

# Úloha č. 8 Vlastnosti optických vláken a optické senzory

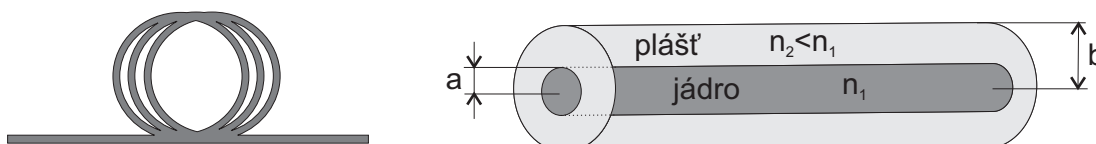
Optické vlákna patří k nejmodernějším přenosovým médiím. Jejich vysoká přenosová kapacita a nízký útlum jsou hlavní výhody, které je staví před klasické kabelové a rádiové komunikační prostředky. Nejdůležitější aplikací vláken je přenos optické informace, ale stále více uplatnění nacházejí optická vlákna i v řídicí a regulační technice jako různé senzory. Vláknové optické senzory mají několik zásadních výhod oproti klasickým elektrickým sensorům [1, 2]:

- pasivní prvky mají dlouhou životnost (více než 20 let)
- senzor je součástí optického vlákna a tak lze signál přenášet na velice dlouhé vzdálenosti
- nedochází k interferenci s elektromagnetickým zářením (rušení apod.), senzor tak lze použít v prostředí, kde klasické senzory selhávají
- mohou se multiplexovat tzn. jedno vlákno lze použít na detekci více proměnných nebo ve více bodech, dochází tak k snižování nákladů při sledování složitějších systémů
- nevyužívají elektrický signál a tak jsou mnohem bezpečnější při poruše kabelu

V této úloze si vyzkoušíte práci s optickým vláknem a zjistíte jak se chová optické vlákno pokud ho budete různým způsobem ovlivňovat.

## 1 Teoretický úvod

Zde si uvedeme stručnou charakteristiku optických vláken [3]. V dnešní době se vyrábějí optická vlákna především z materiálů na bázi skla ( $SiO_2$ ) a z průhledných polymerů. Optické vlákno je zkonstruováno ze dvou základních částí z jádra a pláště viz. obr.1. Šíření optického záření ve vlákně je založeno na totálním odrazu záření ve vlákně, z tohoto důvodu musí být index lomu jádra větší než index lomu pláště. Podle rozměrů a geometrie jednotlivých částí optického vlákna dělíme vlákna na mnohamódové (MM), jednomódové a gradientní optická vlákna viz. obr.2. V tab.1 můžete vidět průměry běžně užívané pro jednotlivé typy vláken. Více módová vlákna jsou vhodná pro propojování krátkých úseků, na kterých se nepoužívají vysoké přenosové rychlosti, protože tyto vlákna mají velkou módovou disperzi, která neumožňuje použít tyto vlákna na vysoké přenosové rychlosti nebo dlouhé vzdálenosti.



Obrázek 1: Optické vlákno je kruhový vlnovod s vnitřním jádrem a vnějším pláštěm

	rozměry [ $\mu m$ ]	
	jádro	plášť
jednomódové v.	8.3-10	125
mnohamódové v.	50-100 (62.5)	125 - 300

