



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

**Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi
elektrooptickými moduly**

**Flexible optical polymer waveguides for transmitting dates between
the electro-optical modules**

Diplomová práce

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Václav Prajzler PhD.**

Bc. Petr Hypš

Praha 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Bc. Petr Hypš

.....



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student: | Bc. Petr Hypš |
| Studijní program: | Inteligentní budovy |
| Název tématu česky: | Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly |
| Název tématu anglicky: | Flexible Optical Polymer Waveguides for Transmitting Dates between the Electro-optical Modules |

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s teoretickými principy planárních mnohavidových optických vlnovodů.
2. Seznamte se s postupy návrhu fotonických struktur.
3. Navrhněte optický polymerní planární flexibilní vlnovod.
4. Proveďte návrh flexibilního hřebenového vlnovodu pro mnohavidová optická vlákna.
5. Proveďte depoziční testy pro výrobu navržených struktur.
6. Proveďte diagnostiku vyrobených struktur.
7. Diskutujte možnost praktického využití dosažených výsledků pro použití v inteligentních budovách.

Seznam odborné literatury:

- [1] Novotný, K.: Optická telekomunikační technika, Skripta ČVUT, Praha 1998
- [2] Bosman, E.: Integration of optical interconnecties and optoelectronic components in flexible substrates, PhD Thesis Universiteit Gent 2010.
- [3] C. Choi, L. Lin, Member, Y. Liu, et al.: Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board-level optical interconnects, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 9, pp. 2168-2176, 2004.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D. (K13134)

Datum zadání diplomové práce: 15. ledna 2015

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016

Doč. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 26. 1. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za jeho užitečné rady a pomoc při návrhu struktur a jejich výrobě. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Pavle Nekvindové, Ph.D. z VŠCHT v Praze za měření optických vlastností použitých materiálů na zařízení Metricon. A také Mgr. Oleksii Lyutakovovi, Ph.D. z VŠCHT v Praze za pomoc při měření tloušťek polymerních vrstev pomocí profilometru Talystep. Další poděkování patří také doc. RNDr. Petru Mikulíkovi, Ph.D. a Ing. Milanu Kučerovi z Masarykovy univerzity v Brně za pomoc při výrobě hřebenových planárních vlnodů v Laboratoři polovodičů. Dále bych chtěl poděkovat firmě DuPont Teijin Films za poskytnutí fólie Melinex® ST726, firmě Mitsubishi Polyester Film GmbH za poskytnutí folie HOSTAPHAN® GN2504600 a firmě Evonik Industries AG za poskytnutí folie Plexiglas® Film OF058 pro depoziční testy.

Název práce: Flexibilní optické polymerní vlnovody pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly

Autor: Bc. Petr Hypš

Katedra: Katedra měření

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

E-mail vedoucího: xprajzler@fel.cvut.cz

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá návrhem flexibilních optických polymerních vlnovodů pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly. V první části práce je popsán princip vedení světla v planárních optických vlnovodech. Dále je v práci uveden teoretický návrh geometrických rozměrů hřebenových optických planárních vlnovodů za použití flexibilních podložek a polymerních vlnovodných materiálů Su8-5/50, EpoCore a EpoClad, LIGHLINK™ XP-6701A Core a LIGHLINK™ XH-100145 Clad. V práci jsou také popsány provedené depoziční testy pro výrobu navržených planárních optických a hřebenových vlnovodů pomocí metody rotačního lití a optické litografie. Na závěr jsou uvedeny metody pro diagnostiku vyrobených vzorků a shrnuty dosažené výsledky.

Podářilo se připravit flexibilní planární optické vlnovody s optickým útlumem nižším než 1 dB/cm na vlnové délce 632,8 nm. Nejlepší vzorky Plexiglas OF058/Su8-50 a Dupont Q65HA/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core měly optický útlum 0,11 dB/cm. Nejlepší hřebenové optické vlnovody měly optický útlum 1,1 dB/cm na vlnové délce 850 nm.

Klíčová slova: Optické planární mnohavidové vlnovody, flexibilní podložky, polymery.

Title: Flexible optical polymer waveguides for transmitting data between the electro - optical modules

Author: Bc. Petr Hypš

Department: Department of Measurement

Supervisor: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: xprajzlv@fel.cvut.cz

Abstract: The goal of the thesis is design, fabrication and investigation properties of flexible polymer optical waveguides for transmitting data between the electro-optical modules. The first part of the thesis describes the theoretical principle of transiting the lights through the planar optical waveguides. The next part describe theoretical proposal of the geometric dimensions of ridge optical waveguides for flexible substrates and polymer waveguide materials Su8-5 / 50, EpoCore and EpoClad, LIGHLINK™ XP-6701 Core and LIGHLINK™ XH-100145 Clad. The thesis also described by the fabrication processes of the planar and ridge optical waveguides using spin coating method, and optical photolithography. Finally the methods used for measurement are described and obtained results are presented.

The fabricated flexible planar optical waveguides have the optical attenuation less than 1 dB/cm at wavelength 32.8 nm. The best samples of Plexiglas OF058 / Su8-50 and Dupont Q65HA / LIGHLINK™ XH-100145 Clad / LIGHLINK™ XP-6701 Core had optical loss around 0.11 dB/cm. The best ridge optical waveguides have optical losses around 1.1 dB/cm at 850 nm.

Keywords: Optical planar multimode waveguides, flexible mats, polymers.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 10 |
| 2 | Teorie šíření světla v optických vlnovodech | 13 |
| 3 | Návrh flexibilního planárního optického vlnovodu | 18 |
| 3.1 | Planární optický vlnovod | 19 |
| 3.2 | Hřebenový planární optický vlnovod..... | 22 |
| 4 | Výroba | 32 |
| 4.1 | Výroba planárních vlnovodů..... | 32 |
| 4.2 | Vlnovody hřebenových vlnovodů s polymery EpoClad a EpoCore | 33 |
| 4.3 | Vlnovody hřebenových vlnovodů s polymery LIGHTLINK..... | 35 |
| 4.4 | Vlnovody hřebenových vlnovodů s polymery Su8-5 a Su8-50 | 37 |
| 5 | Diagnostika vyrobených vzorků | 39 |
| 5.1 | Optická kontrola vyrobených vlnovodů..... | 39 |
| 5.2 | Měření geometrických rozměrů | 41 |
| 5.3 | Měření transmisních spekter | 42 |
| 5.4 | Jednohnanolová vidová spektroskopie | 43 |
| 5.5 | Měření optického útlumu planárních vlnovodů | 44 |
| 5.6 | Měření optického útlumu metodou dvou délek | 45 |
| 6 | Výsledky | 48 |
| 6.1 | Optická kontrola vyrobených vzorků..... | 48 |
| 6.2 | Geometrické rozměry optických vlnovodů | 51 |
| 6.3 | Transmisní spektra | 55 |
| 6.4 | Jednohnanolová vidová spektroskopie | 56 |
| 6.5 | Měření optického útlumu | 58 |
| 6.5.1 | Optický útlum planárních struktur..... | 58 |
| 6.5.2 | Optický útlum hřebenových vlnovodů | 62 |
| 7 | Závěr | 66 |
| | Použitá literatura | 67 |
| | Seznam obrázků | 68 |
| | Seznam tabulek | 71 |
| | Přílohy | i |
| A | Zdrojový kód pro výpočet tloušťek mezivrstvy a horní krycí vrstvy | i |
| B | Motivy použitých masek | iii |
| C | Fotografie vyrobených vzorků | iv |
| D | Seznam vyrobených vzorků | viii |
| E | Seznam příloh uložených na CD | xvii |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| Symbol | Popis | Jednotka |
|----------------------|--|--------------|
| B | Magnetická indukce | T |
| D | Elektrická indukce | $C * m^{-2}$ |
| DPS | Deska plošného spoje | |
| E | Intenzita elektrického pole | $V * m^{-1}$ |
| ENR (Su8) | Epoxy novak resin | |
| f | frekvence | Hz |
| H | Intenzita magnetického pole | $A * m^{-1}$ |
| \hbar | Planckova konstanta | |
| h_c | Výška krycí vrstvy | m |
| h_f | Výška vlnovodné vrstvy/kanálku | m |
| h_s | Výška mezivrstvy/substrátu | m |
| j | Hustota proudu | $A * m^{-2}$ |
| k | Vlnové číslo | m^{-1} |
| k | Vlnový vektor | m^{-1} |
| k₁ | Vlnový vektor dopadající vlny | m^{-1} |
| k₂ | Vlnový vektor prostupující vlny | m^{-1} |
| l_1 | Délka vzorku | m |
| l_2 | Délka vzorku po zlomení | m |
| m | Počet TE (transverzálně elektrické) vidů | |
| n₀ | Vektor kolmý na vlnoplochu | |
| n_1, n_2 | Index lomu prostředí | |
| n_c | Index lomu krycí vrstvy | |
| n_{ef} | Efektivní index lomu | |
| n_f | Index lomu vlnovodné vrstvy | |
| n_s | Index lomu substrátu/mezivrstvy | |
| p | Počet TM (transverzálně magnetické) vidů | |

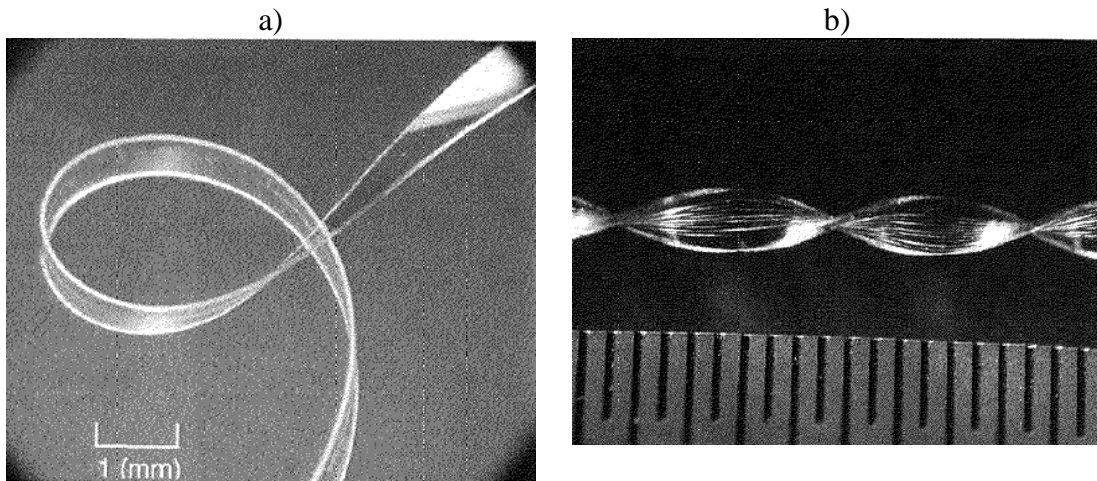
| | | |
|--------------|---------------------------|----------------|
| PET | Polyethylentereftalát | |
| PMMA | Polymethyl-methacrylát | |
| P_1 | Výstupní výkon | W |
| P_2 | Výstupní výkon po zlomení | W |
| t | Čas | s |
| TE | Transversálně elektrická | |
| TM | Transversálně magnetická | |
| UV | Ultra fialová | |
| W | Energie fotonu | eV |
| w | Šířka kanálku | m |
| α | Měrný útlum | $dB * cm^{-1}$ |
| β | Fázová konstanta | $rad * m^{-1}$ |
| ϵ_r | Permitivita prostředí | $F * m^{-1}$ |
| λ_0 | Vlnová délka | m |
| ν_i | Úhel prostupu | rad |
| ν_r | Úhel dopadu | rad |

1 Úvod

V současné době roste složitost integrovaných obvodů. Důvodem tohoto nárůstu jsou vyšší požadavky na rychlost a množství přenesených dat. Vzhledem k počtu zařízení na čípech i počtu čipů a desce plošných spojů se rychlost modulace a stupeň integrace i modulace zvyšuje. Běžné metalické vedení (propojení) se začíná potýkat se základními překážkami, jako jsou rychlost přenosu dat, velikost, ztrátový výkon apod. Proto probíhá snaha o vysokou hustotu elektrických obvodů a návrh mnohačipových obvodů, které zmenšují plochu plošných spojů, zlepšení integrace signálů zkrácením propojovacích vzdáleností a odstranění problémů s impedancí a kapacitami. Přenos dat pomocí metalických vedení na velké a střední vzdálenosti již byl ukončen a v současnosti probíhá výlučně pomocí optických vláken. Přenos dat na velmi krátké vzdálenosti v rámci propojení plošných spojů nebo pro komunikaci typu čip-čip, deska-deska a podobně v současnosti stále ještě dominuje propojování pomocí metalického propojení. Z důvodu stále narůstajících nároků na přenos dat a objem přenášených dat, především kvůli nárůstu počtu multimediálních zařízení, nárůstu rychlosti připojení internetu apod., jsou v poslední době i tyto typy propojování nahrazovány přenosem dat pomocí optických vlnovodů. Běžné metalické vedení na desce plošných spojů nemůže z fyzikální podstaty přenášet signály o větší frekvenci než několika set MHz. Do budoucna se počítá s tím, že se frekvence pro přenos bude neustále zvyšovat až na desítky GHz [1].

Kvůli těmto vlastnostem se začíná uplatňovat spojení pomocí optických vlnovodů, a to z několika důvodů. Těmi jsou odolnost vůči elektromagnetickému rušení, odolnost vůči vibracím, nezávislost na impedanci, nižší spotřeba energie na provoz a hlavně vysoká přenosová rychlost. Optické vlnovody mají i některé nevýhody, těmi jsou výroba vícevrstvých technologií, možnost předělování obvodu apod. [1]. Tato práce se zabývá návrhem flexibilních polymerních planárních vlnovodů, které tyto nedostatky odstraňují. Jejich výhodou jsou malé rozměry, jednoduchá výroba a tedy i jejich cena a možnost jejich použití pro propojení plošných spojů, čipů apod.

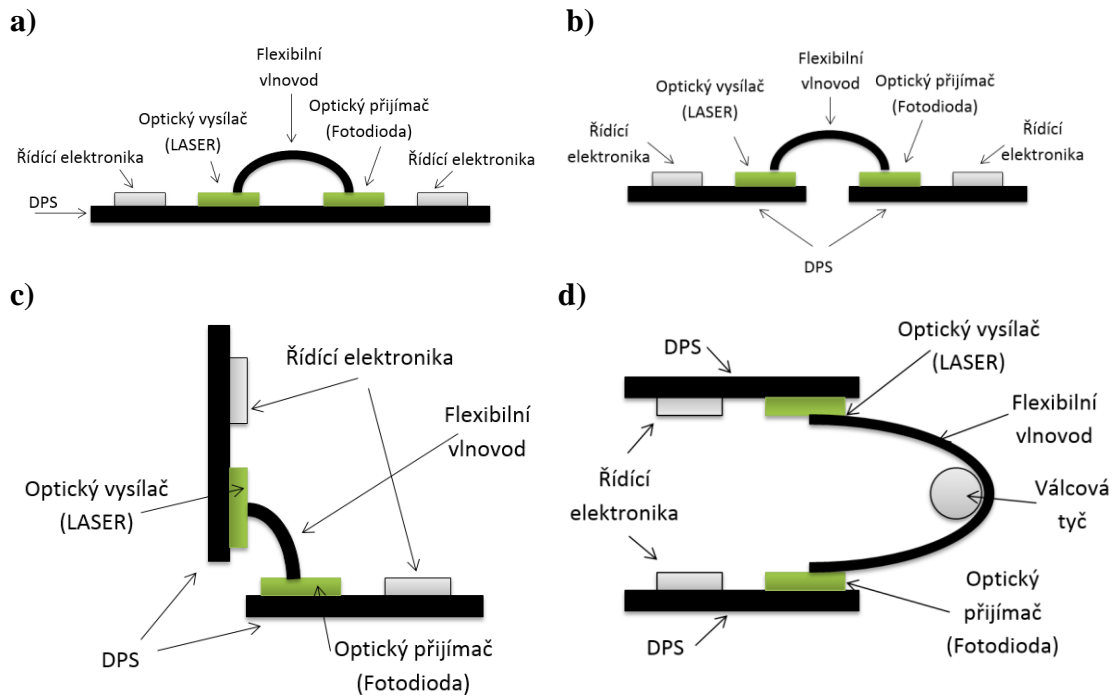
Flexibilní optické planární vlnovody jsou již v současné době úspěšně testovány a vyráběny. Příkladem mohou být výsledky uváděné v článku od autorů Y. Ishida a H. Hosokawa [2], kde vyrobené optické vlnovody mají optický útlum 0,2 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. Optický vlnovod je znázorněn na obrázku 1.1. V článku [3] je prezentován flexibilní optický vlnovod dosahující optického útlumu dokonce jen 0,05 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm s materiálem Dow Corning® OE-4140 UV – core a Dow Corning® OE-4141 UV – cladding.



Obrázek 1.1: Flexibilní optický planární vlnovod s optickým útlumem 0,20 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm [2] a) ohnutý, b) kroucený.

Protože je tato práce součástí studijního oboru Inteligentní budovy, zabývá se návrhem mnohavidových planárních vlnovodů s geometrickými rozměry 50x50 μm (výška x šířka), a to kvůli kompatibilitě s běžně používanými mnohavidovými optickými vlnovody v budovách. V budovách se stále častěji uplatňuje komunikace pomocí optického signálu, především pro přenos multimédií, ale začínají se používat i pro návrh optických tras pro sběr dat od různých senzorů. Pro optickou komunikaci v rámci spojení čip-čip, deska-deska apod. se v současnosti stále více uplatňují optické planární mnohavidové vlnovody.

K výrobě planárních optických vlnovodů se používají polovodiče, skla a optické krystaly. Ale tyto materiály i následná výroba planárních vlnovodů je drahá a náročná, proto se hledají alternativy v podobě nových polymerních materiálů. Polymery jsou lacinější a jednodušeji použitelné při výrobě a kvalitou srovnatelné. Příkladem polymerů pro vlnovodnou vrstvu jsou např. epoxydové pryskyřice Su8 (Epoxy Novak Resin), EpoCore a LIGHLINK™ XP-6701A Core. Také se musí brát v potaz materiál vhodný pro krycí vrstvu a vrstvy mezi substrátem a vlnovodem. Těmi mohou být EpoClad, LIGHLINK™ XH-100145 Clad. Důležitým bodem pro tuto práci je volba substrátů. Jelikož se jedná o flexibilní polymerní planární vlnovody, je důležité, aby byl substrát ohebný, teplotně stálý a dobře přílnavý pro použité polymery. Příklad použití takovýchto planárních vlnovodů je znázorněn na obrázku 1.2. Na obrázku 1.2a) je propojení čipů na jedné desce, na obrázku 1.2b) je propojení čipů v jedné rovině a na obrázcích 1.2c) a 1.2d) je znázorněno propojení různě pootočených plošných spojů.



Obrázek 1.2: Příklady použití planárních flexibilních vlnovodů, a) spojení na DPS, b) spojení deska-deska, c) spojení deska-deska 90°, d) spojení deska-deska 180° [2].

2 Teorie šíření světla v optických vlnovodech

Na světlo lze pohlížet 2 způsoby, z nichž každý se hodí pro vysvětlení jiných optických jevů.

a) Světlo jako proud fotonů.

Touto teorií se popisují např. fotoelektrický jev, emise optického záření apod.

Foton je částice s energií určenou vztahem

$$W = \hbar f \quad (2.1)$$

kde $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s; je Planckova konstanta a f je frekvence uvažovaného záření.

b) Světlo jako elektromagnetická vlna, která je popsána Maxwellovými rovnicemi. Tento způsob je vhodnější pro vysvětlení vlastností optických vlnovodů, a proto se jím budu zabývat podrobněji [4].

Světlo jako elektromagnetická vlna

Jak jsem již uvedl, světlo lze chápat jako elektromagnetickou vlnu popsanou Maxwellovými rovnicemi podobně jako rádiové vlny, pouze s jinou frekvencí. Tento způsob šíření je nezastupitelný při výkladu jevů, jako jsou šíření vln ve vlnovodu, odraz a difrakce, disperze, útlum, vazba vidů apod. V dalším popisu se omezím pouze na dielektrická prostředí, v nichž budu šíření optických vln analyzovat.

Matematickou manipulací Ampérova (2.2) a Faradayova (2.3) zákona pro harmonické průběhy získáme rovnici elektromagnetické vlny (2.4). Tato vlna vzniká rychlým pohybem nabitých částic. Její rychlost je rovna rychlosti světla a její vlnové délky mají široké spektrum od radiových vln až po gama záření.

Maxwellovy rovnice:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \text{ v diferenciálním tvaru: } \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ v diferenciálním tvaru: } \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

K těmto rovnicím musím přiřadit materiální vztahy $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$; $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$.

Po matematické úpravě a dosazením materiálových vztahů do (2.2) a (2.3) získám vlnovou rovnici pro homogenní izotropní prostředí bez náboje s harmonickými průběhy.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \quad \nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.4)$$

kde $\mathbf{k}^2 = -j\omega\mu (j\omega\epsilon + \sigma)$ je vlnový vektor.

Dále uvažuji harmonickou vlnu za rovinu, která se šíří ve směru z , \mathbf{E} ve směru osy x a \mathbf{H} ve směru osy y .

$$\frac{d^2 \mathbf{E}_x(z)}{dz^2} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E}_x(z) = 0 \quad \frac{d^2 \mathbf{E}_x(z)}{dz^2} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E}_x(z) = 0 \quad (2.5)$$

$$\mathbf{k} = k \mathbf{n}_0$$

kde \mathbf{n}_0 je jednotkový vektor kolmý na vlnoplochu, $k = \beta - j\alpha$ je konstanta šíření, která je v obecném prostředí komplexní $-\beta$ je fázová konstanta, α je měrný útlum [4].

Index lomu

V optice se pomocí indexu lomu vyjadřuje vlastnost prostředí (ztráty šířením světla) na místo permitivity ϵ a je definován jako:

$$n = \sqrt{\epsilon_r}, \text{ pro vzduch } n = 1 \quad (2.6)$$

kde ϵ_r vyjadřuje permitivitu prostředí.

Index lomu má také reálnou a imaginární část, ale pro běžné optické materiály je reálná část o několik řádů vyšší, proto imaginární část zanedbáváme [4].

Odraz a lom vln na rozhraní dvou prostředí

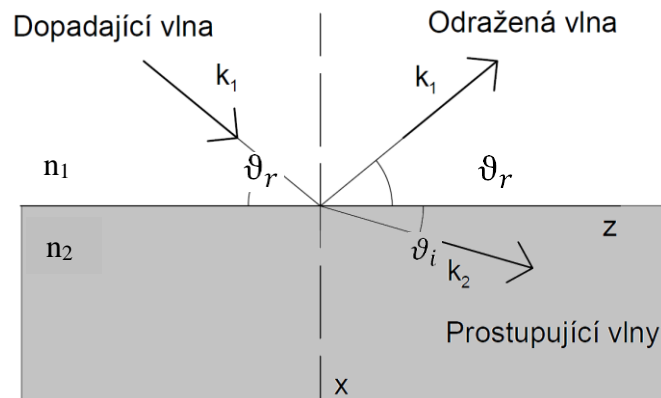
Pro popis odrazu a lomu uvažuji vlnu jako paprsek. Odraz a lom jsou nejdůležitější pojmy v optických vlnovodech. Při dopadu paprsku na rozhraní dvou paprsků platí Snellovy

zákony [4], které definují zákon odrazu (2.7) a lomu (2.8). Tyto zákony jsou zobrazeny na obr. 2.1.

$$\vartheta_r = \vartheta_i \quad (2.7)$$

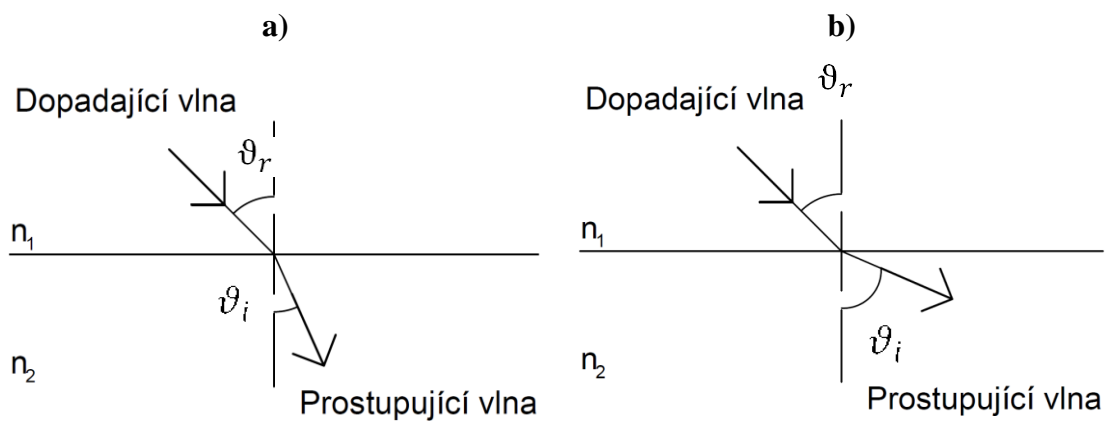
$$\frac{\cos \vartheta_i}{\cos \vartheta_t} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.8)$$

kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu prostředí.



Obrázek 2.1: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí.

Pokud je $n_2 > n_1$ (říkáme že n_2 je opticky hustší než n_1 vlna) se láme ke kolmici (viz obrázek 2.2a), pokud $n_1 > n_2$ vlna se láme od kolmice (viz obrázek 2.2b).



Obrázek 2.2: a) lom ke kolmici, b) lom od kolmice.

Totální odraz

Pokud $n_1 > n_2$, bude se vlna lámat od kolmice, při zvětšování úhlu ϑ_r dojde k situaci, kdy $\vartheta_i = 90^\circ$, úhlu ϑ_i se pak říká kritický (mezí) úhel a je vyjádřen rovnicí:

$$\vartheta_c = \arccos \frac{n_1}{n_2} \quad (2.9)$$

v momentě, kdy dosáhneme kritického úhlu, dochází k totálnímu odrazu. Ve vrstvě n_1 pak vzniká stojaté vlnění. Tento jev je hlavní pojem v optických vlnovodech [4].

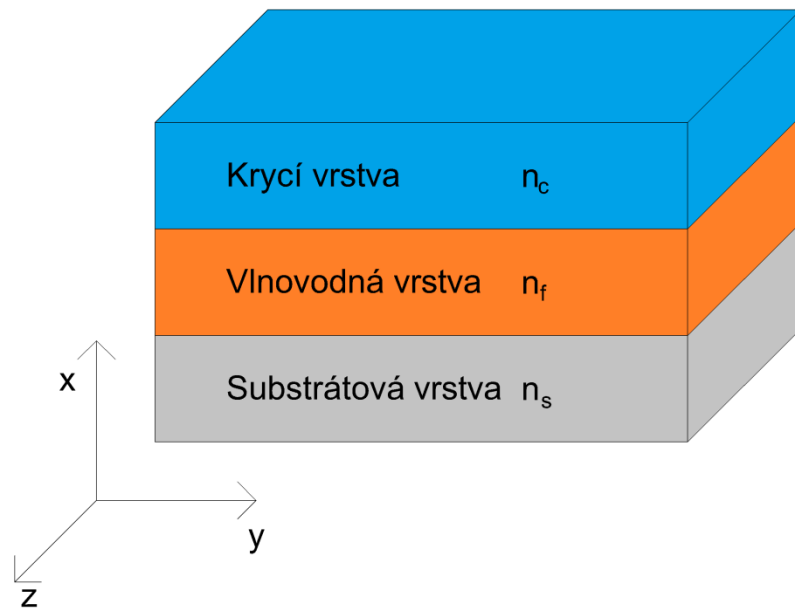
Planární optický vlnovod

Planární optický vlnovod je nejčastěji tvořen tím způsobem, že se na planární (rovinnou) destičku (substrát) nanese vlnovodná vrstva (jádro). Na tuto vrstvu se buď nanese další vrstva (krycí vrstva) nebo jí může být i vzduch. Tato vrstva má 2 funkce. Buď slouží jako ochrana vlnovodné vrstvy nebo vytváří vlastnosti vlnovodné struktury. Planární vlnovod lze vyrobit i pomocí difuze přímo do substrátu.

