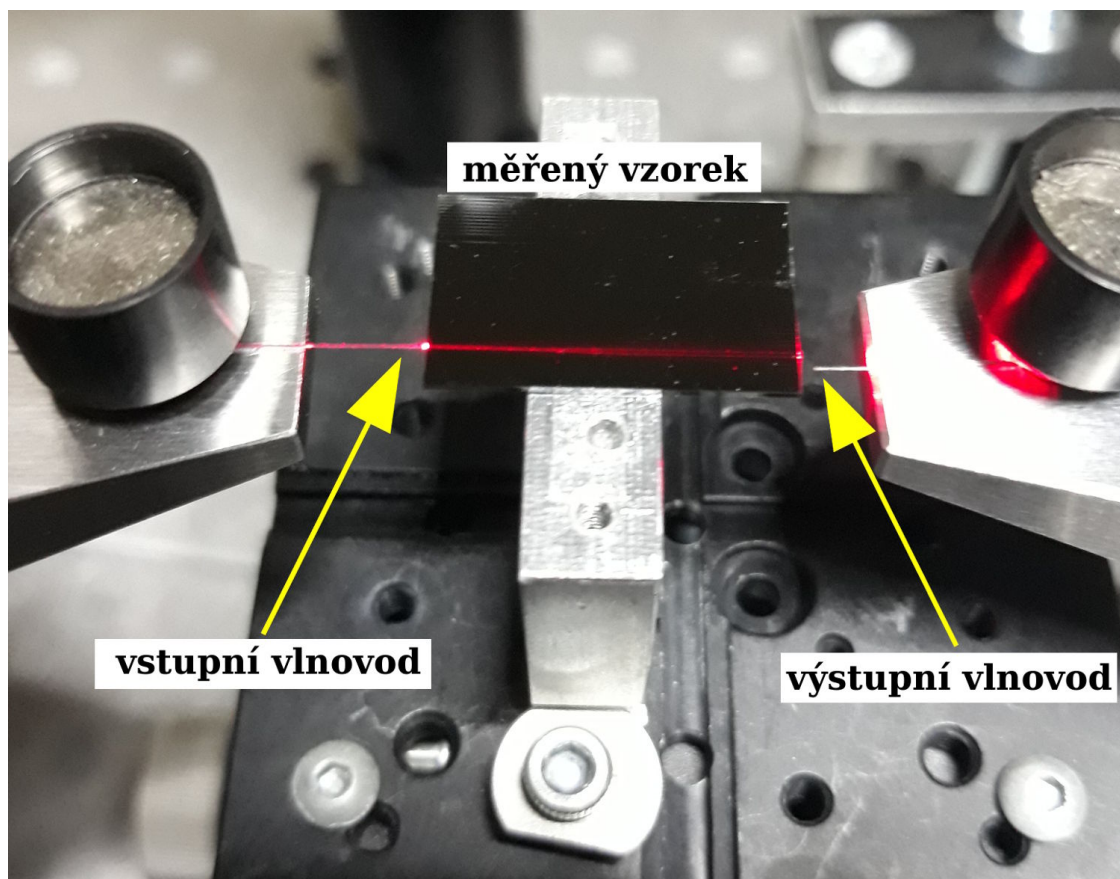
vz. 1073		Vložné ztráty ramene optické rozbočnice při dané vlnové délce (dB)					
Rozbočnice		650 nm		850 nm		1300 nm	
Číslo	Typ	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2
1	scrambler	-13,57	-13,44	-9,80	-9,87	-7,89	-10,68
2	taper	-14,50	-14,30	-8,60	-9,10	-8,61	-9,82
3	scrambler	-14,66	-14,56	-9,05	-8,98	-9,46	-7,90
4	taper	-14,66	-14,30	-8,27	-8,83	-7,45	-10,40

Tab. 7.8: Vložné ztráty ramen rozbočnic vzorku 1076 - Si/EpoClad/EpoCore

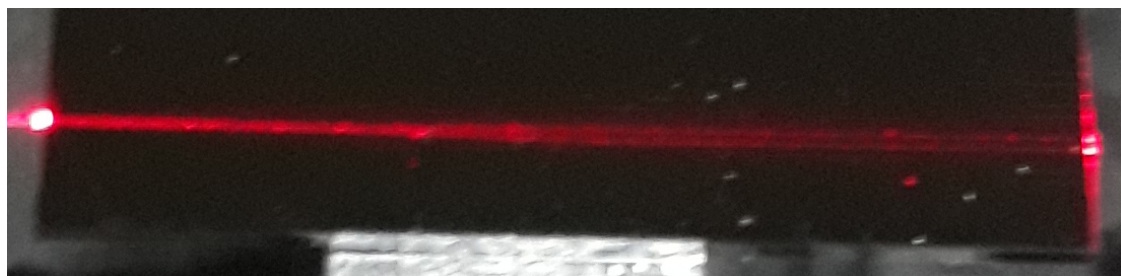
vz. 1076		Vložné ztráty ramene optické rozbočnice při dané vlnové délce (dB)					
Rozbočnice		650 nm		850 nm		1300 nm	
Číslo	Typ	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2	Výstup 1	Výstup 2
1	scrambler	-9,14	-9,61	-5,35	-5,26	-5,89	-4,70
2	taper	-9,46	-10,34	-5,34	-5,56	-4,40	-5,92
3	scrambler	-9,75	-9,47	-5,56	-5,44	-5,09	-5,57
4	taper	-9,32	-9,12	-5,41	-4,82	-5,62	-5,67



Na následujícím obrázku 7.25 jsou uvedeny fotky z měření optické výkonové rozbočnice.



a) Ukázka navázání optických vláken k měřenému vzorku.



b) Detail červeného světla navázaného do výkonové rozbočnice.