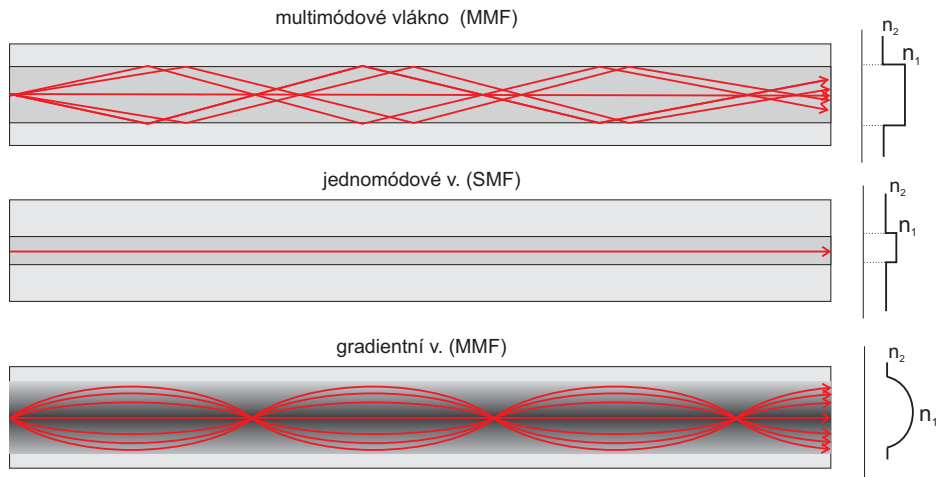
Tabulka 1: Nejčastější rozměry optických vláken

Popíšeme si zde optické vlákno pomocí geometrické optiky. Nejpoužívanějším parametrem pro optická vlákna je **Numerická apertura (NA)**. Určuje úhel pod kterým je možné do vlákna navázat vedené módy (paprsky) obr.3.

$$NA = n_a \sin(\theta_a) \quad (1)$$

nebo

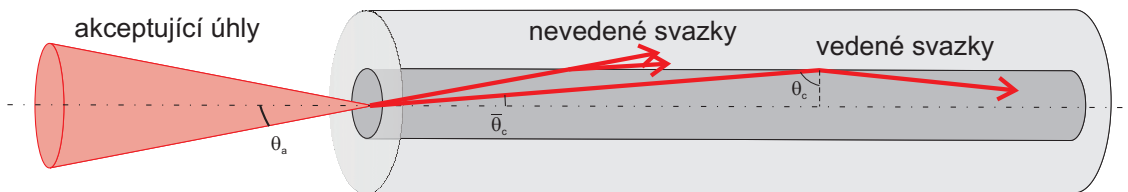
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$



Obrázek 2: Geometrie typických optických vláken a jejich rozložení indexu lomu; zobrazení paprsků šířících se jednotlivými vlákny.

Na obr.3 je vidět jak se světlo šíří ve vlákně. Úhlem  $\bar{\theta}_c$  je označen mezní úhel šíření a  $\theta_c$  označuje mezní úhel na rozhraní jádra a pláště. Mezní úhly vymezují oblasti pro vedené paprsky. Výpočet mezního úhlu šíření:

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}; \cos(\bar{\theta}_c) = \frac{n_2}{n_1}; \sin(\bar{\theta}_c) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (3)$$



Obrázek 3: Přípustné úhly dopadajícího svazku  $\theta_a$  do vlákna. Paprsky z přípustného kužele jsou vedeny ve vlákně pomocí totálního odrazu.

Pro buzení optických vláken je třeba znát, jaký úhel na čele vlákna odpovídá úhlu šíření ve vlákně  $\bar{\theta}_c$ . Výpočet vstupního úhlu:

$$n_a \sin(\theta_a) = n_1 \sin(\bar{\theta}_c), \quad (4)$$

pokud je  $n_a$  index lomu vzduchu ( $n_a = 1$ ) potom

$$\sin(\theta_a) = n_1 \sin(\bar{\theta}_c)$$

Světlo do vlákna se musí navázat pod úhlem menším než je mezní úhel. Pokud paprsky dopadají pod větším úhlem než je  $\theta_a$ , nejsou vláknem vedeny a jsou z vlákna rychle vyvázány.

## Normalizovaná frekvence

Normalizovaná frekvence zohledňuje kmitočet, velikost vlákna a materiál vlákna. Tato frekvence určuje, zda-li je vlákno jednovidivé nebo více vidové. Pokud je vlákno jednomódové, tak musí platit  $V \leq 2.405$ . Normalizovaná frekvence je dána vztahem

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA, \quad (5)$$

kde  $a$  je průměr jádra vlákna.

