

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Nízkoztrátové optické světlovody umožňují dálkové komunikace. Potíže nastávají s vysokou citlivostí vláken na vnější vlivy (fázová citlivost, ztráty na mikroohybech, vidový šum, apod.) a jsou hledány cesty jak tyto ztráty minimalizovat.

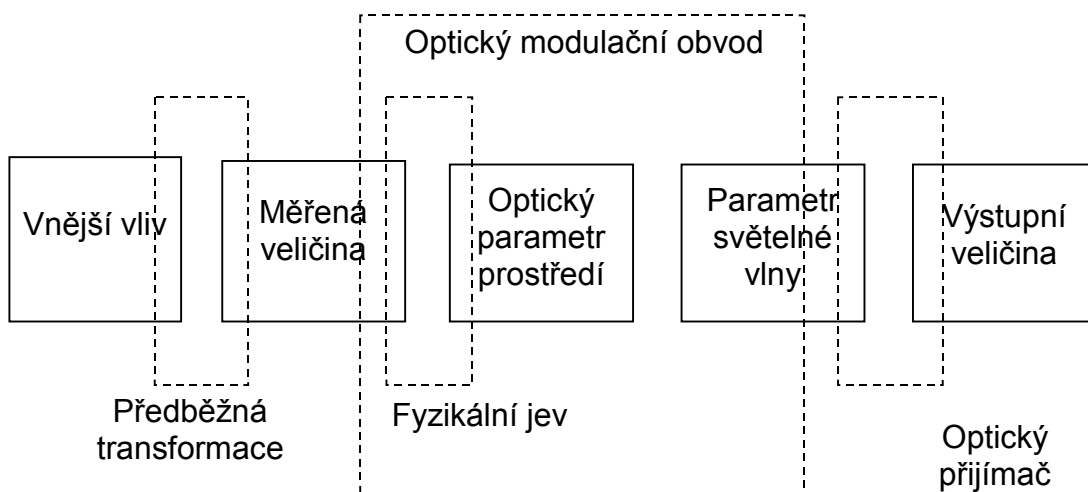
Na druhé straně je však možné tyto výjimečné funkce vláken využít pro různé typy optických čidel.

Vysoká citlivost optických vláken jako senzorů pro účely měření je dána možností velké interakční délky světla s uvažovanou fyzikální proměnnou.

KLASIFIKACE A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ (OVS)

Všechny OVS mají na vstupu zdroj světla (LED, polovodičový laser nebo jiný laserový zdroj záření), který injektuje spojitý nebo pulsní optický signál do optického vlákna. Na výstupu OVS je fotodetektor (PIN dioda, lavinová dioda), který přijímá senzorem modulovaný optický signál.

