



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

**Optické planární polymerní vlnovody realizované na
deskách plošných spojů**

**Optical Planar Polymer Waveguides Realized on
Printed Circuit Boards**

Bakalářská práce

Studijní program: **Komunikace, Multimédia a Elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Václav Prajzler Ph.D.**

Jan Brychta

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

Jan Brychta

.....

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **B R Y C H T A Jan**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Optické planární polymerní vlnovody realizované na deskách plošných spojů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy planárních optických vlnodů.
- 2) Navrhněte optický polymerní planární vlnod, který bude možno realizovat na deskách plošných spojů.
- 3) Proveďte depoziční testy pro výrobu navržených struktur pro podložky používané pro plošné spoje.
- 4) Diagnostikujte vlastnosti vyrobených vlnodů.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy o rozsahu cca 50 až 70 stran.

Seznam odborné literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. E. Bosman: Integration of optical interconnecties and optoelectronic components in flexible substrates, PhD Thesis Universiteit Gent 2010.
3. L. Wang, J. Choi, X. Wang, R.T. Chen, D. Hass, J. Magera: Thin film optical waveguide and optoelectronic device integration for fully e mbedded board level optical interconnects, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Vol. 5556, 2004, pp. 1-14.

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

Platnost zadání: 31. 8. 2016



prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 2. 2015

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za jeho 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. Také bych rád poděkoval Mgr. Oleksii Lyutakovovi, Ph.D. z VŠCHT v Praze za pomoc při měření tloušťek polymerních vrstev pomocí profilometru Talystep. Další poděkování patří 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 Evonik Industries AG za poskytnutí folie Plexiglas® Film OF058 pro depoziční testy.

Název práce: Optické planární polymerní vlnovody realizované na deskách plošných spojů

Autor: Jan Brychta

Katedra: Katedra mikroelektroniky

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

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

Abstrakt: Cílem bakalářské práce je návrh a výroba polymerních optických vlnodů, které bude možno realizovat na deskách plošných spojů, pro přenos dat mezi elektrooptickými moduly a návrh vlnodné spirály o rozměrech realizovatelných na dostupných substrátech. V první části práce je uveden teoretický návrh geometrických rozměrů hřebenových optických planárních vlnodů s použitím polymerních vlnodných materiálů EpoCore, EpoClad, LIGHTLINK™ XP-6701A Core, LIGHTLINK™ XH-100145 Clad a substrátů Pyralux a flexibilní FR-4. V práci je také popsán teoretický návrh a předpokládané vlastnosti vlnodné spirály vyrobené z těchto materiálů. Dále jsou v práci popsány provedené depoziční testy pro výrobu navržených planárních a hřebenových vlnodů. Na závěr jsou uvedeny použité metody pro diagnostiku vyrobených vzorků, následuje shrnutí dosažených výsledků.

Podařilo se připravit flexibilní planární optické vlnovody s optickým útlumem nižším než 0,5 dB/cm na vlnové délce 632,8 nm, vzorek z polymerních materiálů EpoCore/EpoClad měl hodnotu optického útlumu 0,41 dB/cm, vzorek z polymerních materiálů LIGHTLINK™ XP-6701A Core a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad dosahoval hodnoty útlumu 0,39 dB/cm.

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

Title: Optical Planar Polymer Waveguides Realized on Printed Circuit Boards

Author: Jan Brychta

Department: Department of Microelectronics

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

Supervisor's email address: xprajzler@fel.cvut.cz

Abstract: The goal of the bachelor's thesis is design, fabrication and investigation of properties of optical waveguides that can be realized on printed circuit boards for data transmission between electro-optical modules. The first part of the thesis deals with the theoretical proposal for geometrical dimensions of ridge optical waveguides for flexible substrates with the use of EpoCore, EpoClad, LIGHTLINK™ XP-6701A Core and LIGHTLINK™ XH-100145 Clad polymer waveguide materials. The thesis also describes the process of designing a spiral waveguide optimised for given polymer materials. Furthermore, the thesis describes the fabrication of planar and ridge optical waveguides using the spin coating method and photolithography. Ultimately, the methods used for measurement are described and the obtained results are presented.

The fabricated flexible planar optical waveguides have an optical attenuation of less than 1 dB/cm at the wavelength of 632.8 nm. The sample of EpoCore/EpoClad waveguide had an optical loss of 0.41 dB/cm, the sample of LIGHTLINK™ XP-6701A Core and LIGHTLINK™ XH-100145 Clad had an optical loss of 0.39 dB/cm at the 850 nm wavelength.

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

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
a	Škálovací konstanta	
A	Útlum signálu	dB
α	Měrný útlum	dB·cm ⁻¹
β	Fázová konstanta	m ⁻¹
d	Průměr	m
E_{norm}	Normovací konstanta	V·m ⁻¹
E	Intenzita elektrického pole	V·m ⁻¹
E_y	Složka intenzity elektrického pole v ose z	V·m ⁻¹
E_{yc}	Intenzita el. pole ve svrchní krycí vrstvě	V·m ⁻¹
E_{yf}	Intenzita el. pole ve vlnovodném jádru	V·m ⁻¹
E_{ys}	Intenzita el. pole v mezivrstvě	V·m ⁻¹
h_c	Rozestup mezi jádry vlnovodu	m
h_{cmin}	Rozestup pro útlum na 1% signálu	m
h_{cmin+}	Rozestup pro útlum na 0,1% signálu	m
h_{cSIM}	Simulovaná hodnota rozestupu	m
hf	Výška vlnovodu	m
hs	Tloušťka mezivrstvy	m
K	Konstanta útlumu na ohybu	
k	Konstanta šíření	m ⁻¹
λ	Vlnová délka	m
LightClad	LIGHTLINK™ XH-100145 Clad	
LightCore	LIGHTLINK™ XP-6701A Core	
m	Počet TE vidů	
NA	Numerická apertura	
n_c	Index lomu krycí vrstvy	
n_{ef}	Efektivní index lomu	
n_f	Index lomu jádra vlnovodu	
n_s	Index lomu mezivrstvy/substrátu	
p	Počet TM vidů	
P_{in}	Vstupní výkon	W
P_{out}	Výstupní výkon	W
r	Poloměr	m
T	Útlum spirály	
TE	Transverzálně elektrický	
TM	Transverzálně magnetický	
u, v, w	Normované příčné konstanty	
w_f	Šířka vlnovodného jádra	m
x	Vzdálenost	m
x_{max}	Vzdálenost při maximální hodnotě E_{yf}	m

Obsah

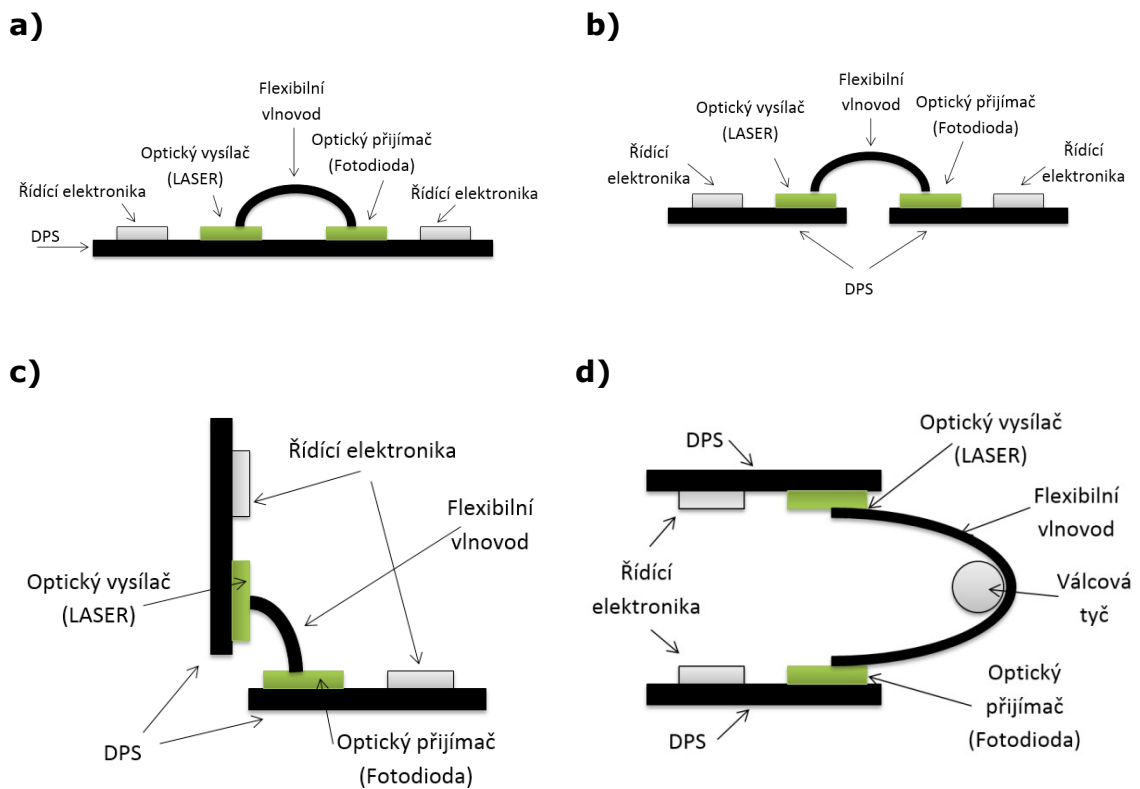
1	Úvod.....	2
2	Optické polymerní vlnovody.....	5
2.1	Návrh optického planárního vlnovodu.....	5
2.2	Návrh polymerního optického vlnovodu.....	10
2.3	Návrh Fermatovy spirály.....	16
3	Depoziční testy a výroba.....	23
3.1	Výroba planárního vlnovodu EpoCore/EpoClad.....	23
3.2	Výroba hřebenového vlnovodu EpoCore/EpoClad.....	25
3.3	Výroba planárního vlnovodu LightCore/LightClad.....	27
3.4	Výroba hřebenového vlnovodu LightCore/LightClad.....	28
4	Diagnostika.....	30
4.1	Optická kontrola vzorků.....	30
4.2	Měření transmisních spekter.....	33
4.3	Jednohnanolová vidová spektroskopie.....	35
4.4	Měření optického útlumu planárních vlnovodů.....	38
4.5	Měření optického útlumu hřebenových/kanálkových vlnovodů.....	40
5	Závěr.....	41
	Literatura.....	43
	Přílohy.....	i
a)	Zdrojové kódy.....	i
b)	Fotodokumentace.....	iv
c)	Technické výkresy navržených Fermatových spirál.....	ix
d)	Seznam příloh uložených na CD.....	xi

1 Úvod

S masovým rozvojem elektroniky roste i objem přenášených dat a požadavky na rychlost přenosu. Z toho důvodu se v současnosti hledají způsoby, jak klasická metalická vedení a elektronické obvody co možná nejvíce nahradit optickými systémy. Výrazně vyšší přenosová rychlost však není jedinou výhodou optických vlnodů. Díky tomu, že přenášejí světlo a ne elektrický proud, jsou imunní vůči vlivům elektromagnetických polí, se kterými má klasické metalické vedení velké problémy. Z toho důvodu jsou hojně využívány například v leteckém a vojenském průmyslu, tedy na místech, kde by zkreslení signálu vnějším rušením představovalo obrovský problém.

Nicméně i v civilním sektoru neustále roste poptávka po rychlejším přenosu informací. Stále se zvyšující nároky na objem přenášených dat způsobily, že přenos dat na střední a velké vzdálenosti je dnes už téměř výlučně prováděn pomocí optických vláken. Ze stejných důvodů začíná docházet i k nahrazování spojení pro přenos dat na velmi krátké vzdálenosti. Přestože pro propojování plošných spojů nebo komunikaci typu čip-čip, deska-deska a podobně jsou stále v drtivé většině případů používána metalická vedení, začíná v poslední době i zde docházet k jejich nahrazování optickými spoji. Díky stále se rozvíjejícím čipům začínají totiž metalická vedení být tím prvkem, který limituje rychlost soustavy, protože ze své fyzikální podstaty nemůžou efektivně přenášet signály o frekvenci větší než několik set MHz [1].

Tato práce se zabývá výrobou flexibilních polymerních planárních vlnodů určených právě k nahrazení metalického vedení jako spoje typu deska-deska nebo čip-čip. Velkou výhodou takovýchto vlnodů je jednak jednoduchá a poměrně levná výroba daná použitými materiály, ale také schopnost propojit libovolně orientované součástky, daná použitím flexibilních substrátů, jak lze vidět na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Příklad použití planárních flexibilních vlnovodů, a) spojení na DPS, b) spojení deska-deska, c) spojení deska-deska 90°, d) spojení deska-deska 180° [2].

Obecně, planární optické vlnovody jsou pasivní systémy používané pro distribuci optického signálu. Zatímco klasické vláknové vlnovody se využívají pro přenos na dlouhé vzdálenosti, planární vlnovody se používají zejména na přenos signálu na krátkou vzdálenost, řádově na jednotky centimetrů. Často se také používají pro realizaci různých složitějších struktur, které mají plnit nějakou konkrétní funkci. Využívají se pro konstrukci řady optických prvků, jako například optické rozbočnice, multiplexory nebo přepínače.

Přestože mají křemenné vlnovody velice dobré optické vlastnosti, hledají se jiné materiály s nízkým optickým útlumem a vhodným indexem lomu, zato levnější a s nižšími náklady na výrobu. Tato kritéria splňují různé polymerní materiály, které umožňují technologicky poměrně jednoduchou výrobu planárních struktur a zároveň dosahují nízkých útlumových hodnot. Další výhodou polymerních materiálů je možnost vytvářet vlnovody s rozdílnými útlumovými okny, které umožňují používání jiných vlnových délek než tzv. telekomunikační okna, tj. 830 nm, 1300 nm a 1550 nm. Díky tomu by se pro

přenos daly používat třeba vlnové délky ve viditelném spektru, což by umožňovalo snadnou detekci závad pouhým okem, případně by to snižovalo riziko poškození zraku při neodborné manipulaci.

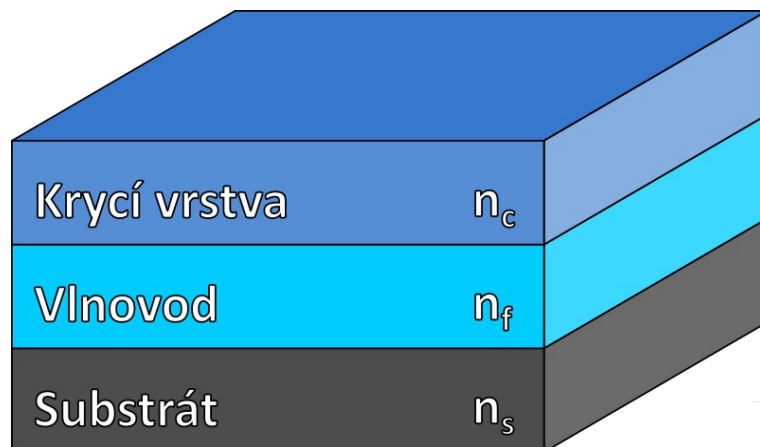
Mým cílem je teoretický návrh, výroba a posléze měření vlastností planárních vlnodů z různých polymerních materiálů realizovaných na flexibilních substrátech, které odpovídají materiálům používaným pro výrobu plošných spojů, jako například FR-4 a Pyralux. FR-4 je standardně pevný materiál tvořený skelnou tkaninou sycenou epoxidovou pryskyřicí, který se běžně používá v elektrotechnice, tvoří základ desky plošných spojů, já používám flexibilní FR-4 o tloušťce 0,1 mm. Pyralux je fólie o tloušťce 0,1 mm používaná při výrobě flexibilních tištěných spojů [3].

Jedná se nám o mnohavidové vlnovody, kompatibilní s mnohavidovými optickými vlnovody běžně používanými v páteřních sítích (50 μm jádro x 125 μm plášť). Cílem práce je návrh, realizace a měření vlastností optických polymerních mnohavidových vlnodů na flexibilních substrátech FR-4 a Pyralux. Na výrobu samotného vlnovodu byly použity komerčně dostupné polymerní materiály od firmy Micro Resist Technology GmbH EpoCore, EpoClad, LIGHTLINK™ XP-6701A Core (dále jen LightCore) a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad (dále jen LightClad). Všechny vzorky byly vyráběny metodou rotačního lití, optický útlum výsledných vyrobených planárních vlnodů byl měřen pomocí zařízení Metricon [4].

2 Optické polymerní vlnovody

2.1 Návrh optického planárního vlnovodu

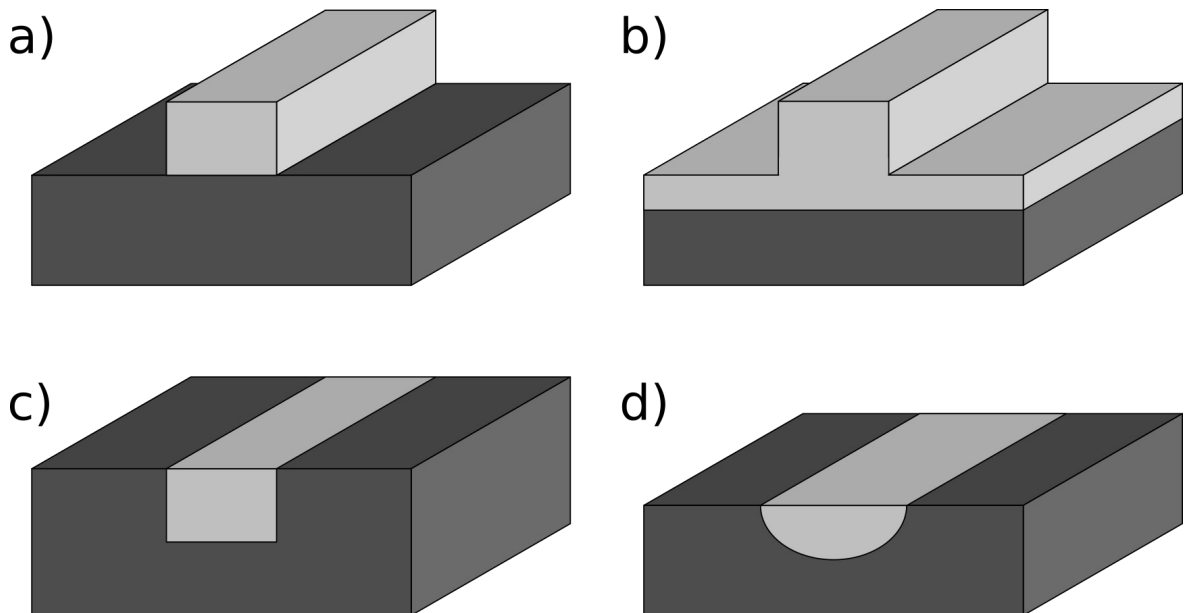
Planární optické vlnovody jsou optické struktury, které se vyznačují obdélníkovým tvarem jak průřezu jádra, tak i pláště. Na obrázku 2.1 je obecné schéma planárního vlnovodu. Bývá tvořen tak, že na planární destičku, substrát s indexem lomu n_s , je nanесena transparentní vlnovodná vrstva s indexem lomu n_f , neboli jádro, která může být na povrchu opatřena další krycí vrstvou dielektrika s indexem lomu n_c . Krycí vrstva má funkci buď ochrannou, nebo pomáhá dotvářet požadované optické vlastnosti struktury.



Obrázek 2.1: Obecné schéma planárního vlnovodu, kde n_c , n_f a n_s jsou indexy lomu krycí vrstvy, vlnovodu a substrátu.

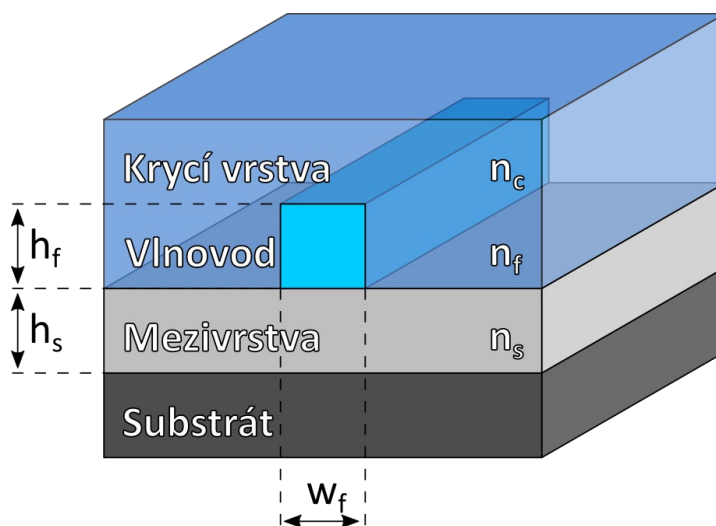
Důležitou vlastností vlnovodu je schopnost navázat a vést elektromagnetické vlnění nebo záření. Podstatou vlnovodného efektu je totální odraz vlny na obou rozhraních. Aby mohlo docházet k odrazu a vlna či paprsek se ve vrstvě šířil, musí být index lomu vlnovodné vrstvy vyšší než index lomu substrátu a krycí vrstvy, tj. $n_f > n_s$ a $n_f > n_c$ [9].

Takový jednoduchý planární vlnovod jako je na obrázku 2.1 ale nelze použít pro přenos signálu, jedná se o takzvaný 2D vlnovod, protože jeden z jeho příčných rozměrů není omezen co do velikosti. Proto je třeba navrhnout složitější strukturu schopnou vést vlnu v daném směru. Za tímto účelem je třeba navrhnout takzvaný 3D vlnovod, který vedenou vlnu omezuje v obou příčných rozměrech. Existuje celá řada 3D vlnovodů, základními typy jsou páskové a kanálkové vlnovody (viz obr. 2.2).



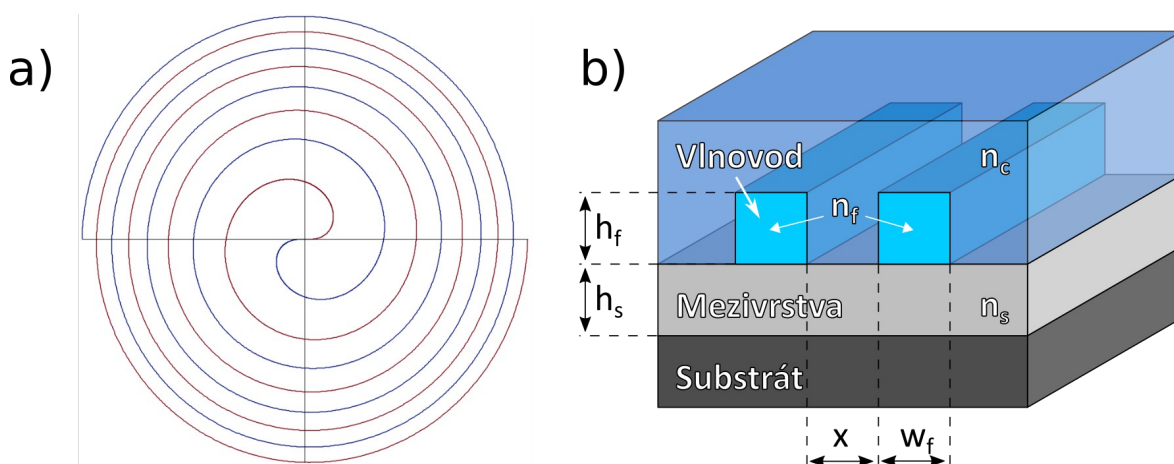
Obrázek 2.2: Základní typy 3d optických vlnovodů - a) páskový, b) žebrový, c) ponořený pásek, d) difuzní kanálek [1].