## Rozdělení módů ve vláknech

Módy jsou vlastně ustáleným řešením vlnové rovnice ve vláknech. Energie, která se do vlákna naváže se přerozdělí tak, aby se mohla vláknem šířit a aby jednotlivé módy splňovali podmínku stojatých vln. Módy v optickém vláknech se dají rozdělit do třech druhů:

- **Vedené módy** - splňují podmínku totálního odrazu. Tyto módy jsou vedeny vláknem a na jejich vyvázání je zapotřebí velký ohyb vlákna.
- **Vyzařující módy** - vstupují do vlákna pod úhlem větším než je numerická apertura. Nejsou vedeny jádrem a dochází tak ke ztrátě energie.
- **Tunelující módy** - jde o nestabilní módy, které se snadno "přelévají" mezi vedenými a vyzařujícími. Dochází zde snadno k vyvázání z vlákna.

Pomocí normované frekvence lze spočítat počty módů vedených ve vláknech. Pro step index vlákno (obr.2) je počet módů dán vztahem

$$M_{SI} = \frac{V^2}{2} \quad (6)$$

a pro gradientní vlákno (obr.2)

$$M_{GI} = \frac{V^2}{4}. \quad (7)$$

Tyto úvahy o počtu módů ve vláknech nám také ukazují, jak lze jejich počet ovlivňovat. Jednou z možností je měnit vlnovou délku ve vláknech.

## Ztráty v optických vláknech

Ztráty ve vláknech se dají rozdělit takto:

- **Ohybové ztráty** - jsou způsobeny ohybem vlákna, porušení totálního odrazu
- **Rozptylové ztráty** - jsou dány výrobou. Vznikají na nečistotách a fluktuacích mřížky.
- **Absorpční ztráty** - přeměna ztrát na teplo
- **Disperzní ztráty**

Základní rovnicí útlumu popisující ztráty optického vlákna je

$$A = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (8)$$

Útlum optického vlákna vyčíslíme ze ztrát výrazem

$$A(dB) = 10 \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right). \quad (9)$$

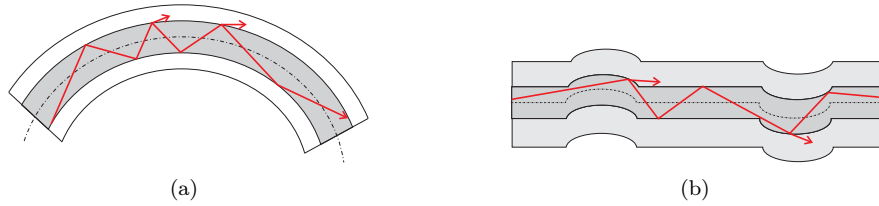
Definuje se také **měrný útlum**, který je vztažený na jednotku délky vlákna

$$a(dBkm^{-1}) = \frac{A(dB)}{L} = -\frac{1}{L} \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right). \quad (10)$$

## Ohybové ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny porušením podmínky totálního odrazu viz. obr.4. Paprsek dopadá pod větším úhlem a láme se do pláště. Další jev, který k této ztrátě přispívá je fotoelastický jev. Tento jev mění index lomu vlákna, protože je funkcí tlaku. Tímto jevem se také mění podmínky pro totální odraz. Ohybové ztráty lze rozdělit na

- Makroohyby
- Mikroohyby



Obrázek 4: a) Makroohyby a porušení podmínky totálního odrazu; b) Mikroohyby jsou ohyby srovnatelné s průměrem vlákna a dochází opět k porušení podmínky totálního odrazu.

Mikroohyb má zakřivení srovnatelné s průměrem vlákna viz.obr.4b.

Ohybové ztráty se dají vyjádřit koeficientem ohybových ztrát  $\alpha_r$

$$\alpha_r = c_1(R) \exp(-c_2(R)R), \quad (11)$$

kde  $R$  je poloměr zakřivení a koeficienty  $c_{1,2}$  jsou konstanty nezávislé na zakřivení. Pro 100% ztrátu energie ve vlákně se zavádí výraz kritický poloměr zakřivení. Pro kritický poloměr vícemódových vláken platí:

$$R_c \cong \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}}. \quad (12)$$

Pro takové typy vlákna je kritický poloměr  $R_c \cong 100 - 200 \mu m$ , což je v praxi takřka nedosažitelné a spíš vlákno praskne. Pro kritický poloměr jednomódového vlákna s step index (SI) rozložením indexu lomu:

$$R_c \cong \frac{20\lambda}{\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \cdot \frac{1}{2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c}}, \quad (13)$$

kde  $\lambda_c$  je mezní vlnová délka pro vedení ve vlákně.