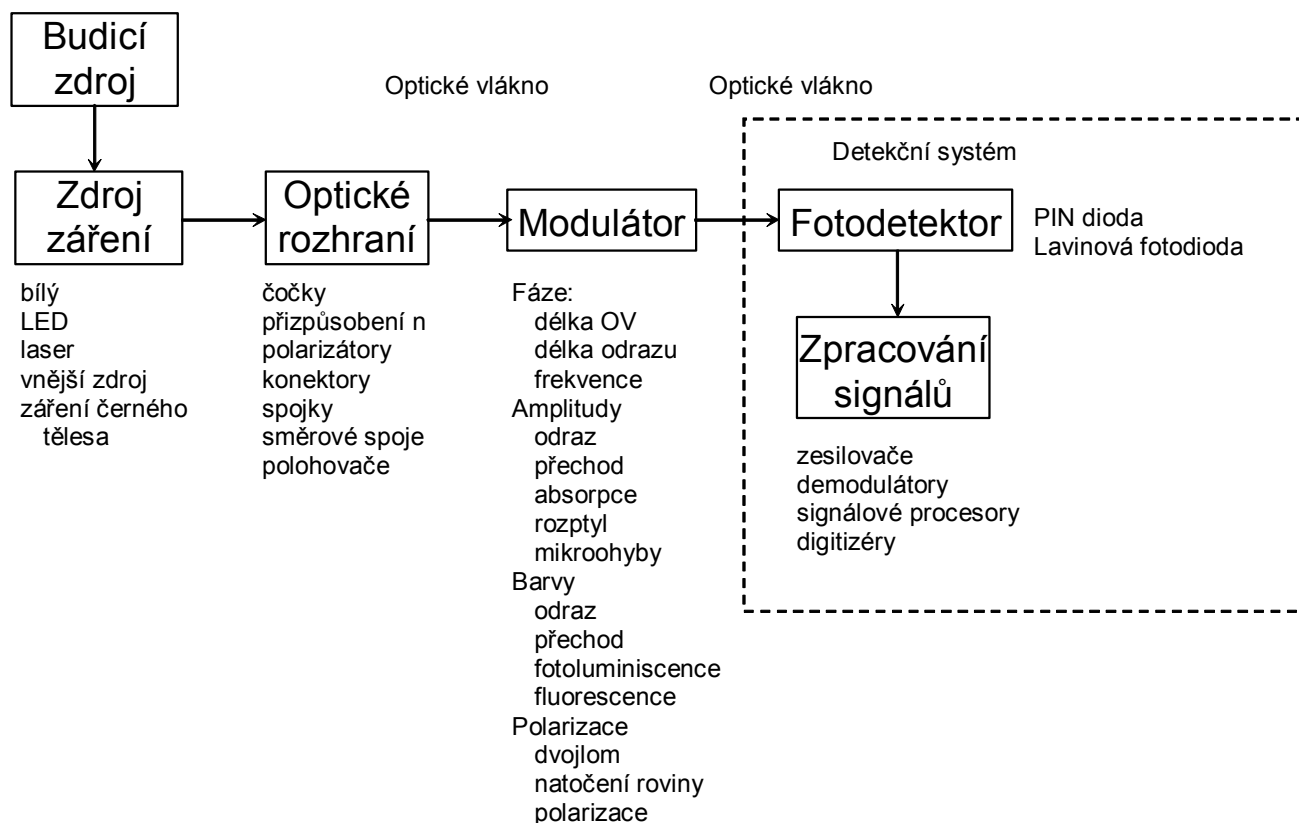
Podstatou OVS je (obráz. 1) fyzikální (optický) jev, který je vyvolán snímanou veličinou mezi zdrojem a detektorem, a který způsobuje změnu (modulaci) přenášeného optického signálu odpovídající snímané veličině.



Obr. 1: Transformace veličin v optických vláknových senzorech

Optické vláknové senzory

Hlavní konstrukční prvky OVS jsou znázorněny na Obr. 2. Souvislosti mezi optickým vláknem a snímanou fyzikální veličinou jsou uvedeny v tabulce.



Obr. 2: Hlavní konstrukční prvky.

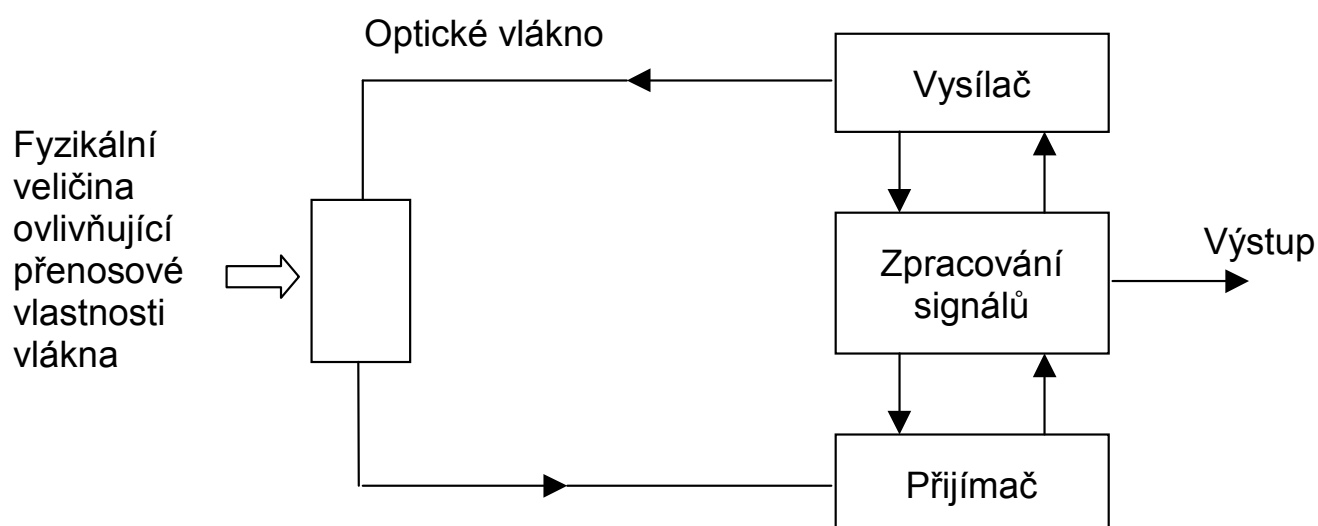
Tab. 1: Souvislost vlastností optického vlákna a snímané veličiny