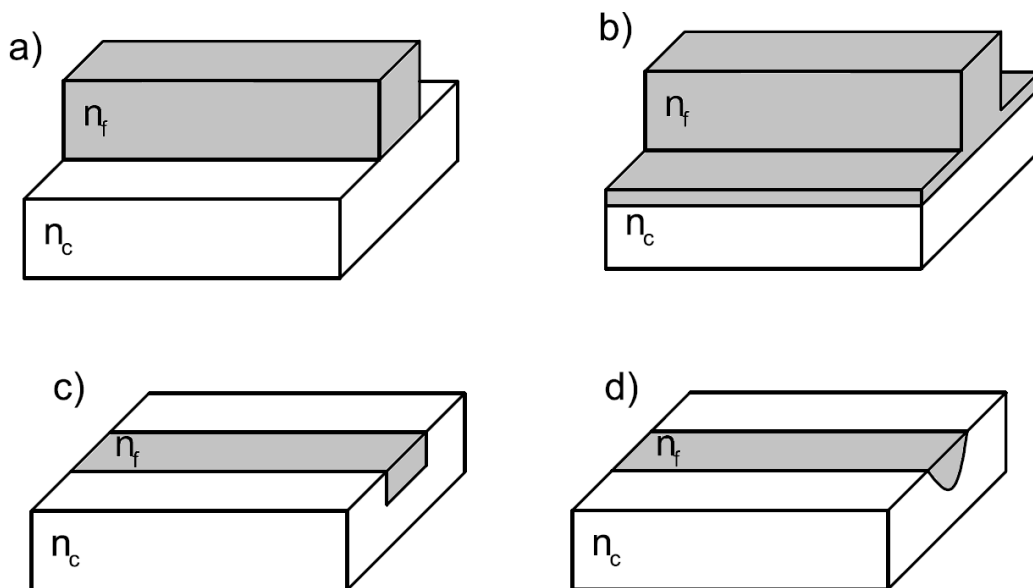
Základní podmínkou vzniku vlnovodného efektu je to, že vlnovodná vrstva (n_f) musí mít vyšší hodnotu indexu lomu než okolní vrstvy (substrát/přechodová vrstva n_s , krycí vrstva n_c).

$$n_f > n_s \quad n_f > n_c \quad (2.10)$$

Pokud je jeden z příčných rozměrů nekonečně dlouhý, nazývá se vlnovod dvourozměrný (2D). Takovýto vlnovod je ale nerealizovatelný, slouží pouze k pochopení jevů v dielektrických vlnovodech. V případě, že je vlnovod omezen ve všech směrech, nazývá se vlnovod trojrozměrný (3D). Základní struktura takového vlnovodu je na obrázku 2.3. Základní typy 3D vlnovodů jsou páskové a kanálkové vlnovody. Rozdíl mezi nimi je ten, že kanálkový vlnovod je vytvořen v substrátu pomocí difuze a páskový je vyroben nanesením pásku na substrát. Některé typy vlnovodů jsou uvedeny na obr. 2.4 [4].



Obrázek 2.3: 3D model optického planárního vlnovodu.

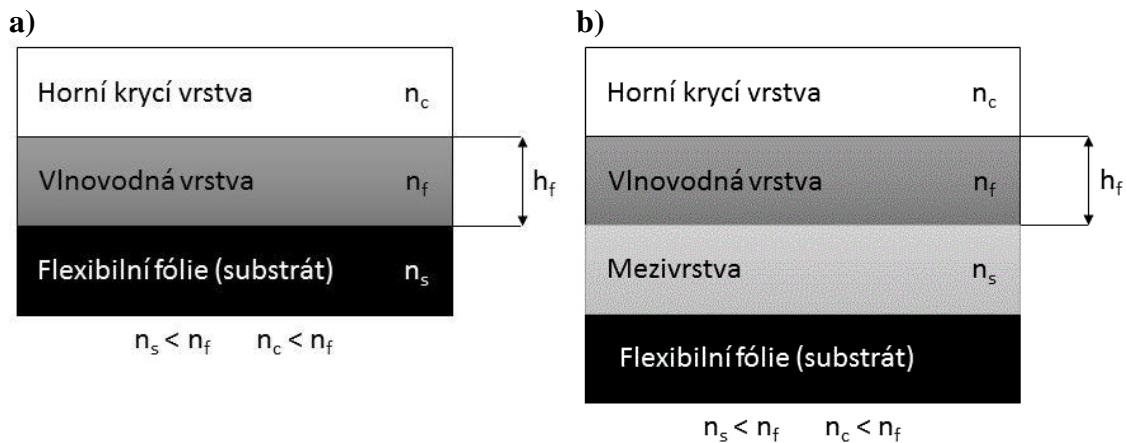


Obrázek 2.4: Příklady planárních 3D optických vlnovodů a) páskový, b) žebrový, c) vnořený, d) kanálkový [4].

3 Návrh flexibilního planárního optického vlnovodu

Optický planární vlnovod je základním prvkem pro návrh a výrobu složitějších struktur, jako je například hřebenový vlnovod, kanálkový vlnovod, optická rozbočnice apod., které mohou sloužit ke spojení různých elektrooptických a fotonických zařízení.

Základní struktura planárního vlnovodu je znázorněna na obrázku 3.1a). V případě, kdy je index lomu substrátu větší než vlnovodné vrstvy, musí se použít mezivrstva, která bude mít index lomu (n_s) nižší než vlnovodná vrstva. Struktura tohoto planárního vlnovodu je znázorněna na obrázku 3.1b).



Obrázek 3.1: a) struktura planárního optického vlnovodu bez mezivrstvy, b) struktura planárního optického vlnovodu s mezivrstvou.

Rozeř h_f určuje kritickou tloušťku vlnovodné vrstvy. Jelikož index lomu je závislý na vlnové délce používaného optického signálu, bude se i kritická tloušťka lišit v závislosti na vlnové délce. Tato kritická tloušťka h_f se vypočítá úpravou disperzní rovnice (3.1) [4]:

$$h_f = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_f^2 - n_s^2}} \left\{ m\pi + \arctan \left[p \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\}, \quad (3.1)$$

kde λ_0 je používaná vlnová délka, m je počet vidů, p je parametr, který závisí na orientaci vln – pro TE $p = 1$, pro TM $p = \left(\frac{n_f}{n_s}\right)^2$.

Ve vzorci se vyskytuje index p , který značí počet vidů, pro který je vrstva vypočítána. Z toho vyplývá, že tloušťka vrstvy je závislá na počtu vidů, které může šířit.

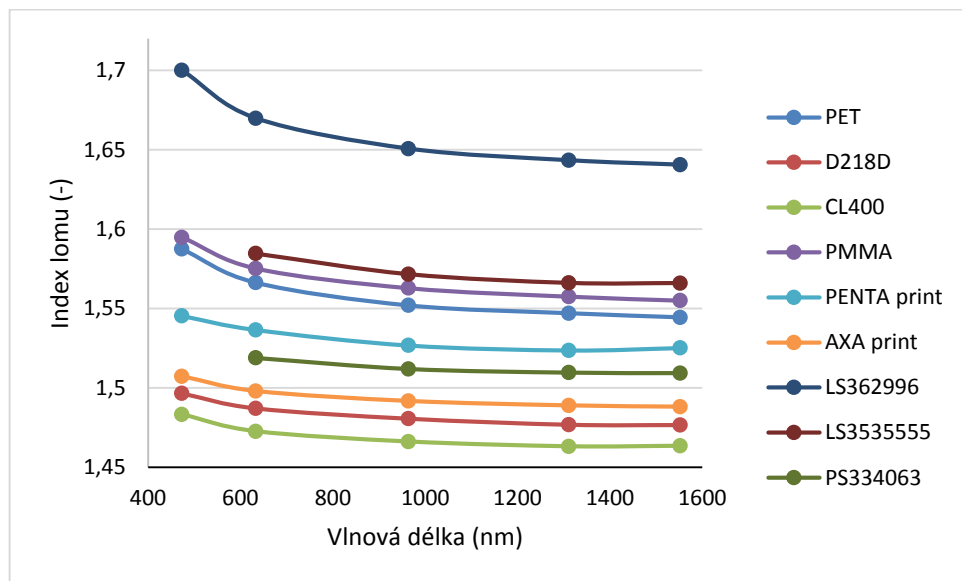
Může nastat i opačný problém, a to ten, že mě může zajímat, kolik vidů se bude šířit vlnovodem se stanovenou tloušťkou vlnovodné vrstvy. Počet TE vidů lze vypočítat pomocí vztahu 3.2, a počet TM vidů pomocí vztahu 3.3 [4]:

$$m = \text{int} \left\{ \frac{2}{\lambda} h_f \sqrt{n_f^2 - n_c^2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left[p \sqrt{\frac{n_f^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\}, \quad (3.2)$$

$$p = \text{int} \left\{ \frac{2}{\lambda} w \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{2}{\pi} \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^2 \sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \right\}. \quad (3.3)$$

3.1 Planární optický vlnovod

Při návrhu základní struktury jsem vycházel z teoretických znalostí uvedených v kapitole 1 a v době návrhu dostupných materiálů, které jsem měl k dispozici. Především se jedná o flexibilní podložky (fólie) a vlnovodné materiály. Jak jsem již uvedl výše, index lomu je závislý na vlnové délce optického signálu. Tato závislosti (obrázek 3.2 a 3.3) byly změřena pomocí zařízení Metricon [5], jedno hranolovou vidovou spektroskopií pro 5 vlnových délek (viz kapitola 5). Závislosti indexu lomu na vlnové délce mnou použitých flexibilních podložek je znázorněna na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro flexibilní polymerní podložky.

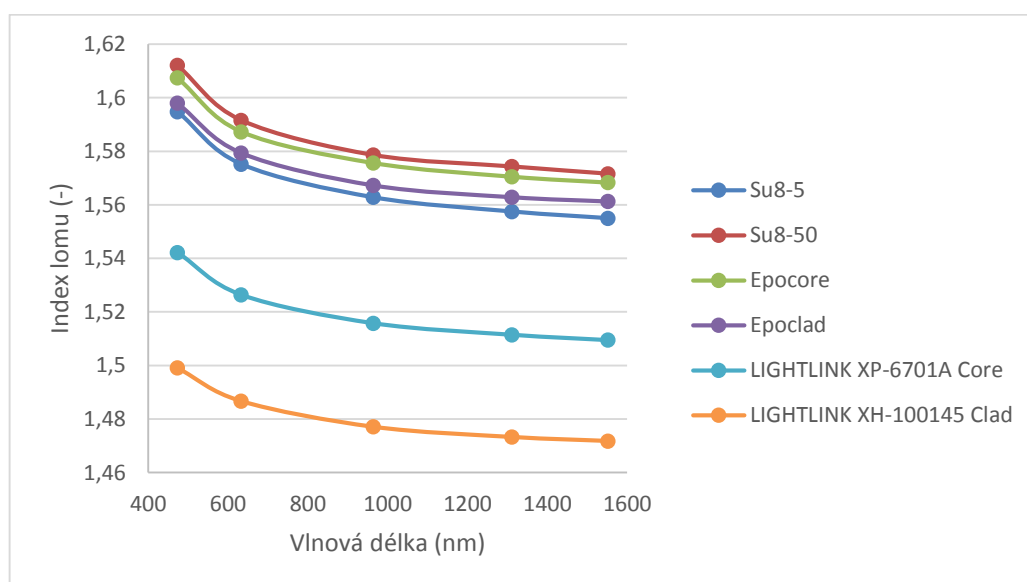
V tabulce 3.1 jsou uvedeny hodnoty indexů lomu zvolených substrátů pro běžně používané vlnové délky v komunikační technice tj. 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm, které byly odečteny z naměřených dat uvedených na obrázku 3.2.

Tabulka 3.1: Indexy lomů zvolených substrátů pro běžné komunikační vlnové délky, hodnoty odečteny z obrázku 3.2.

| λ (nm) | n (-) | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| | PMMA | PET | D218D | CL400 | PENTAPrint |
| 650 | 1,490 | 1,566 | 1,487 | 1,525 | 1,536 |
| 850 | 1,486 | 1,557 | 1,483 | 1,518 | 1,530 |
| 1310 | 1,481 | 1,547 | 1,477 | 1,508 | 1,524 |
| 1550 | 1,478 | 1,545 | 1,476 | 1,507 | 1,525 |

| λ (nm) | n (-) | | | |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|
| | AXAPrint | LS362996 | LS3535555 | PS334063 |
| 650 | 1,498 | 1,667 | 1,583 | 1,518 |
| 850 | 1,494 | 1,659 | 1,577 | 1,515 |
| 1310 | 1,489 | 1,643 | 1,566 | 1,510 |
| 1550 | 1,488 | 1,640 | 1,566 | 1,509 |

Jako vlnovodné materiály jsem použil polymery Su8-5, Su8-50, EpoCore a EpoClad, LIGHLINK™ XP-6701A Core a LIGHLINK™ XH-100145 Clad. Jedná se o komerčně dostupné polymery pro výrobu optických struktur. Polymer EpoClad slouží jako mezivrstva pro polymer EpoCore, LIGHLINK™ XH-100145 Clad je mezivrstva pro LIGHLINK™ XP-6701A Core. Závislost indexů lomů na vlnové délce je znázorněna na obrázku 3.3. V tabulce 3.2 jsou uvedeny číselné hodnoty indexů lomu pro komunikační vlnové délky podobně jako u flexibilních podložek.



Obrázek 3.3: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro vlnovodné optické materiály.

Tabulka 3.2: Indexy lomů zvolených vlnovodných materiálů pro běžné komunikační vlnové délky, odečtené z obrázku 3.3.

| λ (nm) | n (-) | | | | | |
|-------------------|-------|--------|---------|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore | EpoClad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad |
| 650 | 1,575 | 1,591 | 1,587 | 1,579 | 1,526 | 1,486 |
| 850 | 1,567 | 1,583 | 1,581 | 1,571 | 1,519 | 1,480 |
| 1310 | 1,557 | 1,574 | 1,571 | 1,563 | 1,511 | 1,473 |
| 1550 | 1,555 | 1,572 | 1,568 | 1,561 | 1,509 | 1,472 |

Ze závislostí na obrázcích 3.2 a 3.3, případně z tabulek 3.1 a 3.2, je možné navrhnout strukturu planárního vlnovodu. Z indexů lomů substrátů a vlnovodných materiálů je možné určit, kdy je možné nanést vlnovodný materiál přímo na substrát, a kdy je nutné nanést i mezivrstvu. Pro většinu mnou zvolených fólií lze nanést vlnovodnou vrstvu přímo na flexibilní podložku, pouze pro fólie LS3535555 a LS362996 je nutné použít mezivrstvu. Přehled navržených struktur, které je možné vyrobit bez mezivrstvy je znázorněn v tabulce 3.3. Naopak v tabulce 3.4 jsou znázorněny struktury, kde je nutné použít mezivrstvu. Při návrhu planárních vlnovodů jsem použil pouze polymery Su8-5, Su8-50, EpoClad a EpoCore, protože v době návrhu jsem neměl k dispozici polymery ze skupiny LIGHTLINK.

Tabulka 3.3: Přehled navržených struktur bez mezivrstvy.

| Struktura vlnovodu bez mezivrstvy | | | |
|--|-------------------------------|--------|---------|
| Substrát | Možné vlnovodné vrstvy | | |
| PET | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| D218D | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| CL400 | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| PMMA | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| PENTAPrint | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| AXAPrint | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| PS334063 | Su8-5 | Su8-50 | EpoCore |
| LS3535555 | * | Su8-50 | EpoCore |

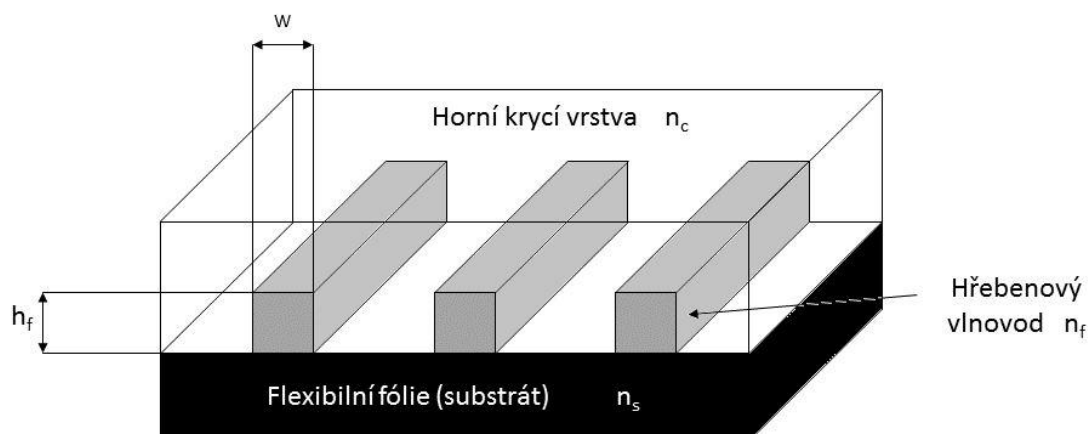
* substrát nelze v daném případě použít pro vlnovodnou vrstvu, protože má vyšší hodnotu indexu lomu než polymer Su8-5

Tabulka 3.4: Přehled navržených struktur s mezivrstvou.

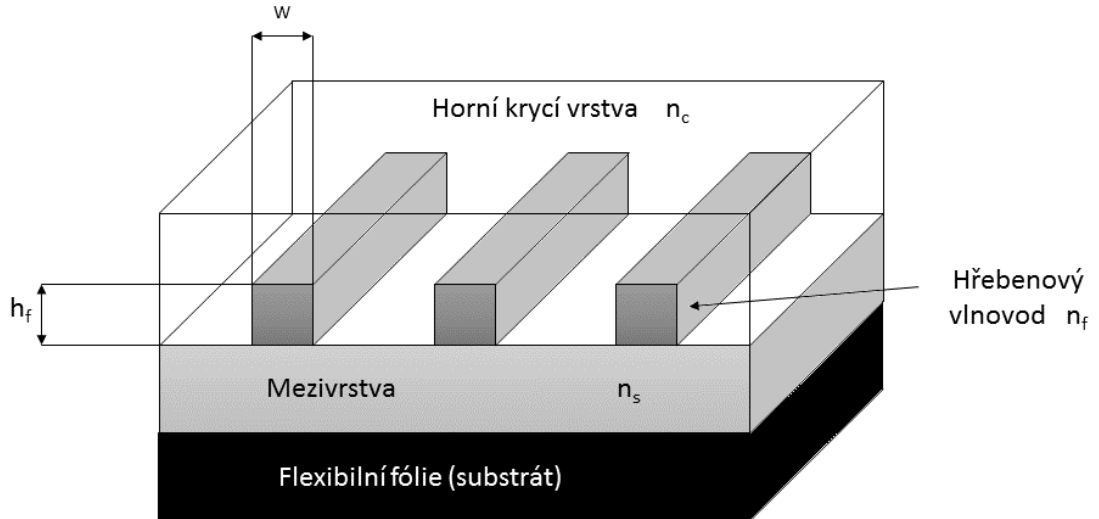
| Struktura vlnovodu s mezivrstvou | | |
|----------------------------------|------------|------------------|
| Substrát | Mezivrstva | Vlnovodná vrstva |
| LS3535555 | EpoClad | EpoCore |
| LS362996 | EpoClad | EpoCore |

3.2 Hřebenový planární optický vlnovod

Struktura hřebenového vlnovodu bez mezivrstvy je znázorněna na obrázku 3.4, struktura s mezivrstvou je znázorněna na obrázku 3.5. Platí zde stejné zásady návrhu jako u klasických planárních vlnovodů, tj. index lomu vlnovodné vrstvy musí být větší než index lomu okolních vrstev. V prvním kroku návrhu je třeba určit, jaký bude rozměr samotného vlnovodu (tloušťka h_f a šířka W). V mém případě se jedná o mnohavidový vlnovod s rozměrem $50 \times 50 \mu\text{m}$ (výška \times šířka), a to z toho důvodu, aby byl kompatibilní s běžně používanými optickými mnohavidovými vláknovými vlnovody.



Obrázek 3.4: Struktura kanálkového vlnovodu bez mezivrstvy.



Obrázek 3.5: Struktura kanálkového vlnovodu s mezivrstvou.

Protože mám určený rozměr vlnovodu, je v dalším kroku potřeba vypočítat tloušťky okolních vrstev (spodní mezivrstvy, horní krycí vrstvy). Důležitým parametrem pro výpočet kritických tlouštěk je ten, aby energie, která se vyzáří z vlnovodu pomocí evanescentní vlny byla menší než 1% celkové energie. Postup tohoto výpočtu je uveden níže. Nejdříve je potřeba vypočítat počet TE a TM vidů pomocí vzorců 3.1 a 3.2 [4].

Dále je potřeba určit efektivní index lomu n_{ef} . Tento výpočet jsem provedl pomocí programu Maple řešením disperzní rovnice [4]:

$$\frac{2\pi}{\lambda} h_f \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^{2v} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] - \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^{2v} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] = m\pi. \quad (3.4)$$

Disperzní rovnice nemá řešení pro všechny vidy, protože musí platit podmínka

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

Tloušťka mezní vrstvy se vypočítá dosazením celkového počtu vidů, které mohou být skutečně vlnovodem vedeny do rovnice [4]:

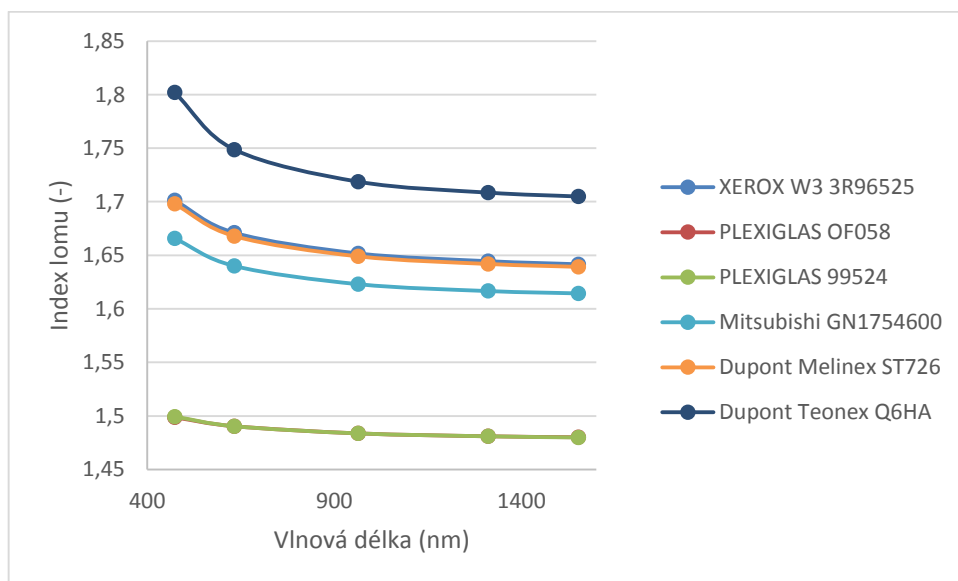
$$h_c: C' \exp(-qx) = a, \quad (3.5)$$

$$h_s: C' \left[\cos(ht_g) + \left(\frac{q}{h} \right) \sin(ht_g) \right] \exp[p(x + t_g)] = a. \quad (3.6)$$

Zdrojový kód a podrobnější výpočet tohoto postupu je uveden v příloze A.

Materiály pro výrobu hřebenových vlnodů

Při návrhu planárních vlnodů jsem vycházel z materiálů, které jsem měl v době návrhu k dispozici, hlavně dostupných flexibilních fólií. Při jejich výrobě se ale ukázalo, že je nebudu moci použít, protože při nanášení ostatních vrstev vznikaly různé chyby. Příklady těchto chyb jsou uvedeny v příloze B. Pro jejich použití by se musely použít složitější postupy při výrobě, především co se týká čištění substrátů. Proto jsem při návrhu hřebenových vlnodů měl k dispozici nové flexibilní fólie, a to: Plexiglas® OF058 500 μm , Plexiglas® OF058 200 μm , DuPont Melinex® ST726 175 μm , DuPont Teonex® Q65HA 125 μm , Mitsubishi GN1754600 175 μm , Mitsubishi RN190 a Xerox W3 3R96525. Jako vlnodný materiál jsem použil EpoCore, Su8-5 a Su8-50 a také jsem provedl návrh s materiály LIGHLINK™ XP-6701A Core. Pro návrh mezivrstvy jsem použil polymery EpoClad a LIGHLINK™ XH-100145 Clad. Na obrázku 3.5 je znázorněna závislost indexu lomu na vlnové délce nových flexibilních fólií, která byla stejně jako předchozí fólie změřena na zařízení Metricon na VŠCHT v Praze. V tabulce 3.5 jsou uvedeny číselné hodnoty indexu lomu na nejpoužívanějších komunikačních vlnových délkách, podobně jako v kapitole 3.1 pro nové flexibilní fólie.



Obrázek 3.5: Závislost indexu lomu na vlnové délce flexibilních fólií použitých při návrhu hřebenových vlnodů.

Tabulka 3.5: Indexy lomů flexibilních podložek pro běžné komunikační vlnové délky, odečtené z obrázku 3.5.

| λ (nm) | n (-) | | |
|----------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| | XEROX W3 3R96525 | Plexiglas OF058 | Plexiglas 99524 |
| 650 | 1,669 | 1,489 | 1,490 |
| 850 | 1,658 | 1,486 | 1,486 |
| 1310 | 1,644 | 1,481 | 1,481 |
| 1550 | 1,642 | 1,480 | 1,480 |
| λ (nm) | n (-) | | |
| | Mitsubishi GN 175 4600 | Dupont Melinex ST726 | Dupont Teonex Q6HA |
| 650 | 1,645 | 1,667 | 1,747 |
| 850 | 1,635 | 1,654 | 1,729 |
| 1310 | 1,622 | 1,642 | 1,709 |
| 1550 | 1,620 | 1,639 | 1,705 |

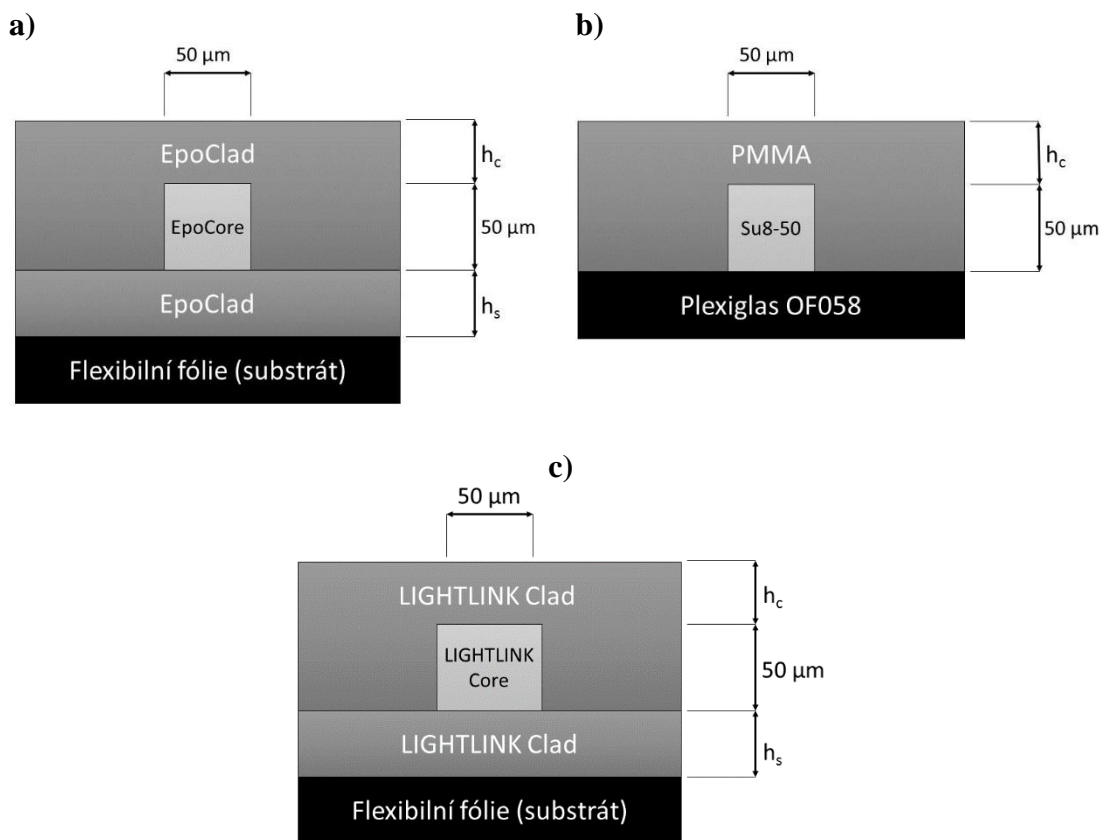
Z uvedených indexů lomu vyplývá struktura hřebenového vlnovodu. Většina flexibilních fólií má větší index lomu než jsou použité vlnovodné materiály, proto se musí použít mezivrstva. Pouze u fólií Plexiglas je možné nanést vlnovodnou vrstvu přímo na tento substrát. V tabulce 3.6 jsou znázorněny možné složení struktury vlnovodů.