Já budu pro účely této práce používat páskové vlnovody, které jsou v našich podmínkách výrazně jednodušší na výrobu a přitom vykazují stejné optické vlastnosti jako kanálkové vlnovody. Na obrázku 2.3 je obecný návrh páskového vlnovodu s přidáním svrchní krycí vrstvy, h_f a w_f udávají výšku a šířku vlnovodného jádra, h_s je tloušťka mezivrstvy. Krycí vrstvu může v našem případě tvořit buď polymerní krycí materiál nebo vzduch.



Obrázek 2.3: Řez páskovým vlnovodem.

Cílem práce je návrh Fermatovy spirály (obr. 2.4a) tvořené optickým vlnovodem, vzhledem k tomu, že na vnější spirály se bude nacházet více vlnovodných jader v těsné vzdálenosti, budu pracovat se speciálním typem páskového vlnovodu, hřebenovým vlnovodem (obr. 2.4b). Na rozdíl od vlnovodu na obrázku 2.3 není hřebenový vlnovod tvořen jen jedním vlnovodným jádrem, jedná se o vlnovod, který obsahuje několik paralelně uspořádaných jader, která se mohou navzájem ovlivňovat, pokud jsou příliš blízko u sebe. Cílem práce je navrhnout takový hřebenový vlnovod, aby rozestupy mezi jednotlivými jádry byly co možná nejmenší, ale zároveň aby nedocházelo k pronikání evanescentní vlny z jednoho jádra do druhého. Vzhledem k tomu, že rozměr jádra vlnovodu máme ze zadání pevně daný, a to $50 \times 50 \mu\text{m}$, aby byl vlnovod kompatibilní s běžně užívanými multivodnými vlákny ($50 \times 125 \mu\text{m}$), potřebujeme určit v podstatě jen minimální rozstup mezi vlnovodnými vlákny.



Obrázek 2.4: a) Fermatova spirála [5], b) schéma hřebenového vlnovodu.

Potřebujeme nalézt takový rozestup mezi jádry vlnovodu, aby byl průnik signálu z jednoho jádra do druhého zcela zanedbatelný. Vzdálenost x jsem si definoval jako vzdálenost, ve které je hodnota normované elektrické intenzity menší než jedno procento. Abych tuto vzdálenost mohl spočítat, potřebuji nejdříve znát počet vidů šířících se vlnovodem. Vidové číslo se určí podle rovnic 1.1 pro vidy ve směru x , neboli TE vidy a 1.2 pro vidy ve směru y , neboli TM vidy [9].

$$m = \frac{2}{\pi} h_f \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left[\sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \quad (1.1)$$

$$p = \frac{2}{\pi} w_f \sqrt{n_f^2 - n_s^2} - \frac{2}{\pi} \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_s} \right)^2 \sqrt{\frac{n_f^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right] \quad (1.2)$$

kde h_f je tloušťka a w_f šířka vlnovodné vrstvy, m zaokrouhлено dolů na nejbližší celé číslo udává počet TE vidů a p obdobně zaokrouhlené udává počet vidů TM. V dalším kroku je třeba určit efektivní index lomu n_{ef} pro jednotlivé vidy, který je třeba k určení konstanty rychlosti šíření β . Ten lze popsat vztahem

$$k t_g \sqrt{n_f^2 - n_{ef}^2} - \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_s} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] - \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_c} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{n_{ef}^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_{ef}^2}} \right] = m \pi \quad (1.3)$$

kde k je vlnové číslo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\nu = 0$ pro vlny typu TE a $\nu = 1$ pro vlny typu TM.

Poté, co známe efektivní index lomu, musíme určit konstantu rychlosti šíření β a koeficienty u , v , w .

$$\begin{aligned} \beta &= n_{ef} k \\ u &= \sqrt{n_f^2 k^2 - \beta^2} \\ v &= \sqrt{\beta^2 - n_s^2 k^2} \\ w &= \sqrt{\beta^2 - n_c^2 k^2} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Nyní už zbývá jen vypočítané koeficienty dosadit do vlnových rovnic

$$E_{yc} = \frac{e^{-wx}}{E_{norm}} \quad (1.5)$$

$$E_{yf} = \frac{\cos(ux) - \frac{w}{u} \sin(ux)}{E_{norm}} \quad (1.6)$$

$$E_{ys} = \frac{\cos(uh_f) - \frac{w}{u} \sin(uh_f) e^{v(x+h_f)}}{E_{norm}} \quad (1.7)$$

kde rovnice 1.5 popisuje intenzitu elektrického pole ve vrchní krycí vrstvě ve vertikální vzdálenosti x od vlnovodné vrstvy, rovnice 1.6 popisuje chování napříč jádrem a rovnice 1.7 popisuje chování intenzity elektrického pole ve spodní krycí vrstvě. Vzhledem k tomu, že máme jádro čtvercového průřezu, můžeme se soustředit pouze na jednu osu (v našem případě vertikální – osu y) a předpokládat, že v druhé ose se bude intenzita chovat obdobně. Navíc vzhledem k tomu, že máme svrchní i spodní krycí vrstvu ze shodného materiálu, můžeme rovnici 1.7 zanedbat a pracovat pouze s rovnicemi 1.5 a 1.6. Zajímá nás, v jaké vzdálenosti x je velikost intenzity menší než 1% ($E_{yc} < 0,01$). Z toho důvodu jsou rovnice normovány pomocí konstanty E_{norm} , která odpovídá maximální intenzitě uvnitř vlnovodné vrstvy, neboli

$$E_{norm} = \cos(ux_{max}) - \frac{w}{u} \sin(ux_{max}) \quad (1.8)$$

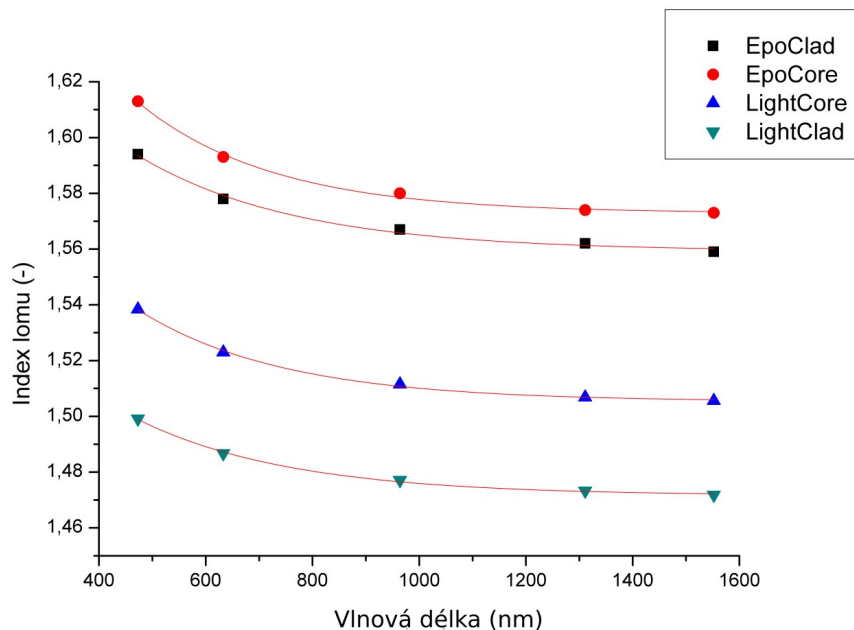
x_{max} určíme z první derivace E_{yf}

$$E'_{yf} = -u \sin(ux_{max}) - w \cos(ux_{max}) = 0 \quad (1.9)$$

Vzhledem k tomu, že navrhujeme mnohavidový vlnovod musíme v našich výpočtech zohlednit všechny vidy. Většina energie se sice přenáší nultým a prvním videm, ale zvláště u vlnovodů, které obsahují velké množství vidů se může takovýto teoretický výpočet značně lišit od reality, proto je lepší všechny výpočty ověřit počítačovou simulací.

2.2 Návrh polymerního optického vlnovodu

Na obrázku 2.5 jsou hodnoty indexů lomu polymerů, které jsem měl k dispozici, to jest komerčně dostupné polymery od firmy Micro Resist Technology GmbH, polymery EpoCore [6], EpoClad [7], LIGHTLINK™ XP-6701A Core (LightCore) a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad (LightClad) [8]. Tyto hodnoty indexů lomu byly naměřeny pomocí zařízení Metricon [4].



Obrázek 2.5: Závislost indexu lomu polymerů na vlnové délce.

Z grafu vyplývá, že materiál EpoCore má velmi vysoký index lomu, tím pádem bude vhodným vlnovodným materiálem, budu ho používat v kombinaci s materiálem EpoClad, který má nižší hodnotu indexu lomu než EpoCore, a proto může být použit jako mezivrstva. Materiál LightCore sice nemá tak vysoký index lomu jako EpoCore, ale i tak půjde využít jako vlnovodný materiál v kombinaci s polymerem LightClad, který má nižší index lomu a tak poslouží jako mezivrstva.

Pro výrobu planárního vlnovodu jsem měl k dispozici celkem dvě kombinace polymerů. První z nich byla kombinace polymerních materiálů EpoCore a EpoClad a druhou kombinace polymerních materiálů LightCore a LightClad. V tabulce 2.1 jsou hodnoty indexů lomu pro vybrané vlnové délky odečtené z obrázku 2.5, polymery jsou rozděleny podle toho jak byly používány na mezivrstvy a vlnovodné materiály. Vzhledem k tomu, že zařízení Metricon,

které bylo použito k určení hodnot indexů lomu, měří na vlnových délkách 473 nm, 632,8 nm, 964 nm, 1311 nm a 1552 nm, byly hodnoty pro vlnové délky 650 nm a 850 nm odvozeny z grafu na obrázku 2.5 proložení známých hodnot exponenciálou.

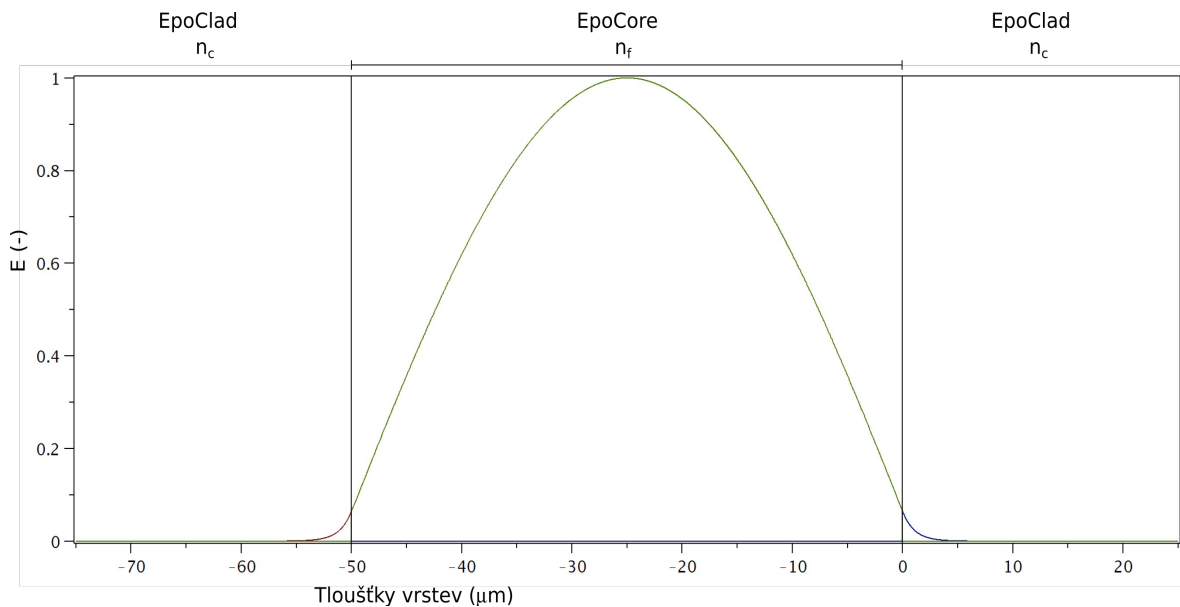
Tabulka 2.1: Hodnoty indexu lomu odečtené z obr. 1.4.

Vlnová délka (nm)	Index lomu (-)			
	Mezivrstvy		Vlnovodné materiály	
	LightClad	EpoClad	LightCore	EpoCore
632,8	1,4867	1,5780	1,5230	1,5930
650	1,4863	1,5781	1,5225	1,5926
850	1,4789	1,5689	1,5133	1,5818
1310	1,4733	1,5620	1,5068	1,5740
1550	1,4718	1,5590	1,5056	1,5730

Pro další výpočty jsem používal program Maple 18.00, simulace byly prováděny pomocí programu BeamPROP. Návrh vlnovodu byl realizován s ohledem na pět různých vlnových délek a to pro klasická telekomunikační okna 850 nm, 1310 nm a 1550 nm a pak pro vlnové délky 633 nm a 650 nm.

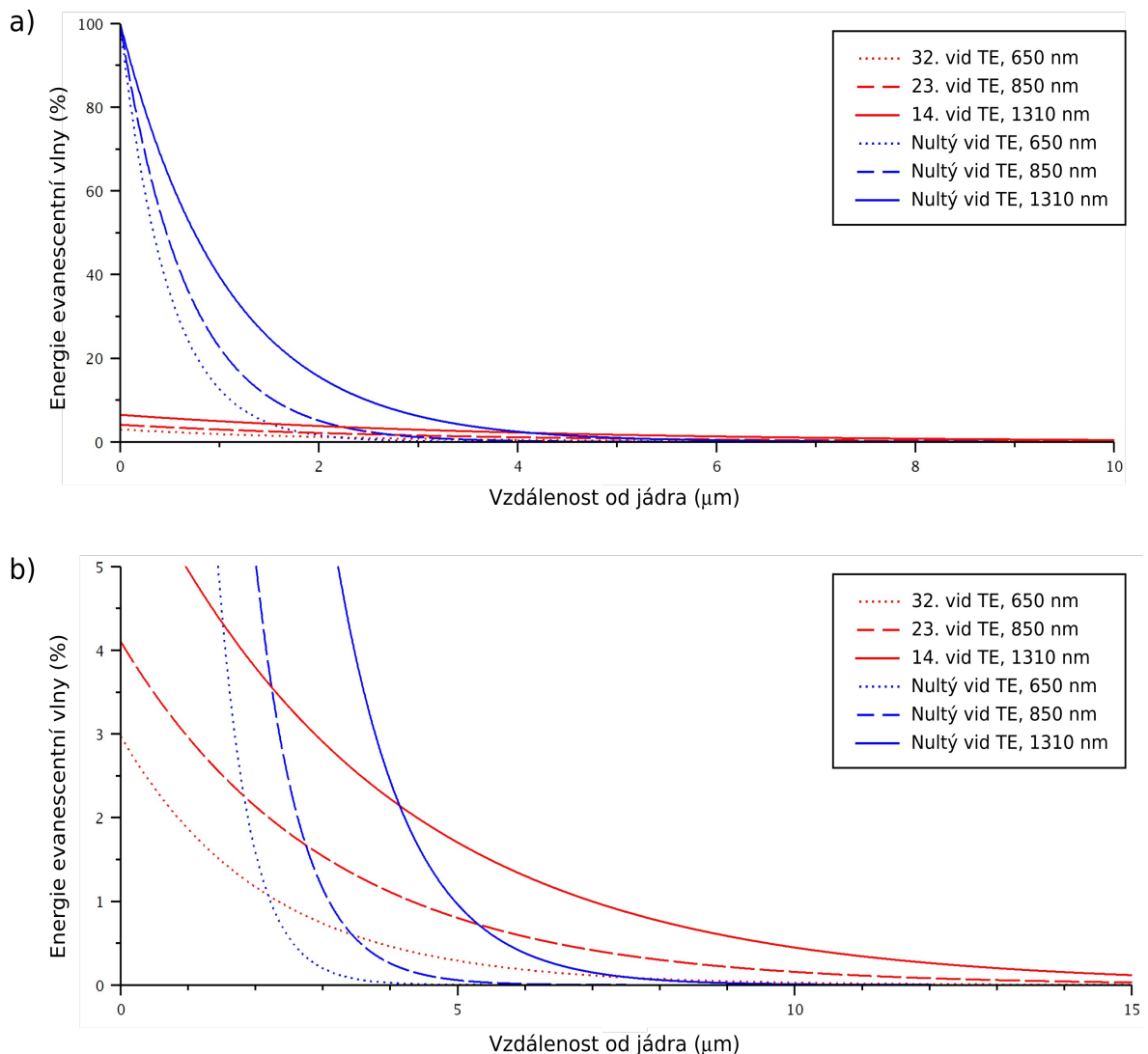
Abych mohl stanovit přibližný minimální rozestup mezi jednotlivými jádry hřebenového vlnovodu takový, při kterém bude pronikání evanescentní vlny do sousedních jader zanedbatelné, dosadil jsem hodnoty indexů lomu z tabulky 2.1 do rovnic a pomocí programu Maple 18.0 jsem spočetl hodnotu rozestupu h_c pro klasická telekomunikační vlnové délky 850 nm, 1310 nm a 1550 nm a pak pro vlnové délky 633 nm a 650 nm. Vzdálenost h_c je za ideálních podmínek vzdáleností, ve které je energie evanescentní vlny E_y rovná nule, ale vzhledem k tomu, že E_y se vzdáleností klesá exponenciálně a tudíž úplně nulové hodnoty dosahuje až s nekonečnou vzdáleností, musel jsem si stanovit nějakou dolní mez, pod kterou budu považovat vliv E_y za zanedbatelný. Proto jsem si minimální vzdálenost h_{cMIN} definoval jako vzdálenost od stěny vlnovodného jádra, ve které klesne energie evanescentní vlny pod jedno procento, $E_y < 1\%$. Pro jistotu jsem ještě spočítal hodnoty h_{cMIN+} neboli vzdálenost, ve které klesne hodnoty E_y pod 0,1% maximální hodnoty. Abych si ověřil správnost výpočtů, provedl jsem ještě simulaci chování těchto vlnovodů pomocí programu BeamPROP. Na základě této simulace jsem stanovil minimální hodnoty rozestupů h_{cSIM} , při kterých v simulaci přestalo docházet k pronikání signálu do sousedních jader prostřednictvím evanescentní vlny.

Na obrázku 2.6 je uvedeno rozložení energie nultého TE vidu napříč vlnovodem. Tento graf operuje s normovanou hodnotou energie, kde hodnota $E=1$ odpovídá maximální intenzitě signálu, hodnota například $E=0,01$ odpovídá jednomu procentu z maximální hodnoty. Naprostá většina energie je koncentrována uvnitř jádra vlnovodu, nicméně je zde po obou stranách rozhraní jádra a mezivrstvy dobře vidět evanescentní vlna. V případě nultého vidu je amplituda evanescentní vlny zpravidla zanedbatelná.



Obrázek 2.6: Distribuce intenzity signálu napříč vlnovodem pro EpoClad/EpoCore při vlnové délce 1310 nm – nultý vid TE.

Abych si ověřil svoje tvrzení, že vliv evanescentní vlny nultého vidu bude opravdu zanedbatelný, porovnal jsem intenzity elektrických energií nultého vidu a vidu s nejvyšším vidovým číslem přítomným ve vlnovodu. Na obrázku 2.7a a 2.7b je graf obsahující vždy tři páry křivek. Tyto páry znázorňují poměr intenzity energií evanescentních vln nultého vidu TE a vidu TE s nejvyšším vidovým číslem přítomným ve vlnovodu tvořeného polymerními materiály EpoCore a EpoClad pro tři různé vlnové délky, a to 650 nm, 850 nm a 1310 nm. Na ose x je vzdálenost od jádra vlnovodu, osa y udává normovanou maximální hodnotu energie evanescentní vlny nultého vidu TE.

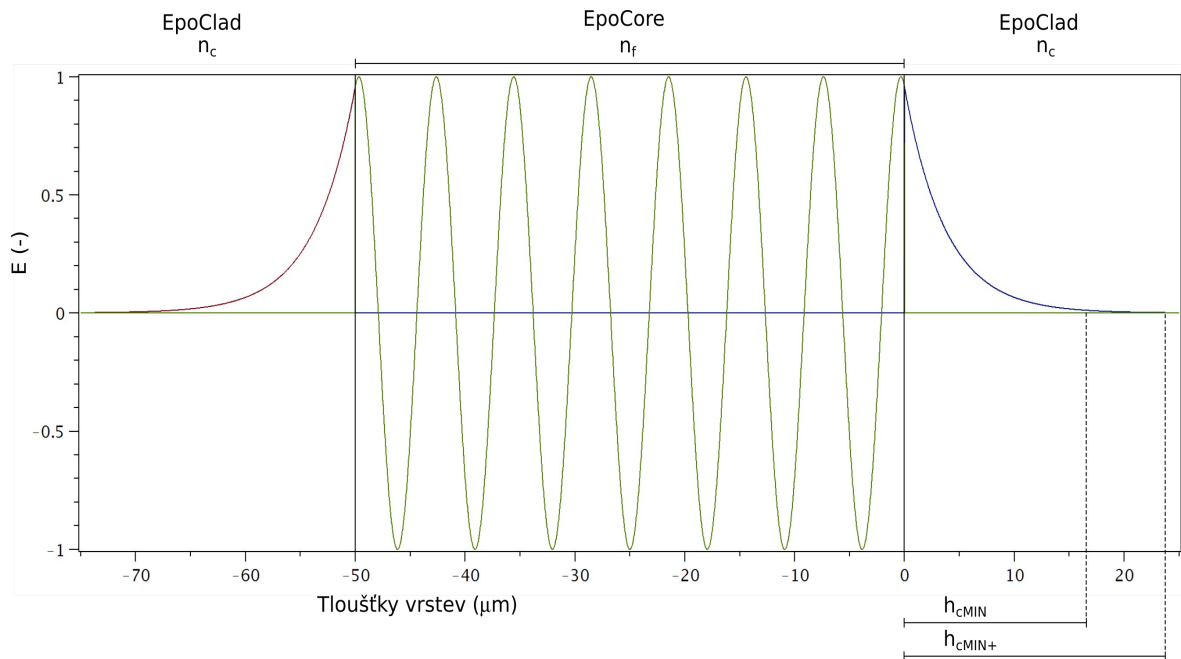


Obrázek 2.7: a) Poměr intenzity elektrické energie vidu TE s nejvyšším vidovým číslem vůči intenzitě elektrické energie nultého TE vidu struktury EpoCore/EpoClad pro vlnové délky 650 nm, 850 nm a 1310 nm, b) detail oblasti, kde intenzita elektrické energie vidu TE s nejvyšším vidovým číslem začíná převažovat.