Vnější působení	Odezva optického vlákna
Mechanická síla	Indukovaný dvojlom
Mechanický tlak	Piezoelektrický jev
Ohyb	Piezoabsorpce
Změna hustoty	Luminiscence
Elektrické pole	Elektro-optický jev
Dielektrická polarizace	Elektrochromatismus
Elektrický proud	Elektroluminiscence
Magnetické pole	Magneto-optický jev
	Faradayův jev
Magnetická polarizace	Magnetoabsorpce
Teplota	Tepelná změna indexu lomu
	Absorpční vlastnosti nebo fluorescence
	Termoluminiscence
Fotoelektrická emise	Poruchy optického vlákna vedoucí ke změně indexu lomu a absorpčních vlastností
Rtg záření, záření γ	Radiační luminiscence
Změny chemického složení	Změny indexu lomu a odrazových vlastností působením chemických procesů, chemoluminiscence

Pozn. Přímou jsou ovlivněny index lomu vlákna, jeho izotropie, tlumení, fluorescence a některé kombinace těchto veličin.

Optické vláknové senzory

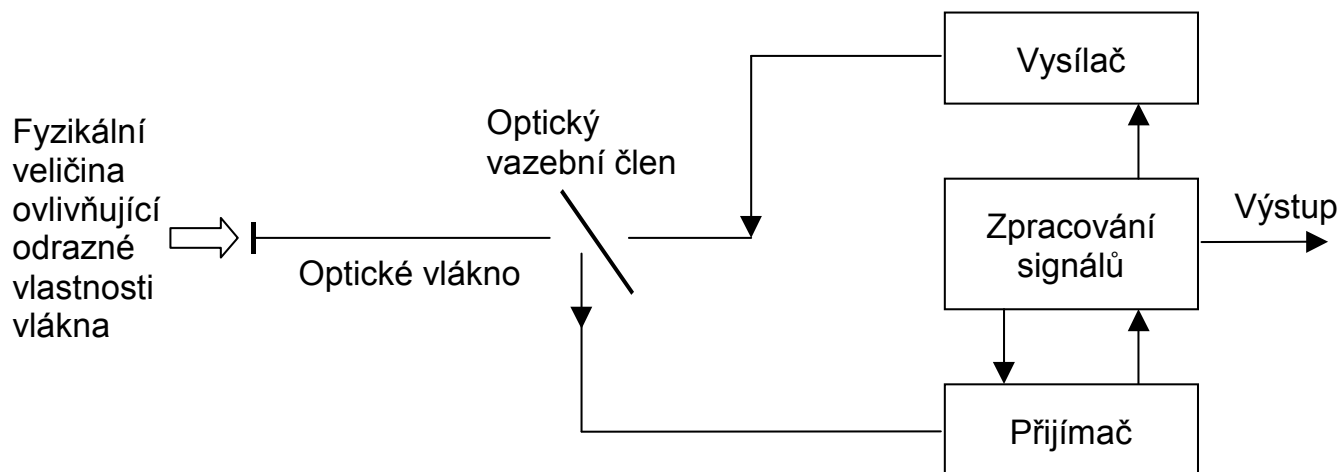
Optický vláknový senzor nazýváme **přenosový** (Obr. 3), pokud je možno fyzikálně rozlišit vstupní a výstupní optické vlákno. Senzor působí v tomto případě jako pasivní převodník uvnitř smyčky optického vlákna a způsobuje modulaci (odpovídající měřené fyzikální veličině) optického signálu, přenášeného optickým vláknem.



Obr. 3: Základní zapojení přenosového OVS

Optické vláknové senzory

Optický vláknový senzor nazýváme **reflexní** (Obr. 4), pokud není možno fyzikálně rozlišit vstupní a výstupní optické vlákno. Senzorem šířící se optický signál se po modulaci a odrazu šíří stejným optickým vláknem k fotodetektoru.