Tabulka 3.6: Navržená struktura hřebenového vlnovodu.

| Substrát | Spodní mezivrstva | Vlnovodná vrstva | Horní krycí vrstva |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Xerox W3 3R96525 | EpoClad | EpoCore | EpoClad |
| Dupont Teonex Q65HA | EpoClad | EpoCore | EpoClad |
| Mitsubishi GN175 4600 | EpoClad | EpoCore | EpoClad |
| Dupont Melinex ST726 | EpoClad | EpoCore | EpoClad |
| Xerox W3 3R96525 | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad |
| Dupont Teonex Q65HA | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad |
| Mitsubishi GN175 4600 | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad |
| Dupont Melinex ST726 | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad |
| Plexiglas OF058 | * | EpoCore | EpoClad |
| Plexiglas OF058 | * | Su8-5 | PMMA |
| Plexiglas OF058 | * | Su8-50 | PMMA |

* pro substrát Plexiglas OF058 není nutné použít mezivrstvu, protože má nižší index lomu než použité polymery EpoCore, Su8-5 a Su8-50

Na obrázku 3.6 jsou znázorněny struktury navržených hřebenových vlnovodů. Na obrázku 3.6a) je struktura, která se skládá z flexibilní fólie (mimo Plexiglas), mezivrstvy EpoClad, vlnovodného kanálku z materiálu EpoCore a horní krycí vrstvy EpoClad. Na obrázku 3.6b) je struktura, kde je vlnovodný materiál nanesen přímo na substrát Plexiglas OF058, jako horní krycí vrstva je použit materiál PMMA. Na obrázku 3.6c) je struktura která se skládá z mezivrstvy/horní krycí vrstvy LIGHLINK™ XH - 100145 Clad a vlnovodného materiálu LIGHLINK™ XP-6701A Core. Všechny tyto struktury jsou navrženy tak, aby byly symetrické. Materiál PMMA má velice podobné vlastnosti jako Plexiglas OF058, tudíž je mohou považovat za symetrický.

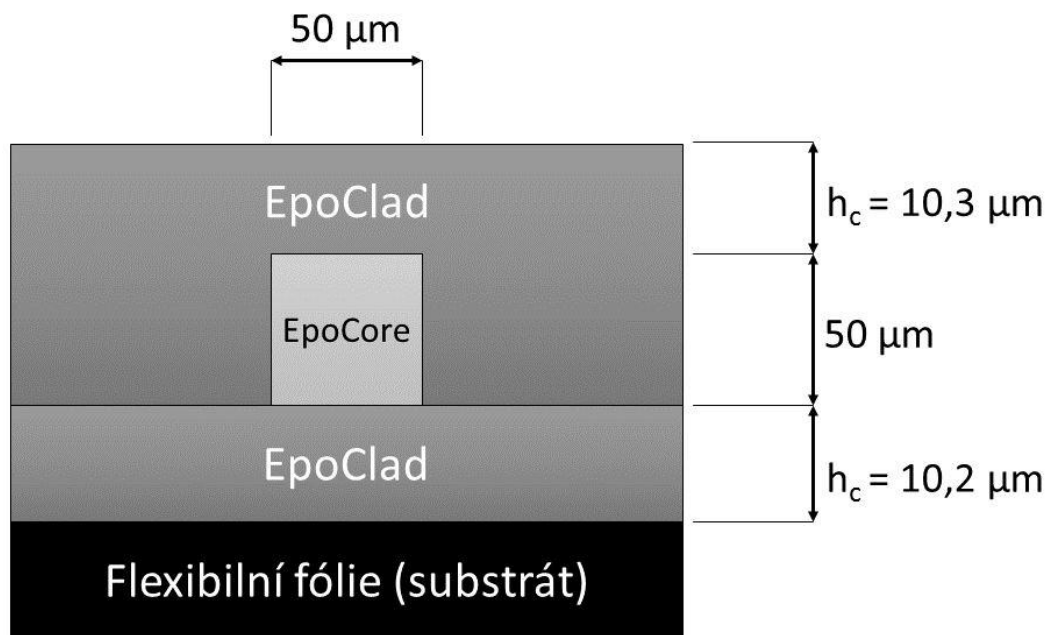


Obrázek 3.6: a) symetrický vlnovod vytvořený nanesením mezivrstvy EpoClad na flexibilní fólii, b) symetrický vlnovod vytvořený nanesením vlnovodné vrstvy Su8-50 přímo na substrát Plexiglas OF058, c) symetrický vlnovod vytvořený nanesením mezivrstvy LIGHLINK™ XH-100145 Clad na flexibilní fólii.

Geometrické rozměry vlnovodu

Základním rozměrem planárního hřebenového vlnovodu je jak jsem již uvedl šířka a výška vlnovodné vrstvy. Ten jsem zvolil $50 \times 50 \mu\text{m}$, aby byl kompatibilní se standardními mnohavidovými optickými vláknovými vlnovody. Dalšími rozměry je tloušťka spodní vrstvy (mezivrstvy) h_s a tloušťka horní krycí vrstvy h_c . Ty jsem určil ze vztahů 3.1 až 3.6 tak, aby energie vyzářená z vlnovodu pomocí evanescentní vlny byla menší než 1% celkové energie. Tyto výpočty jsem provedl pro vlnové délky 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm.

První návrh jsem provedl pro strukturu s mezivrstvou tj. flexibilní fólie/EpoClad/EpoCore/EpoClad. Příklad navrženého vlnovodu je na obrázku 3.7. Minimální rozměry navrženého vlnovodu vyšly $h_s = 10,2 \mu\text{m}$ a $h_c = 10,3 \mu\text{m}$. Tyto rozměry jsou minimální tloušťky, které jsou použitelné pro všechny výše uvedené vlnové délky.

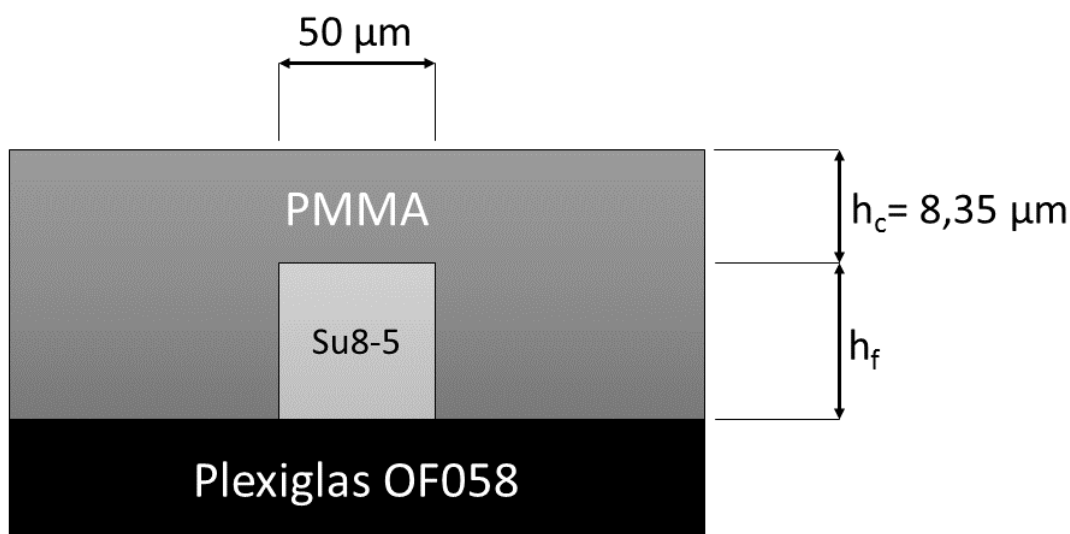


Obrázek 3.7: Příklad navrženého vlnovodu Substrát/EpoClad/EpoCore/EpoClad včetně všech geometrických rozměrů pro vlnovou délku 850 nm.

Tabulka 3.7: Vypočtené rozměry vlnovodu a počty vedených vidů pro strukturu substrát/EpoClad/EpoCore/EpoClad.

| Vlnová délka (nm) | Index lomu (-) | | Rozměry vlnovodu (μm) | | Počet vidů TE = TM |
|-------------------|----------------|---------|------------------------------------|-------|-----------------------|
| | EpoClad | EpoCore | h_c | h_s | |
| 650 | 1,578 | 1,588 | 8,96 | 8,97 | 29 |
| 850 | 1,572 | 1,583 | 10,30 | 10,20 | 27 |
| 1310 | 1,563 | 1,572 | 2,17 | 2,34 | 4 |
| 1550 | 1,562 | 1,555 | 2,47 | 2,66 | 6 |

Druhý návrh se týká struktury Plexiglas OF058/Su8-5/PMMA. S epoxydovou pryskyřicí Su8-5 je možné vyrobit vlnovodné vrstvy do tloušťky $5 \mu\text{m}$, proto je u této struktury navržena pouze šířka kanálku $50 \mu\text{m}$. Příklad této struktury je uveden na obrázku 3.8. Rozměr h_c je dána tloušťkou flexibilní fólie, tedy $200 \mu\text{m}$. Kritická tloušťka horní krycí vrstvy je $6,5 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 1310 nm . V tabulce 3.8 jsou uvedeny rozměry vlnovodu pro ostatní vlnové délky.

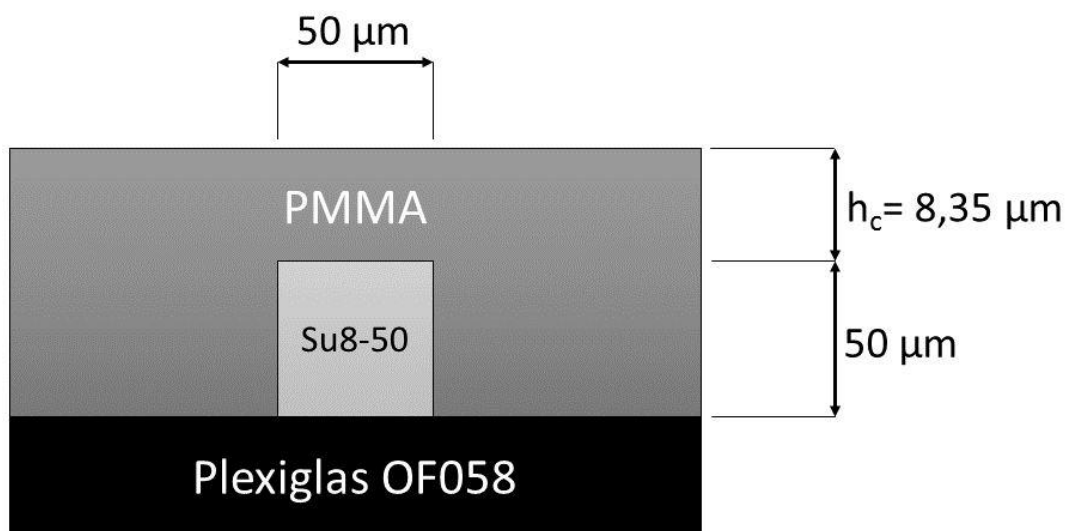


Obrázek 3.8: Příklad navrženého vlnovodu Plexiglas/Su8-5/PMMA pro vlnovou délku 1310 nm .

Tabulka 3.8: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-5/PMMA.

| Vlnová délka (nm) | Index lomu (-) | | | Rozměry vlnovodu (μm) | | Počet vidů |
|-------------------|-----------------|-------|-------|------------------------------------|-------|------------|
| | Plexiglas OF058 | Su8-5 | PMMA | h_c | h_s | TE = TM |
| 650 | 1,489 | 1,574 | 1,490 | 5,13 | 4,56 | 78 |
| 850 | 1,486 | 1,569 | 1,485 | 5,53 | 6,03 | 58 |
| 1310 | 1,481 | 1,559 | 1,481 | 6,50 | 6,93 | 36 |
| 1550 | 1,480 | 1,555 | 1,478 | 0,80 | 8,50 | 30 |

Třetí navržená struktura je podobná jako ta předchozí, pouze jako vlnovodný materiál je použit polymer Su8-50. Na obrázku 3.9 je znázorněna tato struktura včetně vypočteného rozměru horní krycí vrstvy, který je $8,35 \mu\text{m}$ pro vlnovou délku 1550 nm . V tabulce 3.9 jsou uvedeny rozměry vypočtené pro ostatní vlnové délky.

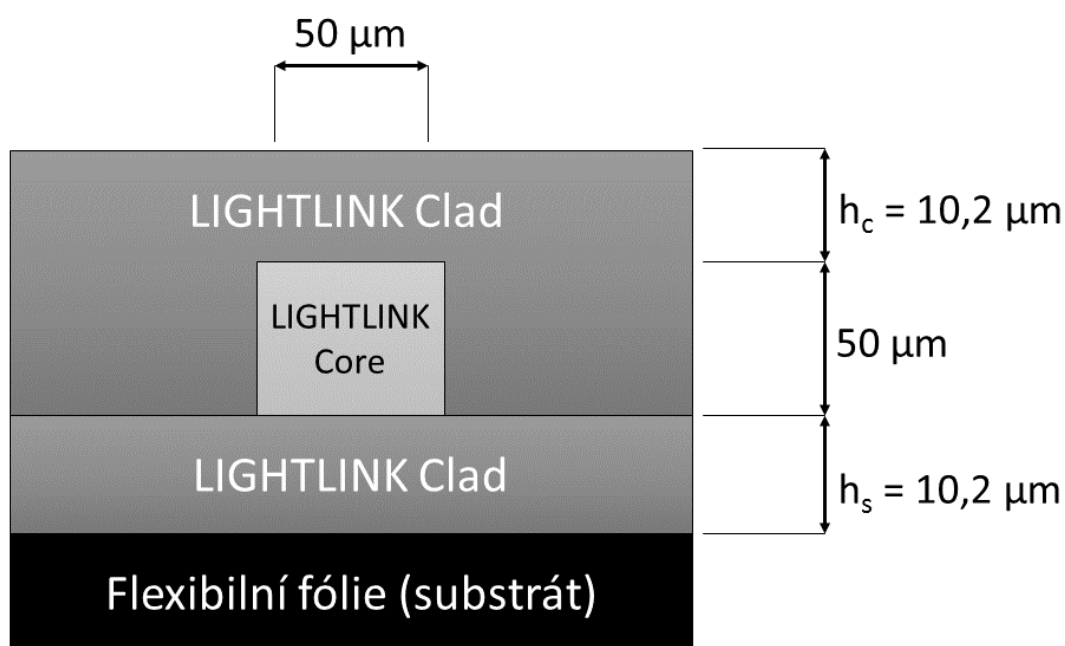


Obrázek 3.9: Příklad navrženého vlnovodu Plexiglas OF058/Su8-50/PMMA pro vlnovou délku 1550 nm .

Tabulka 3.9: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-50/PMMA.

| Vlnová délka (nm) | Index lomu (-) | | | Rozměry vlnovodu (μm) | | Počet vidů |
|-------------------|----------------|--------|-------|-----------------------|-------|------------|
| | Plexiglas | Su8-50 | PMMA | h_c | h_s | TE = TM |
| 650 | 1,489 | 1,589 | 1,575 | 5,73 | 4,86 | 85 |
| 850 | 1,486 | 1,581 | 1,567 | 5,14 | 5,43 | 63 |
| 1310 | 1,481 | 1,573 | 1,558 | 6,93 | 7,43 | 40 |
| 1550 | 1,480 | 1,570 | 1,555 | 8,35 | 7,79 | 33 |

Poslední návrh jsem provedl pro strukturu s materiály LIGHLINK™ XP-6701A Core a LIGHLINK™ XH-100145 Clad. Příklad této struktury včetně všech rozměrů je na obrázku 3.10. Největší tloušťka vlnovodné vrstvy je pro vlnovou délku 1550 nm. V tabulce 3.10 jsou znázorněny vypočtené hodnoty pro všechny používané vlnové délky.



Obrázek 3.10: Příklad navrženého vlnovodu LIGHLINK™ XH-100145 Clad/ LIGHLINK™ XP-6701A Core / LIGHLINK™ XH-100145 Clad pro vlnovou délku 1550 nm.

Tabulka 3.10: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu
 LIGHLINK™ XH-100145 Clad/ LIGHLINK™ XP-6701A Core /
 LIGHLINK™ XH-100145 Clad.

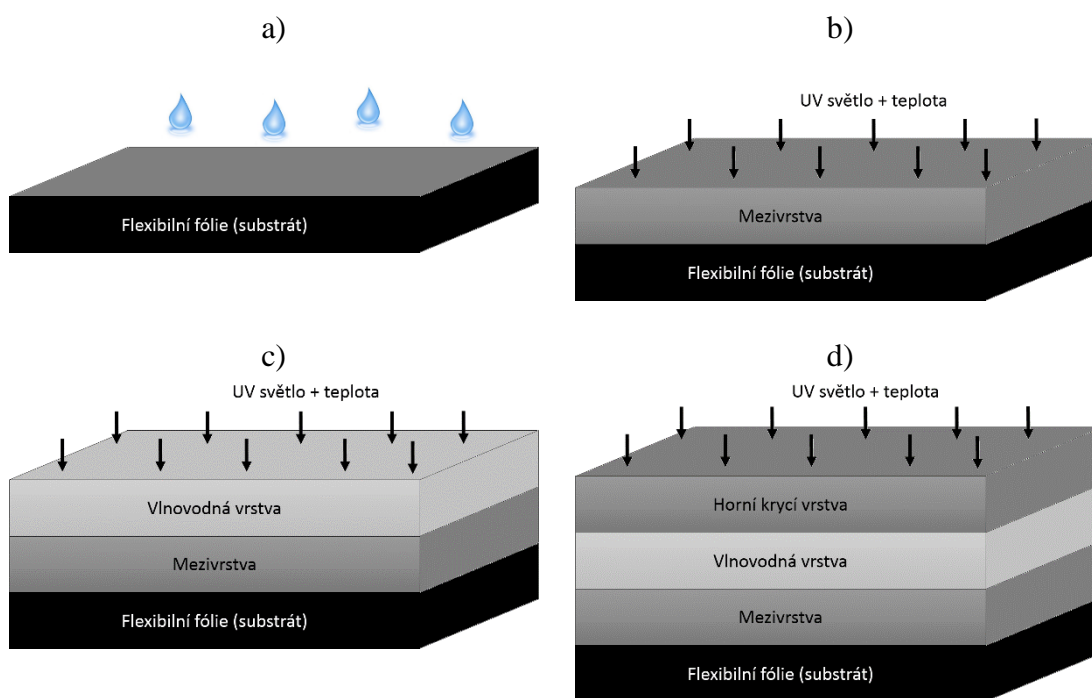
| Vlnová délka (nm) | Index lomu (-) | | | Rozměry vlnovodu (μm) | | Počet vidů |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------|---------------|
| | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | LIGHLINK™ XP-6701A Core | LIGHLINK™ XH-100145 Clad | h_c | h_s | TE = TM |
| 650 | 1,486 | 1,526 | 1,486 | 6,32 | 6,32 | 53 |
| 850 | 1,480 | 1,519 | 1,480 | 7,850 | 8,10 | 40 |
| 1310 | 1,473 | 1,511 | 1,473 | 8,40 | 8,40 | 25 |
| 1550 | 1,472 | 1,509 | 1,472 | 10,20 | 10,20 | 21 |

4 Výroba

4.1 Výroba planárních vlnodů

Výroba planárních optických vlnodů je uvedena na obrázku 4.1, pro výrobu otických vlnodů byly použity komerčně dostupné polymery od firmy Micro resist Technology GmbH. Před vlastní depozicí je nutné substrát řádně vyčistit (viz obrázek 4.1a). Po vyčištění substrátu se na něj pomocí metody rotačního lití nanese mezivrstva (EpoClad nebo LIGHLINK™ XH - 100145 Clad), v případě polymerů Su8-5/50 byly tyto polymery nanášeny přímo na vybrané substráty. Po nanesení mezivrstvy jsou polymery EpoClad a Su8-5/50 vytvrzeny UV světlem, v případě polymeru LIGHLINK™ XH-100145 Clad je tento polymer vytvrzen pomocí zvýšené teploty (viz obrázek 4.1b).

V dalším kroku se opět pomocí metody rotačního lití nanese vlnodná vrstva (EpoCore a LIGHLINK™ XP-6701A Core), která se také nechá vytvrdit tepelně a i UV světlem (viz obrázek 4.1c). Pokud je potřeba vytvořit horní krycí vrstvu, zopakuje se postup s nanášením mezivrstvy, a poté se hotový vzorek nechá vytvrdit UV světlem a teplotou (viz obrázek 4.1d). Detailní postupy použité pro čištění substrátů pro jednotlivé typy polymerů jsou uvedeny v kapitolách 4.2 až 4.3.



Obrázek 4.1: Výroba planárních vlnodů a) čištění flexibilních substrátů, b) nanesení mezivrstvy, c) nanesení vlnodné vrstvy, d) nanesení horní krycí vrstvy.

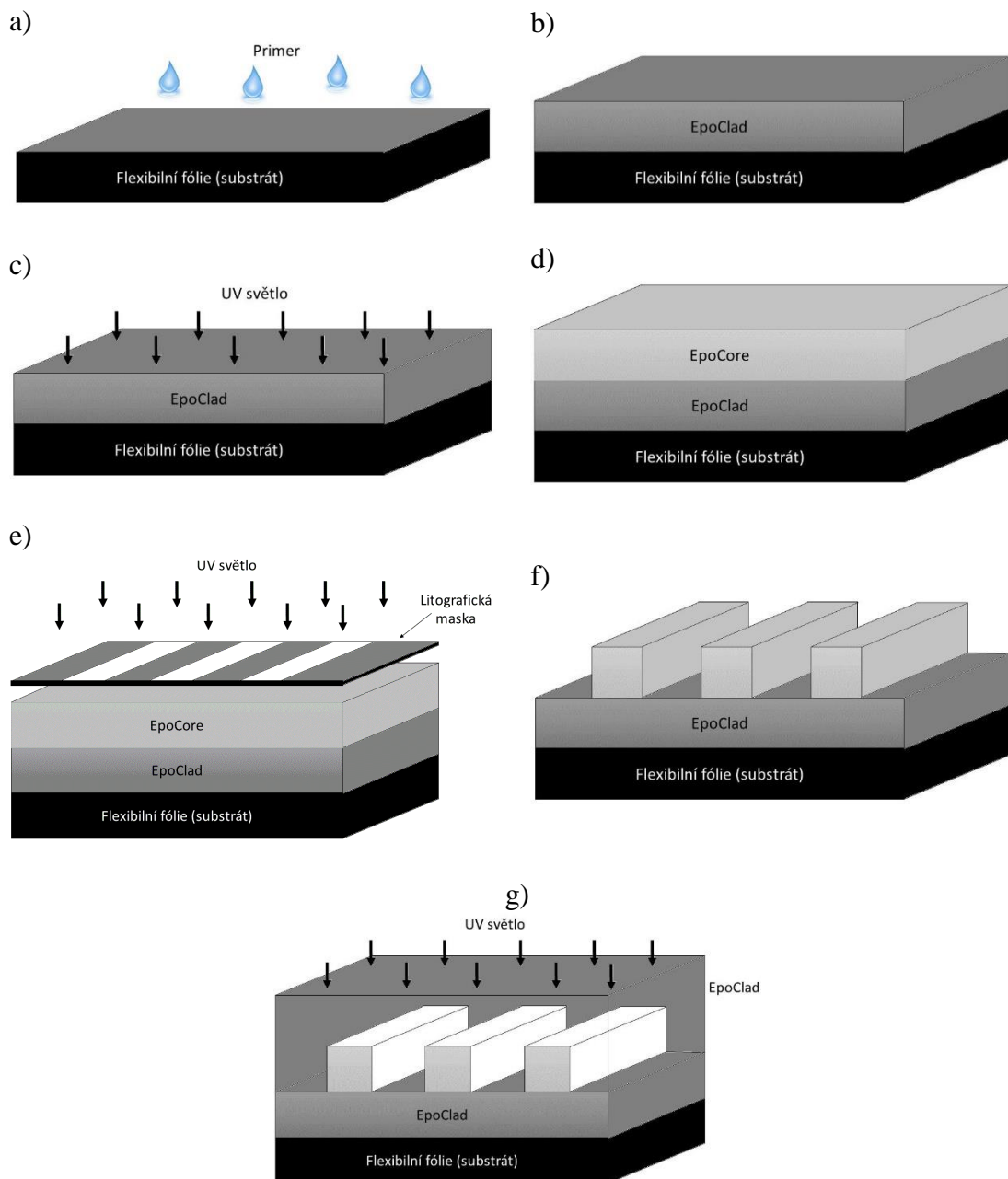
4.2 Vlnovody hřebenových vlnodů s polymery EpoClad a EpoCore

Výroba planárních hřebenových vlnodů se provádí pomocí optické litografie. V prvním kroku je potřeba substrát očistit od hrubých nečistot, například stlačeným vzduchem. Pro planární vlnovody, které jsou vyráběny z polymerních materiálů EpoClad a EpoCore se substráty čistí nanesením MCC Primeru 80/20 na zvolený substrát a nechá se přibližně 30 sekund působit. V přístroji pro rotační lití se tento substrát nechá roztočit a tím se přebytečný Primer odstraní (viz obrázek 4.1a). Následně se takto připravený vzorek vysuší na definovanou teplotu, přibližně po dobu 3 minut.

V dalším kroku se na substrát nanese dostatečné množství polymeru EpoClad. Nanesení je provedeno pomocí metody rotačního lití, kdy je tloušťka vrstvy určena rychlostí otáček. Tímto se materiál rovnoměrně rozlije po povrchu substrátu a vytvoří požadovanou tloušťku vrstvy (viz obrázek 4.1b). Takto připravený vzorek je nadále tepelně upraven. Aplikovaná teplota i čas závisí na použitých materiálech. Po vypečení a vychladnutí se vzorek umístí pod UV lampu a nechá se vytvrdit (viz obrázek 4.1c). Na takto připravený vzorek se opět pomocí metody rotačního lití nanese vlnovodná vrstva, opět za definovaných otáček a času (viz obrázek 4.1d).

V této fázi výroby se provede samotná výroba hřebenového vlnovodu pomocí optické litografie. Na připravený vzorek se přiloží litografická maska s navrženými motivy a nechá se dostatečně dlouhou dobu osvitit UV světlem (viz obrázek 4.1e). Na FEL byl tento osvit proveden pomocí litografu Perkin-Elmer 300 HT Micralign a na Masarykově univerzitě v Brně pomocí litografu Perkin-Elmer (PE 340 HT) s Hg výbojkou. Jelikož se jedná o negativní fotorezist, odleptá se po osvětlení neosvícená část pomocí vývojky mr - Dev 600. Takto vyrobená struktura je na obrázku 4.1f). Motivy použitých litografických masek jsou uvedeny v příloze B.

U struktur, kde není krycí vrstvou vzduch, se na vzorek nanese další vrstva materiálu EpoClad, pomocí metody rotačního lití, a nechá se vytvrdit UV světlem (viz obrázek 4.1g). Tím je výroba dokončena. Vzhledem k citlivosti kvality výsledného filmu na přítomnost prachových částic, musí se celý technologický postup provádět v bezprašném prostředí. V případě výroby struktur bez mezivrstvy je postup stejný, pouze se vynechá nanesení mezivrstvy (obrázek 4.1b) a c). Podrobný postup výroby jednotlivých vzorků je uveden v příloze na D.



Obrázek 4.2: Výroba hřebenových planárních vlnovodů z polymerů EpoClad a EpoCore, a) čištění substrátu, b) nanesení mezivrstvy, c) vytvrzení mezivrstvy UV světlem, d) nanesení vlnovodné vrstvy, e) optická litografie, f) odleptání neosvícené části, g) nanesení horní krycí vrstvy.