Obr. 7.25: Ukázka měření optické výkonové rozbočnice.

## Závěr

Cílem práce byl návrh, příprava a měření vlastností polymerních planárních a hřebenových optických vlnovodů.

Nejprve byly prováděny depoziční testy planárních vlnovodů na skleněných podložkách se třemi druhy polymerů OrmoClear tj. OrmoClear FX, OrmoClear HI01 XP a samotný OrmoClear. Následně bylo u těchto vzorků provedeno měření indexu lomu, optického útlumu a transmisních spekter.

Rozptyl hodnot měření indexu lomu byl způsoben různými postupy vytvrzení polymeru.

Z měření indexu lomu vyplývá, že OrmoClear HI01 XP má výrazně vyšší hodnotu indexu lomu než zbylé dva materiály OrmoClear a OrmoClear FX. OrmoClear HI01 XP je tedy vhodný pro struktury s vysokou mírou integrace.

Nejmenší naměřený optický útlum  $-0,19$  dB/cm při vlnové délce  $632,8$  nm byl změřen u vzorku Sklo/OrmoClear FX (1037A). Nízký optický útlum na všech měřených vlnových délkách vykazoval také vzorek z polymeru OrmoClear HI01 XP (1036B). Při porovnání průměrovaných hodnot naměřeného optického útlumu ze všech vzorků je zřejmé, že OrmoClear HI01 XP vykazuje menší útlum při delších vlnových délkách cca o  $1$  dB/cm na  $1550$  nm než zbylé dva materiály. OrmoClear FX a samotný OrmoClear mají podobný průběh útlumu v závislosti na vlnové délce.

Naměřená transmisní spektra ukazují, že všechny tři materiály jsou vhodné pro použití již od vlnových délek  $400$  nm čímž se potvrzují údaje uvedené výrobcem v datových listech.

Naměřené hodnoty indexu lomu planárních vlnovodů byly použity pro výpočty a simulace jednovidových hřebenových vlnovodů na podložkách Si/SiO<sub>2</sub> s materiály OrmoClear HI01 XP a OrmoClear FX. Největší navržené rozměry jednovidového hřebenového vlnovodu  $1,65 \times 1,75$   $\mu\text{m}$  jsou pro materiál OrmoClear FX. Těchto rozměrů nebylo možné dosáhnout pomocí laserového litografu vzhledem k vyšším požadavkům na rozlišení. Nejmenší vyrobený rozměr vlnovodu činil přibližně  $2 \times 2,3$   $\mu\text{m}$  u vzorku nanášeného rotačním litím při otáčkách  $6000$  ot/min.

Proběhl také návrh i optimalizace mnohavidových vlnovodů s rozměry  $50 \times 50$   $\mu\text{m}$  a výkonových rozbočnic  $1 \times 2Y$  s materiály EpoClad/EpoCore. Jako podložky pod tyto navržené struktury sloužily samotné křemíkové desky  $100$  mm, sklolaminát FR4 nebo vrstva PVA nanesená na Si podložce. Optimalizace rozměrů optických výkonových rozbočnic  $1 \times 2Y$  proběhla pro rozbočnice s postupně rozšiřujícím se vlnovodem a módovým scramblerem pomocí softwarového balíčku MOST v programu BeamPROP<sup>TM</sup>. Na základě provedených počítačových simulací byly vybrány motivy pro výrobu fotolitografické masky.

Nejmenší naměřený útlum hřebenového vlnovodu byl  $-0,47$  dB/cm při vlnové délce  $1300$  nm u vzorku Si/EpoClad/EpoCore (1004).

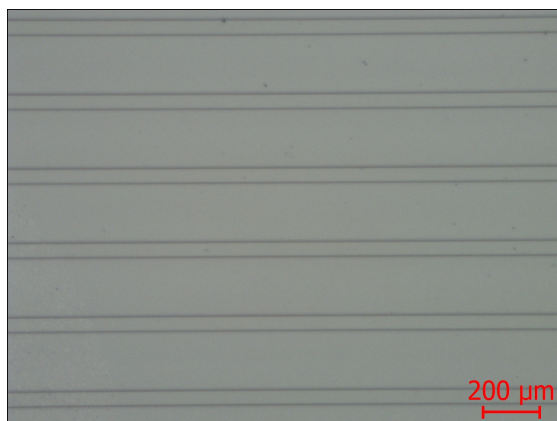
Nejlepšího poměru výkonového rozdělení a nejnižších vložných ztrát ramen  $-5,35$  a  $-5,26$  dB při vlnové délce  $850$  nm bylo dosaženo u výkonové rozbočnice s módovým scramblerem u vzorku Si/EpoClad/EpoCore (1076).