Jak lze vidět na grafu na obrázku 2.7a, s rostoucí vlnovou délkou proniká evanescentní vlna hlouběji do mezivrstvy. Energie evanescentní vlny vidu s nejvyšším vidovým číslem, přítomným ve vlnovodu, je v těsné blízkosti jádra vlnovodu zanedbatelná v porovnání s energií evanescentní vlny nultého vidu, její maximální hodnota energie odpovídá jen přibližně 1,7% maximální hodnoty energie evanescentní vlny nultého vidu. Na obrázku 2.7b je stejný graf s upraveným měřítkem. Jak je na tomto grafu vidět, evanescentní vlna nultého vidu ztrácí energii výrazně rychleji a ve vzdálenosti od jádra větší než přibližně 5 μm pro vlnové délky 650 nm a 850 nm a vzdálenosti 8 μm pro vlnovou délku 1310 nm už lze její vliv považovat za zanedbatelný. Pro ostatní mnou používané vlnové délky a polymerní materiály vychází graf obdobně,

energie vidu s nejvyšším vidovým číslem vždy začíná převažovat ve vzdálenosti od jádra řádově v jednotkách mikrometrů. Proto můžu říci, že pokud budu pracovat s rozestupy mezi jádry vlnovodu řádově alespoň v desítkách mikrometrů, můžu vliv evanescentní vlny nultého vidu zanedbat.

V případě vidů s vyšším vidovým číslem může evanescentní vlna pronikat poměrně hluboko do mezivrstvy, jak lze vidět na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Ukázka distribuce energie čtrnáctého TE vidu napříč vlnovodem pro EpoClad/EpoCore při vlnové délce 1310 nm.

Právě v těchto případech hrozí, že vlna v hřebenovém vlnovodu pronikne až do sousedního jádra, kde se naváže a zkreslí výsledný signál. Na obrázku 2.8 jsou také znázorněny vzdálenosti h_{cMIN} , respektive h_{cMIN+} , ve kterých můžeme považovat amplitudu evanescentní vlny za zanedbatelnou.

V tabulkách 1.2 a 1.3 jsou hodnoty pro jednotlivé kombinace krycích a vlnovodných materiálů vypočítané na základě údajů z tabulky 1.1. V těchto tabulkách lze nalézt vlnovou délku λ , počet vidů TE, v našem případě vždy shodný s počtem vidů TM, ve třetím sloupci vzdálenost h_{cMIN} ve které klesá intenzita signálu na 1%, ve čtvrtém vzdálenost h_{cMIN+} ve které klesá intenzita na 0,1% a v posledním sloupci kontrolní hodnoty h_{cSIM} určené ze simulace pomocí programu BeamPROP, při kterých dochází k zanedbatelným ztrátám signálu, neboli minimální odstup jednotlivých vlnovodů hřebenového vlnovodu, aby nedocházelo k navazování signálu ze sousedních vláken [10].

Tabulka 2.2: Vypočtené a odsimulované hodnoty pro kombinaci EpoCore/EpoClad (viz obr. 2.8).

λ (nm)	TE=TM	h_{cMIN} (μm)	h_{cMIN+} (μm)	h_{cSIM} (μm)
633	34	14,7	22,0	15,0
650	32	9,8	14,8	17,0
850	23	14,0	21,1	13,0
1310	14	17,1	25,7	18,0
1552	13	23,5	35,0	24,0

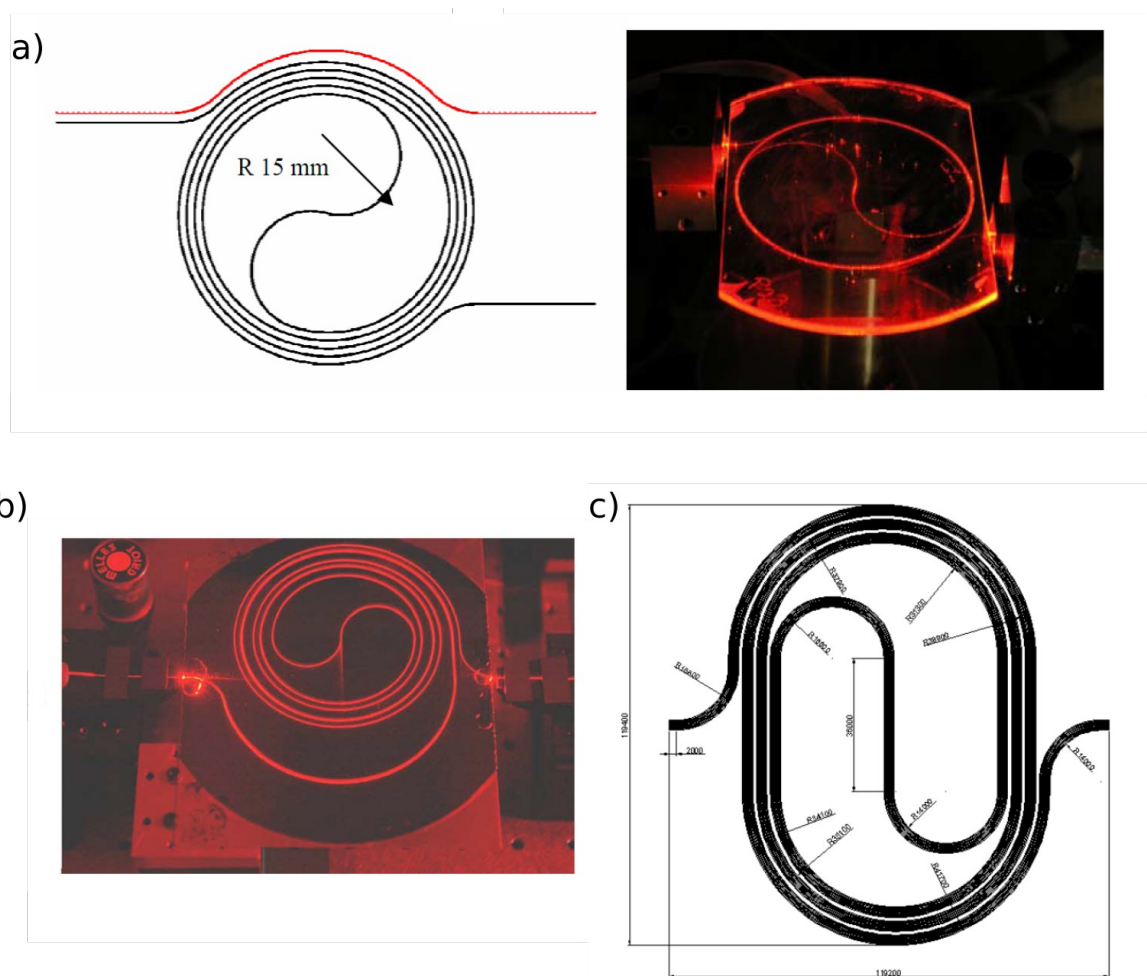
Tabulka 2.3: Vypočtené a odsimulované hodnoty pro kombinaci LightCore/LightClad.

λ (nm)	TE=TM	h_{cMIN} (μm)	h_{cMIN+} (μm)	h_{cSIM} (μm)
633	52	17,6	26,4	12,0
650	51	8,9	13,4	21,0
850	38	11,1	16,4	22,0
1310	23	13,7	20,5	28,0
1552	20	19,4	29,2	20,0

Hodnoty h_c v tabulkách 2.2 a 2.3 byly odvozeny od hodnot pro vid s nejvyšším vidovým číslem, jelikož přestože vidy s nízkým číslem nesou podstatně více energie, v širokých mnohavidových vlnovodech se téměř nepodílejí na úniku energie oproti vidům s vysokým číslem, které sice nesou energie málo, ale zato jí značné procento proniká do pláště. To je také jedním z důvodů, proč se u kombinací s velice vysokým vidovým číslem ($TE/TM > 100$) předpokládané hodnoty značně odlišují od těch simulovaných na počítači. Pro nižší vidová čísla je však patrné, že simulované hodnoty h_{cSIM} přibližně odpovídají vypočteným hodnotám h_{cMIN} . Obecně můžeme říct, že minimální rozestup mezi jednotlivými vlnovodnými pásy optického hřebenového vlnovodu se v našem případě pohybuje v řádu desítek mikrometrů, a to přibližně v rozmezí 20 až 30 μm .

2.3 Návrh Fermatovy spirály

Spirálovitá struktura vlnovodu se používá pro měření vlastností vlnovodu na delších úsecích v řádu desítek až stovek centimetrů, které by bylo jinak problematické za laboratorních podmínek vyrobit. Na obrázku 2.9 jsou příklady vlnovodných spirál prezentovaných v zahraniční literatuře [12,13,14].



Obrázek 2.9: Spirály prezentované v zahraniční literatuře, a) spirála vyrobená týmem z Nizozemské University of Twente [12], b) spirála vyrobená týmem z University of Cambridge [13], c) spirála týmu z University of Texas [14].

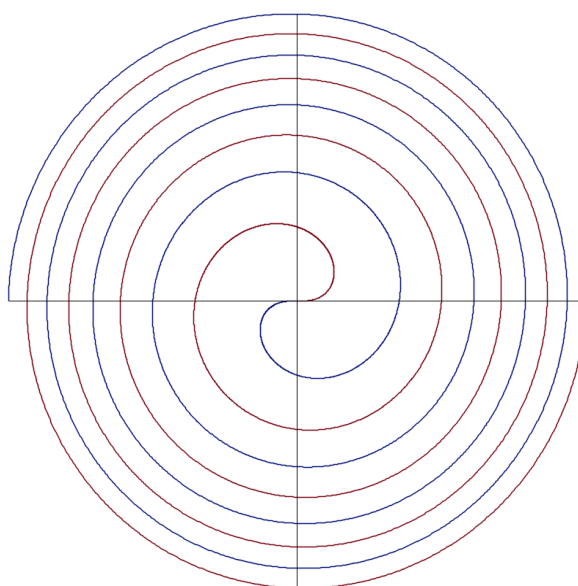
Na obrázku 2.9a je spirála týmu z University of Twente s poloměrem vnitřních půlkružnic 15 mm vyrobená z polymerních materiálů CHEP použitého jako mezivrstva a směsi epoxidových polymerů CHEP a DGEBA v poměru 4:1 pro jádro vlnovodu na substrátu FR-4 a dlouhá 103,6 cm, na obrázku 2.9b je spirála týmu z univerzity v Cambridge dlouhá 1,4 metru a vyrobená

z polymerních materiálů od firmy Dow Corning [15] OE-4140 pro jádro vlnovodu a OE-4141 použitého jako mezivrstva na křemíkovém substrátu, na obrázku 1.8c je spirála týmu University of Texas v Austinu dlouhá 109 cm s 250 mikrometrů velkými rozestupy mezi jednotlivými závity spirály, vyrobená z polymerních materiálů od firmy Zen Photonics [16] ZPU12-460 použitého pro jádro vlnovodu a ZPU12-450 pro mezivrstvu na flexibilním polymerním substrátu Topas. Všechny zmíněné týmy dosáhly zanedbatelných hodnot útlumu na centimetr, neboli hodnoty útlumu způsobeného ohybem byly řádově nižší než hodnoty optického útlumu vlnovodu.

Vzhledem k tomu, že mnou navrhované vlnovody jsou zamýšleny pro přenosy signálu mezi čipy nebo deskami, neboli pro přenosy na vzdálenosti v řádu jednotek až desítek centimetrů, je mým cílem vyrobit vlnovod obdobných rozměrů, aby bylo možno ověřit, zda je flexibilní polymerní vlnovod schopen vést signál na takovéto vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici litograf schopný osvětlovat pouze kulaté substráty s maximálním průměrem 5 cm nebo 10 cm, bude pro nás výhodnější vyrobit stočený vlnovod, abychom byli schopni na relativně malé ploše substrátu, kterou máme k dispozici, dosáhnout co největší délky vlnovodu. Nejvhodnějším tvarem pro návrh takového svinutého vlnovodu je Fermatova spirála (obr. 2.10), taktéž známá jako parabolická spirála, definována rovnicí 1.10 v polárních souřadnicích [5].

$$r = \pm a \theta^2 \quad (1.10)$$

Kde r je vzdálenost od středu spirály, θ je úhel a a je škálovací konstanta. Její velkou výhodou je, že se oba konce spirály nacházejí na okraji, takže se dají pro účely měření snadno připojit k měřicí soustavě.



Obrázek 2.10: Fermatova spirála.

Tento tvar spirály však není pro naše potřeby úplně vhodný, protože ztráty optického signálu na ohybu jsou nepřímo úměrné poloměru daného ohybu, proto je potřeba rovnici spirály upravit tak, abychom dosáhli co největšího poloměru středového ohybu a zároveň co největší hustoty vlnovodů na okrajích.

Pro moje účely by byla ideální spirála, jejíž vnitřní ohyby by měly charakter půlkružnice. Takovýto tvar by mi zaručil, že signál bude vždy putovat po nejširším možném oblouku. Rozestup mezi jednotlivými závity spirály chci v ideálním případě konstantní, což mi zaručí dobrý přehled o vzdálenosti mezi vlnovodnými jádry ve všech úsecích spirály. Pokud si tento rozestup stanovím dostatečně veliký, přenosové vlastnosti jednotlivých vlnovodných jader by neměly být ovlivněny sousedními vlnovodnými jádry. Vzhledem k tomu, že bohužel neexistuje žádná jednoduchá matematická funkce popisující takovouto spirálu, budu muset pracovat s mnou navrženou složenou funkcí vyjádřenou rovnicí 1.11.

$$f(\theta) = \begin{cases} \pm d \sin(\theta) & \text{pro } \theta < \frac{\pi}{2} \\ \pm a \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) + d & \text{pro } \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1.11)$$

kde d je průměr vnitřních půlkružnic, θ je úhel a a je škálovací konstanta ovlivňující velikost rozestupu mezi jádry vlnovodu.

Tato spirála však stále není bez chyby. Pokud se podíváme na obrázek 2.11, na kterém je graf derivace této složené funkce, zjistíme, že derivace, popsaná rovnicí 1.12 nemá okolo hodnoty $\theta = \frac{\pi}{2}$ spojitý průběh. To znamená, že se na spirále v tomto místě objeví hrbol, který bude negativně ovlivňovat přenosové vlastnosti optického vlnovodu.

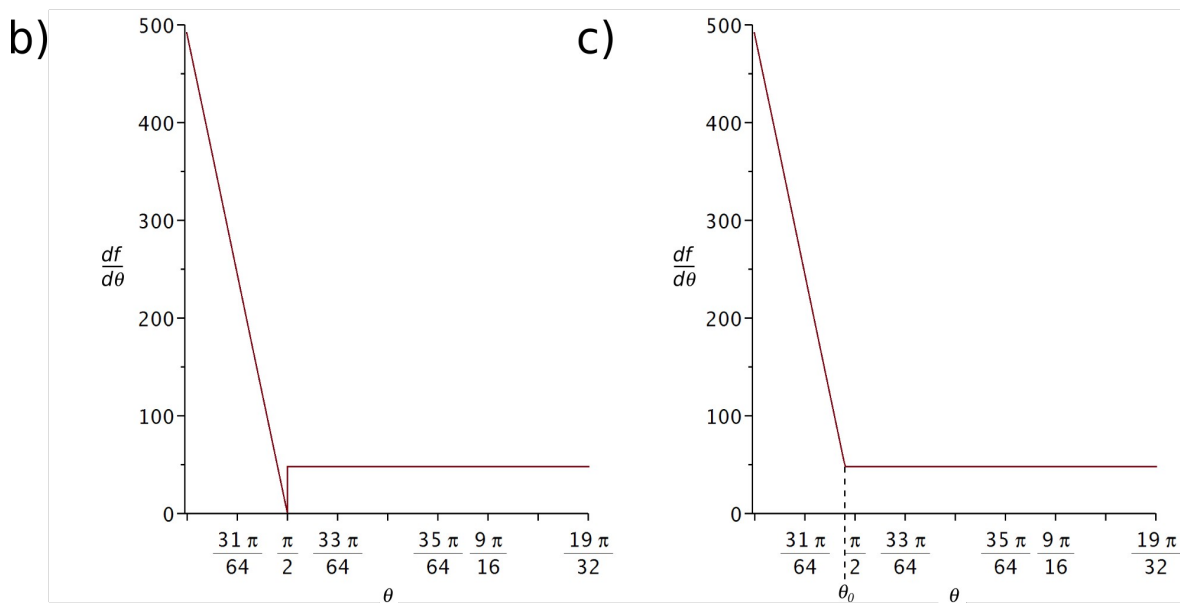
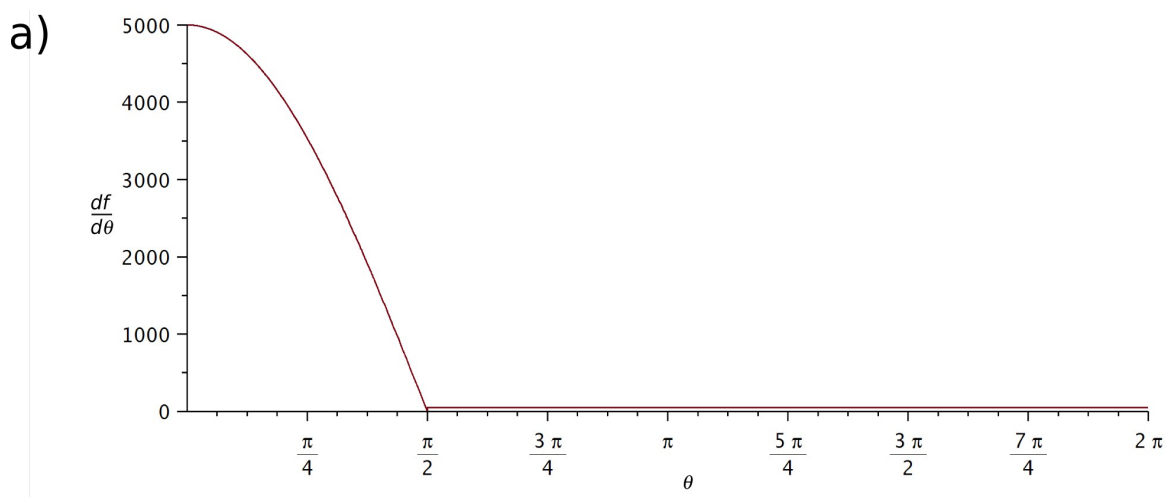
$$\frac{df}{d\theta} = \begin{cases} d \cos(\theta) & \text{pro } \theta < \frac{\pi}{2} \\ a & \text{pro } \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1.12)$$

Abych se tohoto problému zbavil, potřeboval jsem najít řešení rovnice 1.13,

$$d \cos(\theta_0) - a = 0 \quad (1.13)$$

neboli nalézt takový bod θ_0 v okolí hodnoty $\theta = \frac{\pi}{2}$, pro který platí, že se derivace první a druhé části složené funkce rovnají, neboli derivace bude

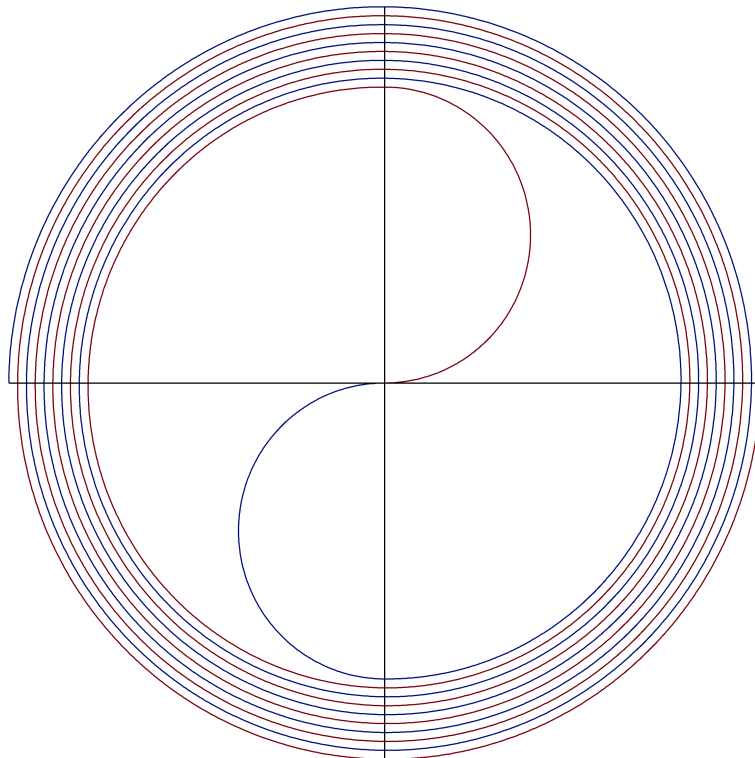
spojitá na celém intervalu. Rovnice 1.14 popisuje opravenou rovnici spirály.



Obrázek 2.11: a) graf derivace rovnice spirály, b) detail okolí bodu $\theta = \frac{\pi}{2}$, c) detail po korekci.

$$f(\theta) = \begin{cases} \pm d \sin(\theta) & \text{pro } \theta < \frac{\pi}{2} - \theta_0 \\ \pm a \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) + d & \text{pro } \theta \geq \frac{\pi}{2} - \theta_0 \end{cases} \quad (1.14)$$

Grafická reprezentace této rovnice v polárních souřadnicích je uvedena na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Upravená spirála.

Nyní, když už mám obecně definovaný tvar spirály, musím ještě odvodit potřebné rozměry spirály a dosadit patřičné hodnoty do rovnice. Proto si ještě potřebuji stanovit požadovaný poloměr vnitřních půlkružnic a rozestupy mezi jednotlivými závity spirály. Výpočet ztrát na ohybu mnohavidových vlnovodů je výrazně složitější než v případě užších, jednovidových vlnovodů, protože kvůli vysokému počtu vidů a potřebných rozměrech ohybu v řádech jednotek až desítek milimetrů, nikoliv mikrometrů, jak je obvyklé u jednovidových vlnovodů, značně roste předpokládaná doba a náročnost simulace.

Z toho důvodu jsem se zaměřil na přibližný výpočet pomocí rovnice pro výpočet útlumu na čtvrtkružnici odvozené na základě paprskové optiky [11]:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{1}{2}K - \frac{1}{6}K^2 - \frac{1}{8}K^3 - \frac{1}{8}K^4 + O(K^5) \quad (1.15)$$

kde T je poměr výkonu P_{out} přeneseného vlnovodem a výkonu na vstupu P_{in} , a konstanta K je definována rovnicí 1.16.