4.3 Vlnovody hřebenových vlnodů s polymery LIGHTLINK

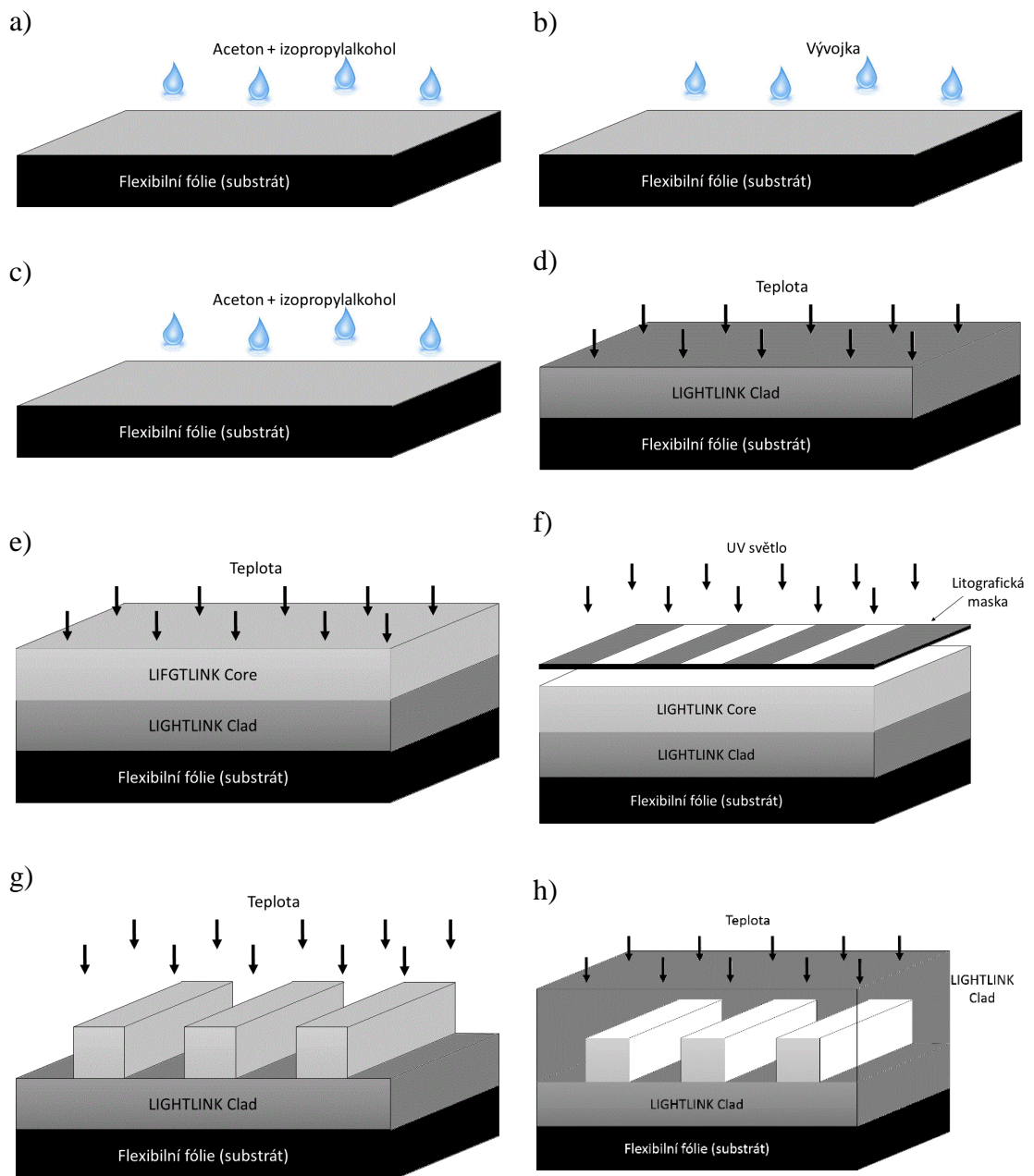
Výroba optických planárních vlnodů s polymery LIGHTLINK™ XH-100145 Clad a LIGHTLINK™ XP-6701A Core je velice podobná předchozímu postupu s polymery EpoCore a EpoClad. Zásadní rozdíl spočívá v čištění flexibilního substrátu. V prvním kroku je potřeba zvolený substrát zbavit hrubých nečistot, například stlačeným vzduchem. Další postup čištění je o několik kroků složitější, než je tomu u struktur s polymery EpoClad a EpoCore. Nejdříve se zvolený substrát očistí nanesením acetonu a nechá se zhruba 30 sekund působit. Pomocí přístroje pro rotačního lití se nechá přebytečný aceton odstranit. Následně se na substrát nanese izopropylalkohol, který se také nechá 30 sekund působit a poté se opět přístrojem pro rotačního lití odstraní (viz obrázek 4.2a).

Po čištění acetonem a izopropylalkoholem se zvolený substrát vloží do vývojky LIGHTLINK XP-3636 (viz obrázek 4.2b) a nechá se definovanou dobu působit. Poté se přebytečná vývojka nechá odstranit přístrojem pro rotačním litím. Dalším krokem je opakování postupu s acetonem a izopropylalkoholem (viz obrázek 4.2c).

Následující postup je již stejný, jako je tomu u polymerů EpoClad a EpoCore tzn., na vyčištěný substrát se nanese pomocí rotačního lití polymer LIGHTLINK™ XH - 100145 Clad, kdy je tloušťka vrstvy opět dána definovanou rychlostí otáček. Rozdíl oproti předchozí výrobě je v tom, že u polymeru LIGHTLINK™ XH-100145 Clad není nutné vytvrzení UV světlem, ale stačí pouze vytvrzení teplotou (viz obrázek 4.2d).

Na takto připravený vzorek se opět pomocí metody rotačního lití nanese vrstva polymeru LIGHTLINK™ XP-6701A Core (viz obrázek 4.2e), a nechá se tepelně vytvrdit. Takto připravený vzorek se vloží do optického litografu, přiloží se litografická maska a vzorek se osvítil UV světlem (viz obrázek 4.2f). Tento osvit byl opět proveden pomocí dvou tipů optický litografů, stejně jako v kapitole 4.2. Po osvětlení se opět nechá vzorek vytvrdit působením teploty. V dalším kroku se vzorek vloží do vývojky LIGHTLINK XP - 3636, která odstraní neosvícenou část vlnovodné vrstvy (viz obrázek 4.2g). K úplnému vytvrzení je potřeba opět nechat působit teplotu.

V případě vytvoření horní krycí vrstvy je potřeba znovu nanést polymer LIGHTLINK™ XH-100145 Clad pomocí metody rotačního lití a pro vytvrzení se nechá působit vysoká teplota (viz obrázek 4.2h). Podrobný postup výroby pro jednotlivé vzorky je uveden v příloze D.



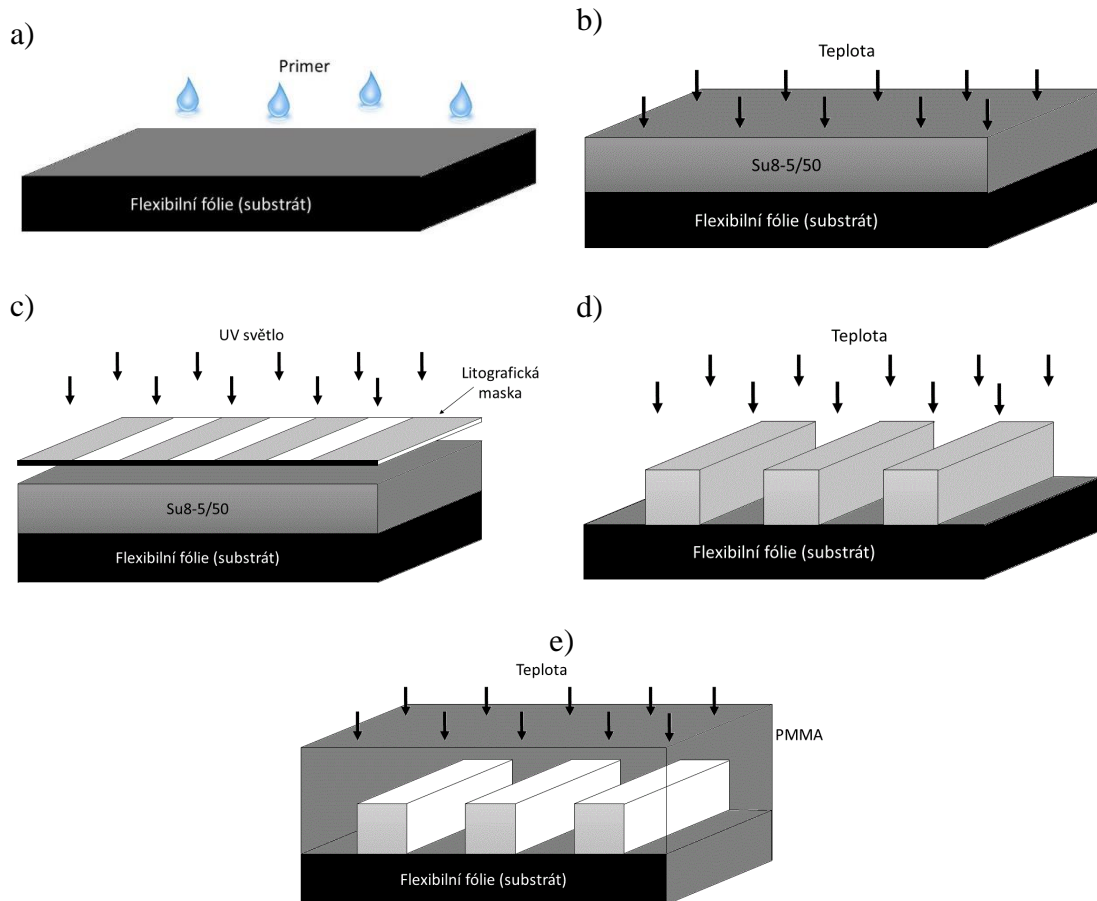
Obrázek 4.3: Výroba hřebenových planárních vlnodů z polymerů LIGHLINK™ H - 100145 Clad a LIGHLINK™ XP-6701A Core, a)-c) čištění substrátu, d) nanesení mezivrstvy a vytvrzení teplotou, e) nanesení vlnodné vrstvy, f) optická litografie, g) odleptání neosvícené části, h) nanesení horní krycí vrstvy.

4.4 Vlnovody hřebenových vlnovodů s polymery Su8-5 a Su8-50

Výroba optických hřebenových planárních vlnovodů pomocí epoxydové pryskyřice Su8- 5 nebo Su8-50 je téměř shodná jako výroba s polymery EpoClad a EpoCore. Rozdíl je pouze v tom, že materiál Su8-5/50 se nanáší přímo na substrát bez použití mezivrstvy.

I zde se musí substrát kvalitně vyčistit, nejdříve od hrubých nečisto pomocí stlačeného vzduchu a poté se nanese MCC Primer 80/20 , který se nechá cca 30 sekund působit. Po 30 sekundách se přebytečný Primer odstraní pomocí přístroje pro rotační lití (viz obrázek 4.3a).

Na vyčištěný substrát se pomocí metody rotačního lití nanese přímo vlnovodný materiál Su8-5/50, opět definovanými otáčkami. Po nanesení vlnovodné vrstvy se tato vrstva nechá vytvrdit působením teploty (viz obrázek 4.3b). V dalším kroku se takto připravený vzorek vloží do litografu, přiloží se litografická maska a nechá se působit UV světlo (viz obrázek 4.3c). Osvícení bylo provedeno ve dvou různých litografech uvedených v kapitole 4.2. Po osvícení se vzorek vloží do vývojky mr-Dev 600, která odleptá neosvícenou část. Pro konečné vytvrzení se nechá působit teplota (viz obrázek 4.3d). V posledním kroku je možné nanést horní krycí vrstvu, podobně jako u předchozích postupů, tzn. metodou rotačního lití a působením teploty (viz obrázek 4.3e). Podrobný postup výroby pro jednotlivé vzorky je uveden v příloze D.



Obrázek 4.4: Výroba hřebenových planárních vlnodů z epoxydové pryskyřice Su8 – 5 a Su8 - 50, a) čištění substrátu, b) nanesení vlnodné vrstvy a vytvrzení teplotou, c) optická litografie, d) odleptání neosvícené části, e) nanesení horní krycí vrstvy.

5 Diagnostika vyrobených vzorků

Důležitým krokem při návrhu a výrobě planárních flexibilních vlnovodů je jejich diagnostika. Ze základních vlastností se jedná v první řadě o měření transmisních spekter [6] a určení hodnot indexů lomů zvolených materiálů [5]. Po samotné výrobě je také důležitá optická kontrola. Dále je třeba změřit optický útlum, u planárních vlnovodů pomocí zařízení Metricon [5] a u hřebenových vlnovodů pomocí metody dvou délek [9, 10].

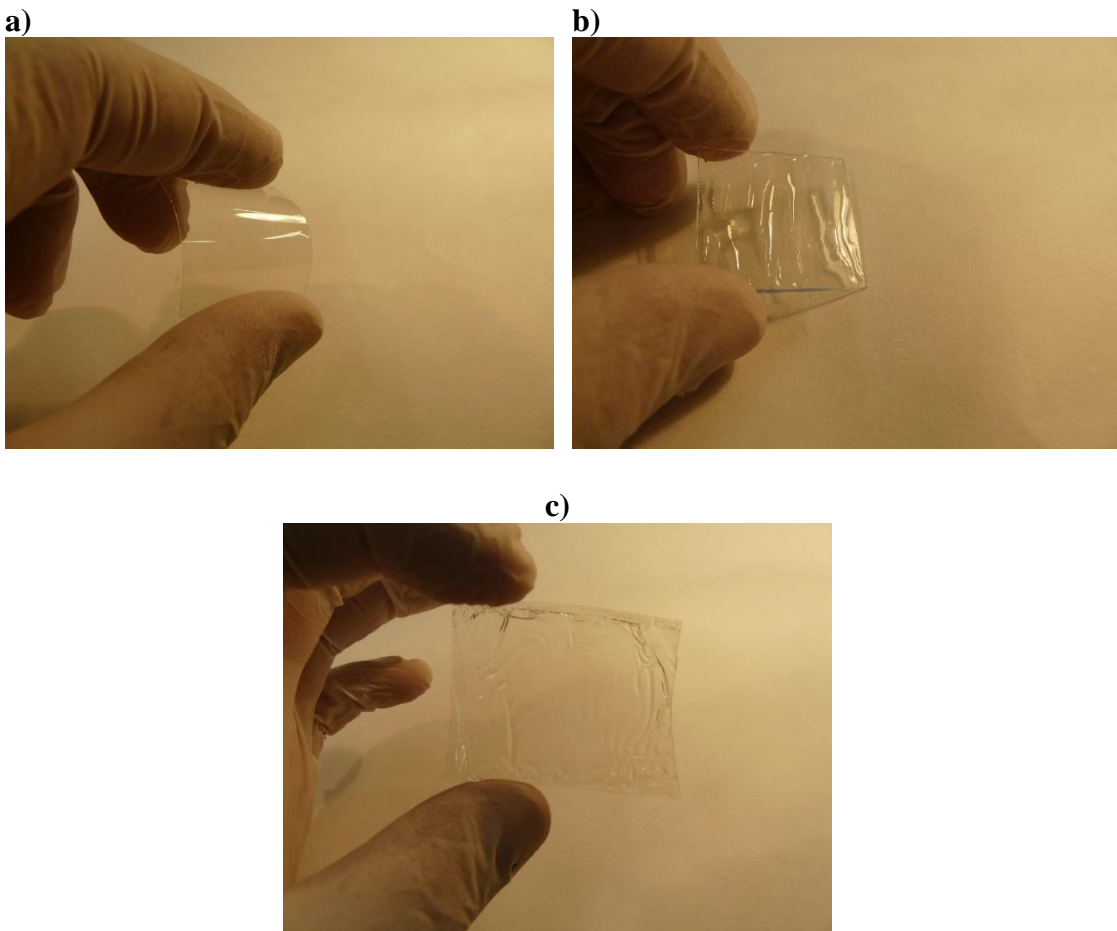
5.1 Optická kontrola vyrobených vlnovodů

Rozměry vyrobených struktur a případné poruchy jsou diagnostikovány v první řadě opticky. U planárních vlnovodů je možné některé vady vidět pouhým okem. Při kontrole hřebenových vlnovodů je kvůli malým rozměrům samotných vlnovodů (šířka cca 50 μm) potřeba použít optický mikroskop. K dispozici jsem měl Olympus BX60 s digitální kamerou DP 10 (fotografie pracoviště je znázorněno na obrázku 5.1).



Obrázek 5.1: Pracoviště s mikroskopem Olympus BX60 s kamerou DP 10 použité pro optickou kontrolu vyrobených vzorků.

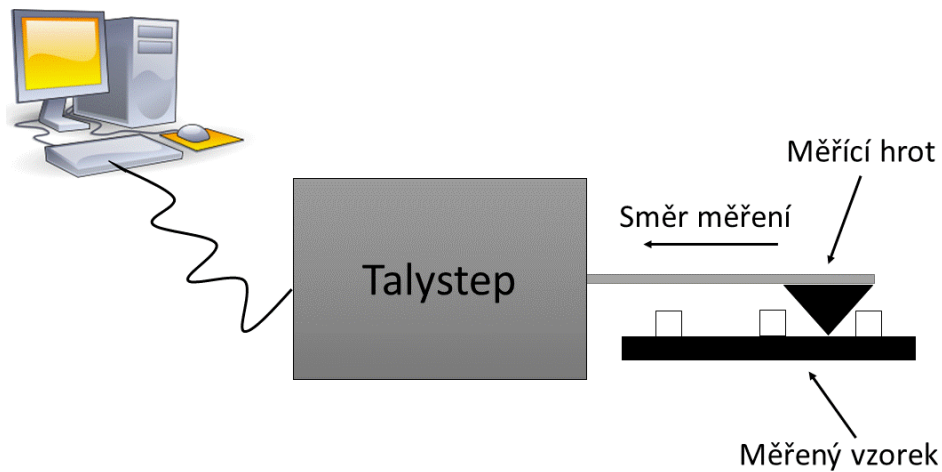
Na následujících obrázcích jsou uvedeny příklady fotografií podařených i nepodařených vyrobených vzorků. Na obrázku 5.2a) je uvedena fotografie vyrobeného planárního vlnovodu bez viditelných chyb (struktura CL400/EpoCore – č. vzorku 312). Na obrázku 5.2b) je znázorněn nepovedený vzorek optického planárního vlnovodu (struktura PET/SU8- 50 – č. vzorku 288). Důvodem může být nedokonale vyčištěný substrát, kdy vlnovodný materiál špatně přilne k substrátu. Na obrázku 5.2c) je naopak vidět zkrabatělý vlnovodný materiál. Důvodem této chyby je příliš dlouhá vytvrzovací doba pod UV lampou (struktura PMMA/Su8-50 – č. vzorku 276).



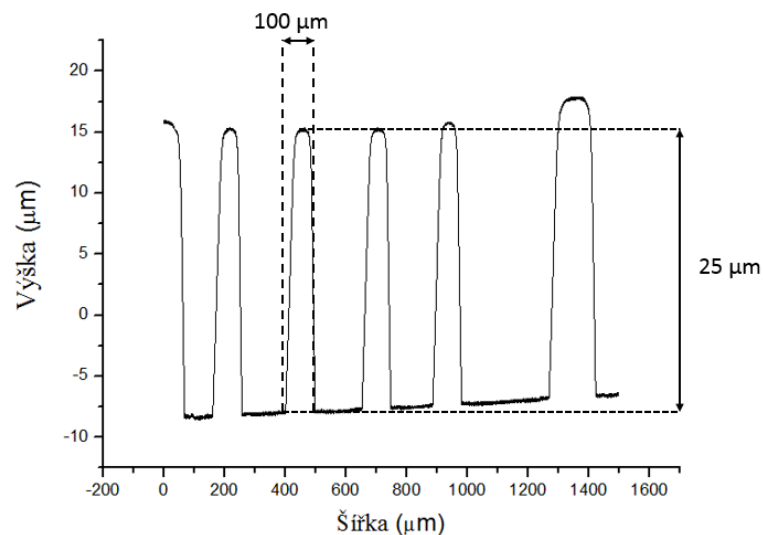
Obrázek 5.2: a) správně vyrobený planární vlnovod bez viditelných vad, b) nepovedený planární vlnovod (špatně nanesená vlnovodná vrstva způsobená špatným čištěním substrátu), c) zkrabatělá vlnovodná vrstva způsobená dlouhým osvětlením UV lampou.

5.2 Měření geometrických rozměrů

Měření geometrických rozměrů jsem provedl pomocí profilometru Talystep Hommel Tester 1000. Profilometr slouží k měření přesným rozměrů vyrobených vlnovodů. Princip spočívá v tom, že se po vzorku pohybuje hrot, který přesně kopíruje profil daného vzorku a výsledek zobrazuje na monitoru. Takto se přesně změří tloušťka i šířka vyrobených vlnovodů. Princip metody je uveden na obrázku 5.3, příklad změřeného profilu je na obrázku 5.4.



Obrázek 5.3: Princip měření profilu hřebenového vlnovodu.

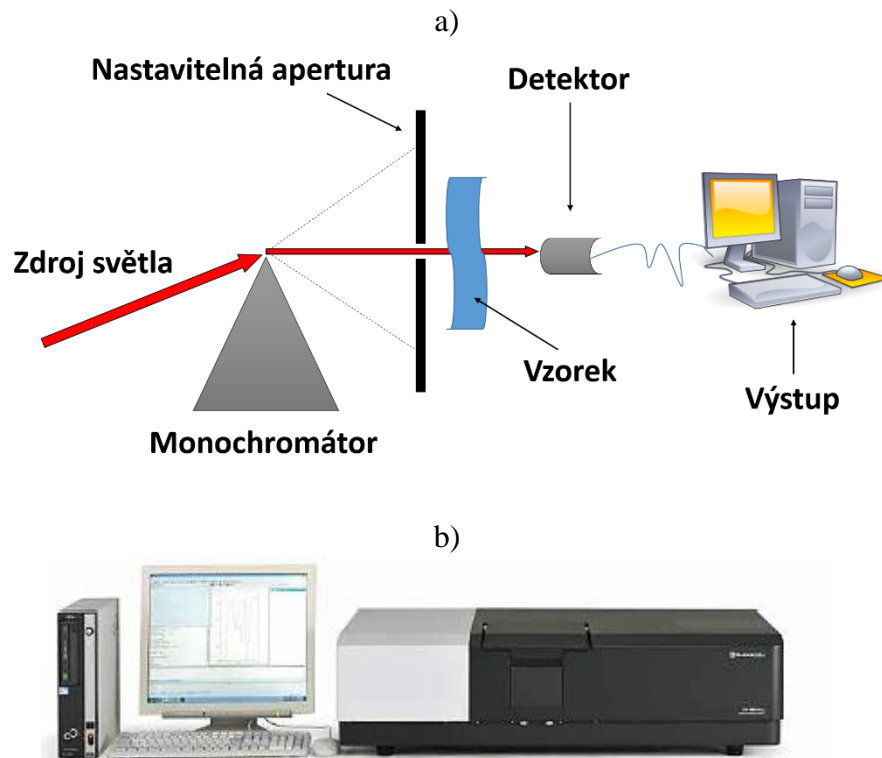


Obrázek 5.4: Ukázka profilu vyrobených hřebenových vlnovodů.

5.3 Měření transmisních spekter

Jedním z důležitých měření je měření transmisních (přenosových) spekter zvolených vlnovodných materiálů, které slouží k vyhodnocení toho, zda je zvolený materiál vhodný pro návrh optických planárních vlnovodů. Měření transmisních spekter se provádí pomocí přístroje UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600. Vzorky pro toto měření byly vytvořeny metodou rotačního lití, tedy nanesením vlnovodného materiálů na křemenné sklo.

Metoda spočívá v tom, že světlo vycházející ze zdroje prochází přes monochromátor a průchodem přes vzorek dopadá na detektor. Měření bylo provedeno na vlnových délkách od 300 nm do 1600 nm. Při UV a viditelném záření byl použit jako detektor R - 28 fotonásobič, pro IR záření InGaAs fotodioda. Princip měření je zobrazen na obrázku 5.5a), fotografie přístroje je zobrazena na obrázku 5.5b) [5].



Obrázek 5.5: a) Princip měření transmisních spekter, b) přístroj UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600 [5].

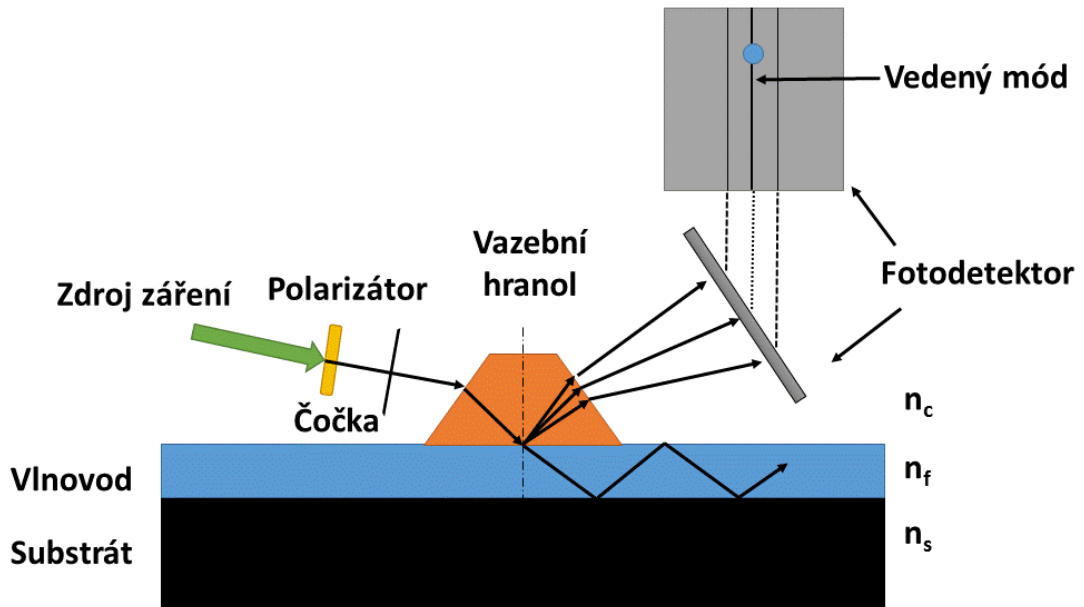
5.4 Jednohranolová vidová spektroskopie

K měření indexu lomu a vlnovodných vlastností byla použita metoda jednohranolové vidové spektroskopie. Pro toto měření bylo použito zařízení Metricon 2010 [6]. Měřící pracoviště je uvedeno na obr. 5.6 a princip metody je zobrazen na obr. 5.7.



Obrázek 5.6: Pracoviště Metricon [6].

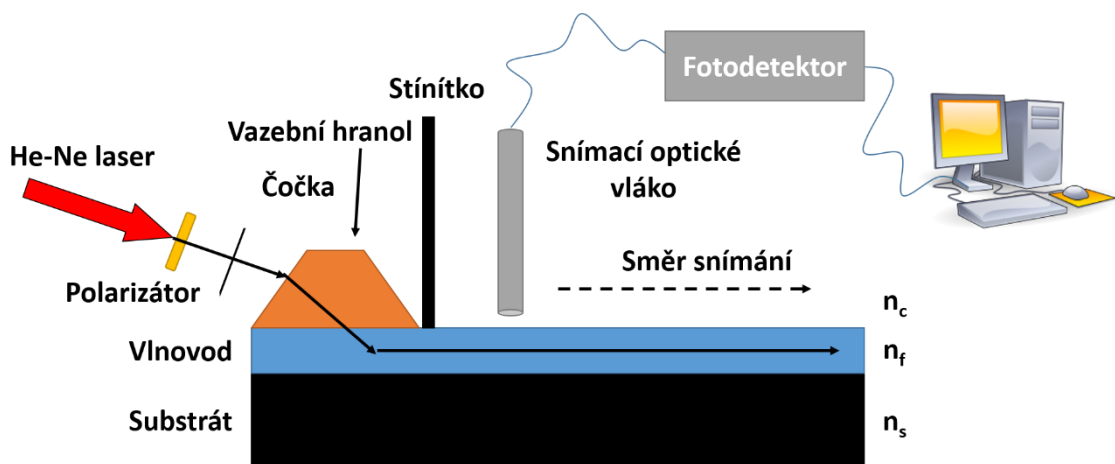
Princip metody vidové spektroskopie je následující. Monochromatický světelný svazek je navázán do vlnovodu pomocí vazebního hranolu a stejným způsobem se opět vyvazuje. Zařízení Metricon slouží k měření synchronních úhlů, ze kterých lze určit závislost průběhu indexu lomu na tloušťce vlnovodné vrstvy nebo lze určit index lomu objemových vzorků. Laserový svazek je zaostřen na základnu hranolu do oblasti optického kontaktu. Dopadající svazek se od základny hranolu odráží a vytváří na detektoru světelnou stopu s tmavými čarami. Tento jev je způsoben tím, že část světla, která dopadá na základnu hranolu pod synchronními úhly, se naváže do vlnovodu a na detektoru se nezobrazí, což se projeví tmavou čarou. Vazební oblast musí být co nejmenší, jinak by docházelo k okamžitému vyvazování světla z vlnovodu. Měření indexu lomů bylo měřeno na pěti vlnových délkách: 473 nm, 632,8 nm, 964 nm, 1311 nm a 1552 nm [7, 8].