# Seznam použité literatury

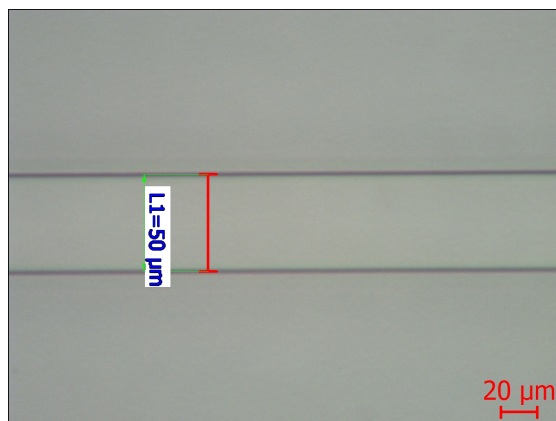
- [1]: POLLOCK, Clifford R. Fundamentals of optoelectronics. Chicago: Irwin, 1995. ISBN 02-561-0104-3.
- [2]: NOVOTNÝ, Karel. Optická komunikační technika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1642-0.
- [3]: NOVOTNÝ, Karel. Vlny a vedení: přednášky. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03317-3.
- [4]: BELTRAMI, D. R., J. D. LOVE a F. LADOUCEUR. Optical and Quantum Electronics. 31(4), 307-326. DOI: 10.1023/A:1006971108806. ISSN 03068919. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1006971108806>
- [5]: YANG, Gao, Gong ZHAO, Bai REN, et al. Multimode-Waveguide-Based Optical Power Splitters in Glass. Chinese Physics Letters. 2008, 25(8), 2912-2914. DOI: 10.1088/0256-307X/25/8/049. ISSN 0256-307X. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0256-307X/25/i=8/a=049?key=crossref.a6fa238570991e0f81a838507f91b69a>
- [6]: NERUDA, Miloš. Optické planární vlnovody [online]. FEL ČVUT Technická 1902/2 Praha 6, Dejvice 166 27 Praha 6, 2016 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65194>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky. Vedoucí práce Václav Prajzler.
- [7]: Micro Resist Technology GmbH: EpoCore & EpoClad - Negative Tone Photoresist Series [online]. In: . Berlin [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: [http://microchem.com/products/images/uploads/PI\\_EpoCoreClad.pdf](http://microchem.com/products/images/uploads/PI_EpoCoreClad.pdf)
- [8]: OrmoClear® Series | micro resist technology GmbH [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.microresist.de/en/products/hybrid-polymers/uv-imprint-uv-moulding/ormoclear%C2%AE-series>
- [9]: Micro resist technology GmbH: Processing Guidelines – OrmoClear FX. Berlin, 2016, , 6.
- [10]: Micro resist technology GmbH: Processing Guidelines - EpoClad. Berlin, 2012, , 4.
- [11]: Micro resist technology GmbH: Processing Guidelines – EpoCore. Berlin, 2012, , 4.
- [12]: Metricon Corporation. Bulk Material or Thick Film Index/Birefringence Measurement — Metricon [online]. 2015 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/app3>
- [13]: HYPŠ, Petr. Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly [online]. FEL ČVUT Technická 1902/2 Praha 6, Dejvice 166 27 Praha 6, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61739>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření. Vedoucí práce Václav Prajzler.
- [14]: Waveguide Loss Measurement — Metricon [online]. 2015 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.metricon.com/app2>
- [15]: UV-3600 Plus UV-VIS-NIR Spectrophotometer : SHIMADZU (Shimadzu Corporation) [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: [https://www.shimadzu.com/an/molecular\\_spectro/uv/uv-3600plus.html](https://www.shimadzu.com/an/molecular_spectro/uv/uv-3600plus.html)

# Přílohy

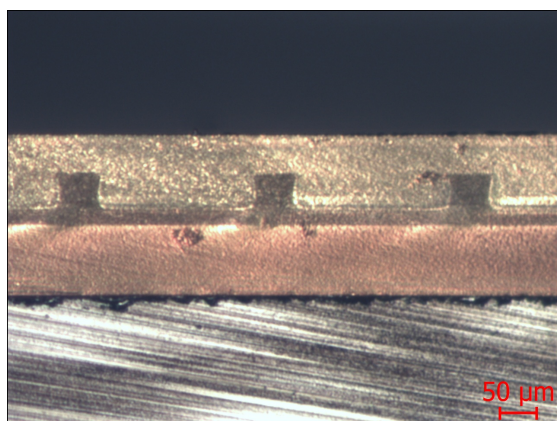
## A - Foto hřebenových vlnodů EpoClad/EpoCore



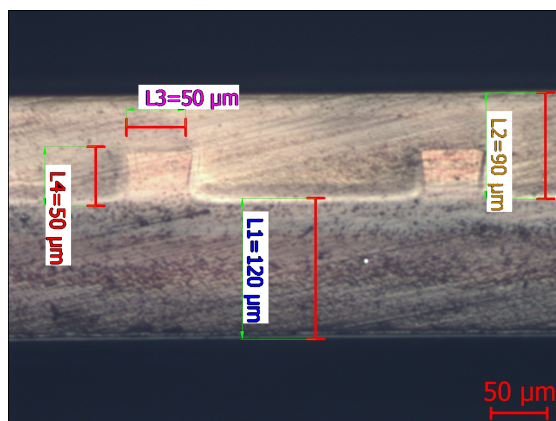
a) Vz. 820 (foto p. Neruda).



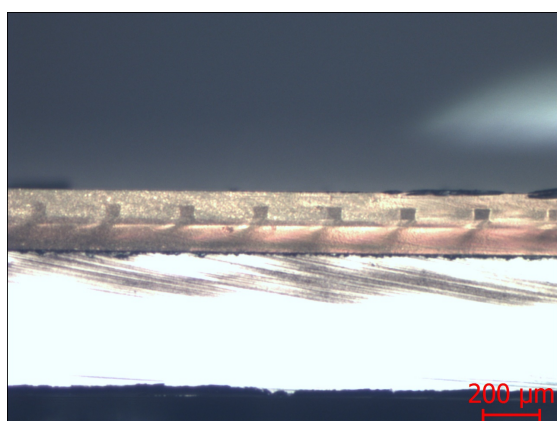
b) Vz. 820 (foto p. Neruda).



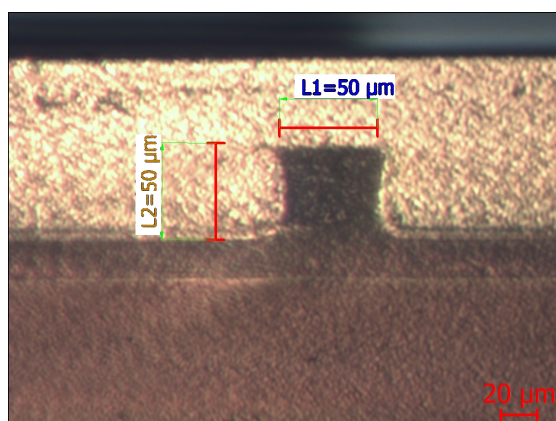
c) Vz. 820 (foto p. Neruda).



d) Vz. 820 (foto p. Neruda).