Jednomódové vlákna jsou náchylnější na ohybové ztráty, protože část energie se šíří v plášti vlákna (40%), a proto není problém tuto energii vyvázat ohybem. V plášti se vlna šíří jako evanescentní. Mikroohyby je velice těžké spočítat a většinou se určují experimentálně. Obecně však platí, že čím větší vlnová délka tím větší ztráty.

## Rozptylové ztráty

Tyto ztráty lze rozdělit do 3 skupin:

1. Rayleigho rozptyl - vzniká tepelnými kmity mřížky
2. Mieův rozptyl - vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou (mikroskopické bubliny, kolísání průměru jádra, napětí ve vlákně, nečistoty apod.)
3. Rozptyl na nečistotách - rozptyl na nečistotách větších než vlnová délka

## Absorpce vláken

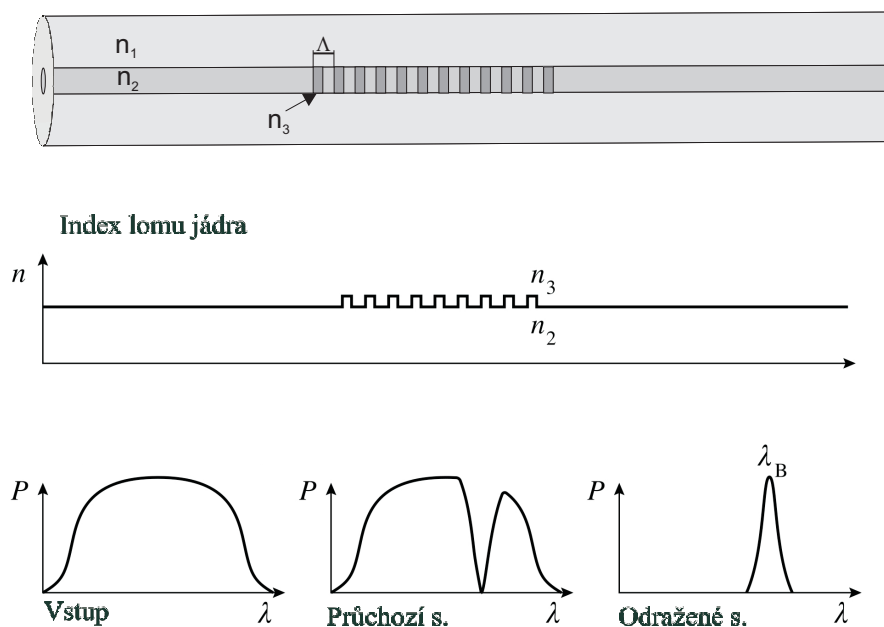
1. vlastní absorpce - absorpce v infračervené a ultrafialové oblasti a absorpce materiálem  $SiO_2$
2. příměsová absorpce - největší vliv mají na svědomí vodní ionty (OH). Příměs OH iontů vytváří ve skle mikrotrhliny, proto jsou skleněné materiály náchylné na praskání. Dalšími příměsemi mohou být ionty kovů, které taky zvyšují absorpci vlákna (např. ionty  $Fe^{2+}$  způsobují na vlnové délce 1100nm útlum  $0.68 [dB \cdot km^{-1}]$  )

## Disperzní ztráty

- Módová disperze - dochází k rozšíření optického pulsu, jednotlivé módy se ve vlákně šíří různou rychlostí
- Chromatická disperze - za chromatickou disperzi může použitý materiál, disperze je závislá na použité vlnové délce

## FBG - optické vlákno s Braggovskou mřížkou

V dnešní době jsou velice populární vláknové senzory s vypálenou braggovskou mřížkou na několika centimetrech vlákna [4, 5]. Tato mřížka je vyrobena pomocí UV záření (excimerový laser) a interference tohoto záření na daném místě vlákna nebo osvětlení vlákna skrz masku. Ve vláknech dochází k permanentní změně indexu lomu a vyrobí se tak příslušná mřížka. Funkce tohoto prvku je zobrazena na obr.5. Tato mřížka je velice citlivá na ohyb, pnutí, tlak a teplotu a lze jí použít v řadě aplikací.