Obrázek 5.7: Princip metody měření vlastností planárních vlnovodů pomocí jedno hranolové vidové spektroskopie zařízením METRICON [6].

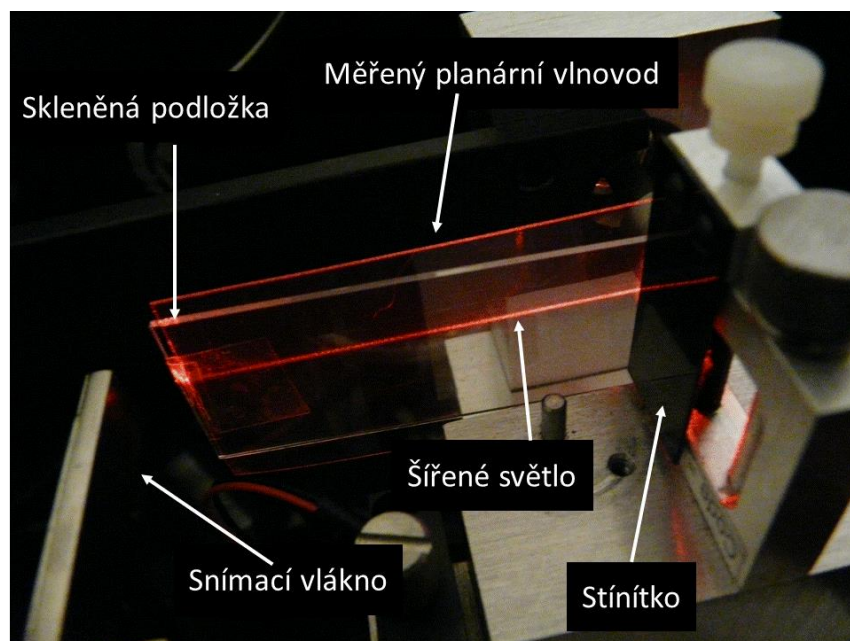
5.5 Měření optického útlumu planárních vlnovodů

Tato metoda slouží k měření optického útlumu planárních vlnovodů pomocí skenování povrchu vlnovodu optickým vláknem a fotodetektorem. Měří se intenzita světla rozptýlená z povrchu vlnovodu. Předpokládá se, že tato intenzita je v každém bodě na povrchu úměrná světlu, které zůstane ve vlnovodu. Princip měření je znázorněn na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Princip měření útlumu planárních vlnovodů [6].

Na obrázku 5.9 je znázorněn měřicí stůl při měření. Samotné měření probíhá tak, že se vzorek uchytí a přes vazební hranol se posvítí do vlnovodu. Optické vlákno poté v těsné blízkosti vlnovodu skenuje jeho povrch a přes fotodetektor je výsledek zobrazen na počítači. Uživatel si poté vybere část vzorku, kde nejsou viditelné chyby a program pomocí metody nejmenších čtverců vypočítá útlum v dB/cm. V mém případě musel být vzorek ještě podložen sklem, aby došlo k vytvoření optického kontaktu, protože samotný vzorek je velice tenký (cca 300 μm). Stínítko zabraňuje tomu, aby nedocházelo k ovlivnění měření. Měření provedeno na viditelné vlnové délce 632,8 nm pomocí He - Ne laseru.



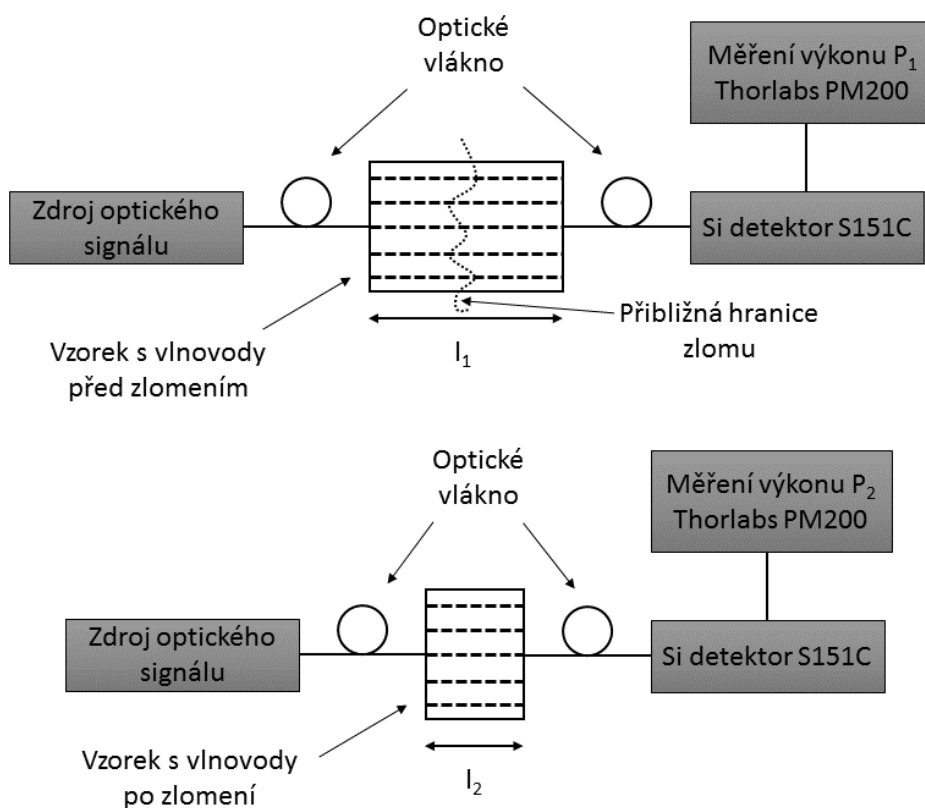
Obrázek 5.9: Pracoviště pro měření optického útlumu planárních vlnovodů.

5.6 Měření optického útlumu metodou dvou délek

Metoda dvou délek je velice přesná metoda měření útlumu. Bohužel je to metoda destruktivní. Používá se pro měření dlouhých i krátkých optických vlnovodů. Postup měření je takový, že se nejprve změří vstupní výkon signálu P_1 po průchodu planárním hřebenovým vlnovodem o délce l_1 . V dalším kroku se hřebenový planární vlnovod zkrátí a poté se opět změří výstupní výkon P_2 , bez toho aby se změnila vstupní vazba. Pro vzorky o délce několika centimetrů se musí vzorek vyjmout, tím vzniká chyba, kterou lze eliminovat měřením na více vzorcích. Princip metody je znázorněn na obr. 5.10 a výsledný optický útlum lze vyjádřit pomocí vztahu 5.1 [9, 10].

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2} \quad (5.1)$$

kde α je měrný útlum (dB/cm), P_1, P_2 je výstupní výkon před zlomením resp. po zlomení (dB), l_1, l_2 je délka kanálku před zlomením resp. po zlomení (cm).



Obrázek 5.10: Princip měření optického útlumu kanálkových/hřebenových vlnovodů pomocí metody dvou délek.

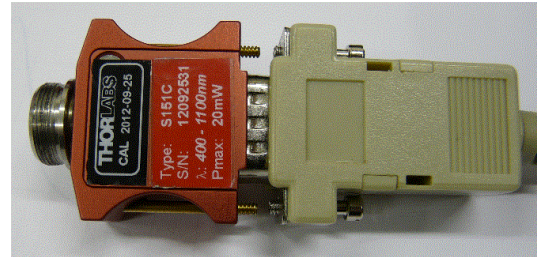
K měření jsem použil dva zdroje optického záření. Jedním z nich je zdroj laserového optického záření o vlnové délce 650 nm Safibra OFLS-5 FP-650. Druhým je zdroj laserového optického záření o vlnové délce 850 nm Safibra OFLS-6. Pro měření výstupního optického výkonu jsem použil měřič výkonu Thorlabs' PM200 s velkoplošným detektorem S151C, který měří optický výkon na vlnových délkách 400 - 1100 nm. Příklad tohoto přístroje je uveden na obrázku 5.11a), velkoplošný detektor je uveden na obrázku 5.11b). Optická vlákna, která jsem použil pro vstupní optický

svazek, byla dvě. První bylo jednovlákové vlákno 9/125 μm (jádro/plášť) a druhé mnohavlákové vlákno 50/125 μm (jádro/plášť).

a)



b)

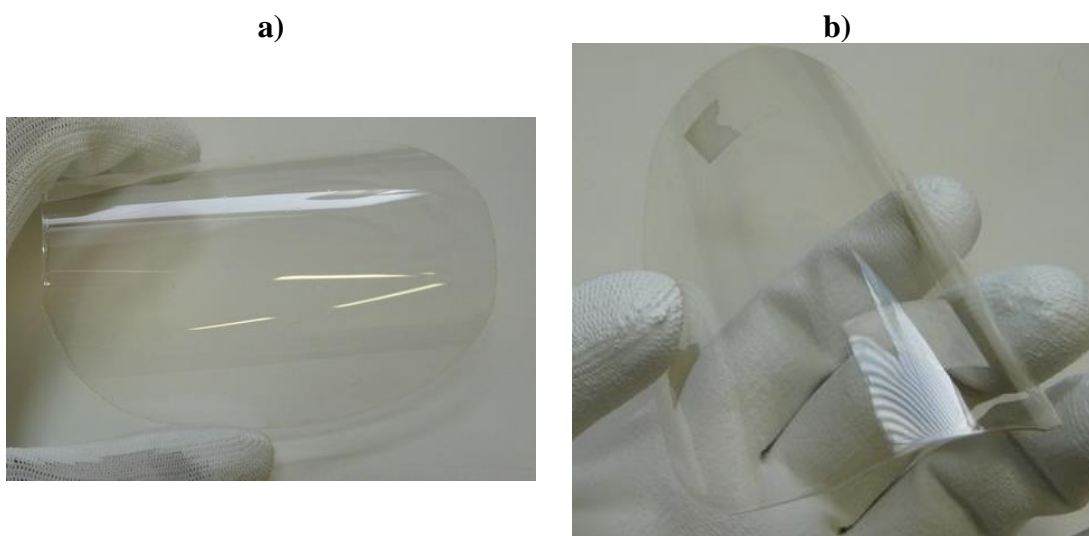


Obrázek 5.11: a) přístroj Thorlabs' PM200, b) velkoplošný detektor S151C.

6 Výsledky

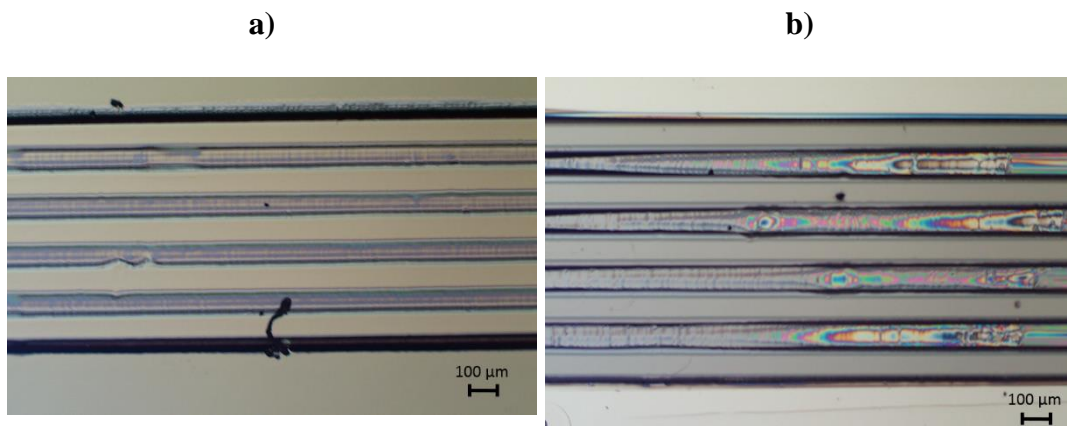
6.1 Optická kontrola vyrobených vzorků

Základním krokem při kontrole vyrobených vzorků je optická kontrola. Některé výrobní vady je možné rozpoznat i pouhým okem (viz kapitola 5.1). U vzorků, kde tomu tak není, jsem ke kontrole použil optický mikroskop. Na následujících obrázcích jsou uvedeny ukázky vyrobených vzorků. Na obrázku 6.1a) je znázorněn správně vyrobený planární vlnovod, na substrátu Plexiglas OF058 je uložený polymer Su8-50. Obrázek 6.1b) znázorňuje planární vlnovod tvořený substrátem Plexiglas OF058 a vlnovodnou vrstvou EpoCore.



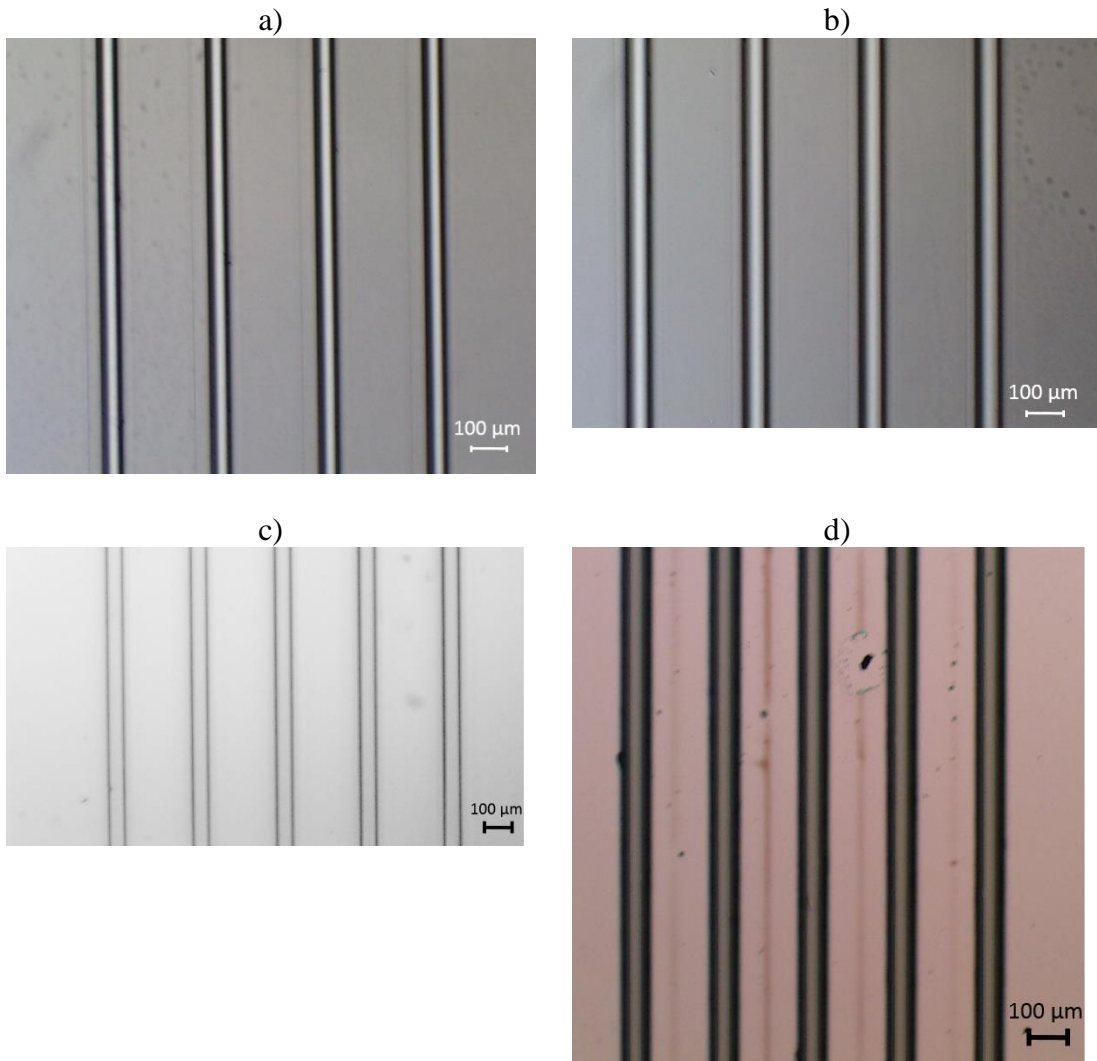
Obrázek 6.1: a) vzorek č. 381 – struktura Plexiglas OF058/Su8-50, b) vzorek č. 384 – struktura Plexiglas OF058/EpoCore.

Na obrázku 6.2a) je znázorněn nepodařený hřebenový planární vlnovod složený z podložky Si, mezivrstvy SiO₂ a vlnovodné vrstvy Su8-50, kde jsou vidět nečistoty v kanálcích a poškozené kanálky. Na obrázku 6.2b) je struktura s vlnovodnou vrstvou Su8-50 nanesenou na podložce Si, kde je naopak zřetelně vidět nedoleptaná vrstva mezi kanálky, zároveň jsou zřetelné i další chyby v samotných kanálcích. Substrát Si případně Si/SiO₂ jsem použil převážně pro zkušební a měřicí účely.



Obrázek 6.2: a) Nepodařený hřebenový vlnovod Si/SiO₂/Su8-50 s viditelnými poškozeními, b) nepodařený vlnovod Si/Su8-50 s nedoleptanou vrstvou mezi kanálky i jinými chybami.

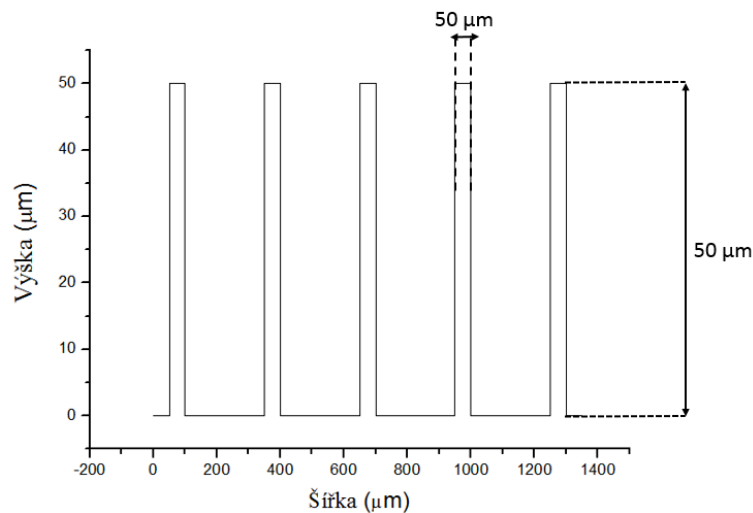
Na obrázku 6.3a) je znázorněn správně vyrobený vlnovod bez viditelných porušení kanálků. Struktura se skládá z flexibilní fólie Plexiglas OF058 200 µm a vlnovodné vrstvy EpoCore. Podle použité masky by měl být široký 62,5 µm, jeho skutečný rozměr je 80 µm. Na obrázku 6.3b) je znázorněn vzorek složený ze substrátu Plexiglas OF058 200 µm a vlnovodné vrstvy Su8-50, předpokládaná šířka je 62,5 µm, ale skutečná šířka je 80 µm. Obrázek 6.3c) znázorňuje vzorek složený ze substrátu Xerox W3 3R96525 s mezivrstvou EpoClad a vlnovodnou vrstvou EpoClad. Šířka kanálku by měla být 50 µm, skutečná je cca 70 µm. Na obrázku 6.3d) je zobrazen vzorek složený ze substrátu Si a vlnovodné vrstvy EpoCore. Předpokládaná šířka kanálků je 50 µm, skutečná je cca 60 µm. Tento nedostatek je pravděpodobně způsoben velkým rozptylem UV paprsků při průchodu UV světla přes litografickou masku do vlnovodné vrstvy. UV světlo není kolimováno na litografickou masku. Z tohoto důvodu je šířka výsledného kanálku větší u paty daného kanálku než na jeho vrcholu.



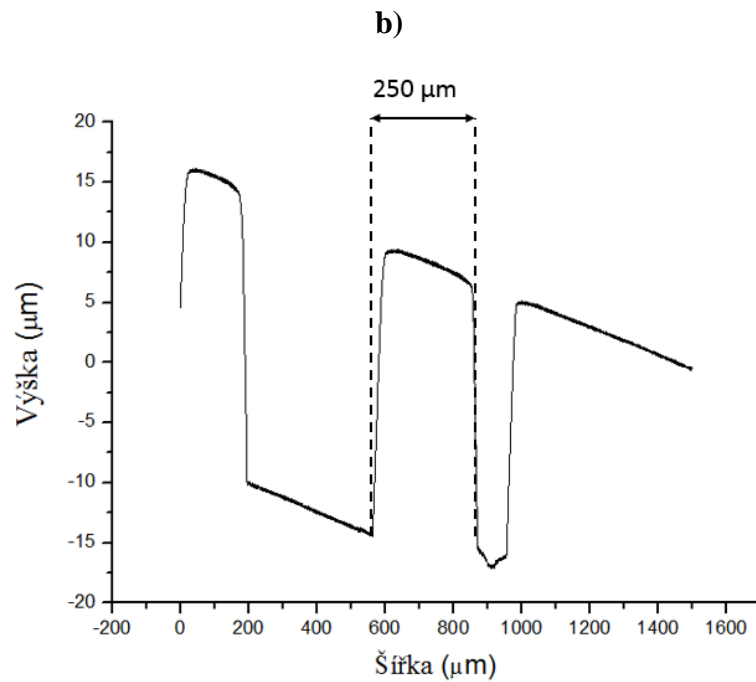
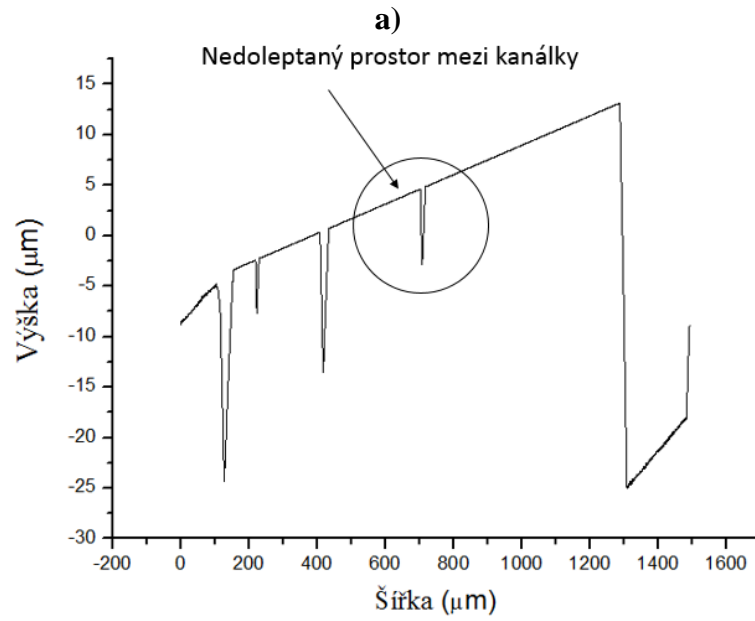
Obrázek 6.3: a) vzorek č. 525, struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (maska 50 μm), b) vzorek č. 525, struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (maska 62,5 μm), c) vzorek č. 405, struktura Xerox W3 3R96525/EpoClad/EpoCore (maska 50 μm), d) vzorek č. 353, struktura Si/EpoCore (maska 62,5 μm).

6.2 Geometrické rozměry optických vlnovodů

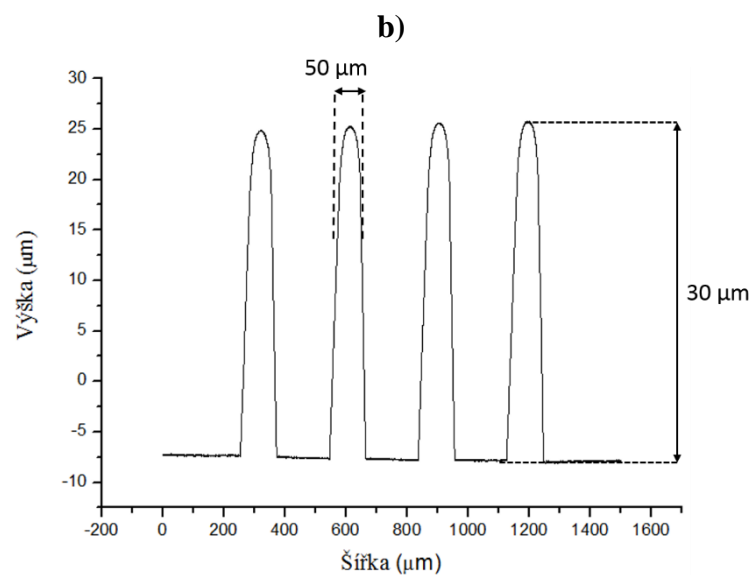
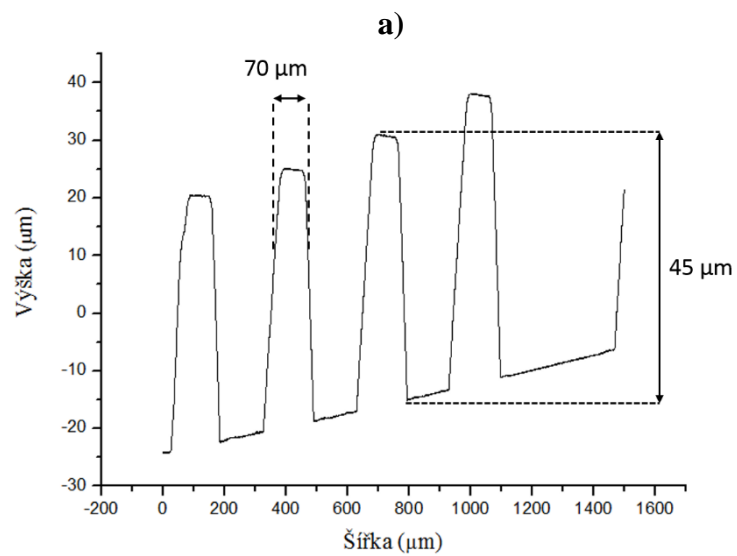
Dalším krokem při hodnocení vyrobených vzorků je měření geometrických rozměrů hřebenových vlnovodů, které jsem provedl pomocí profilometru Talystep Hommel Tester 1000. Na obrázku 6.4 je znázorněn model ideálního profilu s geometrickými rozměry kanálku 50 x 50 μm . Na obrázku 6.5a) je uveden profil vzorku Si/EpoCore, kde je zřetelně vidět nedoleptaný prostor mezi kanálky (č. vzorku 471). Naopak na obrázku 6.5b) je patrný příliš široký kanálek struktury, než byla použita litografická maska, struktura vzorku je Si/EpoCore (č. vzorku 475). Na obrázku 6.6a) je uveden profil vzorku, jehož struktura je Plexiglas OF058/Su8-50 (č. vzorku 531) a použitá maska je 62,5 μm . Na obrázku 6.6b) je uveden profil vzorku, jehož struktura je Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (č. vzorku 525) a použitá maska 50 μm . V tabulce 6.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro struktury s polymerem EpoClad/EpoCore a v tabulce 6.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro struktury s polymerem Su8-50. Výsledky měření s polymerem LIGHTLINK nejsou k dispozici, protože se nepodařilo vyrobit hřebenové vlnovody s těmito polymerem. Ze změřených dat vyplývá, že nejpovedenější jsou vzorky s označením 525 a 531, které byly vyrobeny pomocí litografu na Masarykově univerzitě v Brně.



Obrázek 6.4: Model ideálního profilu s geometrickými rozměry 50 x 50 μm .



Obrázek 6.5: Profil struktury Si/EpoCore, a) profil nedoleptaného hřebenového vlnovodu (č. vzorku 471), šířka použité masky 62,5 μm , b) profil vlnovodu s příliš širokým kanálkem než je použitá litografická maska (č. vzorku 475), šířka použité masky 50 μm .