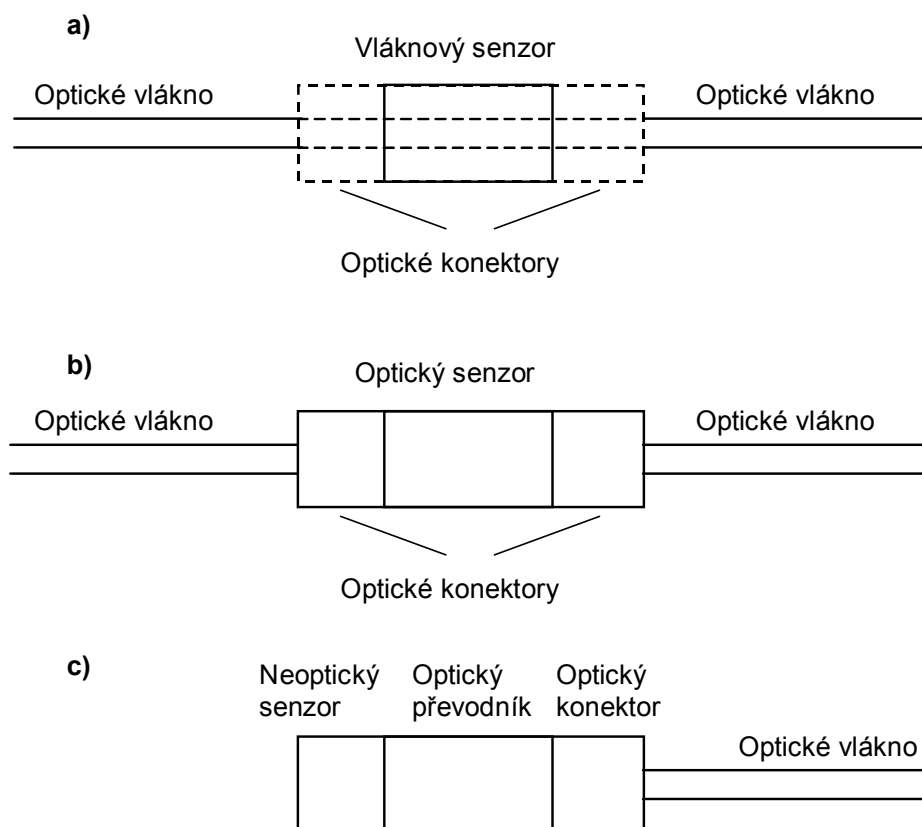
Obr. 4: Základní zapojení reflexního OVS

Optické vláknové senzory je obecně možné rozdělit do dvou skupin:

1. OVS, ve kterých se optické vlákno používá jako citlivý prvek (senzorový prvek). Využívá se vliv snímané fyzikální veličiny na přenosové vlastnosti optického vlákna, přičemž se mění intenzita, fáze a polarizační stav přenášeného optického signálu.
2. OVS, ve kterých se optické vlákno používá jako prvek vstupu - výstupu optického signálu. Modulace optického signálu se provádí mimo optické vlákno, proto musí být použita optická vlákna minimálně citlivá na vnější vlivy a nesmí ovlivňovat vlastnosti přenášeného optického signálu. Do této skupiny OVS je možné při určité míře zobecnění zařadit i různé měřicí přístroje (interferometry, Dopplerovy anemometry, měřiče vibrací, apod.), v kterých optická vlákna umožňují měření vzdáleností, rychlostí, apod.

Optické vláknové senzory

Na Obr. 5 jsou schématicky znázorněny 3 typy konstrukcí OVS. Obr. 5a představuje tzv. vláknově optickou konstrukci OVS, která využívá vlákno jako optického prvku. Na Obr. 5b,c jsou konstrukce OVS, které využívají optické vlákno jen jako prvek vstupu - výstupu optického signálu. OVS na Obr. 5b využívá optický jev v prostředí mimo optické vlákno, OVS na Obr. 5c využívá neoptický fyzikální jev a optické vlákno se používá jen na přenos signálu.