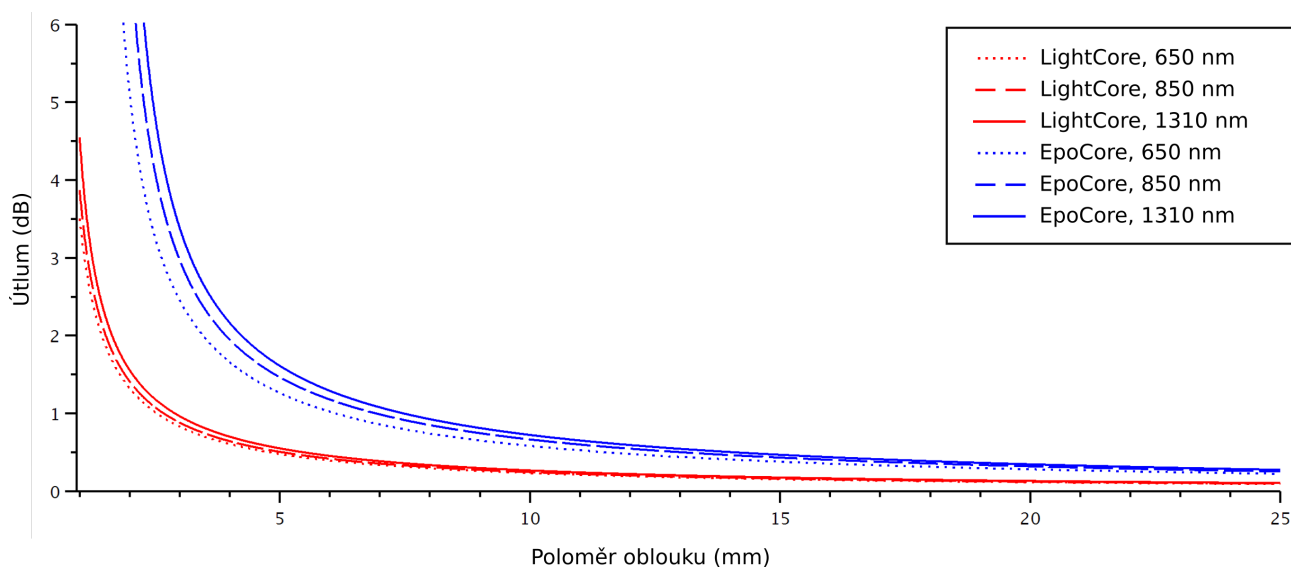
$$K = \frac{w_f}{NA^2 r} \quad (1.16)$$

kde w_f je šířka jádra vlnovodu, r je poloměr oblouku a NA je numerická apertura použitých materiálů vypočtená podle rovnice 1.17.

$$NA = \sqrt{n_f^2 - n_c^2} \quad (1.17)$$

kde n_f je index lomu vlnovodné vrstvy a n_c je index lomu mezivrstvy.

Na obrázku 2.13 je graf znázorňující předpokládaný útlum na čtvrtině kružnice o poloměru r pro mnou používané kombinace polymerních materiálů, neboli vlnovodný materiál EpoCore s mezivrstvou EpoClad a vlnovodný materiál LightCore s mezivrstvou LightClad s rozměry vlnovodného jádra $50 \times 50 \mu\text{m}$. Jak lze na grafu vidět, útlum na ohybu se pro různé vlnové délky liší jen nepatrně – λ se v rovnicích 1.15, 1.16 ani 1.17 neobjevuje, ovlivňuje pouze indexy lomu materiálů, ale výsledný vliv je pro moje účely zanedbatelný.



Obrázek 2.13: Graf ztrát na ohybu v závislosti na poloměru oblouku pro polymerní materiály EpoCore/EpoClad a LightCore/LightClad pro vlnové délky 650 nm, 850 nm a 1310 nm.

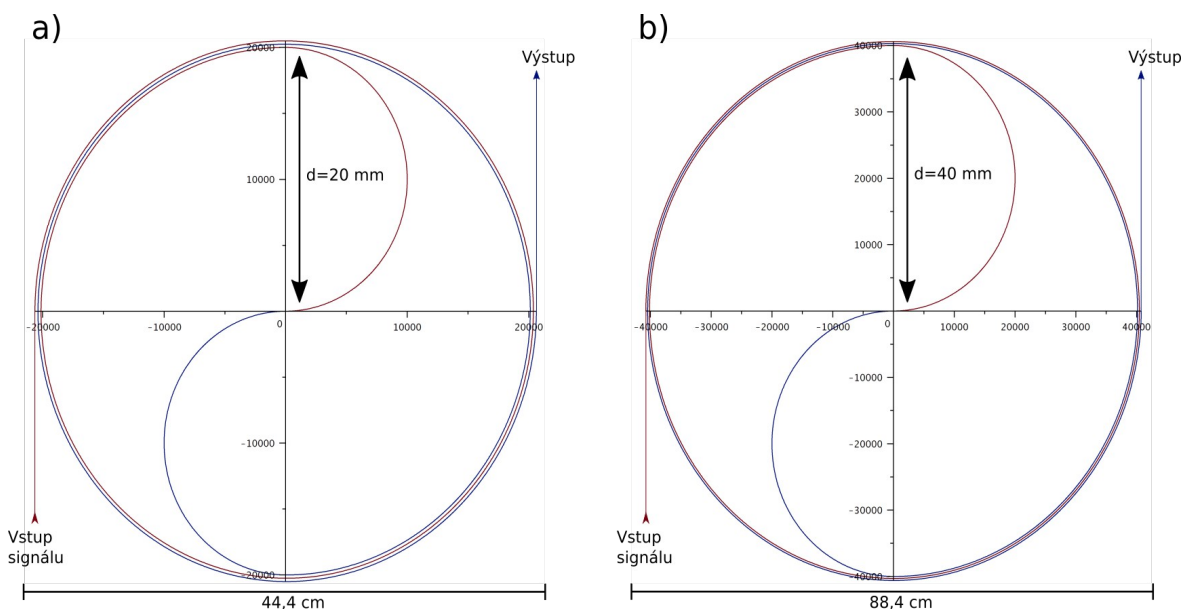
Z grafu vyplývá, že kombinace polymerních materiálů LightCore/LightClad má nižší hodnoty útlumu na ohybu a že velikost útlumu strmě roste pro poloměr ohybu menší než pět milimetrů a pro poloměr větší než 10 mm mají oba materiály velikost útlumu menší než jeden decibel. Obecně se dá z grafu vyčíst, že čím větší poloměr oblouku použijí, tím menší útlum bude mít výsledný vlnovod. Také platí, že kontrast indexů lomu je nepřímo úměrný

velikosti ztrát na oblouku s daným poloměrem, neboli čím větší je rozdíl mezi indexy lomu materiálů tvořících jádro a mezivrstvy, tím menší oblouk můžu zkonstruovat, aniž by docházelo k útlumu výrazně ovlivňujícího kvalitu přenášeného optického signálu.

Co se týče rozestupů mezi závity spirály, vycházel jsem z mnou vypočtených minimálních rozestupů hřebenového vlnovodu, které mi vycházely v řádu desítek mikrometrů. Protože pracuji se zahnutým vlnovodem, rozhodl jsem se použít hodnoty rozestupů o řád vyšší. Vzhledem k tomu, že navrhuji spirály s poloměry řádově v centimetrech, použití takovýchto větších rozestupů by nemělo mít výraznější vliv na poloměr spirály ani délku výsledného vlnovodu.

Na obrázku 2.14a je spirála určená pro menší substrát s poloměrem 5 cm. Tato spirála má celkový průměr 41 mm, průměr vnitřní půlkružnice 20 mm a rozestup mezi jednotlivými závity je 200 μm . Tato spirála má celkem 3 závity a celková délka takto svinutého vlnovodu je přibližně 44,4 cm.

Na obrázku 2.14b je spirála pro větší substrát s poloměrem 10 cm. Vzhledem k tomu, že délka tohoto vlnovodu bude o poznání větší než v případě menšího substrátu, volil jsem u této spirály větší poloměr vnitřních půlkružnic a větší rozestup mezi závity, abych dosáhl co nejlepších útlumových vlastností. Výsledný poloměr této spirály je 81 mm, poloměr vnitřních půlkružnic je 40 mm a rozestup mezi závity je přibližně 250 μm . Tato spirála má taktéž 3 závity a celková délka vlnovodu je přibližně 88,4 cm.



Obrázek 2.14: a) spirála pro substrát o průměru 5 cm, b) spirála pro substrát o průměru 10 cm.

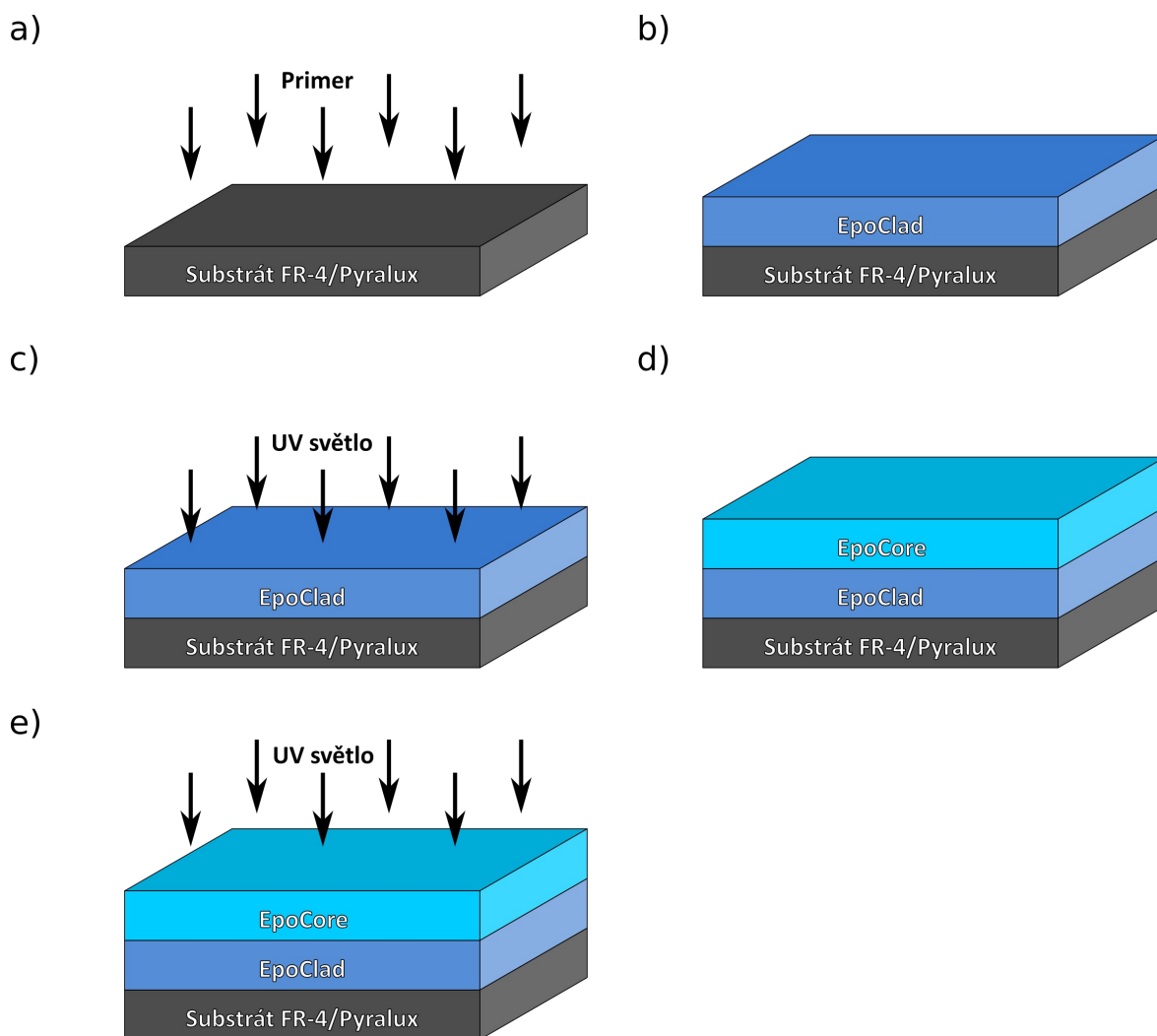
Pokud rozměry těchto spirál dosadíme do rovnice pro výpočet útlumu na ohybu, můžeme spočítat přibližný útlum způsobený ohybem na celé délce vlnovodu. Hodnotu tohoto útlumu jsem určil pro vlnovou délku 850 nm 3,5 dB pro polymerní materiály EpoCore/EpoClad na substrátu o poloměru 5 cm, což odpovídá přibližně 0,042 dB na 1 centimetr vlnovodu, 1,7 dB neboli $0,038 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro tytéž materiály na 10 cm substrátu, 1,23 dB neboli $0,014 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro materiály LightCore/LightClad na 5 cm substrátu a 0,61 dB neboli $0,014 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro LightCore/LightClad na 10 cm substrátu. Podobně jako v zahraniční literatuře, i mě vyšly hodnoty útlumu způsobeného ohybem o řád nižší než hodnoty optického útlumu materiálu, jak lze vidět v kapitole 4.4, kde jsou tyto hodnoty útlumu změřeny. Takovéto hodnoty útlumu jsou dostatečně nízké na to, aby ve spirále přenášený signál zcela nezanikl a tím pádem by tyto spirály mělo být možno realizovat a experimentálně tyto hodnoty útlumu ověřit. Technické výkresy navržených spirál jsou v příloze c).

3 Depoziční testy a výroba

Vzorky byly realizovány na substrátech z FR-4 nebo z Pyraluxu [3]. Vzhledem k tomu, že jsme používali flexibilní Fr-4 a Pyralux, bylo je třeba pomocí oboustranné lepicí pásky upevnit na křemíkové podložky, aby se při výrobním procesu nedeformovaly. Pro výrobu vlnovodů byly použity materiály EpoCore [6], EpoClad [7], LIGHTLINK™ XP 6701A Core a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad [8].

3.1 Výroba planárního vlnovodu EpoCore/EpoClad

Všechny křemíkové destičky byly před samotnou výrobou nastíněnou na obrázku 3.1 vyčištěny pomocí acetonu a deionizované vody, poté na ně byly připevněny substráty buď FR-4 nebo Pyralux, které byly taktéž obdobně vyčištěny. Na ty byl následně metodou rotačního lití nanesen primer (obr. 3.1a), aby se zajistila lepší přilnavost dolní krycí vrstvy. Poté byl na substrát nanesena přechodová mezivrstva EpoClad v tekutém stavu metodou rotačního lití (obr. 3.1b). Odstředivá síla generovaná v našem případě 1500 otáčkami za minutu a působící po 10 minut zaručí, že dojde k rovnoměrnému rozprostření dolní krycí vrstvy po celé ploše substrátu.



Obrázek 3.1: Výrobní proces pro planární vlnovody EpoCore/EpoClad – a) nanášení primeru, b) nanesení vrstvy EpoClad, c) vytvrzení UV zářením, d) nanesení vrstvy EpoCore, e) vytvrzení vrstvy EpoCore UV zářením.

V dalším kroku bylo třeba EpoClad vytvrdit. Toho bylo dosaženo postupným zahříváním při teplotě rostoucí z 50°C až na 90°C (10°C/min), vystavením UV záření po dobu 2 minut (obr. 3.1c) a opětovným zahříváním ve stejném teplotním rozmezí. Dále byla rotačním litím za stejných podmínek nanesena vlnovodná vrstva EpoCore (obr. 3.1d), která byla následně částečně vytvrzena zahříváním při teplotách od 50 do 85°C s krokem 10°C/min. Po zchlazení byl vzorek po dobu 2 minut vystaven UV záření (obr. 3.1e) a nakonec následovalo dotvrzování při teplotě rostoucí od 50°C do 90°C s krokem 10°C/min.

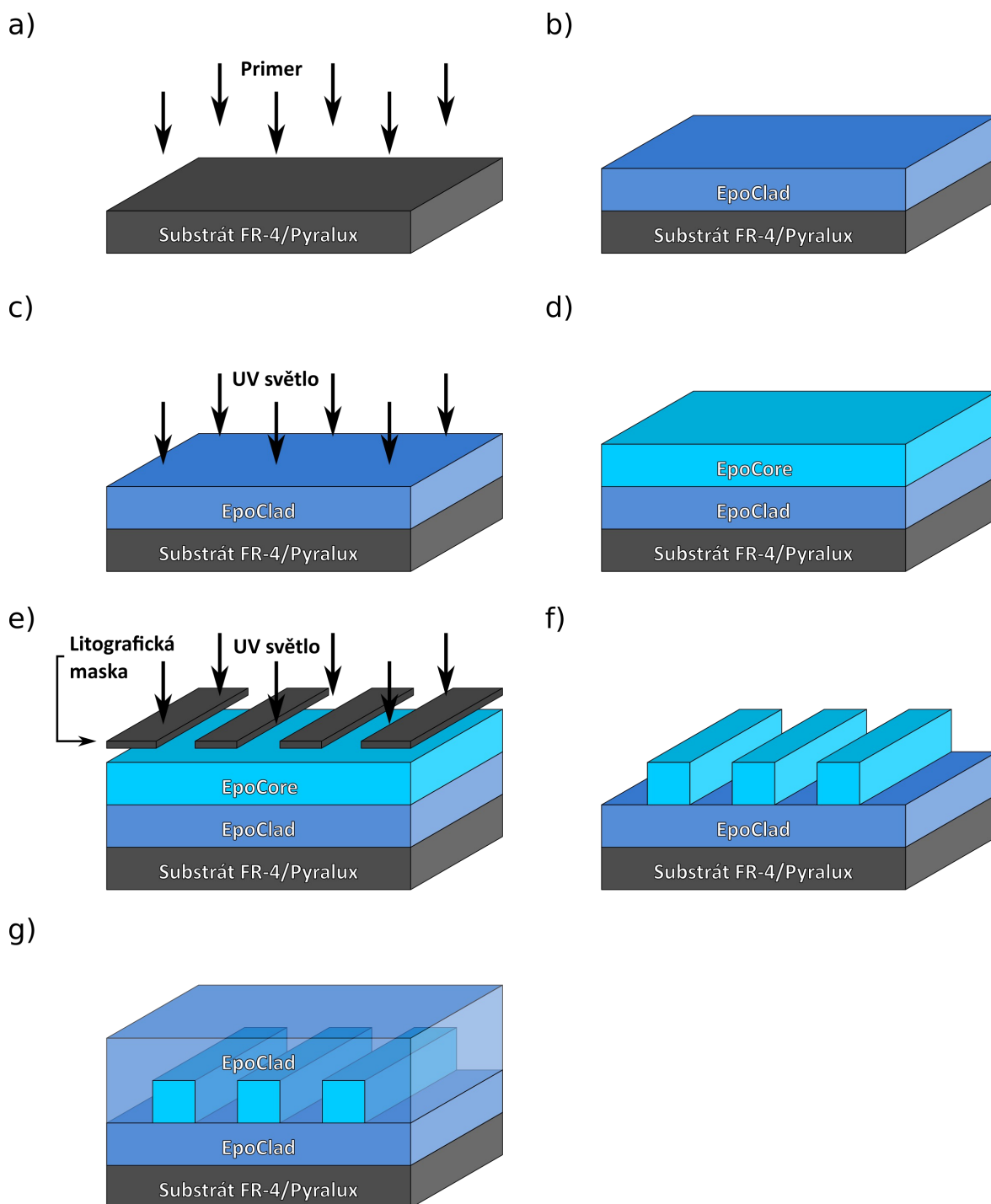
3.2 Výroba hřebenového vlnovodu EpoCore/EpoClad

Celý výrobní proces je nastíněn na obrázku 3.2. Stejně jako při výrobě planárního vlnovodu, bylo třeba nejdříve očistit křemíkové destičky pomocí acetonu a deionizované vody, posléze na ně byly oboustrannou lepicí páskou uchyceny substráty FR-4 nebo Pyralux, které byly také očištěny. Následovalo nanesení primeru metodou rotačního lití (obr. 3.2a) a nanesení mezivrstvy EpoClad toutéž metodou při 1500 otáčkách za minutu po dobu 10 minut (obr. 3.2b).

Následovalo vytvrzení materiálu EpoClad, čehož bylo dosaženo postupným zahříváním při teplotě rostoucí z 50°C až na 90°C (10°C/min), vystavením UV záření po dobu 2 minut (obr. 3.2c) a opětovným zahříváním ve stejném teplotním rozmezí. Dále byla rotačním litím za stejných podmínek nanášena vlnovodná vrstva EpoCore (obr. 3.2d), která byla také částečně vytvrzena zahříváním při teplotách od 50 do 85°C s krokem 10°C/min.

Po tomto kroku byl vzorek připraven na optickou litografii. S pomocí litografu byl vzorek přes masku osvětčován UV zářením po dobu 2 minut (obr. 3.2e) a následně byl znovu umístěn na plotnu, kde byl opět ohříván při teplotě od 50°C až do teploty 90°C. Po zchlazení byl vzorek připraven na vyvolání ve vývojce, která přibližně do minuty odleptala plochu fotorezistu, která nebyla při litografii ozářena, čímž se vytvořily vlnovodné kanálky (obr. 3.2f).

Následovalo dotvrzování pomocí zahřívání na 85°C, zchlazení, vystavení UV záření po dobu 2 minut a opětovné zahřívání na 85°C, aby se dosáhlo úplného vytvrzení vlnovodné vrstvy. Dále bylo už jen třeba nanést a vytvrdit horní krycí vrstvu EpoClad, u které se postupovalo úplně stejně jako při nanášení dolní krycí vrstvy (obr. 3.2g). Po absolvování těchto kroků byl vzorek hotov a připraven k měření.

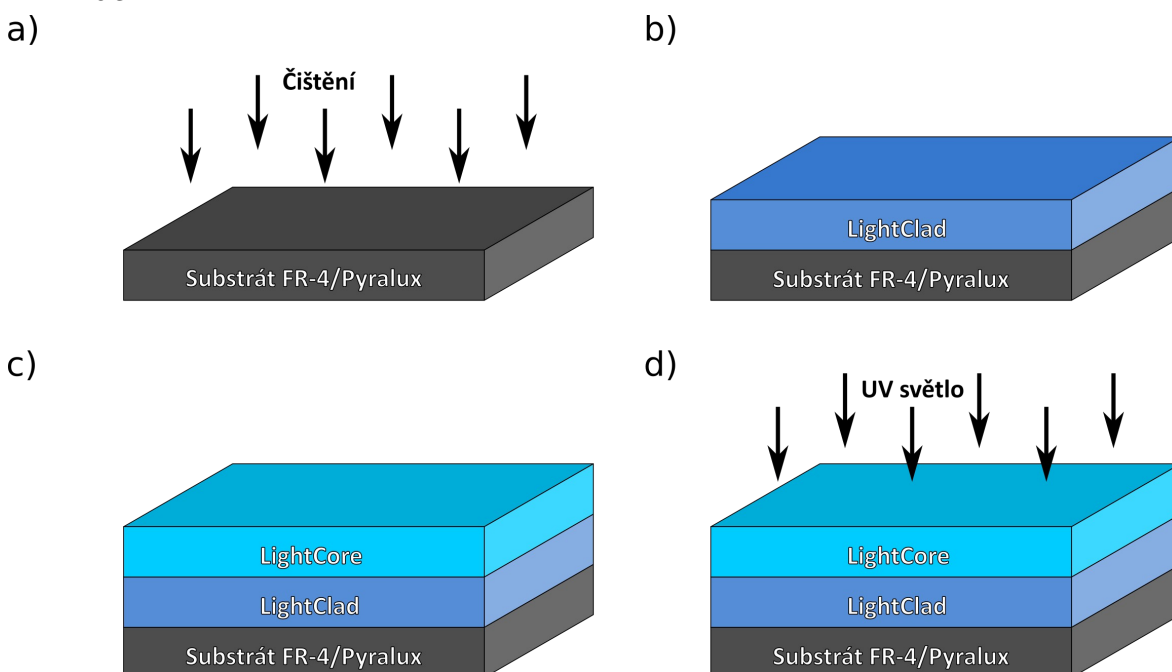


Obrázek 3.2: Výroba hřebenových vlnodů EpoCore/EpoClad – a) nanášení primeru, b) nanesení vrstvy EpoClad, c) vytvrzení UV zářením, d) nanesení vrstvy EpoCore, e) optická litografie, f) odleptání neosvícené části, g) nanesení horní krycí vrstvy.