Obrázek 6.6: Profily vyrobených vzorků, a) struktura Plexiglas OF058/Su8-5 (č. vzorku 531), šířka použité masky 62,5 μm , b) struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (č. vzorku 525), šířka použité masky 50 μm .

Tabulka 6.1: Změřené rozměry kanálků vytvořené z polymerů EpoClad/EpoCore.

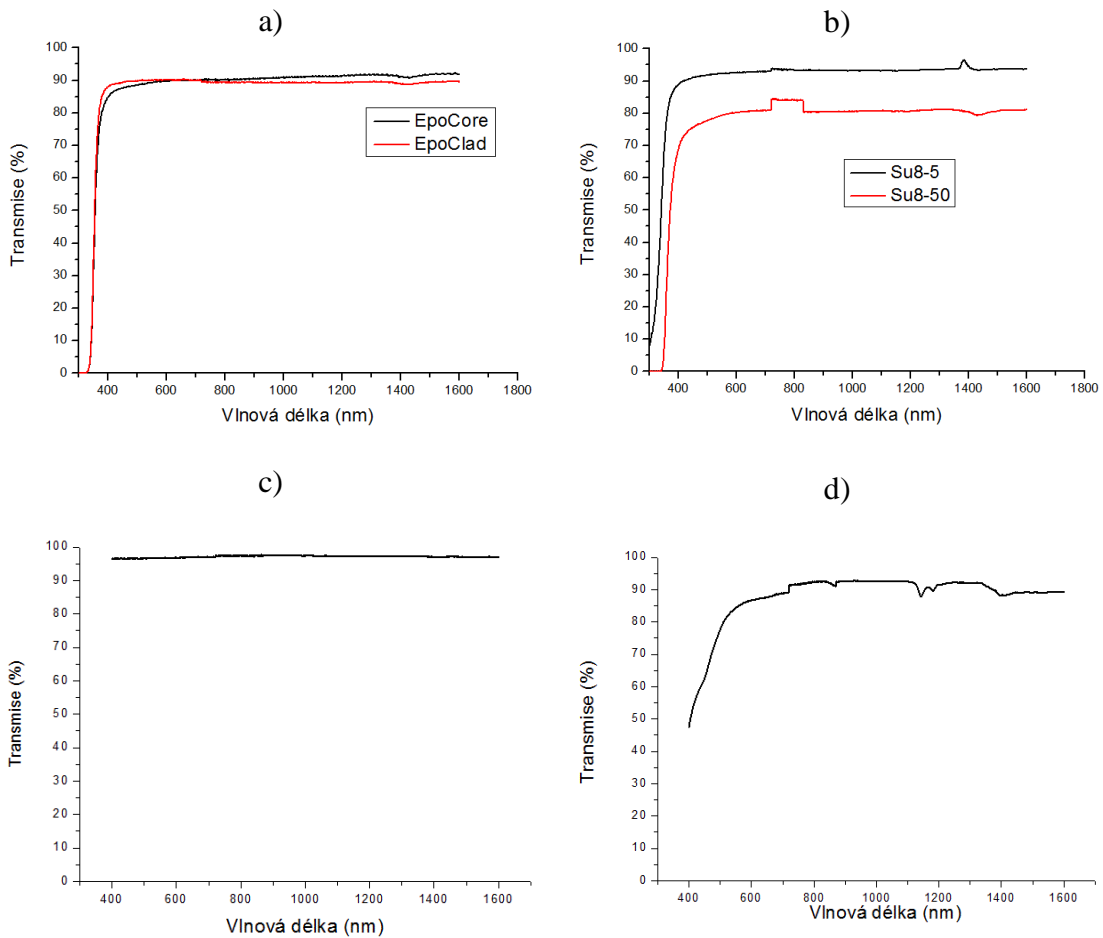
| Č. vzorku | Struktura | Otáčky nanášení polymerů (ot. /min) | Výška kanálku (μm) | Šířka kanálku na vrcholu kanálku (μm) | Šířka kanálku u paty kanálku (μm) |
|--|--|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Šířka motivu na použité masce 50 μm | | | | | |
| 342 | Si/ EpoClad/EpoCore | 2000 | 30 | 179 | 188 |
| 353 | Si/EpoCore | 2000 | 30 | 50 | 142 |
| 473 | Si/EpoCore | 1000 | 50-60 | 90 | 180 |
| 474 | Si/EpoCore | 1250 | 28-30 | 75 | 167 |
| 475 | Si/EpoCore | 1500 | 25 | 83 | 100 |
| 476 | Si/EpoCore | 1500 | 22-25 | 80 | 100 |
| 500 | Si/EpoCore | 950 | 32 | 105 | 239 |
| 525 | Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore | 1000 | 30 | 50 | 110 |
| Šířka motivu na použité masce 62,5 μm | | | | | |
| 340 | Si/SiO ₂ / EpoClad/EpoCore | 2000 | 50 | 89 | 220 |
| 352 | Si/ EpoClad/EpoCore | 2000 | 120 | 124 | 224 |
| 525 | Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore | 1000 | 30 | 70 | 122 |
| Šířka motivu na použité masce 10 μm | | | | | |
| 498 | Si/EpoCore | 1000 | 31 | 82 | 127 |
| 499 | Si/EpoCore | 900 | 35 | 75 | 134 |
| 501 | Si/EpoCore | 1050 | 30,5 | 56 | 135 |

Tabulka 6.2: Změřené rozměry kanálků vytvořené z polymeru Su8-50.

| Č. vzorku | Struktura | Otáčky nanášení polymerů (ot. /min) | Výška kanálku (μm) | Šířka kanálku na vrcholu kanálku (μm) | Šířka kanálku u paty kanálku (μm) |
|--|------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Šířka motivu na použité masce 50 μm | | | | | |
| 470 | Si/Su8-50 | 1500 | 24-30 | 64 | 106 |
| 471 | Si/Su8-50 | 1250 | 55-60 | 85 | 160 |
| 472 | Si/Su8-50 | 1000 | 7-64 | 115 | 300 |
| 531 | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1000 | 47 | 50 | 112 |
| Šířka motivu na použité masce 62,5 μm | | | | | |
| 338 | Si/Su8-50 | 2000 | 50 | 86 | 210 |
| 531 | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1000 | 47 | 73 | 164 |

6.3 Transmisní spektra

Před praktickým použitím zvolených materiálů je potřeba změřit transmisní spektra těchto materiálů. Tyto spektra jsem změřil v rozsahu vlnových délek od 300 do 1600 nm. Měření jsem provedl nanesením zvolených vlnovodných materiálů na křemenné podložky. Na obrázku 6.7a) jsou uvedeny transmisní spektra pro polymerní materiály EpoClad a EpoCore. Na obrázku 6.7b) je uvedeno transmisní spektrum pro epoxydové pryskyřice Su8-5 a Su8-50. Na obrázku 6.7c) je uvedeno transmisní spektrum pro polymer LIGHLINK™ XH-100145 Clad a na obrázku 6.7d) je uvedeno transmisní spektrum pro polymer LIGHLINK™ XP-6701A Core.

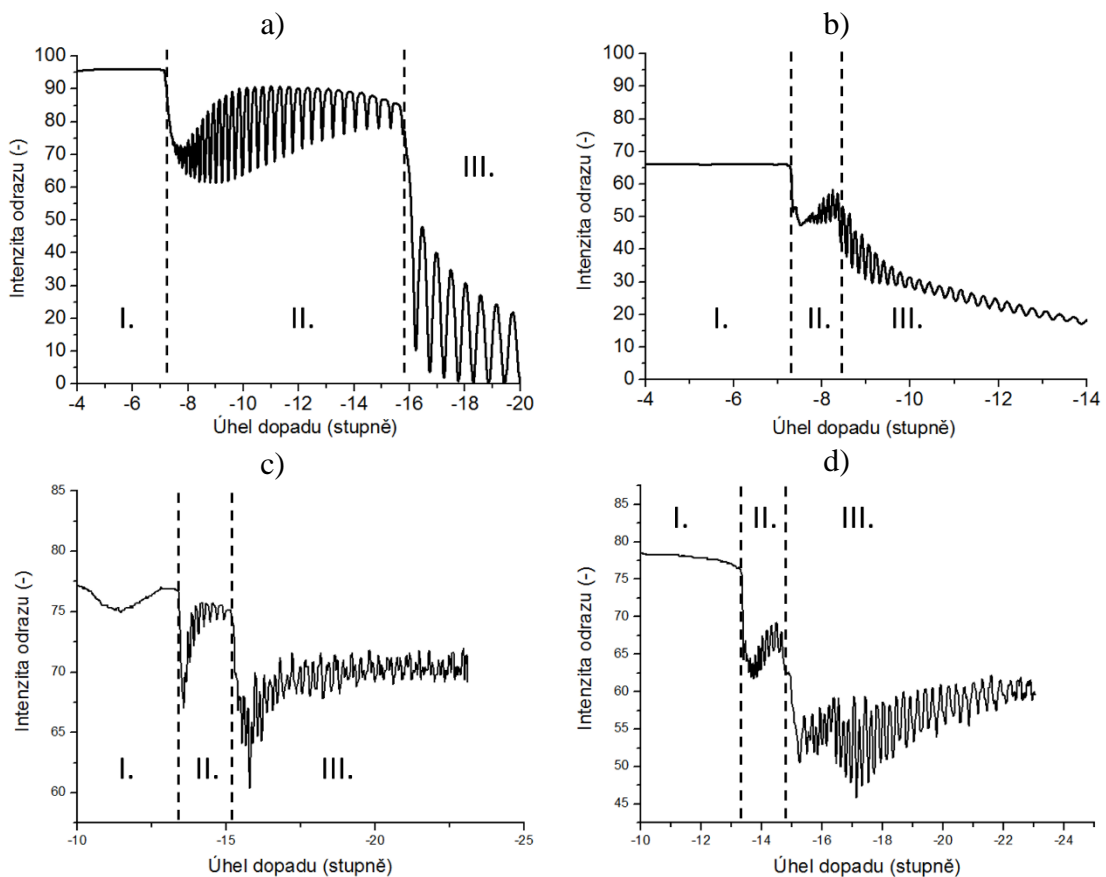


Obrázek 6.7: Transmisní spektra pro polymery, a) EpoCore a EpoClad, b) Su8-5 a Su8-50, c) LIGHLINK™ XH-100145 Clad, d) LIGHLINK™ XP-6701A Core.

Ze změřených výsledků je zřetelné, že všechny použité materiály jsou vhodné pro použití v rozmezí od 400 do 1600 nm. Toto rozmezí vlnových délek je pro mnou navrhované flexibilní vlnovody více než dostačující.

6.4 Jednohranolvá vidová spektroskopie

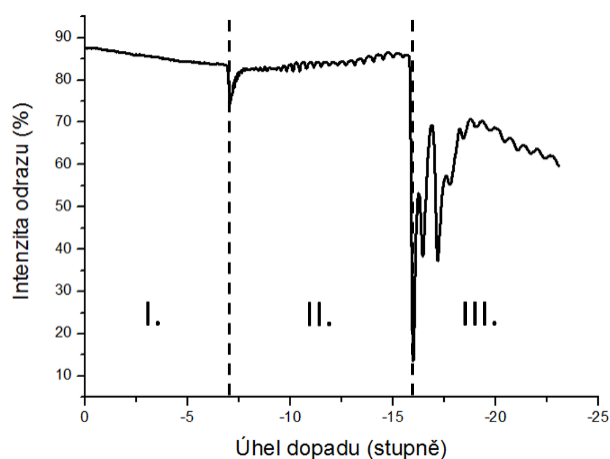
Další použité měření bylo určení indexu lomu pomocí jednohranolvé vidové spektroskopie pomocí zařízení Metricon (viz kapitola 5.3). Na obrázku 6.8a) je znázorněn výsledek měření mnohavidového planárního vlnovodu složeného z materiálů EpoCore/EpoClad naneseného na substrátu Melinex ST726. Index lomu z tohoto obrázku je určen odečtením úhlu z os X (úhel dopadu) z rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Na obrázku 6.8b) je znázorněn výsledek měření planárního vlnovodu, kde vlnovodnou vrstvu tvoří EpoCore a flexibilní podložku Plexiglas OF058. Na obrázku 6.8c) jsou uvedeny výsledky pro strukturu Xerox W3 3R96525/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core a na obrázku 6.8d) jsou uvedeny výsledky pro strukturu Xerox W3 3R98199/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core.



Obrázek 6.8: Měření jednohranolvou spektroskopii na vlnové délce 632,8 nm, a) EpoCore/EpoClad nanesený na podložce Melinex ST726, b) EpoCore na podložce Plexiglas OF058, c) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core na podložce Xerox W3 3R96525, d) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core na podložce Xerox W3 3R98199.

Oblast I. na obrázku 6.8 představuje vzduchovou krycí vrstvu a oblast II. představuje vlnovodnou vrstvu. Podle výpočtů může být ve II. oblasti vidět počet vedených vidů, nicméně je tato oblast příliš úzká, aby mohly být vidět všechny vedené vidy, protože se některé překrývají mezi sebou. Oblast III. představuje spodní mezivrstvu, případně substrát planárního vlnovodu. Z hodnoty úhlu dopadu je možné stanovit hodnotu indexu lomu. V této práci jsou použity hodnoty úhlů na rozhraní oblastí I. a II. pro index lomu vlnovodné vrstvy a hodnoty úhlů dopadu na rozhraní II. a III. vrstvy pro index lomu mezivrstvy. Získané hodnoty indexu lomu jsou shrnuty v kapitole 3 pro všech pět vlnových délek.

Na obrázku 6.9 je uveden výsledek pro strukturu Plexiglas OF58/Su8-50. Všechny uvedené výsledky jsou změřeny na vlnové délce 632,8nm. Ostatní výsledky jsou uloženy v příloze na CD.



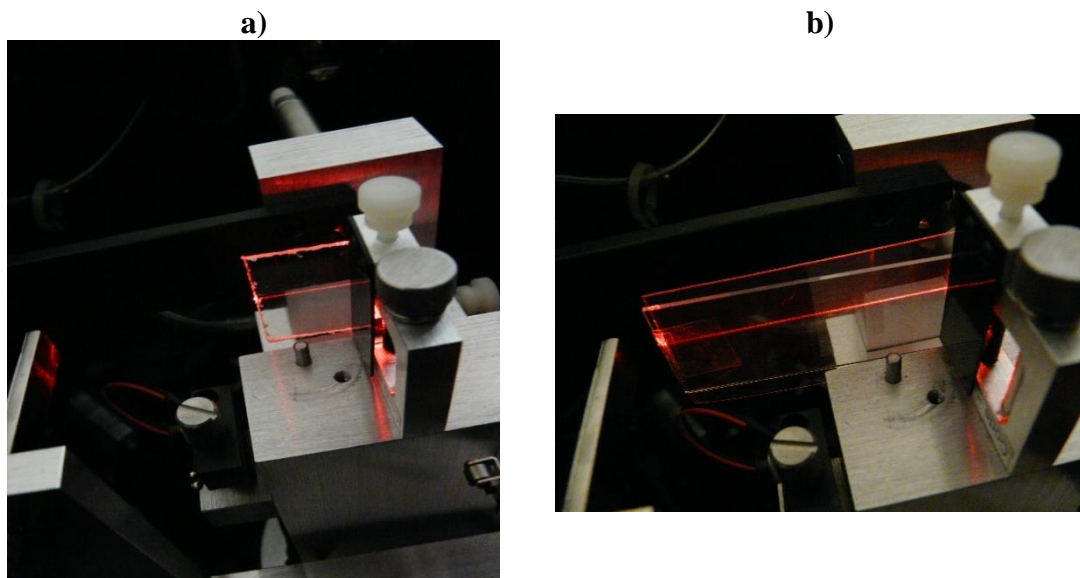
Obrázek 6.9: Měření jednohranolovou spektroskopií na vlnové délce 632,8 nm pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-50.

Oblast I. na obrázku 6.9 představuje vzduchovou krycí vrstvu a oblast II. představuje vlnovodnou vrstvu Su8-50. Oblast III. představuje flexibilní substrát Plexiglas OF058. Z hodnoty úhlu dopadu je možné stanovit hodnotu indexu lomu. Získané hodnoty indexu lomu jsou shrnuty v kapitole 3 pro všech pět vlnových délek.

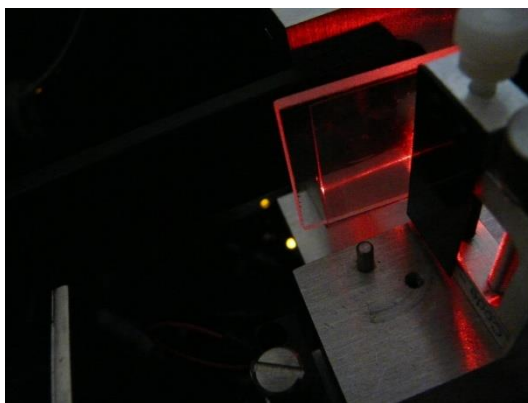
6.5 Měření optického útlumu

6.5.1 Optický útlum planárních struktur

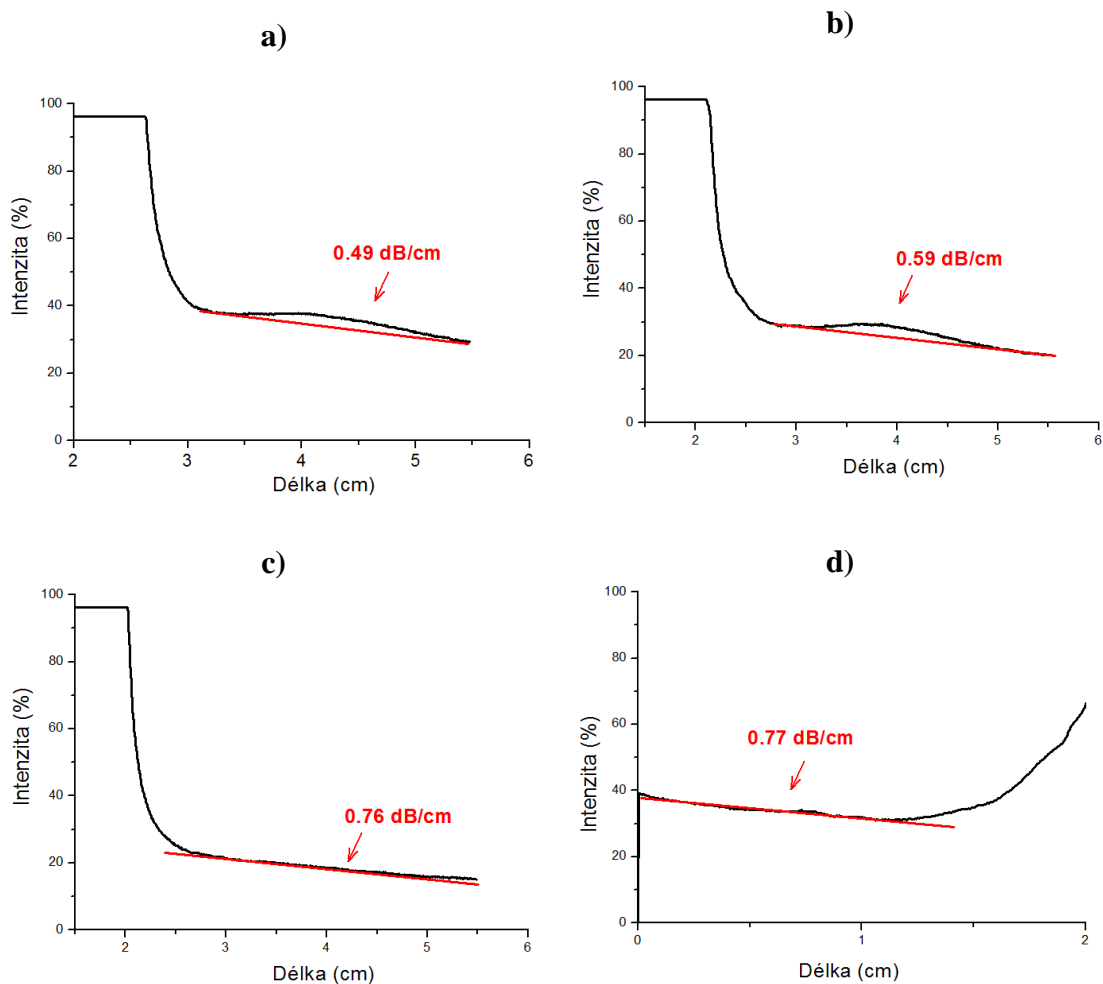
Na následujících obrázcích jsou uvedeny výsledky měření optických útlumů planárních vlnovodů. Na obrázku 6.10a) je znázorněna fotografie z měření optického útlumu planárního vlnovodu složeného z Su8-5 na substrátu PET. Na obrázku 6.10b) je fotografie z měření planárního vlnovodu složeného z LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core na Xerox W3 3R6525. Obrázek 6.11 znázorňuje vedený vid planárního vlnovodu Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore. Na všech obrázcích je zřetelně vidět světelný vedený vid na vlnové délce 632,8 nm. Na obrázku 6.12a) je uveden optický útlum pro strukturu Xerox 3R96525/EpoClad/EpoCore, na obrázku 6.12b) pro strukturu Dupont ST726/EpoClad/EpoCore, na obrázku 6.12c) pro strukturu Mitsubishi GN2504600/EpoClad/EpoCore a na obrázku 6.12d) pro strukturu Plexiglas OF058/EpoCore.



Obrázek 6.10: Fotografie z měření optického útlumu planárních vlnovodů, a) Su8-5 nanesený na podložce PET, b) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP - 6701A Core nanesený na podložce na Xerox 3R6525.

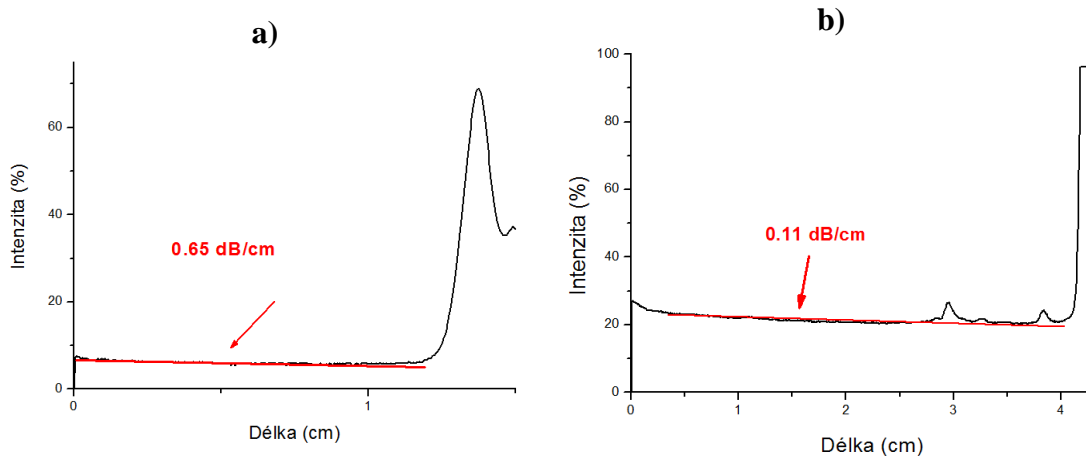


Obrázek 6.11: Fotografie z měření optického útlumu planárního vlnovodu EpoClad/EpoCore na podložce Dupont Q65HA.



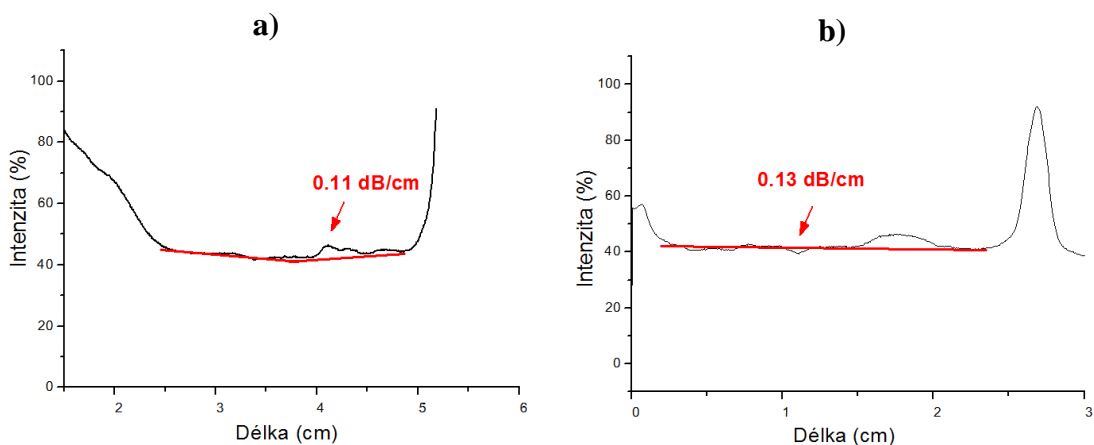
Obrázek 6.12: Optický útlum pro planární vlnovody,
a) Xerox W3 3R96525/EpoClad/EpoCore, b) Dupont ST726/EpoClad/EpoCore,
c) Mitsubishi GN2504600/EpoClad/EpoCore, d) Plexiglas OF058/EpoCore.

Na obrázku 6.13a) je znázorněn optický útlum pro strukturu PET/Su8-5 a obrázek 6.13b) znázorňuje optický útlum pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-50.



Obrázek 6.13: Optický útlum pro strukturu, a) PET/Su8-5, b) Plexiglas OF058/Su8 - 50.

Obrázek 6.14a) znázorňuje optický útlum pro planární strukturu Dupont Q65HA/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core a obrázek 6.14b) znázorňuje optický útlum pro strukturu Plexiglas OF058/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core. Všechna měření jsou provedena pro vlnovou délku 632,8 nm. Červená čára znázorňuje proložení změřených hodnot polynomem, ze které je pak určen optický útlum.



Obrázek 6.14: Optický útlum pro strukturu a) Dupont Q65HA/LIGHLINK™ XH - 100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core, b) Plexiglas OF058/LIGHLINK™ XH - 100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core.

Z výsledků měření optického útlumu planárních vlnovodů vyplývá, že nejlepšího optického útlumu je dosaženo u struktury Plexiglas OF058/Su8-50, u kterého byl naměřen optický útlum 0,11 dB/cm. Obdobného výsledků je dosaženo u struktury Dupont Q65HA/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core. Tyto výsledky odpovídají hodnotám, které jsou běžně prezentovány ve světové literatuře [2, 3]. Optický útlum pro struktury s polymery EpoClad a EpoCore se pohybují v rozmezí od 0,49 dB/cm do 0,77 dB/cm. Tyto hodnoty jsou také velice dobré, protože kvalitní planární optický vlnovod by měl mít hodnotu optického útlumu nižší než 1 dB/cm na požadované pracovní vlnové délce.

6.5.2 Optický útlum hřebenových vlnovodů

U vyrobených hřebenových planárních vlnovodů jsou optické útlumy změřeny pomocí metody dvou délek. K tomuto měření jsou použity dva zdroje optického záření s vlnovými délkami 650 nm a 850 nm. Optický svazek byl do měřeného kanálkového vlnovodu navázán pomocí jednovidového vlákna 9/125 μm nebo mnohavidového vlákna 62,5/125 μm . V tabulce 6.3 jsou uvedeny optické útlumy vyrobených hřebenových vlnovodů s vazebním vláknem 9/125 μm . V tabulce 6.4 jsou uvedeny optické útlumy měřené pomocí vazebního vlákna 62,5/125 μm .