Obr.5: Konstrukce OVS:

- a) vláknově optická
- b) optická
- c) neoptická

ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ PODLE KONSTRUKCE

MODULACE SVĚTLA			
V optickém vlákně			
	Základ konstrukce	Modulace	Snímané veličiny
	Standardní OV	fáze	teplota, mechanické napětí, úhlová rychlost
	OV se speciálním krytím	fáze	tlak, akustické signály, mg. pole, el. proud
	OV pevně spojené s citlivým prvkem	fáze, polarizace	mg. a el. pole, akustické signály
	OV se speciálním složením	amplitudy, polarizace, vlnové délky	radioaktivní záření, mg. pole, teplota
	Mikroohyby OV Uzavřená smyčka OV	amplitudy časového rozšíření pulsů	tlak, akustické signály teplota, radioaktivní záření

Mimo optické vlákno			
Přenosové OVS	Vzájemně pohyblivé konce OV	amplitudy	akustické signály, tlak, zrychlení
	Vazba mezi konci OV	amplitudy, vlnové délky	tlak, teplota, poloha
	Optický tunelový jev	amplitudy	posunutí, akustické signály
Reflexní OVS	Odraz na konci OV	amplitudy, vlnové délky	tlak, teplota, poloha
	Změna okrajových podmínek OV	amplitudy	znečištění prostředí

ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ PODLE TYPU POUŽITÝCH VLÁKEN

- a) Jednovidové s využitím jednovidových optických vláken a koherentních zdrojů záření. Jednovidové OVS většinou využívají jako senzorový prvek optické vlákno. Snímaná veličina se vyhodnocuje prostřednictvím změny různých vlastností optického vlákna, jako jsou: optická dráha, index lomu, rozdíl mezi indexem lomu jádra a pláště optického vlákna nebo rozdíl optických drah dvou navzájem ortogonálně polarizovaných vidů. Jednotlivé OVS jsou většinou uspořádány jako interferometry, u kterých je možné využívat relativní změny fáze mezi dvěma rameny (optickými vlákny), z kterých jedno je referenční a druhé senzorové (jehož přenosové vlastnosti ovlivňuje snímaná fyzikální veličina). Pokrytím jednotlivých ramen vhodnými materiály je možné dosáhnout zvýšené citlivosti senzorového ramena.
- b) Mnohavidové OVS s využitím mnohavidových optických vláken a nekoherentních zdrojů záření. Mnohavidové OVS většinou využívají odvod části intenzity světla z optického vlákna, přerušení optického vlákna, resp. změnu tlumení optického vlákna, způsobující modulaci intenzity optického signálu. V těchto OVS je možné využívat různé elektro-optické, mechanicko-optické, akusto-optické, foto-elestické, radiační a podobné jevy. Použitý jev se vybírá na základě konkrétní aplikace podle požadované citlivosti a dynamického rozsahu.

ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ PODLE ZPŮSOBU MODULACE OPTICKÉHO SIGNÁLU

- a) **amplitudové OVS** využívají modulaci intenzity světla šířícího se optickým vláknem.
- b) **fázové OVS** jsou založeny na modulaci fáze optického signálu, který se šíří optickým vláknem.
- c) **polarizační OVS** využívají vliv snímané veličiny na polarizační stav optické vlny, přenášené optickým vláknem.
- d) **frekvenční OVS** využívají modulaci frekvence optického signálu (např. Dopplerovým jevem), který se šíří optickým vláknem.
- e) **OVS s modulací vlnové délky**, které jsou založeny na detekci spektrálně závislých změn absorpce, emise nebo indexu lomu.
- f) **OVS s modulací šířky a polohy přenášených optických pulsů**, které analyzují zpoždění a rozšíření pulsů, způsobená snímanou veličinou v uzavřené smyčce optického vlákna.