3.3 Výroba planárního vlnovodu LightCore/LightClad

Na obrázku 3.3 je znázorněna výroba planárního vlnovodu z polymerních materiálů LIGHTLINK™ XP-6701A Core (LightCore) a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad (LightClad). Podobně jako u výroby vlnovodu z kombinace polymerních materiálů EpoCore a EpoClad, bylo nejdříve třeba provést čištění křemíkových podložek, na kterých byly poté uchyceny substráty buď FR-4 nebo Pyralux. Toto čištění bylo provedeno pomocí acetonu, poté, co byly substráty upevněny na křemíkové podložky pomocí oboustranné lepicí pásky, bylo je třeba také vyčistit. Čištění bylo docíleno tak, že byla křemíková destička upevněna na spin-coater, poté na ní byla aplikována vývojka, po jejímž nanesení následovalo dvouminutové sušení při 1500 otáčkách za minutu, dále byl na vzorek nanesen aceton, po čemž následovalo minutové sušení při 1500 otáčkách za minutu, a nakonec byl vzorek čištěn pomocí Izopropylalkoholu, po čemž opět následovalo minutové sušení při 1500 otáčkách za minutu (viz. obr. 3.3a).

V dalším kroku byl na substrát rovnoměrně po celé délce nanesen materiál LightClad (obr. 3.3b). Aby bylo dosaženo správné tloušťky materiálu, bylo využito metody rotačního lití při 500 otáčkách za minutu po dobu 5 minut. Takto vzniklou vrstvu bylo třeba před nanášením dalších vrstev vytvrdit, proto byl vzorek umístěn na plotnu nastavenou na teplotu 90°C, kde byl po dobu 2 minut.



Obrázek 3.3: Výrobní proces pro planární vlnovody LightCore/LightClad – a) čištění, b) nanesení vrstvy LightClad, c) nanesení vrstvy LightCore, d) vytvrzení vrstvy LightCore UV zářením.

Po zchlazení vzorku následovalo nanášení vlnovodné vrstvy LightCore (obr. 3.3c), které bylo prováděno opět metodou rotačního lití při 500 otáčkách za minutu po dobu 5 minut. I tuto vrstvu bylo třeba vytvrdit, proto byl vzorek opět umístěn na plotnu, tentokrát nastavenou na teplotu 95°C, kde strávil 2 minuty.

Planární vlnovod bylo poté třeba na 5 minut umístit pod UV lampu (obr. 3.3d) a nakonec vzorek na plotně vytvrdit při teplotě 145°C působící po dobu 60 minut. Tímto krokem byla výroba planárního vlnovodu dokončena a vzorek byl připraven k měření.

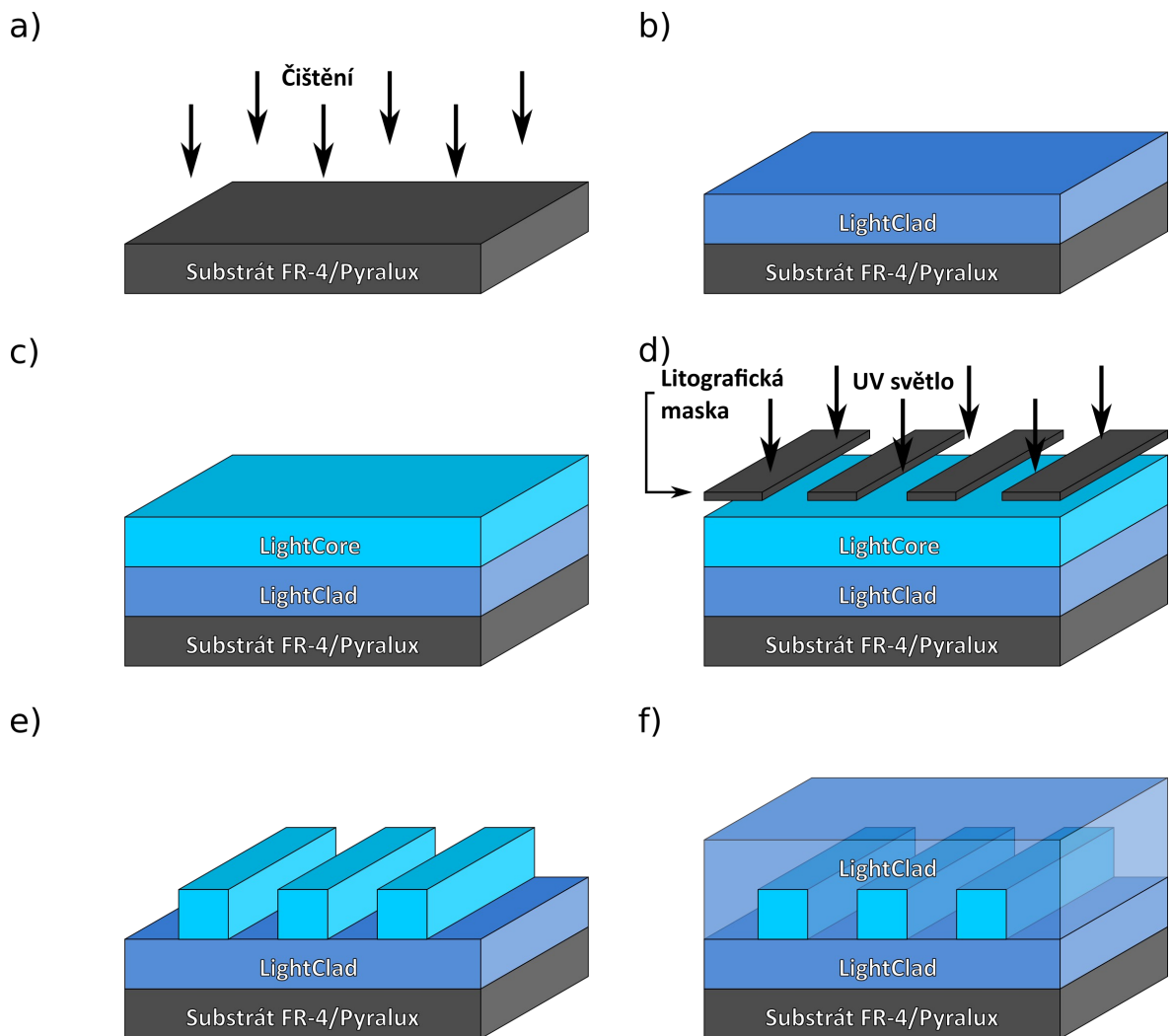
3.4 Výroba hřebenového vlnovodu LightCore/LightClad

Na obrázku 3.4 je proces výroby hřebenového vlnovodu LightCore/LightClad. Stejně jako u výroby planárního vlnovodu, bylo nejdříve třeba očistit křemíkové podložek, na kterých byly poté uchyceny substráty buď FR-4 nebo Pyralux, které byly taktéž očištěny (obr. 3.4a). Čištění probíhalo stejně jako čištění substrátu při výrobě planárního vlnovodu v předchozí kapitole.

V dalším kroku byl na substrát rovnoměrně po celé délce nanesen materiál LightClad (obr. 3.3b). Opět bylo využito metody rotačního lití při 500 otáčkách za minutu po doato vrstva byla poté na plotně vytvrzena při teplotě 90°C působící po dobu 2 minut. Po zchlazení vzorku následovalo nanášení vlnovodné vrstvy LightCore (obr 3.3c), které bylo prováděno opět metodou rotačního lití při 500 otáčkách za minutu po dobu 5 minut. I tato vrstva byla na plotně vytvrzena, tentokrát při teplotě 95°C působící po dobu 2 minut.

Po zchlazení byl vzorek umístěn do optického litografu, kde byl přes masku osvětčován UV zářením po dobu 5 minut (obr. 3.4d). Poté byl umístěn na plotnu, kde strávil 2 minuty při teplotě 95°C. Po zchlazení byl vzorek připraven na vyvolání ve vývojce, která přibližně do 90 sekund odleptala neozářený materiál, díky čemuž se na vzorku vytvořily vlnovodné kanálky (obr. 3.4e).

Pro vytvoření horní krycí vrstvy bylo třeba nanést další vrstvu materiálu LightClad metodou rotačního lití při 500 otáčkách za minutu po dobu 5 minut (obr. 3.4f), nakonec následovalo konečné vytvrzení vzorku na plotně při teplotě 145°C působící po dobu 60 minut.



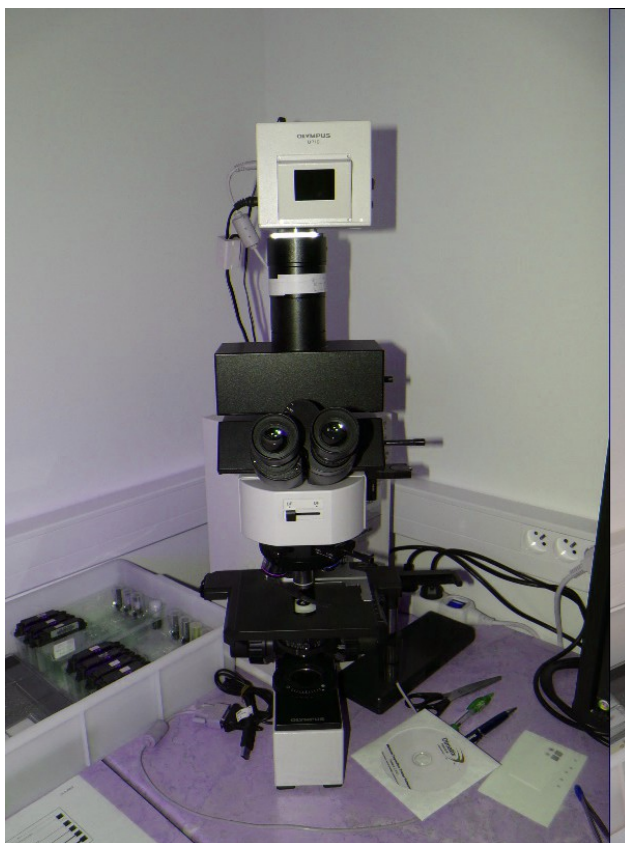
Obrázek 3.4: Výroba hřebenových vlnovodů LightCore/LightClad – a) čištění, b) nanosení vrstvy LightClad, c) nanosení vrstvy LightCore, d) optická litografie, e) odleptání neosvícené části, f) nanosení horní krycí vrstvy LightClad.

4 Diagnostika

U vyrobených vzorků bylo provedeno měření transmisních spekter vlnovodu a stanovení indexů lomu použitých materiálů. Také bylo třeba změřit optický útlum jak vyrobených planárních vlnovodů pomocí zařízení Metricon, tak hřebenových vlnovodů pomocí metody dvou délek. Přímou samotnou výrobě byla také provedena optická kontrola vyrobených vzorků.

4.1 Optická kontrola vzorků

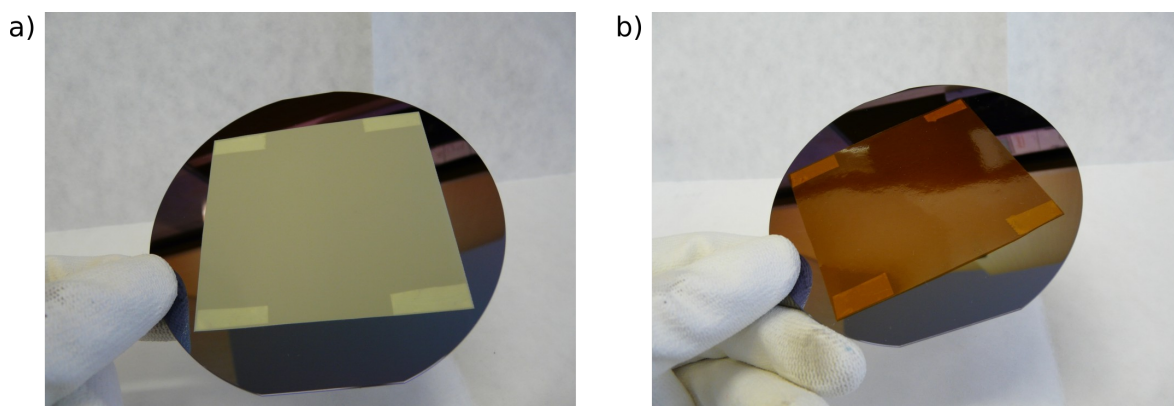
Rozměry a kvalita vyrobených struktur jsou v první řadě diagnostikovány opticky. Námi vyrobené struktury jsou poměrně velké, některé závady, jako například kazová struktura vlivem prachu nebo znečištění při výrobě, nebo odtržení vlnovodných vláken od substrátu, se dají odhalit pouhým okem, na odhalení drobnějších závad, jako třeba nedostatečné odleptání přebytečného materiálu vývojkou, je třeba použít optický mikroskop. Já měl k dispozici mikroskop Olympus BX60 s digitální kamerou DP 10 (obr. 4.1).



Obrázek 4.1: Optický mikroskop Olympus BX60 s kamerou DP 10.

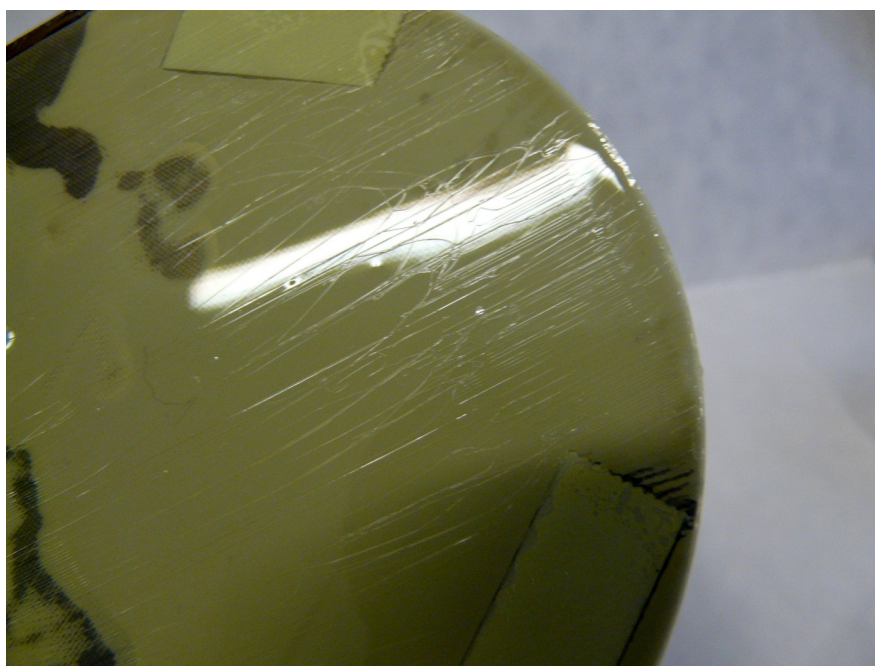
Na následujících jsou ukázky vyrobených vzorků. Na obrázku 4.2 jsou

vyfoceny mnou používané substráty připevněné na křemíkovou podložku, na obrázku 4.2a je flexibilní FR-4, na obrázku 4.2b fólie Pyralux.



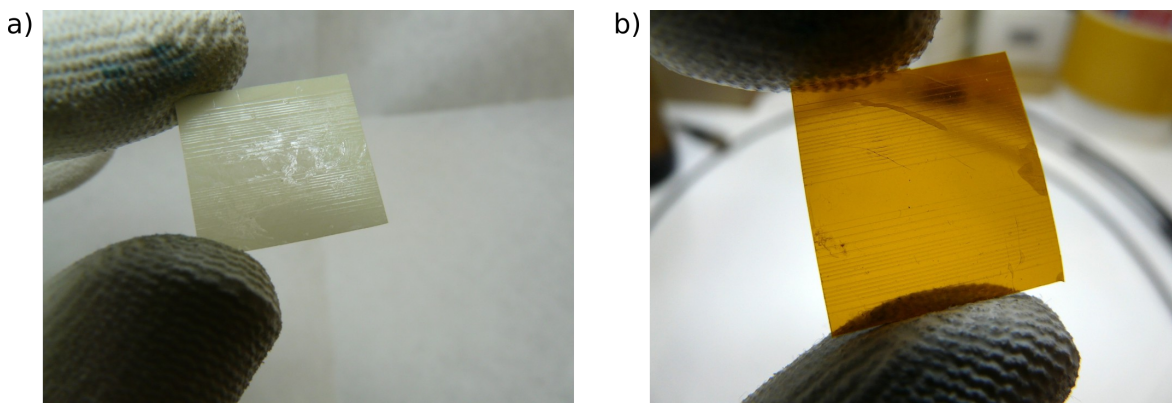
Obrázek 4.2: Používané substráty na křemíkové podložce - a) FR-4, b) Pyralux.

Na obrázku 4.3 je ukázka nepodařeného hřebenového vlnovodu tvořeného polymerními materiály LightCore a LightClad na substrátu FR-4. U tohoto vzorku došlo během odleptávání neosvíceného materiálu ve vývojce k odtržení vlnovodů od mezivrstvy, na obrázku je dobře vidět, že vlnovody nevedou rovnoběžně, ale jsou pokroucené a k dalšímu měření nepoužitelné.



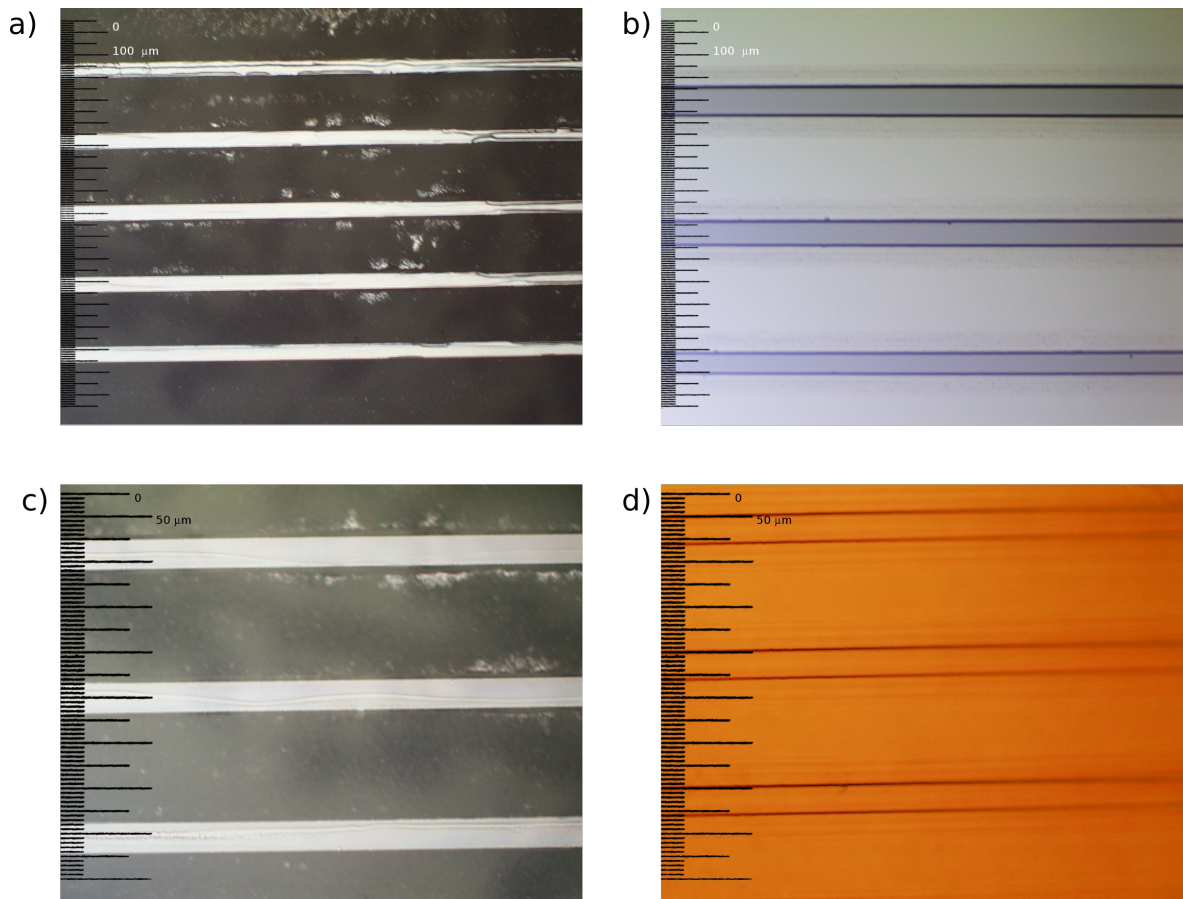
Obrázek 4.3: Nepodařený hřebenový vlnovod LightCore/LightClad na substrátu FR-4 s odtrženými vlnovodnými kanálky.

Na obrázku 4.4a a 4.4b jsou fotografie vyrobených vzorků. Na obrázku 4.4a je vzorek tvořený kombinací polymerních materiálů EpoCore a EpoClad na substrátu FR-4, na obrázku 4.4b je vzorek tvořený také materiály EpoCore/EpoClad, ale na substrátu Pyralux. Oba vzorky mají rovné, nepřerušované vlnovodné kanálky.



Obrázek 4.4: Ukázky vyrobených vzorků EpoCore/EpoClad
a) na substrátu FR-4, b) na substrátu Pyralux.