Tabulka 6.3: Optický útlum měřený s vazebním vláknem 9/125 μm .

| Číslo vzorku | Struktura | Měřený kanálek | Optický útlum (dB/cm) | |
|--------------|--|--|----------------------------|----------------------------|
| | | | $\lambda = 650 \text{ nm}$ | $\lambda = 850 \text{ nm}$ |
| 403 | Dupont Q65HA/ EpoClad/EpoCore | 2. série, 1. kanálek, 10 μm | 1,8 | 3,2 |
| 403 | | 2. série, 6. kanálek, 62,5 μm | 2,3 | 3,2 |
| 403 | | 2. série, 8. kanálek, 50 μm | 2,1 | 2,9 |
| 403 | | 2. série, 11. kanálek, 50 μm | 1,8 | 2,6 |
| 403 | | 2. série, 14. kanálek, 62,5 μm | 2,6 | 3 |
| 403 | | 3. série, 7. kanálek, 50 μm | 3,9 | 5,5 |
| 404 | Dupont ST726/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 10. kanálek, 50 μm | 1,9 | 2,5 |
| 404 | | 2. série, 1. kanálek, 10 μm | 3,5 | 3,0 |
| 404 | | 2. série, 3. kanálek, 62,5 μm | 2,6 | 2,4 |
| 404 | | 2. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 1,9 | 3,8 |
| 404 | | 3. série, 1. kanálek, 10 μm | 4,2 | 3,3 |
| 404 | | 3. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 2,7 | 3,3 |
| 404 | | 3. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 3,6 | 3,8 |
| 404 | | 3. série, 6. kanálek, 62,5 μm | 2,9 | 4,1 |
| 405 | Xerox W3 3R9525/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 1. kanálek, 10 μm | 3,2 | 2,4 |
| 405 | | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 3,0 | 3,2 |
| 405 | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 2,7 | 2,4 |
| 405 | | 1. série, 6. kanálek, 62,5 μm | 5,1 | 3,8 |
| 405 | | 2. série, 10. kanálek, 50 μm | 2,4 | 2,2 |
| 405 | | 2. série, 14. kanálek, 50 μm | 2,2 | 2,2 |
| 405 | | 2. série, 10. kanálek, 50 μm | 5,7 | 5,2 |
| 405 | | 2. série, 12. kanálek, 80 μm | 3,5 | 3,3 |
| 405 | | 3. série, 14. kanálek, 62,5 μm | 5,11 | 4,2 |
| 406 | Mitsubishi GN175 4600/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 2,0 | 7,1 |
| 407 | | 1. série, 2. kanálek, 62,5 μm | 2,3 | 2,3 |

| Číslo vzorku | Struktura | Měřený kanálek | Optický útlum (dB/cm) | |
|--------------|----------------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| | | | $\lambda= 650 \text{ nm}$ | $\lambda= 850 \text{ nm}$ |
| 407 | Plexiglas OF058/EpoCore | 1. série, 3. kanálek, 62,5 μm | 2,1 | 2,1 |
| 407 | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 1,7 | 1,9 |
| 407 | | 2. série, 9. kanálek, 50 μm | 3,1 | 2,7 |
| 407 | | 2. série, 11. kanálek, 50 μm | 2,5 | 2,3 |
| 407 | | 2. série, 12. kanálek, 80 μm | 3,4 | 2,9 |
| 407 | | 2. série, 10. kanálek, 62,5 μm | 1,8 | 2,2 |
| 415H | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 6,4 | 6,5 |
| 415H | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 7,9 | 6,2 |
| 416H | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 1,9 | 1,1 |
| 525 | Dupont Q65HA/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 1. kanálek, 50 μm | 1,9 | 1,2 |
| | | 1. série, 3. kanálek, 50 μm | 4,2 | 2 |
| | | 1. série, 4. kanálek, 50 μm | 3,1 | 2,7 |
| | | 3. série, 1. kanálek, 50 μm | 3,3 | 3,2 |
| | | 3. série, 2. kanálek, 50 μm | 4,8 | 2,8 |
| | | 3. série, 3. kanálek, 50 μm | 2,3 | 2 |

Tabulka 6.4: Optický útlum měřený s vazebním vláknem 62,5/125 μm .

| Vzorek č. | Struktura | Měřený kanálek | Optický útlum (dB/cm) | |
|-----------|--|---|----------------------------|----------------------------|
| | | | $\lambda = 650 \text{ nm}$ | $\lambda = 850 \text{ nm}$ |
| 403 | Dupont Q65HA/ EpoClad/EpoCore | 2. série, 1. kanálek, 10 μm | 3,7 | 1,5 |
| 403 | | 2. série, 6. kanálek, 62,5 μm | 1,7 | 1,3 |
| 403 | | 2. série, 8. kanálek, 50 μm | 2,7 | 2,4 |
| 403 | | 2. série, 11. kanálek, 50 μm | 6,6 | 2,2 |
| 403 | | 2. série, 14. kanálek, 62,5 μm | 5,5 | 3,8 |
| 404 | Dupont ST726/ EpoClad/EpoCore | 2. série, 1. kanálek, 10 μm | 2,8 | 3,4 |
| 404 | | 2. série, 3. kanálek, 62,5 μm | 4,7 | 3,9 |
| 404 | | 2. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 2,9 | 2,9 |
| 405 | Xerox W3 3R9525/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 1. kanálek, 10 μm | 2,1 | 1,9 |
| 405 | | 1. série, 2. kanálek, 62,5 μm | 3,7 | 2,9 |
| 405 | | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 5,9 | 4,1 |
| 405 | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 1,8 | 1,9 |
| 405 | | 1. série, 6. kanálek, 62,5 μm | 3,8 | 2,8 |
| 406 | Mitsubishi GN175 4600/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 5,9 | 4,6 |
| 407 | Plexiglas OF058/EpoCore | 1. série, 2. kanálek, 62,5 μm | 3,0 | 4,4 |
| 407 | | 1. série, 3. kanálek, 62,5 μm | 4,1 | 1,6 |
| 407 | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 1,8 | 2,2 |
| 407 | | 2. série, 9. kanálek, 50 μm | 1,9 | 2,8 |
| 407 | | 2. série, 11. kanálek, 50 μm | 4,2 | 3,2 |
| 407 | | 2. série, 12. kanálek, 80 μm | 1,5 | 1,8 |
| 415H | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 5,9 | 5,0 |
| 415H | | 1. série, 5. kanálek, 62,5 μm | 8,2 | 8,2 |
| 416H | Plexiglas OF058/Su8-50 | 1. série, 4. kanálek, 62,5 μm | 2,8 | 2,7 |
| 525 | Dupont Q65HA/ EpoClad/EpoCore | 1. série, 1. kanálek, 50 μm | 1,9 | 1,2 |
| | | 1. série, 3. kanálek, 50 μm | 4,2 | 2 |
| | | 1. série, 4. kanálek, 50 μm | 3,1 | 2,7 |
| | | 3. série, 1. kanálek, 50 μm | 3,3 | 3,2 |
| | | 3. série, 2. kanálek, 50 μm | 4,8 | 2,8 |
| | | 3. série, 3. kanálek, 50 μm | 2,3 | 2 |

Nejlepšího výsledku měření optického útlumu hřebenových optických flexibilních vlnovodů bylo dosaženo u struktury Dupont Q65HA/ EpoClad/EpoCore (č. vzorků 403 a 525), kde jsou hodnoty optického útlumu kolem 1,7 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 1,2 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. U struktury Plexiglas OF058/Su8-50 byl naměřen nejnižší optický útlum 1,9 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 1,1 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. Ostatní změřené vzorky dosahují nejnižších optických útlumů v rozmezí od 1,5 dB/cm do 3 dB/cm. Tyto vyšší hodnoty optického útlumu jsou pravděpodobně způsobeny nedokonalým procesem optické litografie.

7 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh a realizace flexibilních polymerních optických planárních a hřebenových vlnovodů. Celkem bylo navrženo 27 struktur planárních optických vlnovodů a 30 struktur hřebenových vlnovodů. Pro návrh bylo použito 18 typů flexibilních polymerních substrátů a 3 typy polymerních materiálů pro vlnovodné vrstvy (EpoCore, Su8-5, Su8-50 a LIGHLINK™ XP-6701A Core) a 2 typy polymerů pro oddělovací vrstvy (EpoClad a LIGHLINK™ XH-100145 Clad).

Aby byl návrh polymerních vlnovodů co nejpřesnější, byly vyrobeny planární optické vlnovody na křemenném skle a tyto vzorky byly použity pro měření hodnot indexů lomu. Byly také změřeny transmisní spektra použitých vlnovodných materiálů a toto měření prokázalo, že zvolené materiály jsou vhodné pro danou aplikaci.

Navržené vlnovody byly vyráběny pomocí metody rotačního lití a optické litografie. Takto bylo vyrobeno 38 planárních optických vlnovodů a 14 hřebenových vlnovodů z epoxydové pryskyřice Su8-5 a Su8-50. Dále bylo vyrobeno 20 planárních optických vlnovodů a 35 hřebenových vlnovodů z polymerů EpoClad a EpoCore a 16 planárních optických vlnovodů z polymerů LIGHLINK™ XP-6701A Core a LIGHLINK™ XH - 100145 Clad.

U planárních vlnovodů byl optický útlum měřen pomocí skenování povrchu vlnovodu optickým vláknem. Měření bylo prováděno na vlnové délce 632,8 nm a nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků vytvořených na flexibilní podložce Plexiglas OF058, s vlnovodnou vrstvou Su8-50 a také u planárního optického vlnovodu tvořeného flexibilní podložkou Dupont Q65HA, mezivrstvou LIGHLINK™ XH-100145 Clad a vlnovodnou vrstvou LIGHLINK™ XP-6701A Core. Tyto planární optické vlnovody měly optický útlum 0,11 dB/cm. Nejlepšího výsledku pro polymery EpoClad a EpoCore bylo dosaženo u vzorků vyrobených na flexibilní podložce Xerox W3 3R96525, kde byla naměřena hodnota optického útlumu 0,49 dB/cm (632,8 nm).

U hřebenových vlnovodů byl optický útlum měřen pomocí metody dvou délek a nejlepšího výsledku bylo dosaženo pro strukturu Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore, kde byl naměřen optický útlum 1,7 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 1,2 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm. U struktury Plexiglas OF058/Su8-50 byla změřena nejmenší hodnota optického útlumu 1,7 dB/cm pro vlnovou délku 650 nm a 1,1 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm.

Použitá literatura

- [1] C. CHOI, L. LIN, Y. LIU, J. CHOI, L. WANG, D. HAAS, J. MAGERA, R. T. CHEN, Flexible optical waveguide film fabrications and optoelectronic devices integration for fully embedded board-level optical interconnects, *Journal of Lightwave Technology* 22 (2004) 2168-2176.
- [2] Y. ISHIDA, H. HOSOKAWA, Optical link utilizing polymer optical waveguides: Application in multimedia device (Proceedings Paper). *Proc. SPIE. Photonics in Multimedia II.* (2008) 70010J-1 – 70010J-9.
- [3] R. DANGEL, F. HORST, T. LAMPRECHT, B. OFFEIN, M. GMUR, Flexible Polymer Waveguides as Cost-Efficient, High-Density Capable, and Versatile Technology for Board-to-Board and On-Board Optical Interconnects.
- [4] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 148 s. ISBN 978-80-01-03920-5.
- [5] SHIMADZU CORPORATION, [online]
<http://www.shimadzu.com/an/spectro/uv/uv-3600plus.html>
- [6] Metricon Corporation, [online] <http://www.metricon.com>
- [7] NEKVINDOVÁ, Pavla a kol. *Planární optické vlnovody*. Praha: VŠCHT 2007, *Návody pro laboratoře oboru anorganická chemie*, VŠCHT.
- [8] NERUDA Miloš. *Návrh optické planární mnohavidové rozbočnice*. Praha: ČVUT 2012. *Bakalářská práce*, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [9] VESELÝ, Tomáš. *Příprava a studium vlastností polymerních vrstev pro integrovanou optiku*. Praha: ČVUT 2010. *Diplomová práce*, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [10] AMBROŽ, Jan. *Měření optických přenosových tras*. Brno: VUT 2009. *Bakalářská práce*, VUT, Fakulta elektrotechnická a komunikačních technologií telekomunikace.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1: Flexibilní optický planární vlnovod s optickým útlumem 0,20 dB/cm pro vlnovou délku 850 nm [2] a) ohnutý, b) kroucený. | 11 |
| Obrázek 1.2: Příklady použití planárních flexibilních vlnovodů, a) spojení na DPS, b) spojení deska-deska, c) spojení deska-deska 90°, d) spojení deska-deska 180° [2]. . | 12 |
| Obrázek 2.1: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí..... | 15 |
| Obrázek 2.2: a) lom ke kolmici, b) lom od kolmice. | 15 |
| Obrázek 2.3: 3D model optického planárního vlnovodu..... | 17 |
| Obrázek 2.4: Příklady planárních 3D optických vlnovodů a) páskový, b) žebrový, c) vnořený, d) kanálkový [4]..... | 17 |
| Obrázek 3.1: a) struktura planárního optického vlnovodu bez mezivrstvy, b) struktura planárního optického vlnovodu s mezivrstvou..... | 18 |
| Obrázek 3.2: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro flexibilní polymerní podložky. | 19 |
| Obrázek 3.3: Závislost indexu lomu na vlnové délce pro vlnovodné optické materiály. | 20 |
| Obrázek 3.4: Struktura kanálkového vlnovodu bez mezivrstvy. | 22 |
| Obrázek 3.5: Struktura kanálkového vlnovodu s mezivrstvou. | 23 |
| Obrázek 3.5: Závislost indexu lomu na vlnové délce flexibilních fólií použitých při návrhu hřebenových vlnovodů..... | 24 |
| Obrázek 3.6: a) symetrický vlnovod vytvořený nanesením mezivrstvy EpoClad na flexibilní fólii, b) symetrický vlnovod vytvořený nanesením vlnovodné vrstvy Su8-50 přímo na substrát Plexiglas OF058, c) symetrický vlnovod vytvořený nanesením mezivrstvy LIGHLINK™ XH-100145 Clad na flexibilní fólii..... | 26 |
| Obrázek 3.7: Příklad navrženého vlnovodu Substrát/EpoClad/EpoCore/EpoClad včetně všech geometrických rozměrů pro vlnovou délku 850 nm. | 27 |
| Obrázek 3.8: Příklad navrženého vlnovodu Plexiglas/Su8-5/PMMA pro vlnovou délku 1310 nm. | 28 |
| Obrázek 3.9: Příklad navrženého vlnovodu Plexiglass OF058/Su8-50/PMMA pro vlnovou délku 1550 nm. | 29 |
| Obrázek 3.10: Příklad navrženého vlnovodu LIGHLINK™ XH-100145 Clad/ LIGHLINK™ XP-6701A Core / LIGHLINK™ XH-100145 Clad pro vlnovou délku 1550 nm. | 30 |
| Obrázek 4.1: Výroba planárních vlnovodů a) čištění flexibilních substrátu, b) nanesení mezivrstvy, c) nanesení vlnovodné vrstvy, d) nanesení horní krycí vrstvy..... | 32 |
| Obrázek 4.2: Výroba hřebenových planárních vlnovodů z polymerů EpoClad a EpoCore, a) čištění substrátu, b) nanesení mezivrstvy, c) vytvrzení mezivrstvy UV světlem, d) | |

| | |
|---|----|
| nanesení vlnovodné vrstvy, e) optická litografie, f) odleptání neosvícené části, g) nanesení horní krycí vrstvy. | 34 |
| Obrázek 4.3: Výroba hřebenových planárních vlnovodů z polymerů LIGHLINK™ XH-100145 Clad a LIGHLINK™ XP-6701A Core, a)-c) čištění substrátu, d) nanesení mezivrstvy a vytvrzení teplotou, e) nanesení vlnovodné vrstvy, f) optická litografie, g) odleptání neosvícené části, h) nanesení horní krycí vrstvy. | 36 |
| Obrázek 4.4: Výroba hřebenových planárních vlnovodů z epoxydové pryskyřice Su8 – 5 a Su8 - 50, a) čištění substrátu, b) nanesení vlnovodné vrstvy a vytvrzení teplotou, c) optická litografie, d) odleptání neosvícené části, e) nanesení horní krycí vrstvy. | 38 |
| Obrázek 5.1: Pracoviště s mikroskop Olympus BX60 s kamerou DP 10 použité pro optickou kontrolu vyrobených vzorků. | 39 |
| Obrázek 5.2: a) správně vyrobený planární vlnovod bez viditelných vad, b) nepovedený planární vlnovod (špatně nanesená vlnovodná vrstva způsobená špatným čištěním substrátu), c) zkrabatělá vlnovodná vrstva způsobená dlouhým osvětlením UV lampou. | 40 |
| Obrázek 5.3: Princip měření profilu hřebenového vlnovodu. | 41 |
| Obrázek 5.4: Ukázka profilu vyrobených hřebenových vlnovodů. | 41 |
| Obrázek 5.5: a) Princip měření transmisních spekter, b) přístroj UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600 [5]. | 42 |
| Obrázek 5.6: Pracoviště Metricon [6]. | 43 |
| Obrázek 5.7: Princip metody měření vlastností planárních vlnovodů pomocí jednohranolové vidové spektroskopie zařízením METRICON [6]. | 44 |
| Obrázek 5.8: Princip měření útlumu planárních vlnovodů [6]. | 44 |
| Obrázek 5.9: Pracoviště pro měření optického útlumu planárních vlnovodů. | 45 |
| Obrázek 5.10: Princip měření optického útlumu kanálkových/hřebenových vlnovodů pomocí metody dvou délek. | 46 |
| Obrázek 5.11: a) přístroj Thorlabs' PM200, b) velkoplošný detektor S151C. | 47 |
| Obrázek 6.1: a) vzorek č. 381 – struktura Plexiglas OF058/Su8-50, b) vzorek č. 384 – struktura Plexiglas OF058/EpoCore. | 48 |
| Obrázek 6.2: a) Nepodařený hřebenový vlnovod Si/SiO ₂ /Su8-50 s viditelnými poškozeními, b) nepodařený vlnovod Si/Su8-50 s nedoleptanou vrstvou mezi kanálky i jinými chybami. | 49 |
| Obrázek 6.3: a) vzorek č. 525, struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (maska 50 μm), b) vzorek č. 525, struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (maska 62,5 μm), c) vzorek č. 405, struktura Xerox W3 3R96525/EpoClad/EpoCore (maska 50 μm, d) vzorek č. 353, struktura Si/EpoCore (maska 62,5 μm). | 50 |
| Obrázek 6.4: Model ideálního profilu s geometrickými rozměry 50 x 50 μm. | 51 |
| Obrázek 6.5: Profil struktury Si/EpoCore, a) profil nedoleptaného hřebenového vlnovodu (č. vzorku 471), šířka použité masky 62,5 μm, b) profil vlnovodu s příliš širokým | |

| | |
|---|----|
| kanálkem než je použita litografická maska (č. vzorku 475), šířka použité masky 50 μ m. | 52 |
| Obrázek 6.6: Profily vyrobených vzorků, a) struktura Plexiglas OF058/Su8-5 (č. vzorku 531), šířka použité masky 62,5 μ m, b) struktura Dupont Q65HA/EpoClad/EpoCore (č. vzorku 525), šířka použité masky 50 μ m..... | 53 |
| Obrázek 6.7: Transmisní spektra pro polymery, a) EpoCore a EpoClad, b) Su8-5 a Su8-50, c) LIGHLINK™ XH-100145 Clad, d) LIGHLINK™ XP-6701A Core..... | 55 |
| Obrázek 6.8: Měření jednohnanolovou spektroskopii na vlnové délce 632,8 nm, a) EpoCore/EpoClad nanesený na podložce Melinex ST726, b) EpoCore na podložce Plexiglas OF058, c) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core na podložce Xerox W3 3R96525, d) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core na podložce Xerox W3 3R98199. | 56 |
| Obrázek 6.9: Měření jednohnanolovou spektroskopii na vlnové délce 632,8 nm pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-50..... | 57 |
| Obrázek 6.10: Fotografie z měření optického útlumu planárních vlnovodů, a) Su8-5 nanesený na podložce PET, b) LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP - 6701A Core nanesený na podložce na Xerox 3R6525..... | 58 |
| Obrázek 6.11: Fotografie z měření optického útlumu planárního vlnovodu EpoClad/EpoCore na podložce Dupont Q65HA. | 59 |
| Obrázek 6.12: Optický útlum pro planární vlnovody, a) Xerox W3 3R96525/EpoClad/EpoCore, b) Dupont ST726/EpoClad/EpoCore, c) Mitsubishi GN2504600/EpoClad/EpoCore, d) Plexiglas OF058/EpoCore..... | 59 |
| Obrázek 6.13: Optický útlum pro strukturu, a) PET/Su8-5, b) Plexiglas OF058/Su8 - 50. | 60 |
| Obrázek 6.14: Optický útlum pro strukturu a) Dupont Q65HA/LIGHLINK™ XH - 100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core, b) Plexiglas OF058/LIGHLINK™ XH -100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core. | 60 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 3.1: Indexy lomů zvolených substrátů pro běžné komunikační vlnové délky, hodnoty odečteny z obrázku 3.2. | 20 |
| Tabulka 3.2: Indexy lomů zvolených vlnovodných materiálů pro běžné komunikační vlnové délky, odečtené z obrázku 3.3. | 21 |
| Tabulka 3.3: Přehled navržených struktur bez mezivrstvy. | 21 |
| Tabulka 3.4: Přehled navržených struktur s mezivrstvou. | 22 |
| Tabulka 3.5: Indexy lomů flexibilních podložek pro běžné komunikační vlnové délky, odečtené z obrázku 3.5. | 25 |
| Tabulka 3.6: Navržená struktura hřebenového vlnovodu. | 25 |
| Tabulka 3.7: Vypočtené rozměry vlnovodu a počty vedených vidů pro strukturu substrát/EpoClad/EpoCore/EpoClad. | 28 |
| Tabulka 3.8: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-5/PMMA. | 29 |
| Tabulka 3.9: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu Plexiglas OF058/Su8-50/PMMA. | 30 |
| Tabulka 3.10: Vypočtené rozměry a počty vedených vidů pro strukturu LIGHLINKTM XH-100145 Clad/ LIGHLINKTM XP-6701A Core / LIGHLINKTM XH-100145 Clad. | 31 |
| Tabulka 6.1: Změřené rozměry kanálků vytvořené z polymerů EpoClad/EpoCore. | 54 |
| Tabulka 6.2: Změřené rozměry kanálků vytvořené z polymeru Su8-50. | 54 |
| Tabulka 6.3: Optický útlum měřený s vazebním vláknem 9/125 μm | 62 |
| Tabulka 6.4: Optický útlum měřený s vazebním vláknem 62,5/125 μm | 64 |

Přílohy

A Zdrojový kód pro výpočet tloušťek mezivrstvy a horní krycí vrstvy

> *restart* :

> *with(Student[CalculusI])* :

> *digits := 10* :

> **#Vstupní data**

> $n_f := [1.526, 1.519, 1.511, 1.509]$:

> $n_s := [1.486, 1.480, 1.473, 1.472]$:

> $n_c := [1.486, 1.480, 1.473, 1.472]$:

> $\lambda := [650E-9, 850E-9, 1310E-9, 1550E-9]$:

> $t_g := 50E-6$:

> $w := 50E-6$:

> $i := 4$:

> **#Index kontrastu**

> $IC_{fs} := \frac{(n_f[i])^2 - (n_s[i])^2}{2 \cdot (n_f[i])^4}$:

> $IC_{fc} := \frac{(n_f[i])^2 - (n_c[i])^2}{2 \cdot (n_f[i])^4}$:

> **#Pocet vidů**

> $m := \text{floor} \left(\frac{2}{\lambda[i]} \cdot t_g \cdot \sqrt{(n_f[i])^2 - (n_s[i])^2} - \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(\sqrt{\frac{(n_s[i])^2 - (n_c[i])^2}{(n_f[i])^2 - (n_s[i])^2}} \right) \right)$;

> $p := \text{floor} \left(\frac{2}{\lambda[i]} \cdot w \cdot \sqrt{(n_f[i])^2 - (n_s[i])^2} - \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(\sqrt{\frac{(n_s[i])^2 - (n_c[i])^2}{(n_f[i])^2 - (n_s[i])^2}} \right) \frac{(n_f[i])^2}{(n_s[i])^2} \right)$;

> $pp := p$:

> **#Efektivní index**

> $k := \text{evalf} \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda[i]} \right)$:

$$\begin{aligned}
> N := \text{Roots} \left(k \cdot t_g \cdot \sqrt{(n_f[i])^2 - N^2} - \arctan \left(\frac{\sqrt{N^2 - (n_c[i])^2}}{\sqrt{(n_f[i])^2 - N^2}} \right) \right. \\
\left. - \arctan \left(\frac{\sqrt{N^2 - (n_s[i])^2}}{\sqrt{(n_f[i])^2 - N^2}} \right) - (m-1) \cdot \pi, n_c[i] .. n_f[i] \right);
\end{aligned}$$

$$> \#N[1] := 1.3462;$$

$$> \beta := \text{evalf}(N[1] \cdot k);$$

> #Rozlozeni intezity rozmery

$$> q := \sqrt{|(\beta)^2 - (n_c[i])^2 \cdot k^2|};$$

$$> p := \sqrt{(\beta)^2 - (n_s[i])^2 \cdot k^2};$$

$$> h := \sqrt{k^2 \cdot (n_f[i])^2 - (\beta)^2};$$

$$> E_{yf} := \left(\cos(h \cdot x) - \frac{q}{h} \cdot \sin(h \cdot x) \right);$$

$$> \text{maxx} := \frac{d}{dx} E_{yf};$$

$$> \text{findmaxx} := \text{solve}(\text{maxx} = 0, x);$$

$$> \text{evalf}(\text{abs}(\%) - t_g);$$

$$> \text{konst} := \text{abs} \left(\cos(\text{abs}(h) \cdot (\text{findmaxx})) - \frac{q}{h} \cdot \sin(\text{abs}(h) \cdot (\text{findmaxx})) \right);$$

$$> E_{yc} := \frac{e^{-q \cdot x}}{\text{konst}};$$

$$> E_{yf} := \frac{\cos(h \cdot x) - \frac{q}{h} \cdot \sin(h \cdot x)}{\text{konst}};$$

$$> E_{ys} := \frac{\left(\cos(h \cdot t_g) + \frac{q}{h} \cdot \sin(h \cdot t_g) \right) e^{(p \cdot (x + t_g))}}{\text{konst}};$$