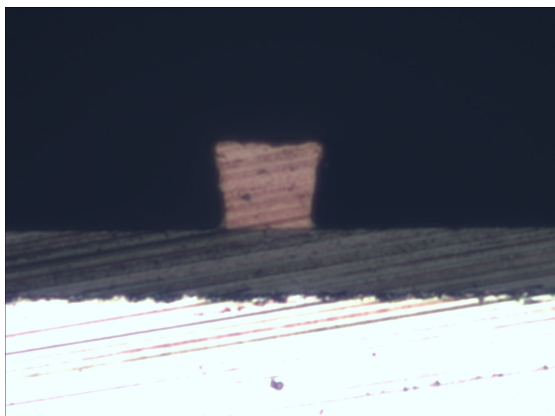


e) Vz. 820 (foto p. Neruda).

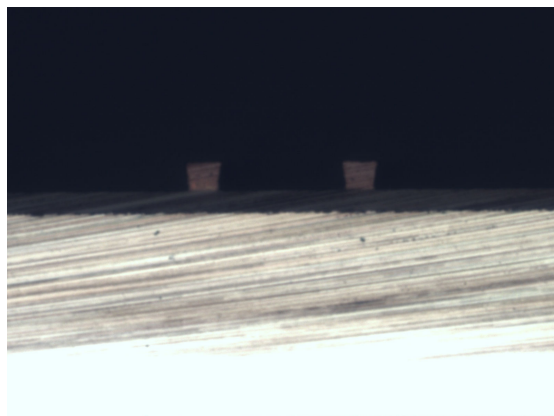


f) Vz. 820 (foto p. Neruda).

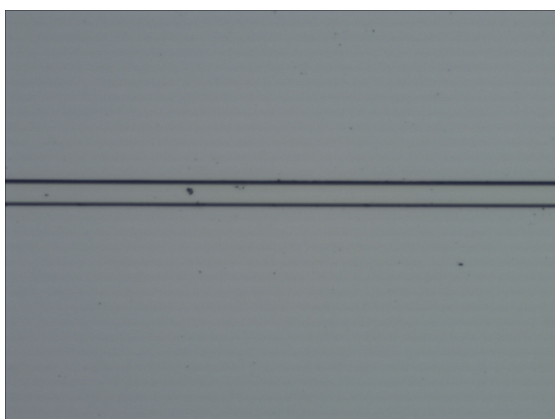
## B - Foto optických výkonových rozbočnic EpoClad/EpoCore



a) Vz. 1071: čelo vstupního vlnovodu rozbočnice.



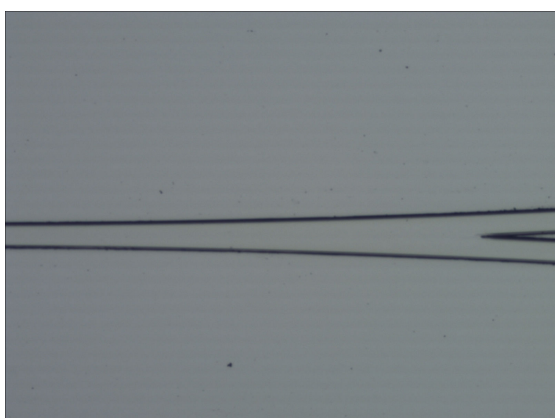
b) Vz. 1071: čela výstupních vlnovodů rozbočnice.



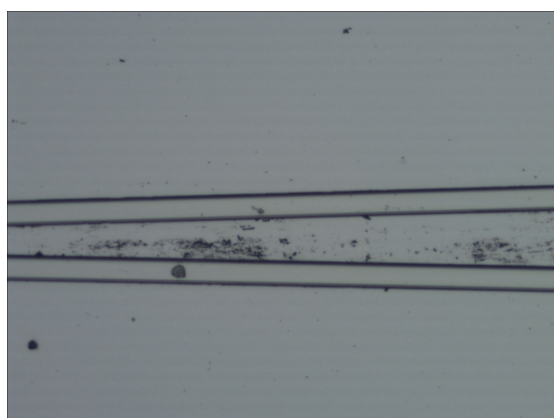
d) Vz. 1071: vstupní vlnovod rozbočnice.



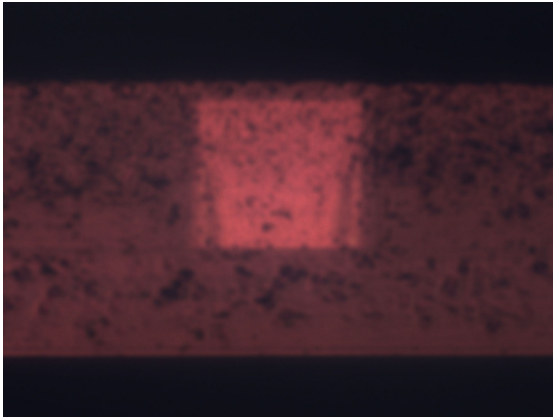
e) Vz. 1071: módový scrambler rozbočnice.



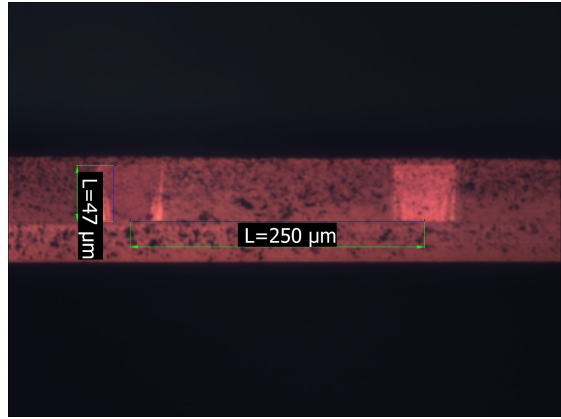
f) Vz. 1071: postupně rozšiřující se vlnovod rozbočnice.