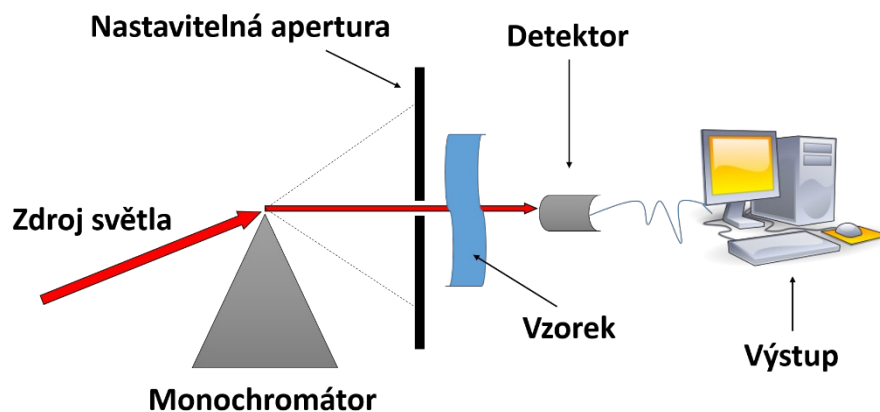
Na dalších obrázcích jsou vzorky focené pomocí mikroskopu Olympus BX60 s digitální kamerou DP 10. Na obrázku 4.5a je znázorněn nepovedený hřebenový vlnovod složený z materiálů EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4. Na tomto obrázku je dobře patrné poškození kanálků způsobené pravděpodobně buď nedostačnou expozicí během optické litografie, nebo příliš dlouhou dobou strávenou ve vývojce, což vedlo k odleptání částí kanálků. Na obrázku 4.5b je další vzorek EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4. Tento vzorek má hladké, rovnoměrné stěny kanálků, ale jejich šířka se pohybuje okolo 100 μm , přestože podle použité litografické masky by měly být široké 62,5 μm . To je pravděpodobně způsobeno rozptylem UV paprsků při průchodu přes litografickou masku do vlnovodné vrstvy, UV světlo pravděpodobně nebylo správně kolimováno na litografickou masku. Na obrázku 4.5c je vzorek EpoClad/EpoClad na substrátu FR-4, jehož šířka vlnovodných kanálků už přibližně odpovídá předpokládané šířce 62,5 μm . Na obrázku 4.5d je vzorek tvořený polymerními materiály EpoCore/EpoClad na substrátu Pyralux, jehož šířka vlnovodných kanálků také přibližně odpovídá použité litografické masce.



Obrázek 4.5: Ukázka hřebenových optických vlnovodů focených mikroskopem: a) EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4 s poškozenými kanálky, b) EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4 s nadměrně širokými kanálky, c) EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4, d) EpoCore/EpoClad na substrátu Pyralux.

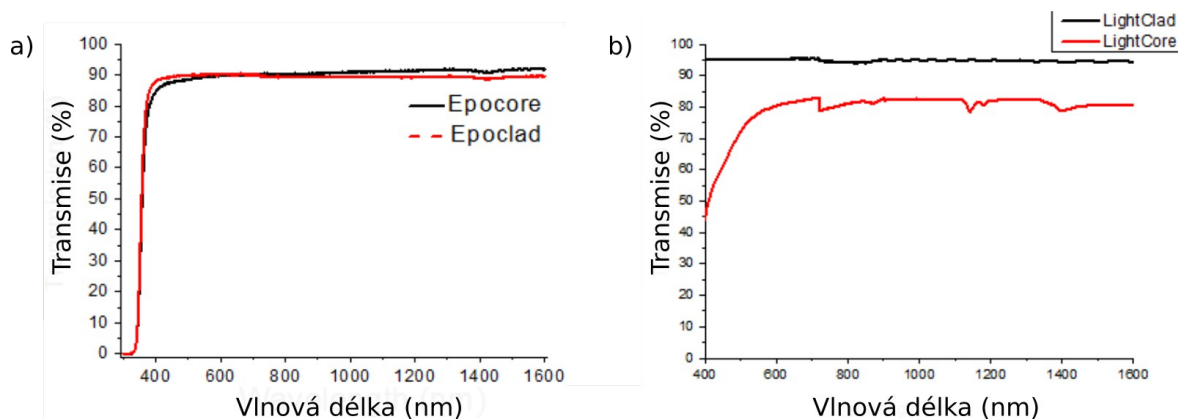
4.2 Měření transmisních spekter

Měření transmisních spekter slouží k vyhodnocení toho, jestli jsou zvolené materiály vhodné pro návrh optických vlnovodů. Polychromatické světlo vycházející ze zdroje prochází přes Czerného-Tunerův monochromátor a po průchodu vzorkem dopadá na detektor. Intenzita detekovaného záření se vyhodnotí systémem převodníků a dále zpracuje počítačovým software. Schéma měřícího pracoviště je na obrázku 4.6. Transmisní spektra vlnovodných materiálů byla změřena pomocí přístroje UV-VIS-NIR Shimadzu UV 3600. Pro účely měření byly tyto materiály nanášeny na křemenné sklo pomocí metody rotačního lití.



Obrázek 4.6: Schéma pracoviště pro měření transmisních spekter.

Na obrázku 4.7a jsou uvedeny transmisní spektra polymerních materiálů EpoCore a EpoClad, na obrázku 4.7b jsou spektra pro materiály LightCore a LightClad.

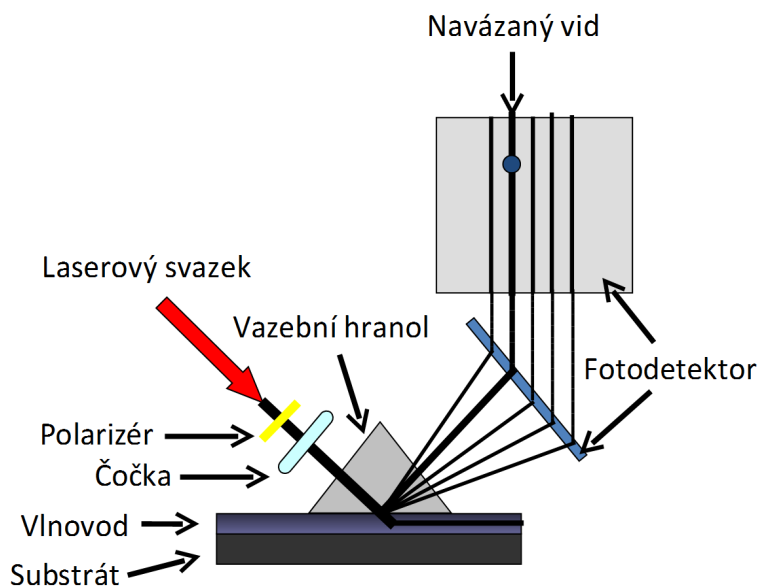


Obrázek 4.7: Transmisní spektra materiálů a) EpoCore a EpoClad, b) LightCore a LightClad.

Z grafů na obrázku 4.7 vyplývá, že všechny materiály jsou vhodné pro návrh optických vlnovodů pro vlnové délky od 400 nm do 1600 nm. Toto rozmezí je pro mě zcela postačující, mnou předpokládané pracovní vlnové délky jsou 650 nm, 850 nm a 1310 nm.

4.3 Jednohranolvá vidová spektroskopie

Jednohranolvá vidová spektroskopie se používá ke změření indexu lomu a vlnovodných vlastností daného materiálu. Jak lze vidět na obrázku 4.8, k měřenému vzorku se upevní vazební hranol tak, aby mezi hranolem a vlnovodem byla tenká vzduchová mezera.



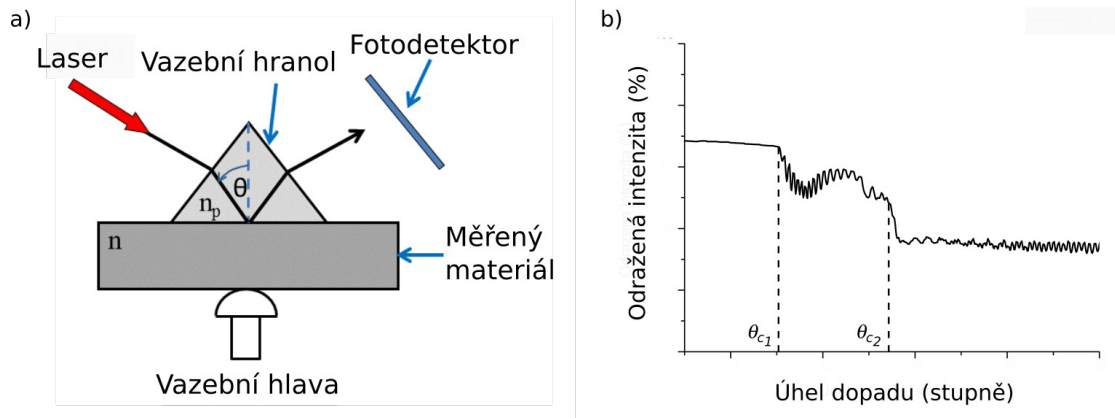
Obrázek 4.8: Schéma měření vidové spektroskopie [17].

Laserový paprsek je nastaven tak, aby docházelo k úplnému odrazu od podstavy hranolu směrem do fotodetektoru. Při změně úhlu dopadu může nastat situace, kdy se fotony začnou tunelovat skrz vzduchovou mezera a vnikat do vlnovodu, což poznáme podle výrazného úbytku světelné intenzity na detektoru – to platí pro takzvané vidové úhly [17]. Toto měření bylo prováděno na pěti vlnových délkách, a to 473 nm, 632,8 nm, 964 nm, 1310 nm a 1552 nm pomocí zařízení Metricon [4].

Na obrázku 4.9a je znázorněn princip určení indexu lomu. Pokud je materiál s indexem lomu n v kontaktu s hranolem o známém indexu lomu n_p a tato soustava je vůči staticky umístěnému laserovému paprsku otáčena, nalezneme kritický úhel θ_c , při kterém přestane docházet k úplnému odrazu do fotorezistoru a paprsek začne pronikat do měřeného materiálu. Z tohoto úhlu a indexu lomu hranolu jsme schopni vypočítat index lomu materiálu pomocí vztahu 1.18.

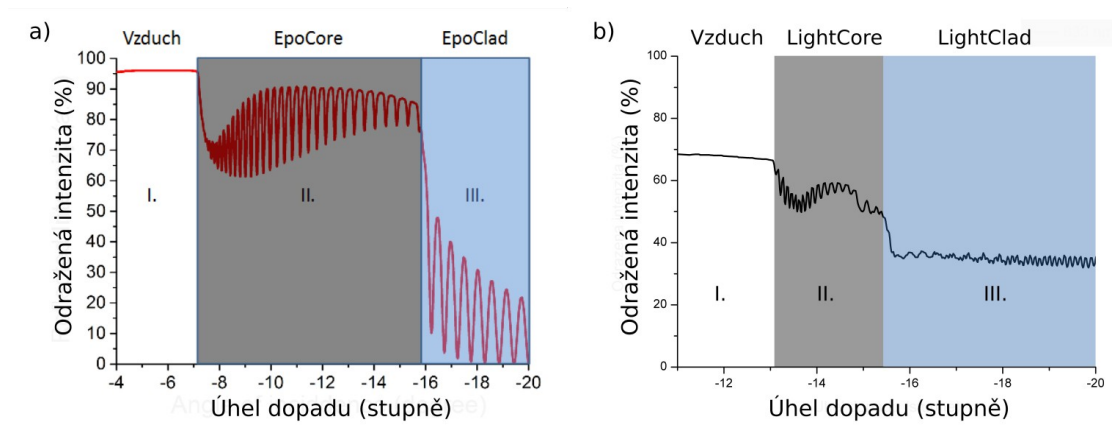
$$n = n_p \sin \theta_c \quad (1.18)$$

Na obrázku 4.9b je znázorněno odečítání kritických úhlů pro vlnovodnou vrstvu θ_{c1} a pro spodní mezivrstvu θ_{c2} .



Obrázek 4.9: a) princip určení indexu lomu, b) odečítání kritických úhlů z grafu.

Na obrázku 4.10 jsou znázorněny výsledky měření polymerních mnohavidových vlnovodů pro vlnovou délku 632,8 nm. Na obrázku 4.10a je graf intenzity odraženého paprsku pro materiál EpoCore s mezivrstvou EpoClad, na obrázku 4.10b je výsledek měření pro vlnovodný materiál LightCore s mezivrstvou LightClad.

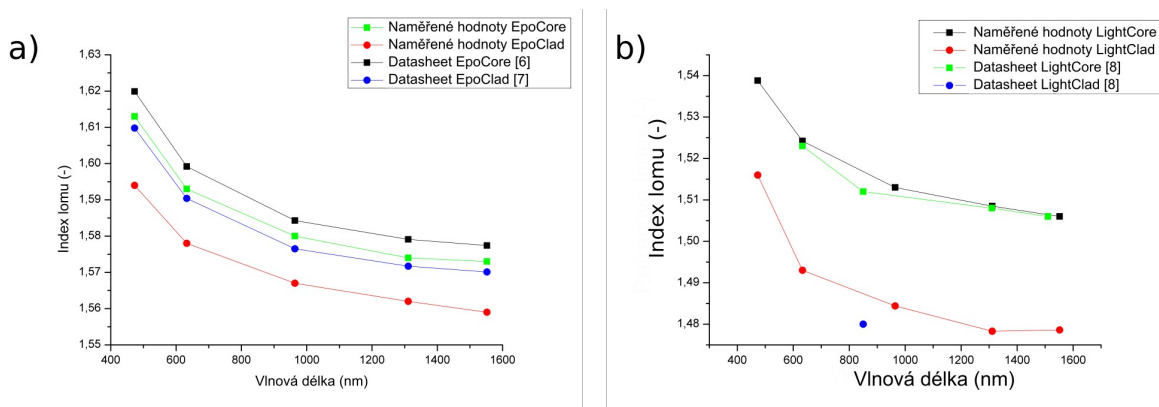


Obrázek 4.10: Měření jednohranolvou vidovou spektroskopií na vlnové délce 632,8 nm, a) polymerní materiály EpoCore/EpoClad, b) polymerní materiály LightCore/LightClad.

Obrázky 4.10a a 4.10b jsou rozděleny na tři oblasti. Oblast I. představuje úhel

dopadu příliš malý na to, aby paprsek pronikl do materiálu. Dochází zde k téměř úplnému odrazu. Na rozhraní oblastí I. a II. se nachází kritický úhel θ_c neboli úhel, na kterém přestává docházet k úplnému odrazu a paprsek začíná pronikat do materiálu. Právě tento úhel použijeme k určení indexu lomu vlnovodného materiálu. Oblast II. představuje vlnovodnou vrstvu, lokální minima v této oblasti představují přenášené vidy. Oblast II. odděluje od III. oblasti další strmý propad odražené intenzity, představující úhel, pod kterým proniká paprsek do spodní mezivrstvy. Z tohoto úhlu lze vypočítat index lomu materiálu tvořícího spodní mezivrstvu.

Na obrázcích 4.11a a 4.11b jsou uvedeny hodnoty indexů lomu používaných polymerních materiálů získané pomocí jednohranolové vidové spektroskopie, pro srovnání jsou v grafech uvedeny i tabulkové hodnoty poskytnuté výrobcem těchto materiálů.

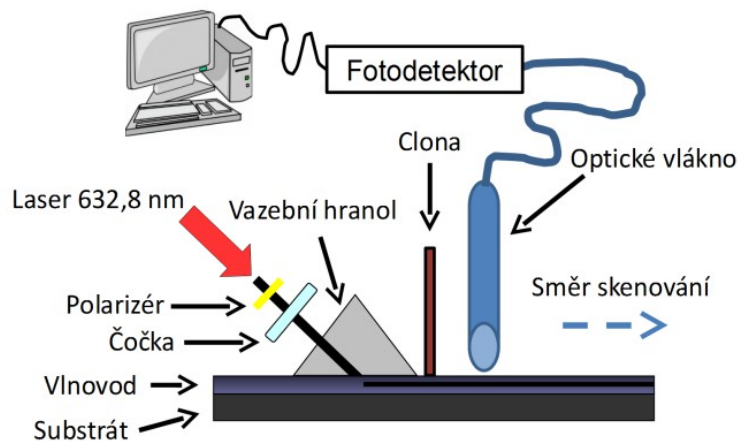


Obrázek 4.11: Změřené hodnoty indexu lomu pro polymerní materiály a) EpoCore a EpoClad, b) LightCore a LightClad.

Na obrázku 4.11a je vidět, že naměřené hodnoty indexu lomu vyšly o trochu nižší než hodnoty odpovídající výrobcem. Vzhledem k tomu, že tvar křivky naměřených hodnot odpovídá předpokádanému tvaru, nepovažoval bych to za chybu měření, nižší indexy lomu mohou být způsobeny odlišnými depozičními podmínkami laboratoře. Z grafu na obrázku 4.11b je vidět, že naměřené hodnoty polymeru LightCore v zásadě odpovídají tabulkovým hodnotám, hodnoty pro LightClad se sice od uvedené tabulkové hodnoty o pár setin odlišují, ale vzhledem k tomu, že výrobce uvádí pro tento materiál pouze jedinou hodnotu indexu lomu pro vlnovou délku 850 nm, nemusí se zde jednat o chybu měření. Takto získané indexy lomu byly použity pro návrh vlnovodu v kapitole 1 a jsou znázorněny na grafu na obrázku 2.5.

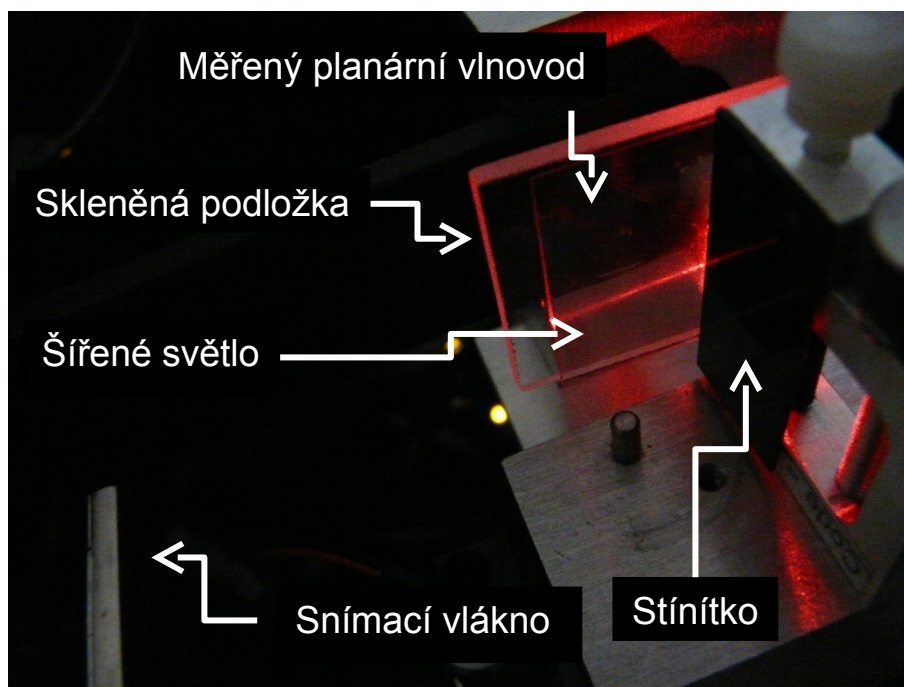
4.4 Měření optického útlumu planárních vlnovodů

Během měření optického útlumu planárních vlnovodů se měří intenzita světla rozptýleného na povrchu vlnovodu. Jak je znázorněno na schématu na obrázku 4.12, do vlnovodu je navázán laserový paprsek a optickým vláknem připojeným k fotodetektoru je skenován povrch po délce vlnovodu. Vychází se z předpokladu, že intenzita rozptýleného světla je v každém bodě úměrná intenzitě světla, které zůstane ve vlnovodu [17].



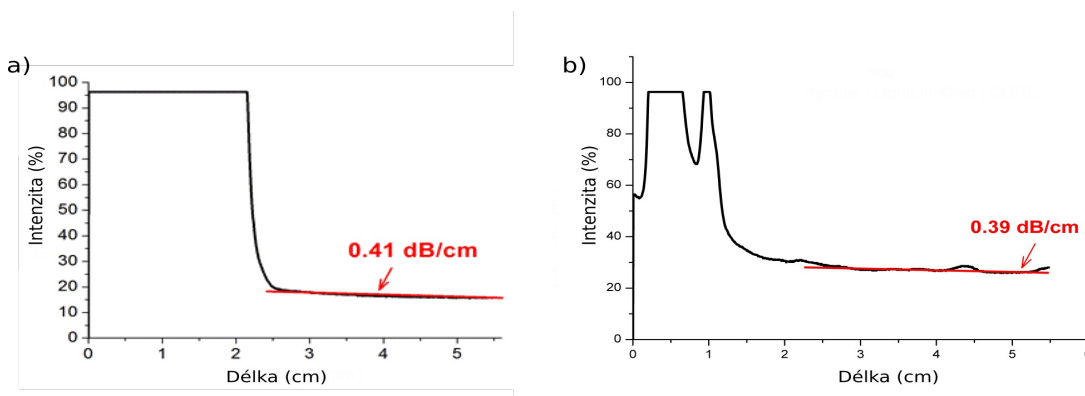
Obrázek 4.12: Schéma měření útlumu [17].

Samotné měření probíhá tak, že se vzorek uchytí do přístroje a přes vazební hranol je do něj navázán paprsek. Optické vlákno poté v těsné blízkosti vlnovodu skenuje jeho povrch, fotodetektor připojený na druhý konec optického vlákna vyhodnotí intenzitu vyzářeného světla v daném bodě a informaci předá počítači. Počítač poté zobrazí graf rozložení intenzity na celém měřeném úseku, ze kterého si uživatel může vybrat část, na které nejsou žádné viditelné chyby a program pomocí metody nejmenších čtverců spočítá útlum dané části v dB/cm. V mém případě byl vzorek ještě přilepen na pevnou skleněnou podložku, protože použité flexibilní substráty by se v zařízení mohly kroutit a ovlivnit tak výsledky měření. Měření bylo provedeno na viditelné vlnové délce 632,8 nm pomocí He-Ne laseru, pracoviště pro měření je znázorněno na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13: Zařízení pro měření optického útlumu planárních vlnovodů.

Na obrázcích 4.14a a 4.14b jsou uvedeny výsledky měření optických útlumů planárních vlnovodů. Na obrázku 4.14a je uveden optický útlum planárního vlnovodu tvořeného kombinací polymerních materiálů EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4, na obrázku 4.14b je optický útlum kombinace LightCore/LightClad na substrátu Pyralux.

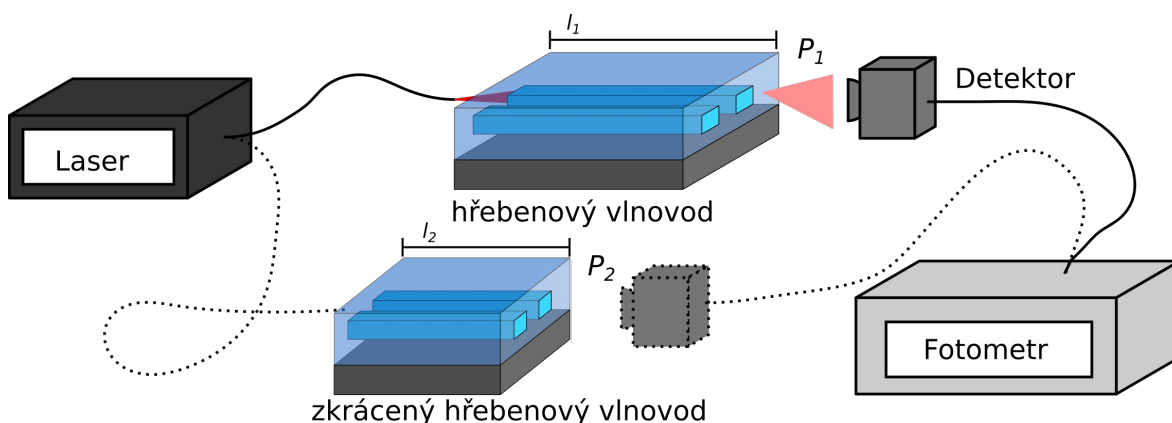


Obrázek 4.14: Optický útlum planárního vlnovodu a) EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4, b) LightCore/LightClad na substrátu Pyralux.