Obrázek 5: Princip FBG vlákna

## 2 Zadání úlohy

### Cíle úlohy:

Seznámit se s principem optických vláknových senzorů a na demonstračních úlohách z plastových vláken provést jednoduchá měření za účelem ověření principů.

### Pomůcky:

optické vlákna (bez konektorů, s konektory), detektor optického výkonu, kolimační optika, kroužky různých průměrů, úhломěr, neutrální filtry, voda, líh

### Postup měření:

Proveďte tyto měření:

#### úkol č.1:

Navážte záření He-Ne laseru do vlákna pomocí fokačního objektivu a mikroposuvného stolku. Naměřte optický výkon prošlý vláknem a studujte vliv navázání.

Při navazování optického záření dochází k různým typům ztrát. Častým důvodem ztrát je nepřizpůsobení numerické apertury vstupujícího svazku a optického vlákna (rozdíl numerických apertur mikroobjektivu a optického vlákna).

Další možností jsou ztráty z důvodu nepřizpůsobení průměru jádra vlákna. K těmto ztrátám dochází, má-li jádro vlákna menší průměr než stopa dopadajícího optického svazku. V případě jednomódových

vláken je žádoucí, aby příčné rozložení intenzity dopadajícího svazku bylo shodné s intenzitním profilem vedeného záření ve vlákne. Tato podmínka je částečně splněna, předpokládáme-li, že intenzitní profil módu  $HE_{11}$  je gaussovský, stejně jako profil fokuzovaného laserového svazku. Tyto ztráty, stejně jako ztráty nepřizpůsobením NA se dají částečně eliminovat volbou vhodného mikroobjektivu.

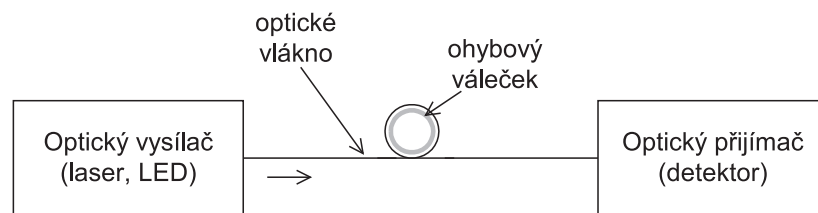
Fresnelovy ztráty (odraz) vznikají všude na rozhraních optických prostředí s rozdílným indexem lomu. Je tedy příčinou ztrát nejen při navazování optického výkonu do vlákna, ale také při spojení dvou vláken s rozdílnými indexy lomu.

Odchylka osy jádra optického vlákna a vstupujícího paprsku je z hlediska ztrát kritická, zvláště při použití jednomódových vláken (průměr jádra  $10\mu m$ ). Osové odchylky mohou být úhlové nebo laterální. Ztráty odchylkou os je možno v laboratorních podmínkách minimalizovat použitím přesných mikroposuvů. Obecně je nezbytné zajistit, aby koncové plochy vlákna byly čisté a opticky hladké. Často je také důležité, aby čelo vlákna bylo přesně pod úhlem  $90^\circ$  k ose vlákna.

### úkol č.2:

Změřte vliv ohybů na útlum vlákna. Ohyb optického vlákna vede k přidavným ztrátám optického záření, a tím k zvětšení jeho útlumu.