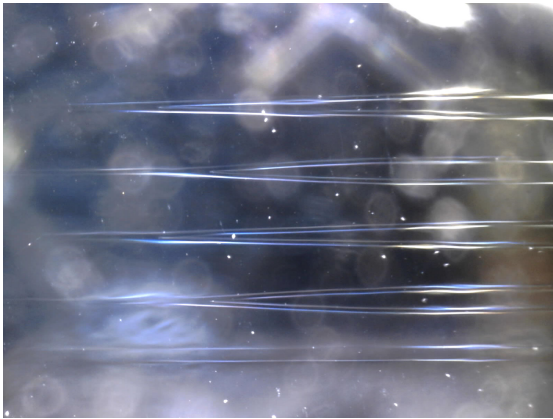
g) Vz. 1071: výstupní vlnovody robz. s m. scramblerem.



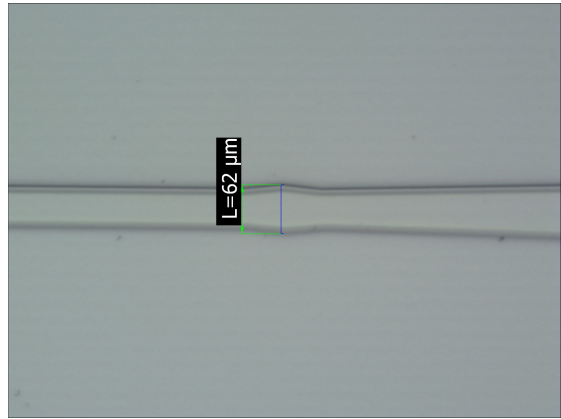
a) Vz. 1073: čelo vstupního vlnovodu rozbočnice.



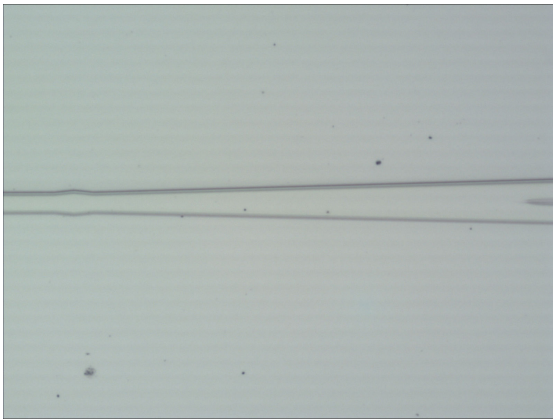
b) Vz. 1073: čela výstupních vlnovodů rozbočnice.



c) Vz. 1073: 4 x rozbočnice.



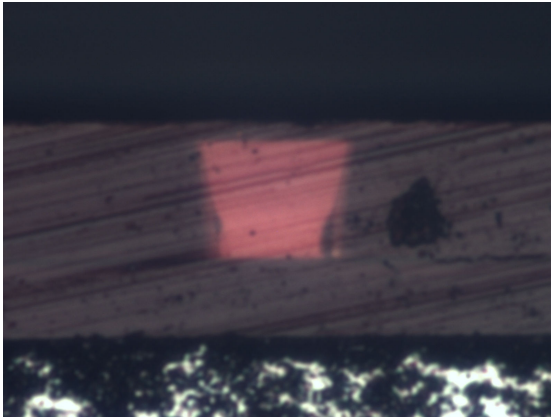
d) Vz. 1073: módový scrambler rozbočnice.



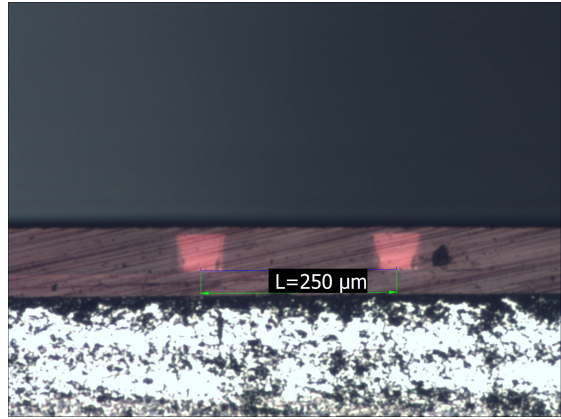
e) Vz. 1073:scrambler s výstupními vlnovody rozbočnice.



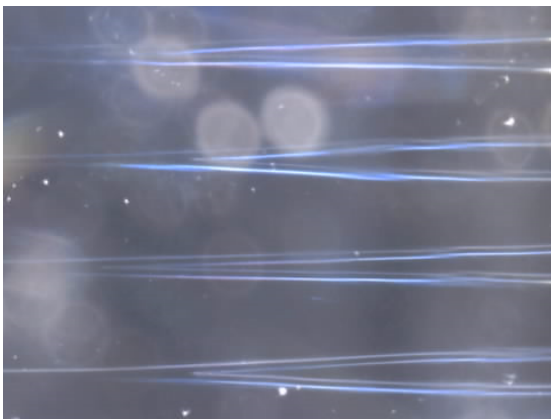
f) Vz. 1073: postupně rozšiřující se vlnovod rozbočnice.