Červená čára na obrázcích 4.14a a 4.14b znázorňuje proložení naměřených hodnot polynomem metodou nejmenších čtverců, ze kterého je určen optický útlum, který v našem případě činí $0,41 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro EpoCore/EpoClad a $0,39 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro LightCore/LightClad pro vlnovou délku $632,8 \text{ nm}$.

4.5 Měření optického útlumu hřebenových/kanálkových vlnodů

Měření optického útlumu hřebenových vlnodů bylo prováděno metodou dvou délek. Tato metoda spočívá v tom, že se vzorek upraví na známou délku l_1 tak, aby se do něj dal navázat paprsek, a změří se výstupní výkon vlnovodu (obr. 4.15). Poté se vzorek zlomí na dvě poloviny o délkách l_2 a měření se s jednou z částí opakuje.



Obrázek 4.15: Schéma měření útlumu metodou dvou délek.

Z takto získaných hodnot optického výkonu jsme schopni spočítat jak útlum, tak i měrný útlum vlnovodu pomocí vztahů

$$A = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1.19)$$

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (1.20)$$

Kde P_1 je výkon naměřený na delším úseku, tedy výkon naměřený ve vzdálenosti l_1 , P_2 je výkon naměřený na kratším úseku (výkon ve vzdálenosti l_2), L je rozdíl délek úseku, $L = l_1 - l_2$. Nevýhodou této metody je, že patří mezi destruktivní, jelikož se měřením daný vzorek zničí.

V prvním kroku byl změřen optický výkon pro delší vzorek (délka l_1). Po změření tohoto optického výkonu byl vzorek zlomen a následně byl změřen optický výkon na kratší délce vlnovodu (délka l_2). Při lámání vzorků ale docházelo k technologickým potížím a nepodařilo se vyrobit vzorky s kvalitním definovaným lomem, aby bylo možno změřit optický výkon ve vzdálenosti l_2 . Pro úspěšné provedení tohoto měření by bylo třeba provést více depozičních testů, aby se podařilo vyrobit kvalitní čelo optického planárního vlnovodu pro měření optického výkonu.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh optických polymerních planárních a hřebenových vlnodů, které bude možno realizovat na deskách plošných spojů. Zabýval jsem se nejen návrhem planárních a hřebenových struktur tvořených polymerními materiály, ale také návrhem vlnodné Fermatovy spirály. Návrh jsem prováděl pro vlnové délky 632,8 nm, 650 nm, 850 nm, 1310 nm a 1550 nm a použil jsem polymerní materiály EpoCore, EpoClad, LIGHTLINK™ XP-6701A Core a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad. Pro podložky jsem zvolil flexibilní substráty FR-4 a Pyralux.

Nejprve jsem prováděl depoziční testy pro výrobu planárních optických vlnodů, poté byly vyráběny hřebenové optické vlnovody. Optické vlnovody byly vyráběny metodou rotačního lití a vytvrzení polymerů bylo prováděno pomocí UV záření. Bylo vyrobeno celkem 32 emisí, z toho 4 emise tvořily planární vlnovody, zbylých 28 emisí tvořilo hřebenové vlnovody. Každá z těchto 28 emisí obsahovala 20 vlnodů. Na vyrobených optických planárních vlnovodech byly pomocí jednohranolové vidové spektroskopie změřeny indexy lomu použitých materiálů a byly studovány jejich vlnodné vlastnosti. Dále byla ověřena vhodnost použitých vlnodných polymerních materiálů pomocí měření transmisních spekter, při kterém se zjistilo, že všechny použité vlnodné materiály jsou vhodné pro aplikaci v rozsahu vlnových délek 400 nm až 1600 nm.

Na základě naměřených hodnot indexů lomu a optického útlumu byl proveden návrh optických hřebenových vlnodů. Bylo třeba určit nejmenší možný rozestup jader vlnodů, při kterém nebude docházet k pronikání optického signálu do sousedních vlnodů vlivem evanescentní vlny. Rozestup optických vlnodů byl spočítán na základě vztahů odvozených z disperzní rovnice, dále jsem provedl simulaci pomocí simulačního software BeamPROP, která ověřila provedené výpočty. Návrh prokázal, že minimální rozestup mezi jádry vlnodů se pohyboval v rozmezí 20-30 μm .

Dále jsem provedl návrh vlnodné Fermatovy spirály, jejíž tvar byl upraven tak, aby bylo dosaženo co nejnižších hodnot optického útlumu na ohybu a zároveň aby bylo docíleno konstantního rozestupu mezi jednotlivými závitů spirály. Rozestup mezi závitů spirály byl stanoven na základě návrhu

hřebenového vlnovodu. Pro spirálu jsem zvolil o řád větší hodnoty rozestupu, aby bylo zaručeno, že nebude docházet k vyvázání signálu z vlnovodu. Navrhl jsem celkem dvě spirály, jednu s průměrem 44,4 cm a rozestupy mezi jednotlivými závitů 200 μm , druhou s průměrem 88,4 cm a rozestupy mezi závitů 250 μm . Vložené ztráty těchto spirál činí 0,038-0,042 $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro vlnovod tvořený polymerními materiály EpoCore a EpoClad a 0,014 $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ pro polymerní materiály LIGHTLINK™ XP-6701A Core a LIGHTLINK™ XH-100145 Clad.

Optický útlum planárních vlnovodů byl měřen metodou skenování povrchu vlnovodu optickým vláknem. Měření bylo prováděno na vlnové délce 632,8 nm, nejnižší hodnoty optického útlumu vykazovaly optické vlnovody tvořené kombinací polymerních materiálů LightCore a LightClad na substrátu Pyralux, zde bylo dosaženo nejnižší hodnoty optického útlumu 0,39 $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$. Pro polymerní materiály EpoCore/EpoClad bylo dosaženo nejlepšího výsledku na substrátu FR-4, kde byla naměřena hodnota optického útlumu 0,41 $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Podle rozměrů naržené Fermatovy spirály by měla být vyrobena chromová litografická maska, která bude použita k výrobě polymerních flexibilních vlnovodů.

Literatura

- [1] A. Neyer, S. Kopetz, E. Rabe, D. Cai: Polymer Waveguide Technologies for Optical Interconnects, University of Dortmund.
- [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] Printed s.r.o., <http://www.printed.cz/pruzne-a-ohebne-spoje>
- [4] Metricon Corporation, <http://www.metricon.com>
- [5] Weisstein, Eric W.: Fermat's Spiral, MathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/FermatsSpiral.html>
- [6] Negative Tone Photoresists EpoCore, Micro Resist Technology, Datasheet
- [7] Negative Tone Photoresists EpoClad, Micro Resist Technology, Datasheet
- [8] XP LIGHTLINK™ Optical Waveguide Technology Process Guidelines, MicroChem, Datasheet
- [9] K. Novotný: Optická komunikační technika, ČVUT, 1997, skripta.
- [10] J. Klapouch: Návrh nového polymerního optického vlnovodu, ČVUT 2010, Bakalářská práce.
- [11] S. Musa, A. Borreman, A. A. M. Kok, M. B. J. Diemeer, A. Driessen: Experimental study of bent multimode optical waveguides, Applied Optics, vol. 43, no. 30, pp. 5705-5707, 2004
- [12] M. B. J. Diemeer, L. T. H. Hilderink, H. Kelderman, A. Driessen: Multimode Waveguides of Photodefinable Epoxy for Optical Backplane Applications, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, pp. 53-56, 2006, Eindhoven
- [13] N. Bamiedakis, J. Beals, R. V. Penty, I. H. White, J. V. DeGroot, T. V. Clapp: Cost-Effective Multimode Polymer Waveguides for High-Speed On-Board Optical Interconnects, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 45, no. 4, pp. 415-424, 2009
- [14] L. Wang, J. Choi, X. Wang, R. T. Chen: Thin film optical waveguide and optoelectronic device integration for fully embedded board level optical interconnects, University of Texas, Austin terconnects, IEEE Journal of Quantum Electronics, VOL. 45, no. 4, pp. 415-424, 2009.

- [15] Flexible, Stable, and Easily Processable Optical Silicones for Low Loss Polymer Waveguides, Dow Corning Corporation, Datasheet
- [16] Technical Information of ZPU12-RI & ZPU13-RI, ChemOptics, Datasheet
- [17] V. Prajzler, P. Nekvindová, P. Hypš, O. Lyutakov, V. Jeřábek: Flexible polymer planar optical waveguides, Radioengineering, vol. 23, no. 3, ISSN 1210-2512, pp. 776-782, 2014.

Přílohy

a) Zdrojové kódy

Výpočet pronikání evanescentní vlny do substrátu

```
> restart;
> Plexiglas := [1.4904, 1.4895, 1.4864, 1.4812, 1.4801]; PDMS := [1.4115,
1.41, 1.407, 1.4032, 1.4017]; PMMA := [1.4898, 1.4893, 1.4855, 1.4807,
1.4783]; Su8 := [1.5713, 1.5697, 1.5622, 1.5525, 1.5508]; EpoClad :=
[1.578, 1.5781, 1.5689, 1.562, 1.559]; EpoCore := [1.593, 1.5926, 1.5818,
1.574, 1.573]; LightCore := [1.523, 1.525, 1.5153, 1.5058, 1.5056];
LightClad := [1.4867, 1.4883, 1.4803, 1.4733, 1.4718]; Air := [1, 1, 1,
1, 1];
> lambda := [0.633e-6, 0.650e-6, 0.850e-6, 0.1310e-5, 0.1552e-5]; tg :=
0.50e-4; w := 0.50e-4; nf := EpoCore; ns := EpoClad; nc := ns; i := 4;
k := evalf(2*Pi/lambda[i]); evalf(sqrt(-nc[i]^2+nf[i]^2));
> m := floor(evalf(2*tg*sqrt(nf[i]^2-ns[i]^2)/lambda[i]-arctan(sqrt(abs(-
nc[i]^2+ns[i]^2)/(nf[i]^2-ns[i]^2)))/Pi))); m2 :=
floor(evalf(2*w*sqrt(nf[i]^2-ns[i]^2)/lambda[i]-
2*arctan((nf[i]/ns[i])^2*sqrt(abs(-nc[i]^2+ns[i]^2)/(nf[i]^2-
ns[i]^2)))/Pi)));
> funkce := k*tg*sqrt(-nef^2+nf[i]^2)-arctan(sqrt((nef^2-ns[i]^2)/(-
nef^2+nf[i]^2)))-arctan(sqrt((nef^2-nc[i]^2)/(-nef^2+nf[i]^2)))-(m+0)*Pi;
plot(funkce, nef = ns[i] .. nf[i]); nef[i] := fsolve(funkce, nef =
ns[i] .. nf[i]);
> beta := nef[i]*k; wm := sqrt(-k^2*nc[i]^2+beta^2); vm := sqrt(-
k^2*ns[i]^2+beta^2); um := sqrt(k^2*nf[i]^2-beta^2);
> cos(um*x)-wm*sin(um*x)/um; maxx := diff(%, x); findmaxx := solve(maxx =
0, x); konst := abs(cos(um*findmaxx)-wm*sin(um*findmaxx)/um); Eyc :=
exp(-0.1e-5*wm*x)/konst; Eyf := (cos(0.1e-5*um*x)-wm*sin(0.1e-
5*um*x)/um)/konst; Eys := (cos(um*tg)+wm*sin(um*tg)/um)*exp(vm*(0.1e-
5*x+tg))/konst;
> plot(Eys, x = -2*tg*0.1e7 .. -0.1e7*tg); hs10 := solve(Eys = .1, x);
hs10 := evalf(abs(%) - 0.1e7*tg); nprintf("%0.3E", hs10); hs100 :=
solve(Eys = 0.1e-1, x); hs100 := evalf(abs(%) - 0.1e7*tg); nprintf("%0.3E",
hs100); hs1000 := solve(Eys = 0.1e-2, x); hs1000 := evalf(abs(%) -
0.1e7*tg); nprintf("%0.3E", hs1000); plot(Eyc, x = 0 .. 0.1e7*tg);
hc10 := solve(Eyc = .1, x); nprintf("%0.3E", hc10); hc100 := solve(Eyc =
0.1e-1, x); nprintf("%0.3E", hc100); hc1000 := solve(Eyc = 0.1e-2, x);
nprintf("%0.3E", hc1000); plot(Eyf, x = -0.1e7*tg .. 0);
> nprintf("%0.3E", hc10); nprintf("%0.3E", hc100); nprintf("%0.3E",
hs100); nprintf("%0.3E", hc1000); nprintf("%0.3E", hs1000);
```

```

> plot(piecewise(x <= -tg, Eys, -tg < x and x <= 0, Eyf, 0 < x, Eyc), x =
-2*tg .. tg);
> plot([Heaviside(-0.1e7*tg-x)*Eys, Heaviside(x)*Eyc,
Heaviside(x+0.1e7*tg)*Heaviside(-x)*Eyf], x = -(3/2)*tg*0.1e7 ..
0.1e7*tg*(1/2), axes = boxed, size = [1200, 500], thickness = 2, axis =
[thickness = 2], font = ["Helvetica", 14]);

> plotsetup('png', plotoptions = "width=2400,height=1000", plotoutput =
"intenzita.png");
> plot([Heaviside(-0.1e7*tg-x)*Eys, Heaviside(x)*Eyc,
Heaviside(x+0.1e7*tg)*Heaviside(-x)*Eyf], x = -(3/2)*tg*0.1e7 ..
0.1e7*tg*(1/2), axes = boxed, size = [2400, 1000], thickness = 2, axis =
[thickness = 2], font = ["Helvetica", 24], numpoints=4000);
> plotsetup(default);

```

Určení optického útlmu na ohybu

```

> restart;
> Plexiglas := [1.4904, 1.4895, 1.4864, 1.4812, 1.4801]; PDMS := [1.4115,
1.41, 1.407, 1.4032, 1.4017]; PMMA := [1.4898, 1.4893, 1.4855, 1.4807,
1.4783]; Su8 := [1.5713, 1.5697, 1.5622, 1.5525, 1.5508]; EpoClad :=
[1.578, 1.5781, 1.5689, 1.562, 1.559]; EpoCore := [1.593, 1.5926, 1.5818,
1.574, 1.573]; LightCore := [1.523, 1.525, 1.5153, 1.5058, 1.5056];
LightClad := [1.4867, 1.4883, 1.4803, 1.4733, 1.4718]; Air := [1, 1, 1,
1, 1];
> lambda := [0.633e-6, 0.650e-6, 0.850e-6, 0.1310e-5, 0.1550e-5]; tg :=
0.50e-4; w := 0.50e-4; nf := LightCore; ns := LightClad; nc := ns; i :=
4; k := evalf(2*Pi/lambda[i]); NA1 := evalf(sqrt(-nc[1]^2+nf[1]^2));
NA2 := evalf(sqrt(-nc[2]^2+nf[2]^2)); NA3 := evalf(sqrt(-
nc[3]^2+nf[3]^2)); NA4 := evalf(sqrt(-nc[4]^2+nf[4]^2)); NA5 :=
evalf(sqrt(-nc[5]^2+nf[5]^2));
> NULL;
> K := w/((1/1000)*NA^2*r); T := 10*log(1-(1/2)*K-(1/6)*K^2-(1/8)*K^3-
(1/8)*K^4-K^5);
> plot([subs(NA = NA1, -T), subs(NA = NA2, -T), subs(NA = NA3, -T),
subs(NA = NA4, -T), subs(NA = NA5, -T)], r = 1 .. 25);
>
> plot([subs(NA = .3325479063, -T), subs(NA = .3237993206, -T), subs(NA =
.3111603284, -T), subs(NA = .2144181662, -T), subs(NA = .2016036458, -T),
subs(NA = .1939896904, -T)], r = 1 .. 25, axes = normal, size = [1200,
500], thickness = 2, axis = [thickness = 2], linestyle = [dot, longdash,
solid, dot, longdash, solid], color = [red, red, red, blue, blue, blue],
font = ["Helvetica", 14]);
> plotsetup('png', plotoptions = "width=2400,height=1000", plotoutput =
"bend utlum.png"); plot([subs(NA = .3325479063, -T), subs(NA = .
3237993206, -T), subs(NA = .3111603284, -T), subs(NA = .2144181662, -T),
subs(NA = .2016036458, -T), subs(NA = .1939896904, -T)], r = 1 .. 25,
axes = normal, size = [2400, 1000], thickness = 4, axis = [thickness =
4], linestyle = [dot, longdash, solid, dot, longdash, solid], color =

```

```
[red, red, red, blue, blue, blue], font = ["Helvetica", 24], numpoints =
4000); plotsetup(default);
> r0 := 10; NA0 := .33; utlum := evalf(4*subs([r = r0, NA = NA0], T)
+2.5*subs([r = 2*r0, NA = NA0], T));
```

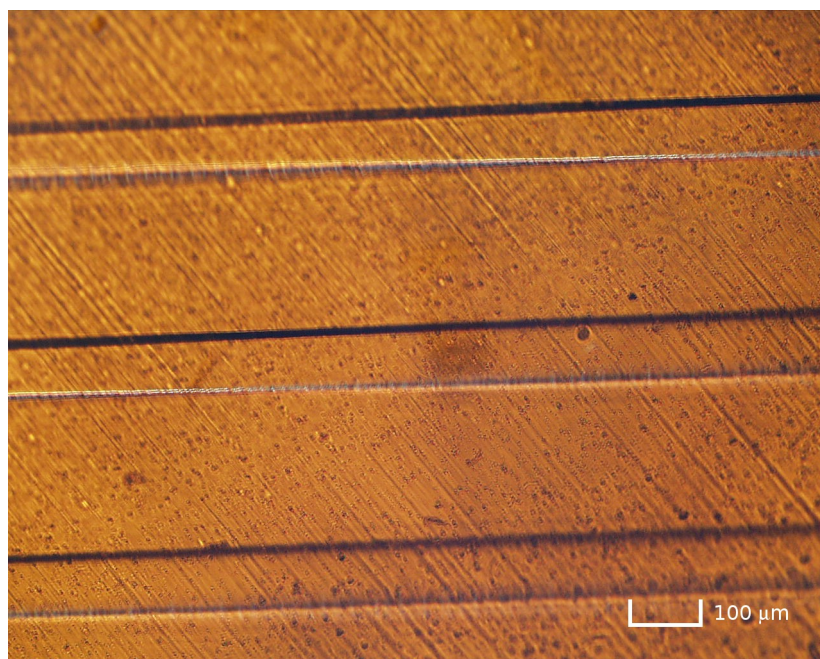
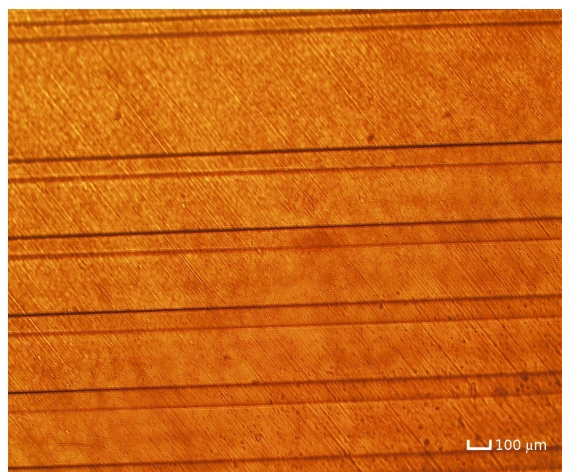
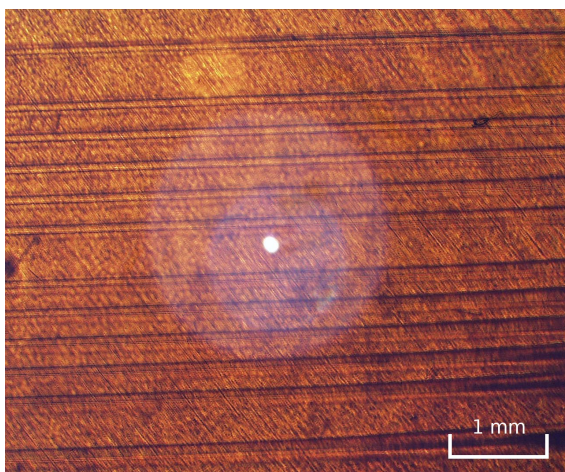
Návrh Fermatovy spirály

```
> restart;
> n := 15; a := 96; d := 40000; x := evalf(d/((1/2)*Pi)^(1/n)); x2 :=
evalf(d-(1/2)*a*Pi); z := 3*Pi; offset := (1/2)*Pi;
> funkce := d*Heaviside(offset-t)*sin(t)+Heaviside(t-offset)*x*t^(1/n);
funkce2 := d*Heaviside(offset-t)*sin(t)+Heaviside(t-offset)*(a*t+x2);
evalf(subs(t = Pi, diff(funkce2, t))); fsolve(diff(funkce2, t)-%, t =
0 .. (1/2)*Pi); offset := %; funkce2 := d*Heaviside(offset-t)*sin(t)
+Heaviside(t-offset)*(a*t+x2); dist := evalf(subs(t = z+Pi, funkce2)-
subs(t = z, funkce2)-50);
> plot([funkce2, -funkce2], t = 0 .. z, coords = polar, size = [800, 1],
numpoints = 4000); sirka = evalf(2*subs(t = z,
funkce2)*(1/1000)+50*(1/1000))*mm;
> evalf(Pi*d+int(sqrt((a*t+x2)^2+a^2), t = (1/2)*Pi .. z)); delka = (2*
%*(1/1000))*mm;
> plotsetup('png', plotoptions = "width=2400,height=1000", plotoutput =
"graf_derivace.png"); plot([Heaviside(-tg-x)*Eys, Heaviside(x)*Eyc,
Heaviside(x+tg)*Heaviside(-x)*Eyf], x = -(3/2)*tg .. (1/2)*tg, axes =
boxed, size = [2400, 1000], thickness = 2, axis = [thickness = 2], font =
["Helvetica", 24], numpoints = 4000); plotsetup(default);

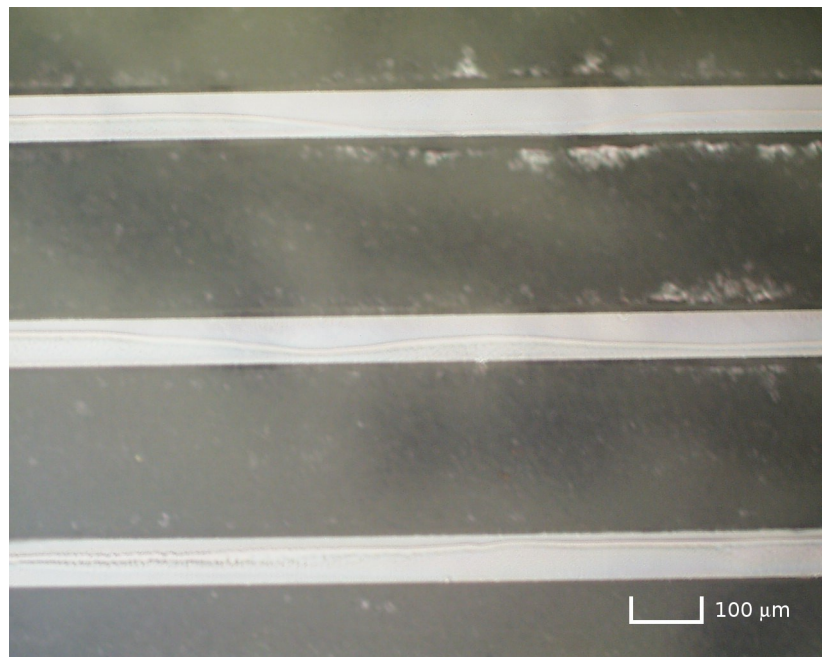
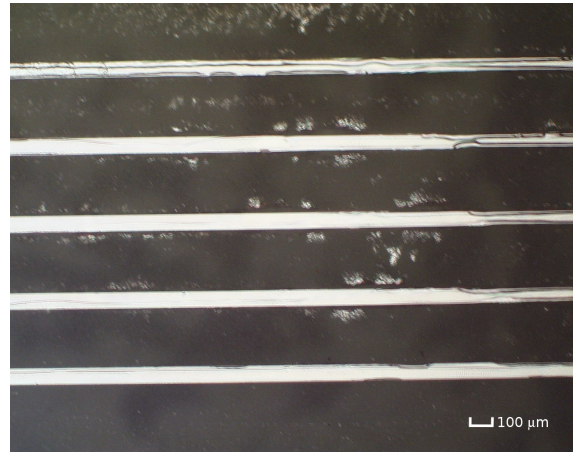
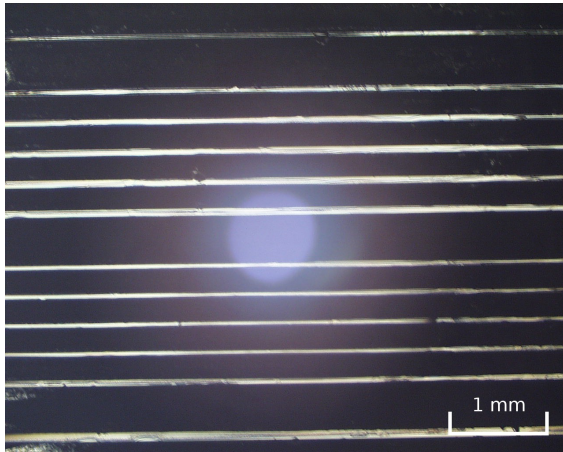
> plotsetup('png', plotoptions = "width=10000,height=10000", plotoutput =
"spiralex.png"); plot([funkce2, -funkce2], t = 0 .. z, coords = polar,
size = [10000, 1], numpoints = 4000, thickness = 12, axes = none, axis =
[thickness = 5], font = ["Helvetica", 40]); plotsetup(default);
> plotsetup('png', plotoptions = "width=2800,height=2400", plotoutput =
"graf_derivace.png"); plot(diff(funkce2, t), t = 0 .. 2*Pi, size = [1200,
1200], thickness = 3, axis = [thickness = 3], font = ["Helvetica", 32],
labelfont = ["Helvetica", 24], labels = ['theta', 'df/'('d'*theta)],
numpoints = 4000, view = [30*Pi*(1/64) .. 38*Pi*(1/64), 500 .. 0]);
plotsetup(default);
> plot(diff(funkce2, t), t = 0 .. 2*Pi, size = [800, 800], thickness = 2,
axis = [thickness = 2], font = ["Helvetica", 24], labelfont =
["Helvetica", 24], labels = ['theta', 'df/'('d'*'theta')], numpoints =
4000, view = [30*Pi*(1/64) .. 38*Pi*(1/64), 500 .. 0]);
> plot([x*t^(1/n), x*(t+Pi)^(1/n)], t = 0 .. 8*Pi); plot([x*t^(1/n),
-x*t^(1/n)], t = 0 .. 8*Pi, coords = polar);
> plot([2*sqrt(t), -2*sqrt(t)], t = 0 .. 8*Pi, coords = polar, size =
[800, 1], numpoints = 4000);
> plot(x*sqrt(t), t = 0 .. 8*Pi, coords = polar);
```