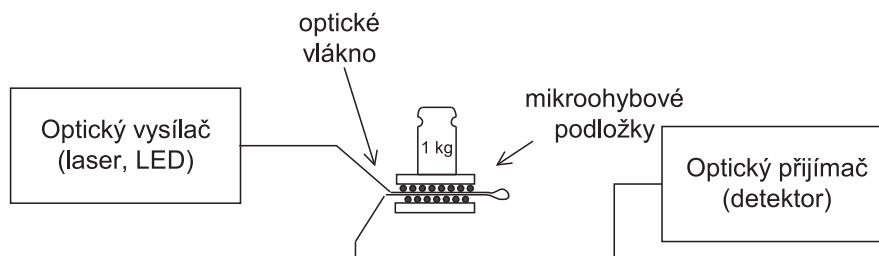
Při ohybu vlákna se mění úhel dopadu paprsků na rozhraní jádra a pláště. V důsledku toho některé paprsky už nesplňují podmínku totálního odrazu a vyšší vidy jsou vyzařovány z jádra vlákna a dále pak z vlákna ven. Proto je při instalaci optického kabelového rozvodu nutné znát kritický poloměr ohybu vlákna, popř. kabelu, a dbát na to, aby všechny ohyby tento poloměr přesahovaly. Této závislosti ohybu vlákna se využívá ve vidových filtrech, nebo u různých amplitudových optických senzorech pro snímání otočení, polohy předmětů atd. Propojení měřící soupravy proveďte podle obr.6.



Obrázek 6: Měření vlivu ohybů na výkon procházející optickým vláknem

### úkol č.3:

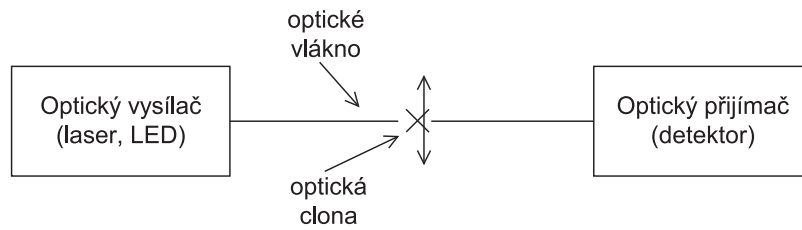
Změřte vliv mikroohybů na útlum vlákna. Mikroohyby znamenají periodicky se opakující změnu zakřivení osy optického vlákna s malou amplitudou ohybu. Vznikají při kabelování optického vlákna a mohou značně zvětšit jeho útlum. Naopak principu mikroohybů se využívá v některých amplitudových optických vláknových senzorech. Propojte měřící soupravu podle obr.7.



Obrázek 7: Měření vlivu mikroohybů na výkon procházející optickým vláknem

### úkol č.4:

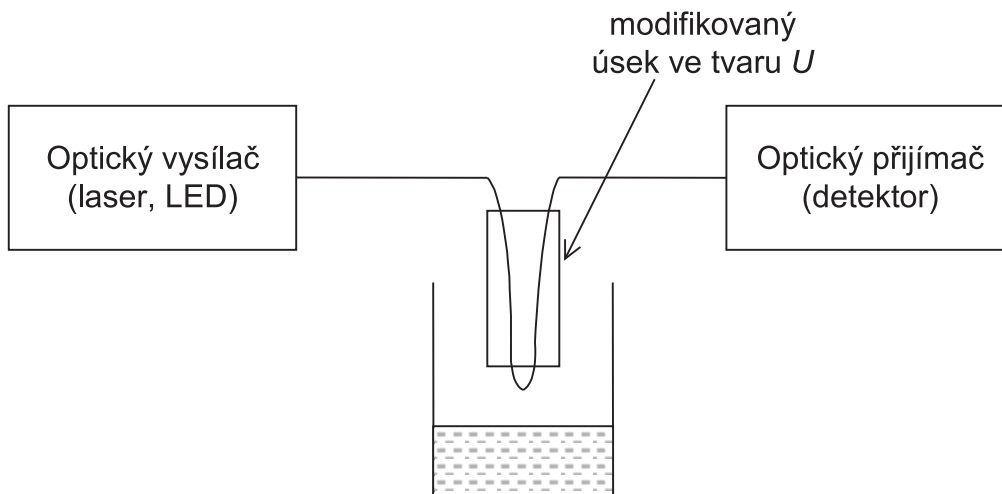
Změřte transmisní senzor. V této úloze se demonstruje vliv polohy předmětu v optické dráze mezi dvěma vlákny na útlum přenášeného záření. Principem se jedná o amplitudový senzor transmisního typu. Uspořádání měření popojte podle obr.8.