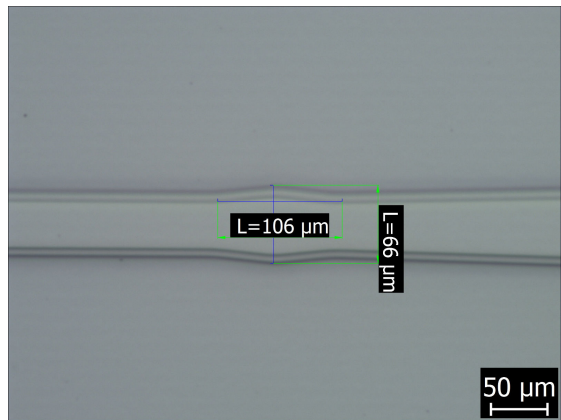
a) Vz. 1076: čelo vstupního vlnovodu rozbočnice.



b) Vz. 1076. výstupní vlnovody rozbočnice.



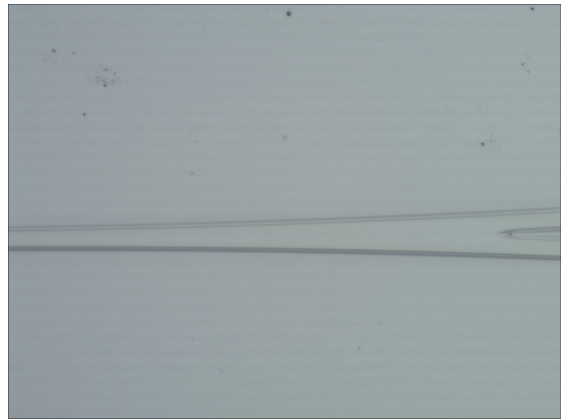
c) Vz. 1076: 4 x rozbočnice.



d) Vz. 1076: módový scrambler rozbočnice.



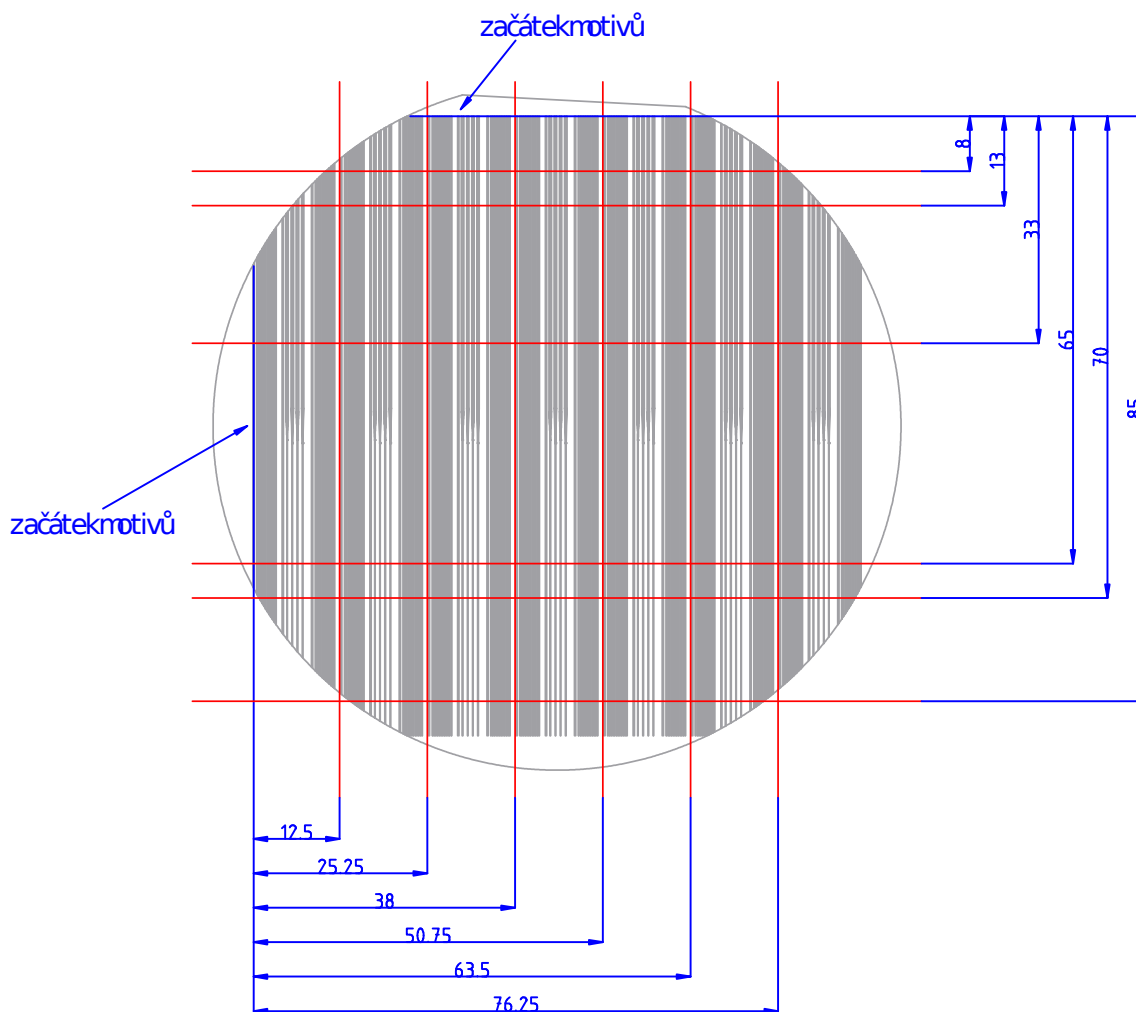
e) Vz. 1076:scrambler s výstupními vlnovody rozbočnice.



f) Vz. 1076: postupně rozšiřující se vlnovod rozbočnice.