b) Fotodokumentace

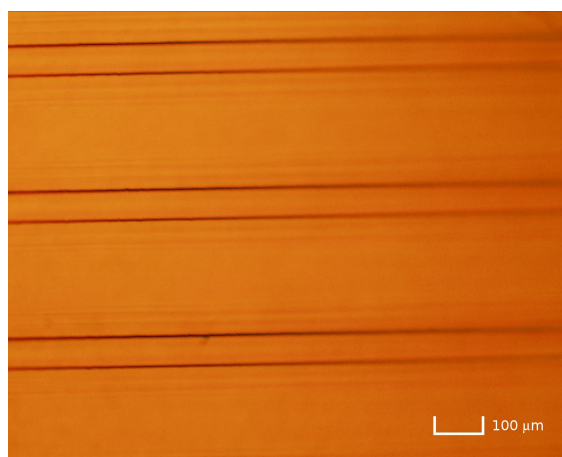
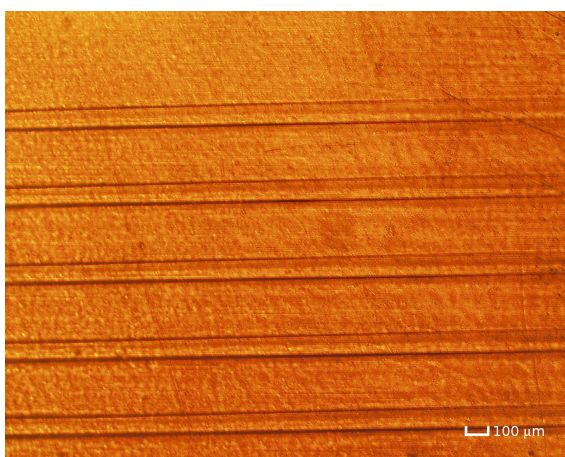
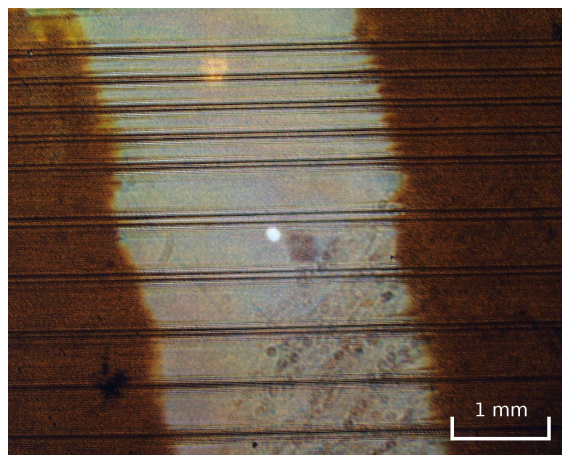
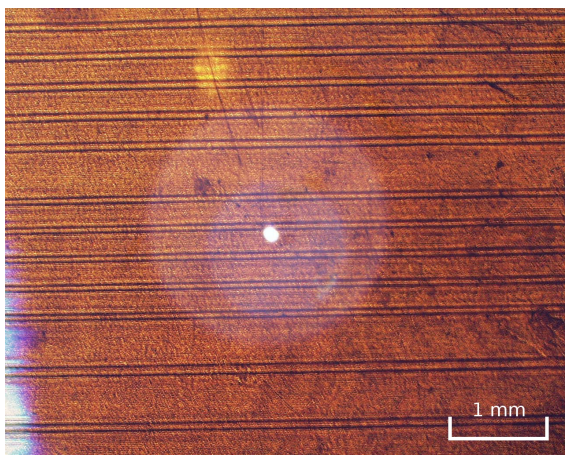
Vzorek 394, EpoCore/EpoClad na substrátu Pyralux.



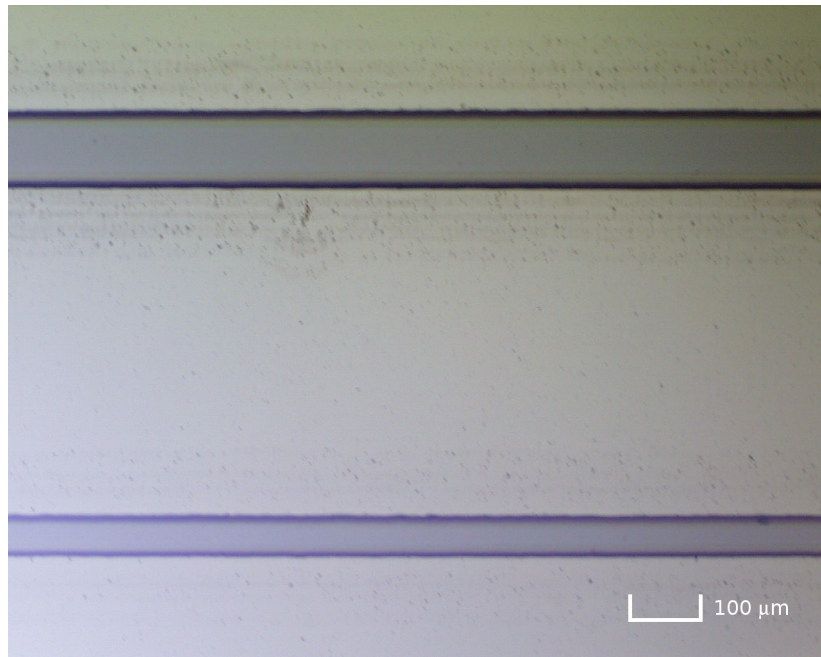
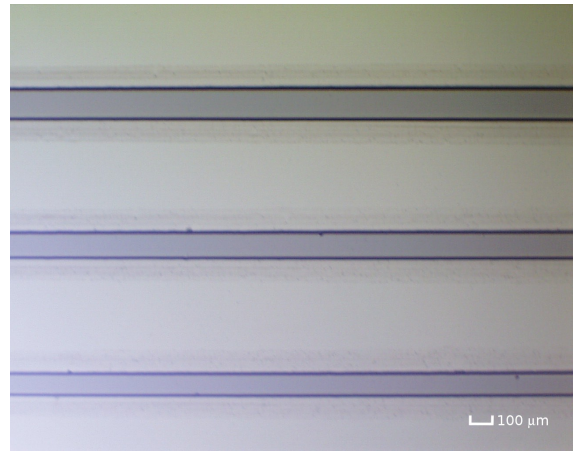
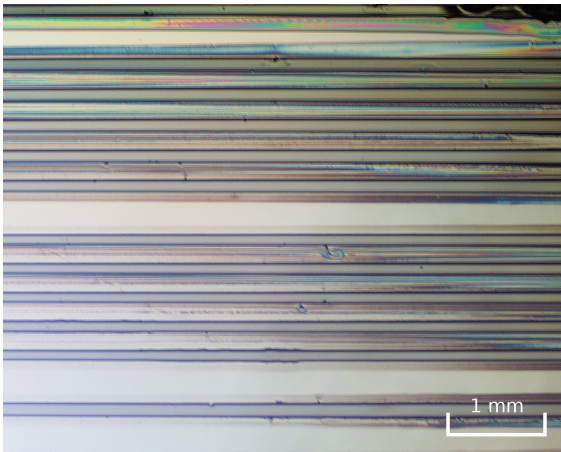
Vzorek 395, EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4.



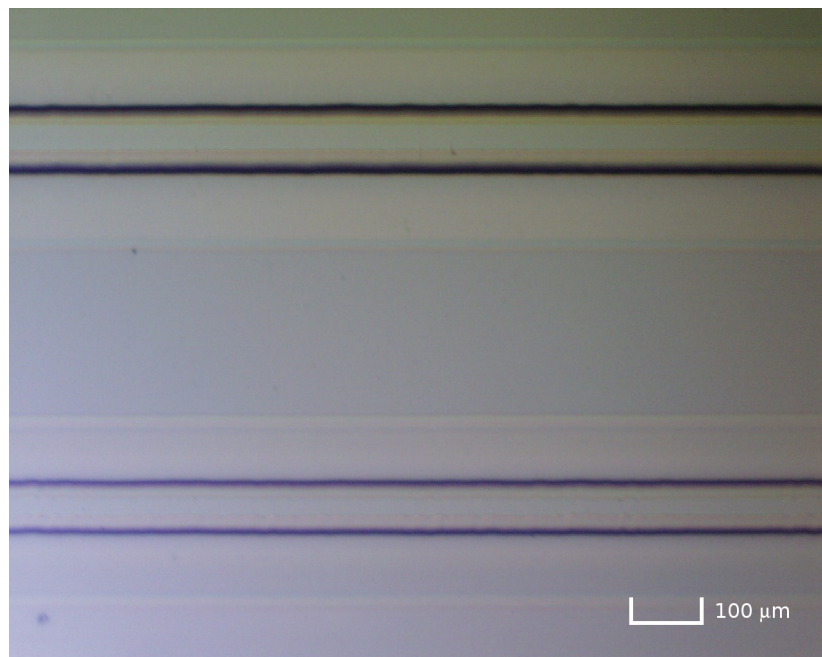
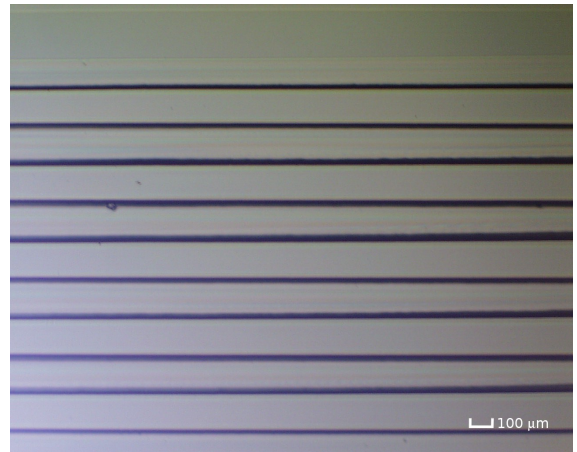
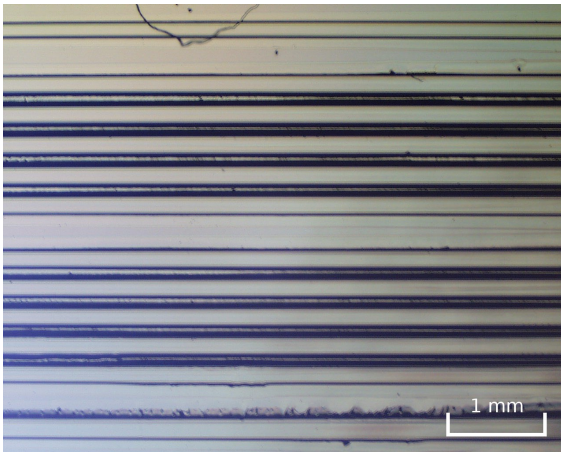
Vzorek 396, EpoCore/EpoClad na substrátu Pyralux.



Vzorek 399, EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4.

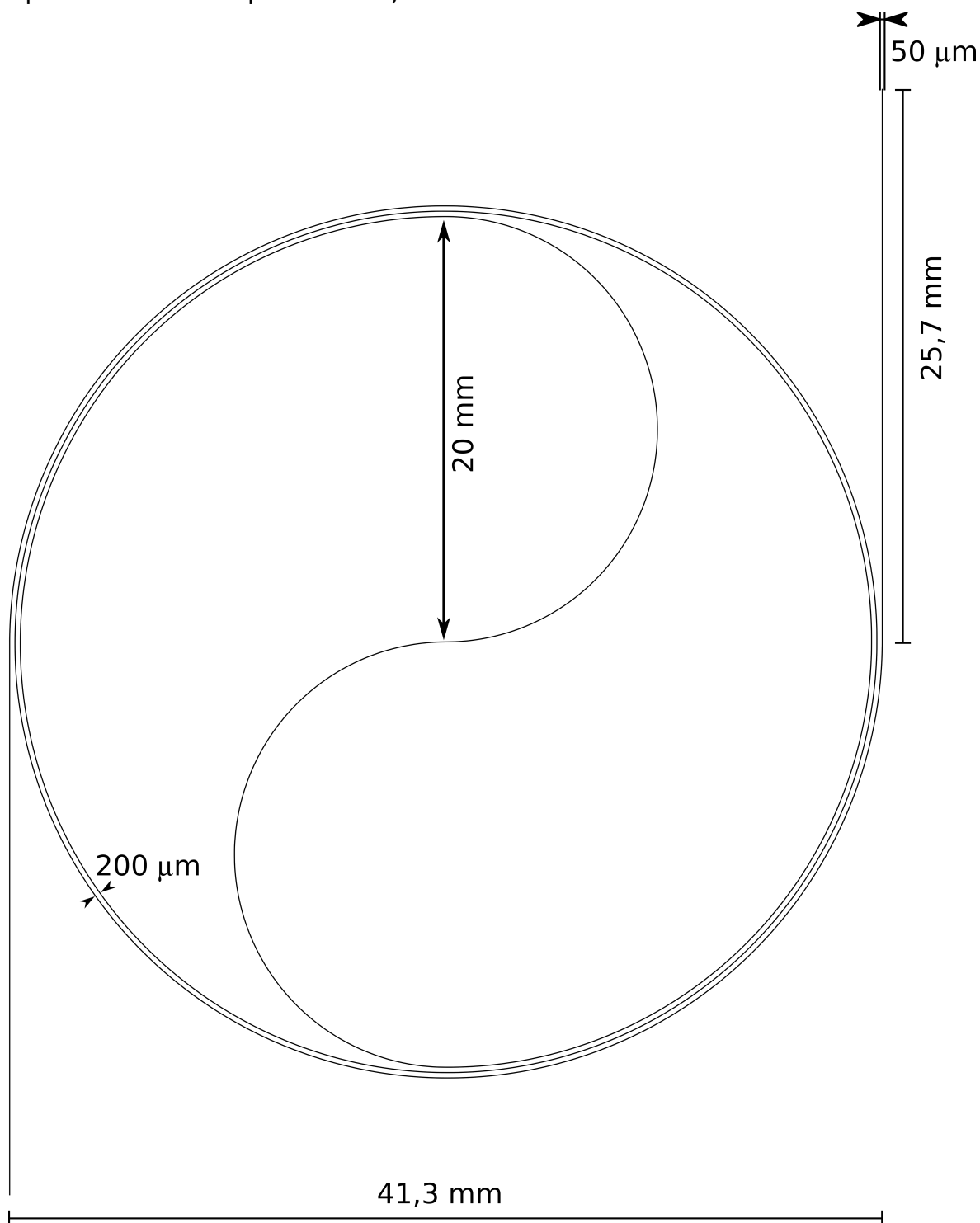


Vzorek 400, EpoCore/EpoClad na substrátu FR-4.

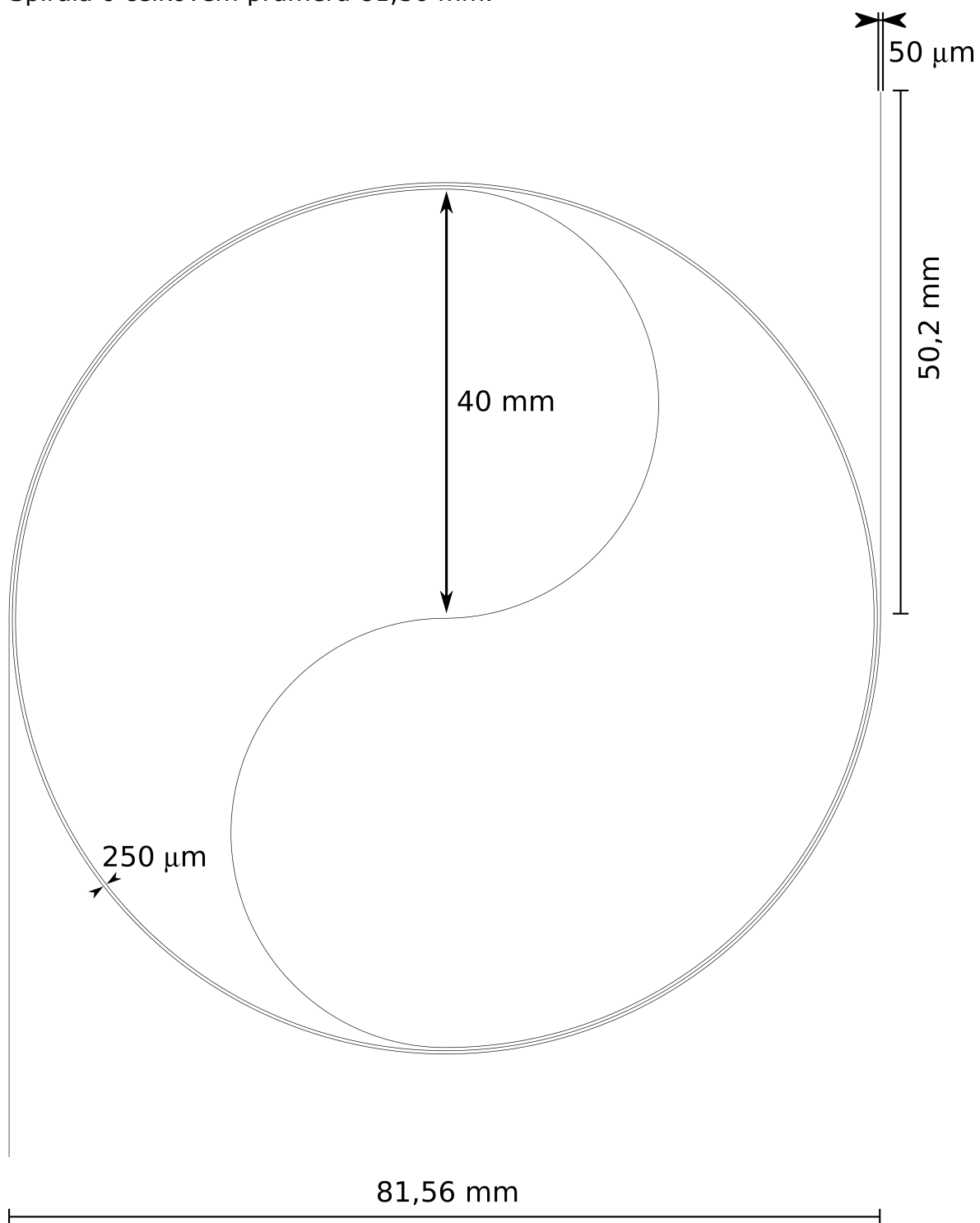


c) Technické výkresy navržených Fermatových spirál

Spirála o celkovém průměru 41,3 mm.



Spirála o celkovém průměru 81,56 mm.



d) Seznam příloh uložených na CD

- Diplomová práce ve formátu PDF
- Fotografie vyrobených vzorků
- Zdrojové kódy používané pro výpočty
- Výsledky měření ze zařízení Metricon
- Technické výkresy Fermatových spirál