Obrázek 8: Měření vlivu neutrálního transmisního filtru na výkon procházející optickým vláknem

### úkol č.5:

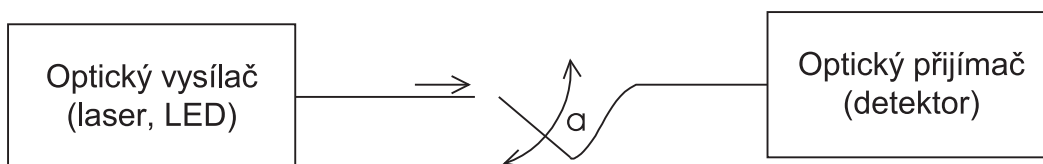
Použijte senzor hladiny kapaliny a určete přenesený výkon senzorem v jednotlivých kapalinách. Některé amplitudové optické vláknové senzory využívají jako čidla modifikované optické vlákno (vlákno, které má upravené geometrické rozměry nebo rozložení indexu lomu). Mezi takové modifikace patří i úsek vlákna ve tvaru U. Ohyb vlákna o 180° s velmi malým poloměrem ohybu způsobuje značné ohybové ztráty závislé na hodnotě indexu lomu okolního prostředí. Na tomto principu jsou založeny senzory hladiny kapaliny. Uspořádání demonstrativní měřící úlohy je na obr.9.



Obrázek 9: Měření senzorem hladiny

### úkol č.6:

Změřte vyzařovací charakteristiku vlákna - numerickou aperturu. Numerická apertura se nejčastěji určuje z vyzařovací charakteristiky (fotodetektor rotuje kolem čela vlákna). Šířka vyzařovací charakteristiky se určí z poklesu této závislosti na 5% maximální hodnoty. Experimentální uspořádání je na obr.10. Ze znalosti úhlů se pak určí NA ( $NA = \sin\alpha$ )



Obrázek 10: Měření numerické apertury optického vlákna

## 3 Požadované výsledky

1. Naměřte optický výkon prošlý vláknem a studujte vliv navázání.

2. Sledujte závislost útlumu vlákna jednak na poloměru ohybu, jednak na délce ohybu. Z naměřených hodnot vypočtete přídatný útlum vlákna (9). Závislost vyneste graficky.
3. Sledujte závislost útlumu vlákna pro různé hodnoty závaží, výsledky písemně okomentujte.
4. Příčnými posuvy pohybujte clonou a sledujte závislost hodnoty útlumu na poloze . Výsledek, měřený optický výkon  $P_x$  a relativní úroveň výkonu, zaznamenejte do tabulky a závislost vyneste do grafu. Stejně měření proveďte se soustavou neutrálních filtrů (1-7).
5. Sledujte závislost hodnoty útlumu na prostředí, ve kterém je umístěn senzor (láh, voda, vzduch). Do tabulky запиšte naměřené hodnoty výkonu a příslušné hodnoty indexu lomu jednotlivých kapalin.
6. Změřenou vyzářovací charakteristiku vyneste do grafu v normovaném tvaru a vypočtete numerickou aperturu optického vlákna.
7. Najděte 3 optické senzory používané v praxi - uveďte aplikaci a webovské stránky.

Na závěr proveďte diskusi měření.

## Reference

- [1] Francis T.S. Yu and Shizhuo Yin. *Fiber Optic Sensors*. CRC Press; 1 edition, 2002.
- [2] <http://www.opticalfibersensors.org/>.
- [3] Ing.Leoš Maršálek. Optická vlákna ver.2.1.3. <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>, 2006.
- [4] <http://www.smartfibres.com/>.
- [5] <http://www.fbgs-technologies.com/pagina.php?parid=676>.