NEJDŮLEŽITĚJŠÍ PARAMETRY OVS

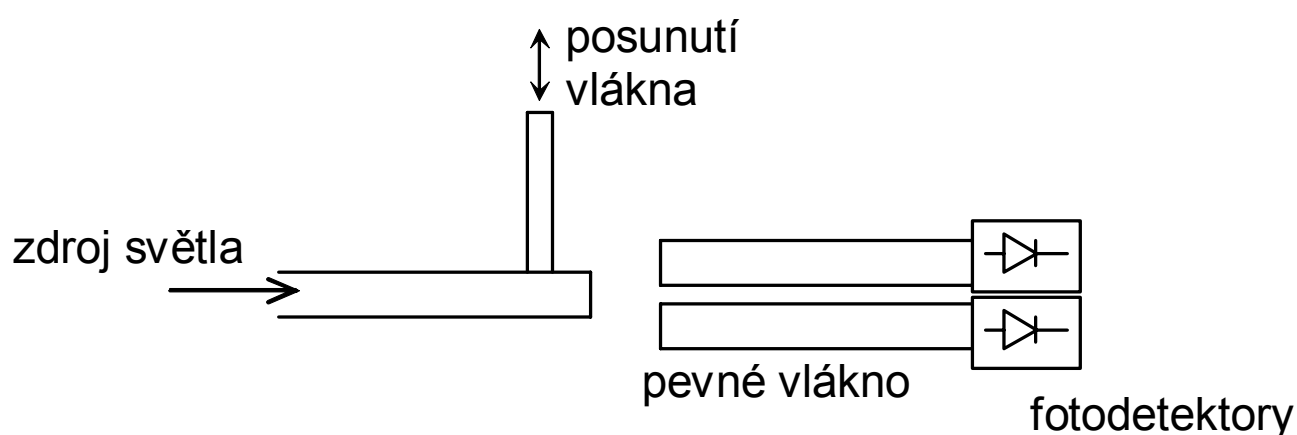
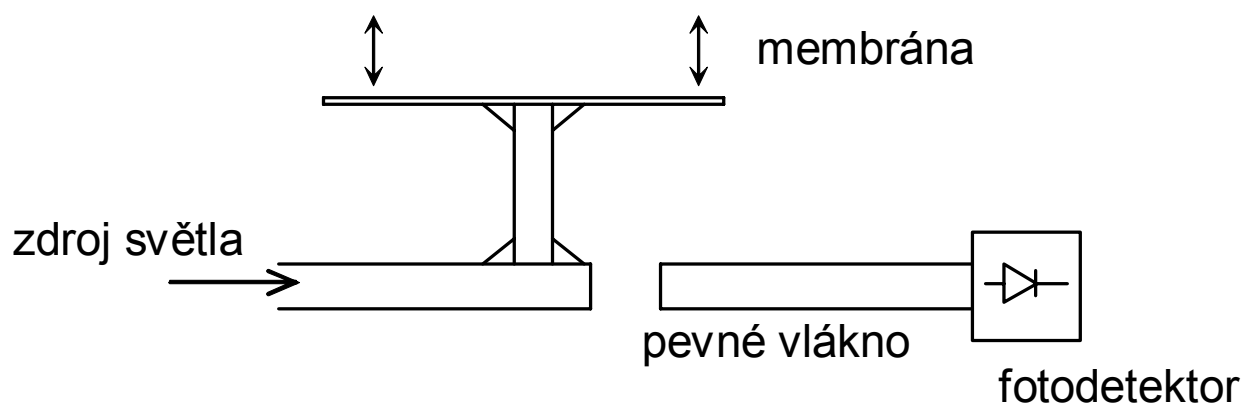
- a) **citlivost**, která se vyjadřuje pomocí hodnoty **napětí** signálu na výstupu detekčního systému OVS při působení jednotkové snímané veličiny;
- b) **práh citlivosti**, který se rovná velikosti snímané veličiny, při působení které se na výstupu OVS hodnota napětí nosného signálu rovná střední kvadratické hodnotě napětí vnitřních šumů OVS;
- c) **dynamický rozsah**, který je určen intervalem přípustných hodnot měřené veličiny, daným prahem citlivosti a maximální přípustnou hodnotou snímané veličiny;
- d) **linearita**, která znamená, že hodnota nosného signálu na výstupu detekčního systému OVS závisí lineárně na snímané veličině.

Práh citlivosti reálných OVS závisí na úrovni jejich vnitřních šumů. Proto jedním ze základních směrů výzkumu OVS je určení zdrojů šumů v OVS a hledání metod jejich zmenšení. Největší vliv na práh citlivosti OVS mají šумы vznikající v optickém vlákně, protože šумы záření lze podstatně kompenzovat použitím diferenciálních metod detekce a příspěvek šumu fotodetektoru je relativně malý. Šумы vznikající v optickém vlákně mají vícero příčin (různá hodnota konstanty šíření pro různé vidy, mezividová konverze, vybuzení navzájem ortogonálních vidů v jednovidovém optickém vlákně, nestabilita polarizace optické vlny apod.), přičemž podstatnou roli má typ a konkrétní zapojení OVS. Všeobecně mají OVS o řád (někdy i o několik řádů) menší práh citlivosti ve srovnání se senzory stejných fyzikálních veličin zhotovenými konvenčními metodami, mají velký dynamický rozsah (i několik řádů) a dobrou linearitu.