> #rozmer strany hs

$$> h_s := \text{solve}(E_{ys} = 0.01, x);$$

$$> h_s := \text{evalf}(\text{abs}(\%) - t_g);$$

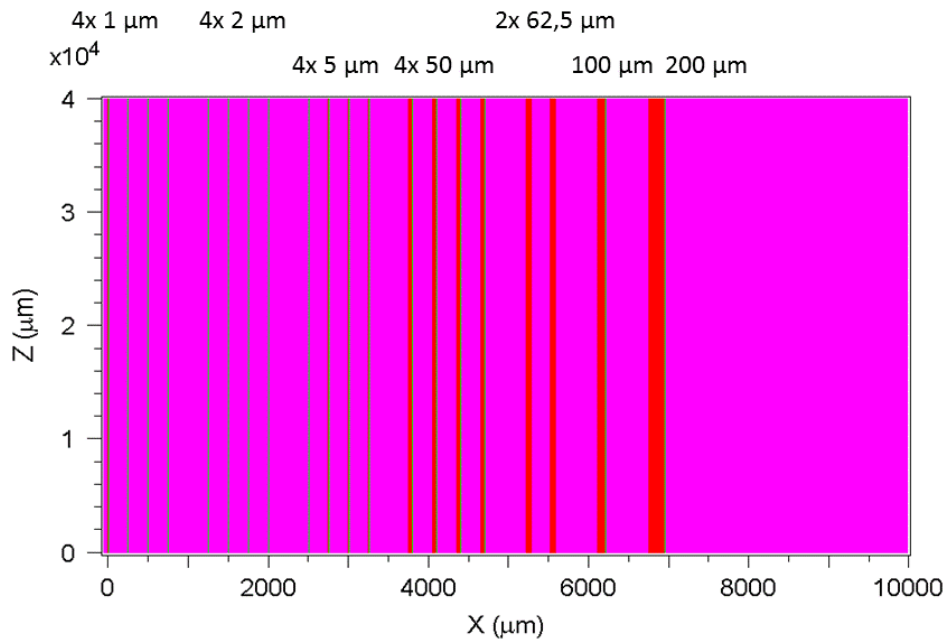
$$> \text{nprintf}("%0.3E", h_s);$$

> #rozmer strany hc

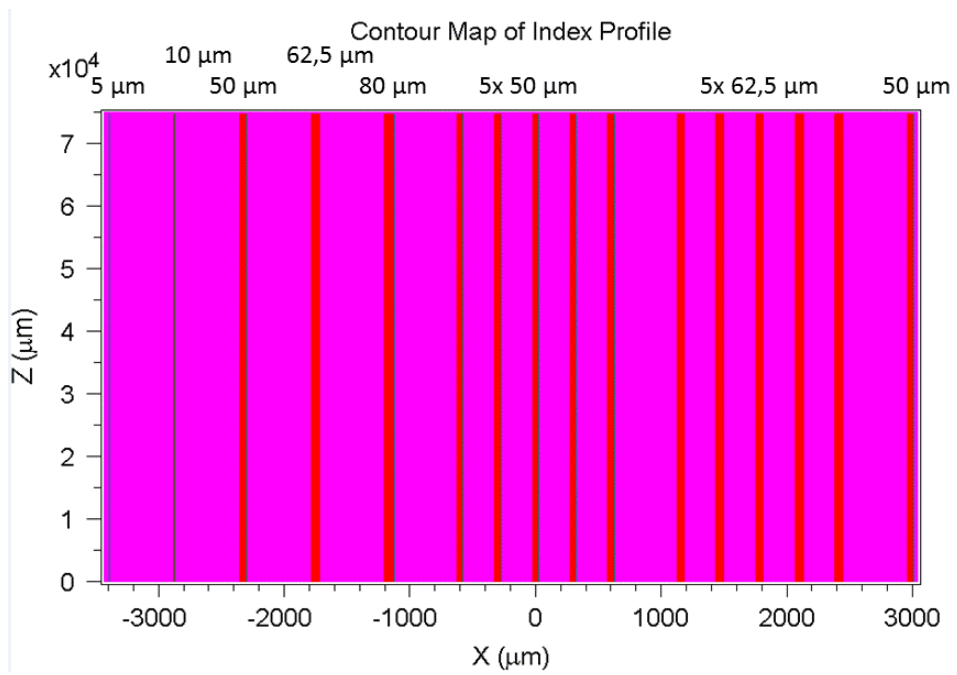
$$> h_c := \text{solve}(E_{yc} = 0.01, x);$$

$$> \text{nprintf}("%0.2E", h_c);$$

B Motivy použitých masek



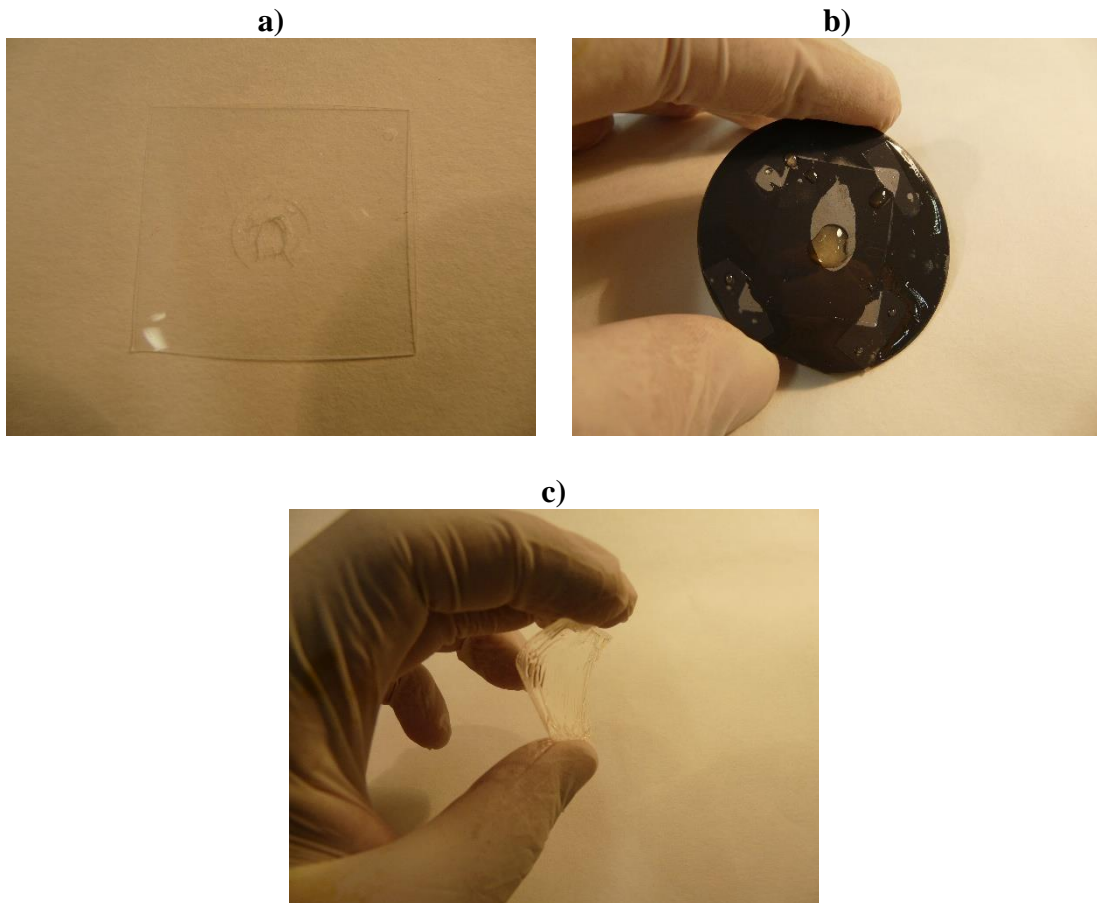
Motiv litografické masky s názvem Plzeň 2013



Motiv litografické masky s názvem Plzeň 2014

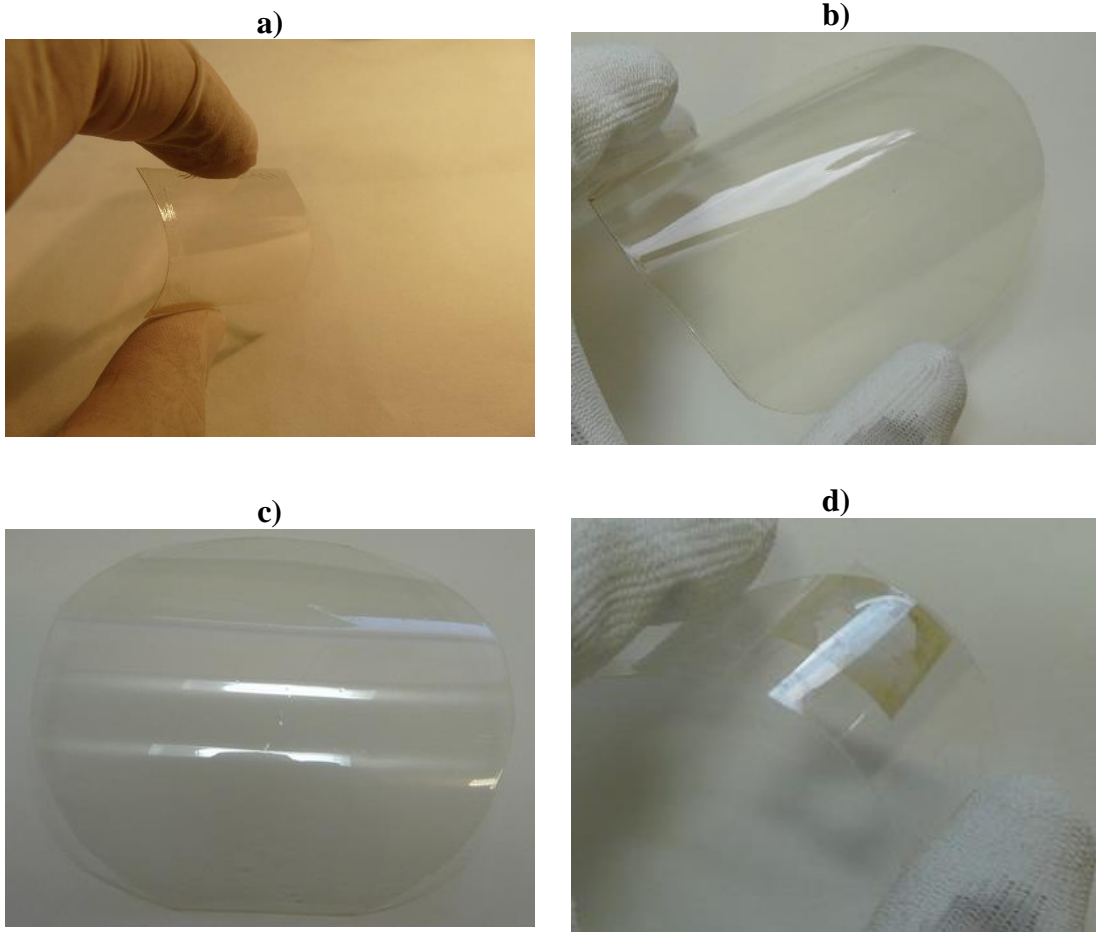
C Fotografie vyrobených vzorků

Časté chyby při výrobě planárních vlnodů



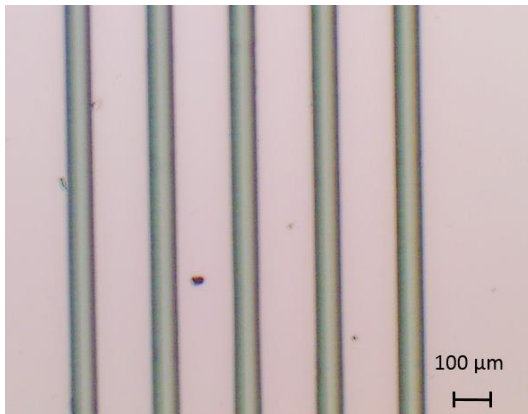
a) díra v substrátu PMMA způsobená přísátím substrátu vakuovou vývěvou a čištěním pomocí acetonu, b) špatně nanesená vlnovodná vrstva Su8-50 způsoben špatným vyčištěním substrátu PMMA, c) zkrabatělá vlnovodná vrstva Su8-50 způsobená dlouhým osvětlením UV lampou.

Vyrobené flexibilní optické planární vlnovody

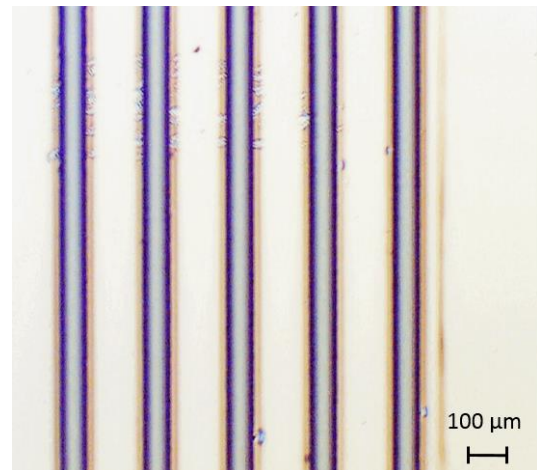


a) vzorek č. 312 – struktura CL400/EpoCore, b) vzorek č. 367 – struktura Plexiglas OF058/EpoCore, c) vzorek č. 386 – struktura Plexiglas OF058/Su8-50, d) vzorek č. 486 – struktura Xerox W3 3R98199/LIGHLINK™ XH-100145 Clad/LIGHLINK™ XP-6701A Core.

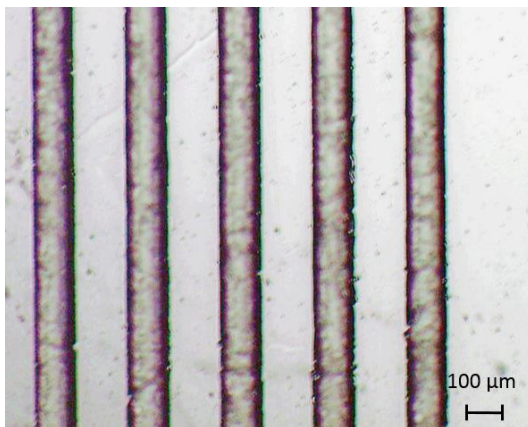
Vyrobené hřebenové optické planární vlnovody



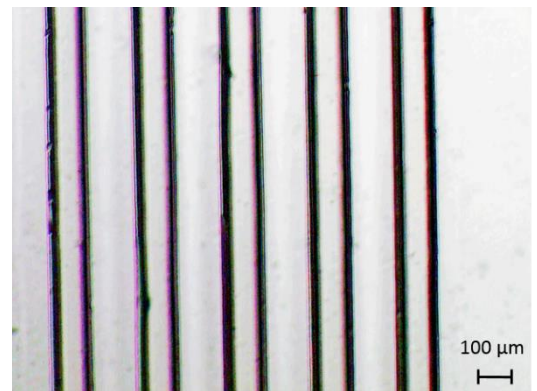
Vzorek č. 352, struktura Si/EpoClad/EpoCore (maska 50 μm).



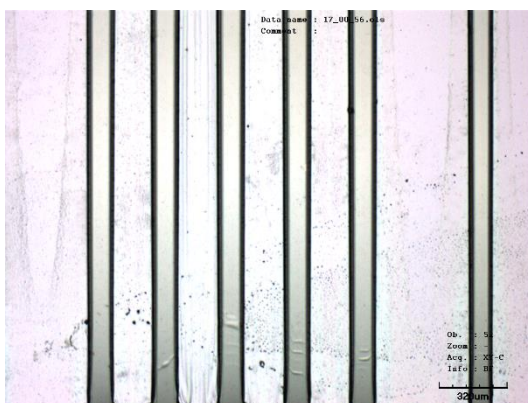
Vzorek č. 353, struktura SiO₂/EpoCore (maska 62,5 μm).



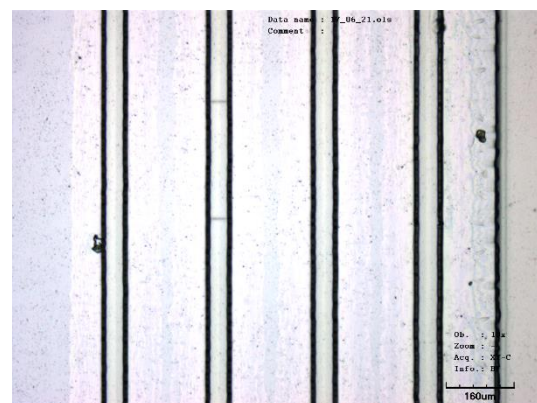
Vzorek č. 354B, struktura Fólie1/EpoClad/EpoCore (maska 62,5 μm).



Vzorek č. 356B, struktura Si/EpoClad (maska 62,5 μm).



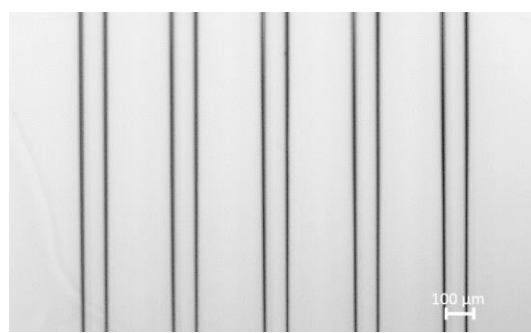
Vzorek č. 474, struktura Si/EpoCore (maska 50 μm).



Vzorek č. 475, struktura Si/EpoCore (maska 50 μm).



Vzorek č. 407, struktura
Plexiglas OF058 200 μm/EpoCore
(maska 50 μm).



Vzorek č. 416H, struktura
Plexiglas OF058 200 μm/Su8-50 (maska
62,5 μm).



Vzorek č. 531, struktura
Plexiglas OF058/Su8-50 (maska 50 μm).



Vzorek č. 531, struktura
Plexiglas OF058/Su8-50 (maska 62,5 μm).

D Seznam vyrobených vzorků

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|------------------|------------------|--|------------------|
| 274A | PMMA | Su8-5 | 1. čištění líh+izopropylalkohol 2. rotační lití 3000 ot. /min 1min 3. UV 3 minuty | Planární vlnovod |
| 274B | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 274C | SiO ₂ | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 275A | PMMA | Su8-5 | 1. čištění líh+izopropylalkohol 2. rotační lití 1500 ot. /min 1 min 3. UV 3 minuty | Planární vlnovod |
| 275B | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 276 | PMMA | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 277 | PMMA | Su8-50 | Stejná jako 275A | Planární vlnovod |
| 278 | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 275A | Planární vlnovod |
| 279 | PMMA | Su8-50 | Stejná jako 275A | Planární vlnovod |
| 280 | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 281 | PMMA | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 282 | PMMA 1mm | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 283 | PMMA 1mm | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 284 | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 285 | PMMA 1mm | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 286 | PentaPRINT | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 287 | PentaPRINT | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 288 | PET | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|----------|------------------|---|------------------|
| 289 | PET | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 290 | PMMA | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 291 | PMMA | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 292 | LS353555 | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 293 | LS353555 | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 294 | PS334063 | Su8-5 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 295 | PS334063 | Su8-50 | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 296 | AXAprint | EpoClad | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 297 | AXAprint | EpoClad | Stejná jako 274A | Planární vlnovod |
| 298 | PET | EpoCore | 1. čištění líh+izopropylalkohol 2. rotační lití 3000 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty | Planární vlnovod |
| 299 | PET | EpoCore | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 301 | D218D | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 302 | D218D | EpoClad/EpoCore | 1. čištění líh+izopropylalkohol 2. EpoClad - rotační lití 3000 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty 4. EpoCore - rotační lití 3000 ot. /min 1min 5. UV 2 min | Planární vlnovod |
| 303 | PS334063 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 304 | PS334063 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 302 | Planární vlnovod |
| 306 | LS362996 | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 307 | LS362996 | EpoCore | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 308 | CL400 | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|---------------------|------------------|---|------------------|
| 309 | CL400 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 302 | Planární vlnovod |
| 310 | PET | Su8-50 | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 311 | PET | Su8-5 | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 312 | CL400 | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 313 | CL400 | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 314 | D218D | EpoClad | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 315 | D218D | EpoCore | Stejná jako 298 | Planární vlnovod |
| 316 | D218D | Su8-5 | 1. Primer 2. rotační lití 1500 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty | Planární vlnovod |
| 317 | D218D | Su8-5 | Stejná jako 316 | Planární vlnovod |
| 320 | CL400 | Su8-5 | Stejná jako 316 | Planární vlnovod |
| 321 | CL400 | Su8-5 | Stejná jako 316 | Planární vlnovod |
| 322 | CL400 | Su8-50 | 1. Primer 2. rotační lití 3000 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty | Planární vlnovod |
| 323 | Si/SiO ₂ | EpoCore | 1. Primer 2. rotační lití 1500 ot. /min 1min 3. Litograf 6 cykly | Plzeň 2013 |
| 324 | Si/SiO ₂ | Su8-5 | 1. Primer 2. rotační lití 2000 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty | Planární vlnovod |
| 325 | Si/SiO ₂ | Su8-50 | Stejná jako 324 | Planární vlnovod |
| 326 | Si/SiO ₂ | Su8-5 | 1. Primer 2. rotační lití 1500 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty | Planární vlnovod |
| 327 | Si/SiO ₂ | Su8-50 | Stejná jako 326 | Planární vlnovod |
| 328 | Sklo | Su8-5 | Stejná jako 324 | Planární vlnovod |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|---------------------|------------------|--|------------------|
| 329 | Sklo | Su8-5 | Stejná jako 324 | Planární vlnovod |
| 330 | Sklo | Su8-50 | 1. Primer 2. rotační lití 2000 ot. /min 1min 3. Litograf 2 cykly | Plzeň 2013 |
| 331 | Sklo | Su8-50 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 332 | Si | Su8-5 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 333 | Si | Su8-5 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 334 | Si/SiO ₂ | Su8-5 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 335 | Si/SiO ₂ | Su8-5 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 336 | Si/SiO ₂ | Su8-50 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 337 | Si/SiO ₂ | Su8-50 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 338 | Si | Su8-50 | Stejná jako 330 | Plzeň 2013 |
| 340 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | 1. Primer 2. EpoClad - rotační lití 2000 ot. /min 1min 3. UV 2 minuty 4. EpoCore - rotační lití 2000 ot. /min 1min 5. UV 2 min | Plzeň 2013 |
| 342 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 343 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 344 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 345 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 347 | Si/SiO ₂ | EpoCore | 1. Primer 2. rotační lití 2000 ot. /min 1min 3. Litograf 2 cykly | Plzeň 2013 |
| 350 | Si | EpoClad | Stejná jako 347 | Plzeň 2013 |
| 351 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|-----------------------|------------------|--|------------|
| 352 | Si | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 353 | Si | EpoCore | Stejná jako 347 | Plzeň 2013 |
| 354A | Fólie 1 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 354B | Fólie 1 | EpoClad | Stejná jako 347 | Plzeň 2013 |
| 356A | Fólie 2 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 340 | Plzeň 2013 |
| 356B | Fólie 2 | EpoClad | Stejná jako 347 | Plzeň 2013 |
| 403 | Dupont Q65HA | EpoClad/EpoCore | 1. Primer 2. EpoClad - rotační lití 1500 ot. /min 1min 3. Plotna 50°C 10 min, do 90 °C po 10 °C za minutu 4. UV 2 minuty 5. krok 3 6. EpoCore - rotační lití 1500 ot. /min 10 min 7. krok 3 8. Litograf 2 cykly 9. krok 3 10. Vývojka 30 sekund | Plzeň 2014 |
| 404 | Dupont ST726 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403 | Plzeň 2014 |
| 405 | Xerox W3 3R9525 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403 | Plzeň 2014 |
| 406 | Mitsubishi GN175 4600 | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403 | Plzeň 2014 |
| 407 | Plexiglas OF058 | EpoCore | 1. Primer 2. Rotační lití 1500ot./min 10 minut 3. Plotna 50°C 10 min, do 90 °C po 10 °C za minutu 4. Litograf 2 cykly 5. krok 3 6. Vývojka 30 sekund | Plzeň 2014 |
| 408 | Plexiglas OF058 | EpoCore | Stejná jaké 407 | Plzeň 2014 |
| 415H | Plexiglas OF058 | Su8-50 | Stejná jaké 407 | Plzeň 2014 |
| 416H | Plexiglas OF058 | Su8-50 | Stejná jaké 407 | Plzeň 2014 |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|----------------------|------------------------|---|---------------------|
| 429 | Sklo | LIGHLINK Core | 1. Vývojka 2 min, destilovaná voda, aceton, izopropylalkohol – 2000 ot. /min 2. Rotační lití 200 ot. /min 5 min 3. Plotna 90 °C 30 min 4. UV 2 minuty 5. Plotna 90 °C 10 min | Planární vlnovod |
| 430 | Sklo | LIGHLINK Core | Stejná jako 429, krok 2 – 500 ot. /min 5 minut | Planární vlnovod |
| 431 | Sklo | LIGHLINK Core | Stejná jako 429, krok 2 – 750 ot. /min 5 minut | Planární vlnovod |
| 432 | Sklo | LIGHLINK Clad | Stejná jako 429, krok 2 – 200 ot. /min 5 minut, krok 5 – 160 °C 1 hodina | Planární vlnovod |
| 433 | Sklo | LIGHLINK Clad | Stejná jako 432, krok 2 – 500 ot. /min | Planární vlnovod |
| 434 | Sklo | LIGHLINK Clad | Stejná jako 432, krok 2 – 750 ot. /min | Planární vlnovod |
| 484 | Xerox W3 3R96525 | LIGHTLINK Clad/Core | 1. Aceton a Izopropyl 60 + 60 s 2. Vývojka 2 minuty + ofuk 3. Aceton a Izopropyl 60 + 60 s 4. Clad 750 ot. /min 5 minut 5. Plotna 90 °C 2 minuty 6. Core 750 ot. /min 5 minut 7. Plotna 95 °C 2 minuty 8. UV 5 minut 9. Plotna 100 °C/min, 120 °C/min, 140 °C/10minut | Planární vlnovod |
| 485 | Xerox W3 3R98199 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 484 | Planární vlnovod |
| 486 | Xerox W3 3R98220 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 484 | Planární vlnovod |
| 491 | Xerox W3 3R98199 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 484, krok 4 a 6 – 500 ot. /min | Planární vlnovod |
| 492 | Xerox W3 3R981220 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 484, krok 4 a 6 – 500 ot. /min | Planární vlnovod |
| 493 | Xerox W3 3R96525 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 484, krok 4 a 6 – 500 ot. /min | Planární vlnovod |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|------------------------------|---------------------|--|------------------|
| 494 | Sklo Schott D263 210 μ m | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 493, bez kroku 9 | Planární vlnovod |
| 495 | Sklo Schott D263 145 μ m | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 493, bez kroku 9 | Planární vlnovod |
| 496 | Sklo Schott D263 200 μ m | EpoClad/EpoCore | 1. Primer 2. EpoClad - rotační lití 1000 ot. /min 5min 3. Plotna 50°C 10 min, do 90 °C po 10 °C za minutu 4. UV 2 minuty 5. krok 3 6. EpoCore - rotační lití 1000 ot. /min 5 min 7. krok 3 8. UV 3 minuty | Planární vlnovod |
| 497 | Sklo Schott D263 145 μ m | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 496 | Planární vlnovod |
| 498 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403, krok 2 a 6 – 1000 ot. /min, vývojka 2+1 min. | Plzeň 2014 |
| 499 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403, krok 2 a 6 – 900 ot. /min, vývojka 2 min 10s. | Plzeň 2014 |
| 500 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403, krok 2 a 6 – 950 ot. /min, vývojka 2 min. | Plzeň 2014 |
| 501 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 403, krok 2 a 6 – 1050 ot. /min, vývojka 2 min 45s. | Plzeň 2014 |
| 518 519 | Si/SiO ₂ | Su8-50 | 1. Primer+85°C 3 min 2. rotační lití 1000 ot. /min 5min 3. Plotna 65°C 60 min 4. UV + maska 60 min 5. Plotna 65°C 1min, 95°C 5 min | Plzeň 2015 |
| 520 | Plexiglas OF058 | Su8-50 | 1. Primer+65°C 5 min 2. rotační lití 1000 ot. /min 5min 3. Plotna 65°C 30 min 4. Litograf Brno Exposure 083 (1min 46s) 5. Plotna 65°C 30 min 6. Vývojka 1min 30 s | Plzeň 2015 |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|------------------|---------------------|---|------------|
| 531 | Plexiglas OF058 | Su8-50 | Stejná jako 520 Krok 4 - Exposure 040 (3min 55s) Krok 6-vývojka 1min 30 s | Plzeň 2015 |
| 522 | Xerox W3 3R96525 | LIGHTLINK Clad/Core | 1. Aceton a Izopropyl 60 + 60 s 2. Vývojka 2 minuty + ofuk 3. Aceton a Izopropyl 60 + 60 s 4. Clad 750 ot. /min 5 minut 5. Plotna 90 °C 2 minuty 6. Core 750 ot. /min 5 minut 7. Plotna 95 °C 2 minuty 8. Litograf Brno Exposure 040 (3 min 55s) 9. Plotna 90 °C 10 minut 10. Vývojka 35s | Plzeň 2015 |
| 523 | Xerox W3 3R96525 | LIGHTLINK Clad/Core | Stejná jako 525 Krok 8 – Exposure 083 (1min 46s) Krok 10 vývojka 1 min | Plzeň 2015 |
| 525 | Dupont Q65HA | EpoClad/EpoCore | 1. Primer 30s+90 °C 3 min 2. EpoClad - rotační lití 1000 ot. /min 5min 3. Plotna 50°C 10 min, do 90 °C po 10 °C za minutu 4. UV 2 minuty 5. krok 3 6. EpoCore - rotační lití 1000 ot. /min 5 min 7. krok 3 8. Litograf Brno Exposure 020 (7min 47s) 9. Krok 3 10 Vývojka 2 min 40 s 11. Plotna 140°C 30 min | Plzeň 2015 |
| 526 | Dupont Q65HA | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 525 Krok 8-Exposure 040 (3min 55s) Krok 11 není | Plzeň 2015 |

| Číslo vzorku | Substrát | Vlnovodná vrstva | Výroba | Motiv |
|--------------|---------------------|------------------|---|------------|
| 527 528 | Dupont Q65HA | EpoClad/EpoCore | 1. Primer 30s+90 °C 3 min 2. EpoClad - rotační lití 1000 ot. /min 5min 3. Plotna 50°C 10 min, do 90 °C po 10 °C za minutu 4. UV 2 minuty 5. krok 3 6. EpoCore - rotační lití 1000 ot. /min 5 min 7. krok 3 8. Litograf 20 cyklů 9. Vývojka 3 minuty | Plzeň 2015 |
| 529 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 527 Litograf 6 cyklů | Plzeň 2015 |
| 528 | Si/SiO ₂ | EpoClad/EpoCore | Stejná jako 527 Litograf 10 cyklů | Plzeň 2015 |

E Seznam příloh uložených na CD

- Diplomová práce ve formátu PDF
- Fotografie vyrobených vzorků
- Seznam vyrobených vzorků a jejich výroba
- Zdrojové kódy pro výpočet tloušťek
- Výsledky měření z profilometru
- Výsledky měření ze zařízení Metricon