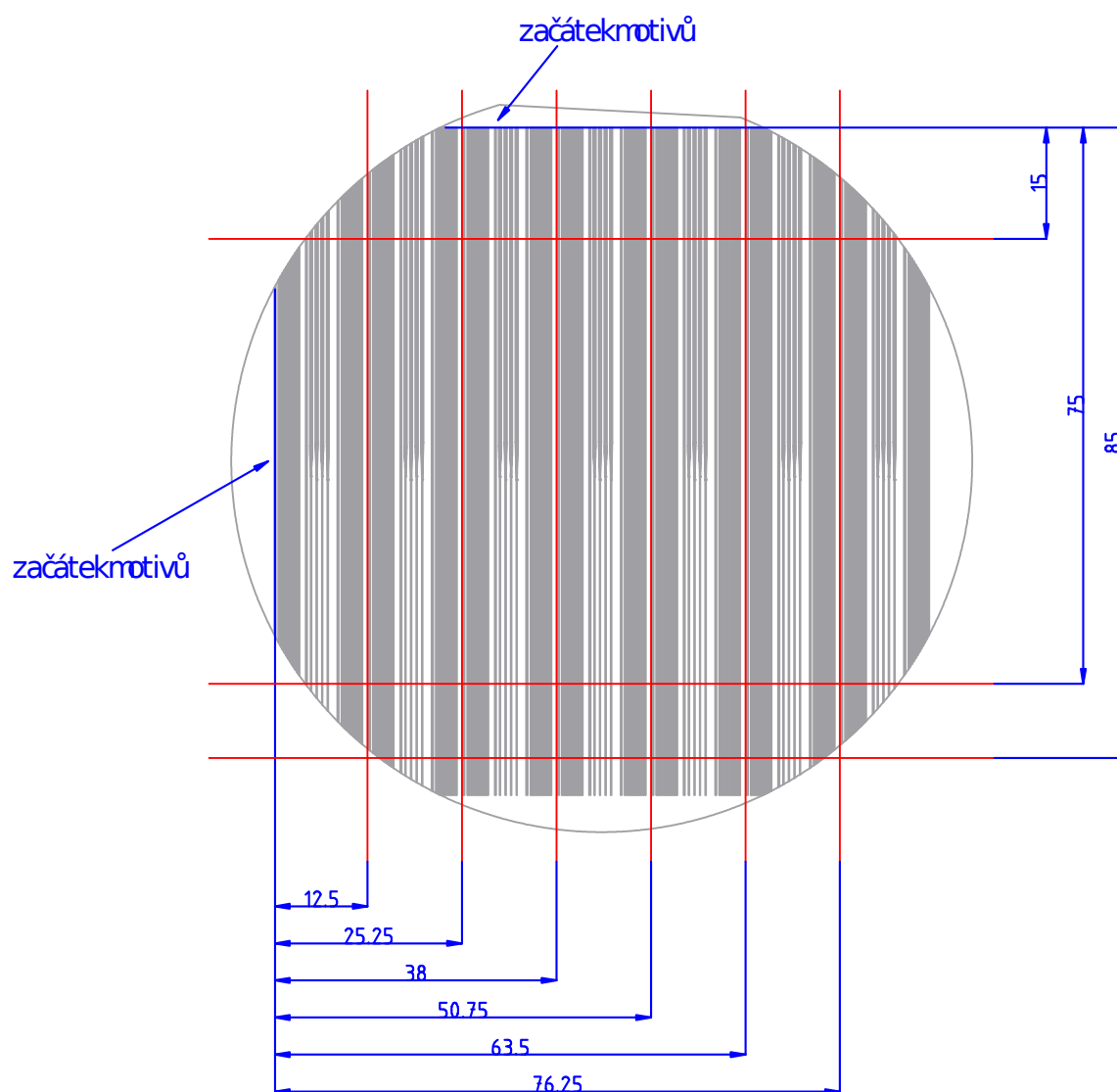
## C - Výkresy pro řezání vzorků EpoClad/EpoCore

Výkres 1:

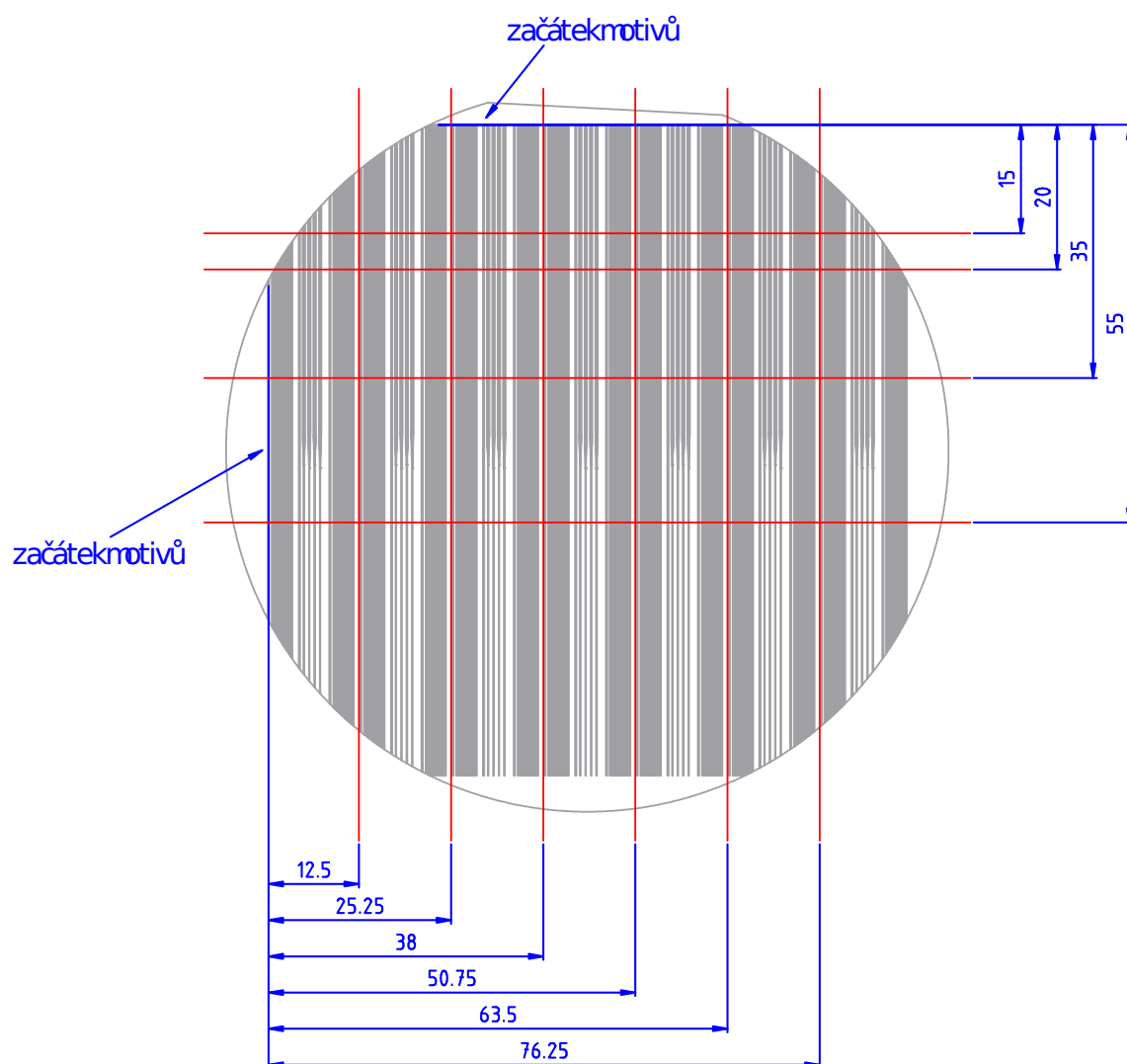




Výkres 2:



Výkres 3:



## D - Seznam vyrobených vzorků

Číslo	Složení	Poznámka
818	FR4-0.5/PVA/EpoClad	Expozice na optickém litografu v čistých prostorách na PŘF MU v Brně. 3. října 2017
819	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
820	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
821	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
822	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
823	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
833	Si/FR4-0.1/ EpoClad2017-II/EpoCore2017	
834	Si/FR4-0.1/ EpoClad2017-II/EpoCore2017	
835	Si/PET/EpoClad2017-II/EpoCore2017	
836	Si/PET/EpoClad2017-II/EpoCore2017	
838	Si/EpoClad2017-II/EpoCore2017	
843	FR-4-500/TOPAS300/EpoClad2017-II/EpoCore2017	
874	Sklo/OrmoClear FX	
875	Sklo/OrmoClear FX	
876	Sklo/OrmoClear HI01 XP	
877	Sklo/OrmoClear HI01 XP	
892	Sklo/OrmoClear	
884	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	Expozice laserovým litografem v čistých prostorách CEITEC v Brně. 24. listopadu 2017
885	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR	
886	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	
887	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR	
888	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	
889	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	
890	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	
891	Si/SiO <sub>2</sub> (SIEGERT WAFER GmbH) ORMOCELAR FX	
1001	Si/FR4-0.1/EpoClad/EpoCore	Expozice na optickém litografu v čistých prostorách na PŘF MU v Brně. 14. února 2018
1002	Si/FR4-0.1/EpoClad/EpoCore	
1003	Si/FR4-0.1/EpoClad/EpoCore	
1004	Si/EpoClad/EpoCore	
1006	Si/PVA/EpoClad2017/EpoCore2017	
1007	Si/PVA(HOLO+)/PVA/EpoClad/EpoCore	
1008	Si/EpoClad/EpoCore	
1009	Si/PVA/ EpoClad/EpoCore	

Číslo	Složení	Poznámka
1035A	Sklo/OrmoClear	Výroba v laboratoři nanolitografie na Katedře mikroelektroniky ČVUT FEL.
1035B	Sklo/OrmoClear	
1036A	Sklo/OrmoClear HI01 XP	
1036B	Sklo/OrmoClear HI01 XP	
1037A	Sklo/OrmoClear FX	
1037B	Sklo/OrmoClear FX	
1054	Si/SiO <sub>2</sub> -2“(POLOVODIČE Praha) ORMOCELAR FX	Expozice laserovým litografem v čistých prostorách CEITEC v Brně. 13. března 2018
1055	Si/SiO <sub>2</sub> -2“(POLOVODIČE Praha) ORMOCELAR FX	
1056	Si/SiO <sub>2</sub> -2“(POLOVODIČE Praha) ORMOCELAR FX	
1057	Si/SiO <sub>2</sub> -4“/ORMOCELAR FX	
1058	Si/SiO <sub>2</sub> -4“/ORMOCELAR FX	
1069	Si/EpoClad/EpoCore	Expozice na optickém litografu v čistých prostorách na PŘF MU v Brně. 18. dubna 2018
1070	Si/EpoClad/EpoCore	
1071	Si/EpoClad/EpoCore	
1072	Si/EpoClad/EpoCore	
1073	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
1074	Si/PVA/EpoClad/EpoCore	
1076	Si/EpoClad/EpoCore	

## E - Seznam příloh uložených na CD

- Diplomová práce ve formátu PDF.
- Zdrojové kódy používané pro výpočty.
- Návrh masky pro optický litograf.
- Motivy pro depoziční testy prováděné laserovým litografem.
- Postupy depozičních testů vzorků.
- Naměřená data z profilometru vzorků OrmoClear.
- Fotografie vyrobených vzorků.
- Výsledky měření ze zařízení Metricon.
- Naměřené hodnoty výkonů při měření metodou dvou délek.
- Datové listy použitých polymerních materiálů.