AMPLITUDOVÉ OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Amplitudová modulace optického signálu se může uskutečnit jedním z těchto způsobů:

1. přímým zeslabením světla v optickém prostředí, způsobeným změnou koeficientu absorpce;
2. změnou příčného průřezu optického kanálu (např. přerušením optického vlákna a vzájemným pohybem jeho konců);
3. změnou odrazných vlastností, způsobenou změnou koeficientu odrazu a porušením podmínky úplného vnitřního odrazu v jádru optického vlákna (clony, optické mřížky, vzájemný pohyb vysílacího a přijímacího OV);
4. ovládním optického signálu v optickém vlákně (např. ovlivňováním vazby vlnovodů - optický tunelový jev, změna polohy optického kontaktu, změna geometrie OV);
5. generací doplňujícího záření (termoluminiscence, indukovaný rozptyl).



Obr. 6: Jednoduché amplitudové OVS:

a) senzor tlaku

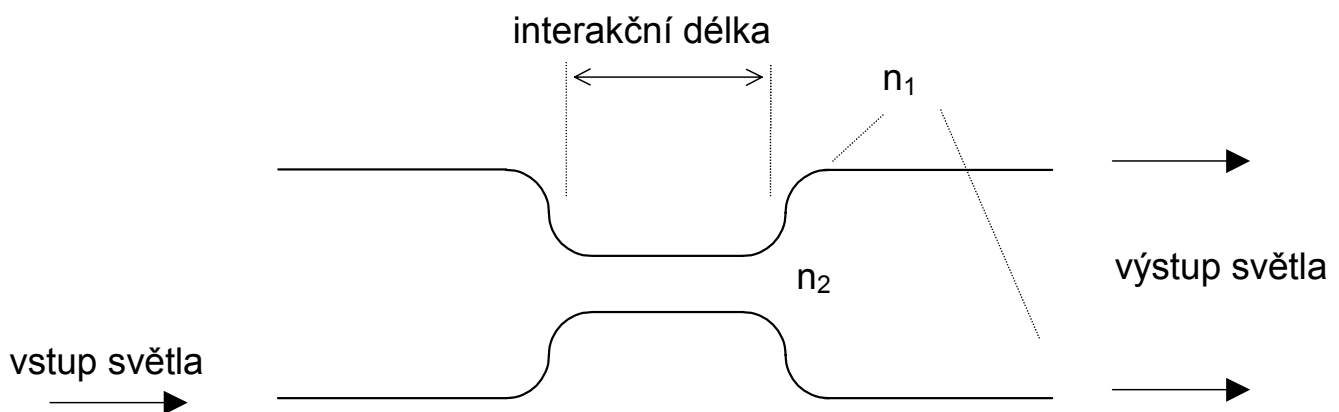
b) senzor posunutí

Citlivějších odezev se dosáhne svazky optických vláken. Princip

6a) lze použít i pro optický vláknový mikrofon.

Optické vláknové senzory

Intenzitu světla šířícího se v jádru OV je možné měnit i pomocí změny koeficientu vazby mezi dvěma navzájem vázanými optickými vlákny. Jádra dvou jednovírových optických vláken jsou navzájem vázána (umístěním do vzdálenosti několika milimetrů) na úseku několika centimetrů. Měří se intenzita světla, které prostřednictvím „optického tunelového jevu“ prošlo ze vstupního do výstupního OV.



Obr.7: OVS s využitím „optického tunelového jevu“.

FÁZOVÉ OVS

Nejcitlivější OVS jsou založeny na fázové modulaci optické vlny šířící se optickým vláknem. Ta vzniká působením snímané veličiny na materiál optického vlákna. Změny fáze optické vlny se měří interferometrickými metodami.

Základem konstrukce fázových OVS jsou optické vláknové interferometry, které je možné rozdělit do třech základních skupin:

1. Dvojramenný jednovidový interferometr (Mach-Zehnderův nebo Michelsonův) využívá srovnání fáze optické vlny, která se šíří senzorovým optickým vláknem a vlny, která se šíří referenčním optickým vláknem.
2. Mezividový interferometr využívá interferenci mezi dvěma nebo více vidy optické vlny, která se šíří jedním optickým vláknem. Jeho výhodou je možnost použití mnohovidových optických vláken, nevýhodou problémy při vyhodnocování interferenčního obrazu.
3. Jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou porovnává fáze dvou vln, které se šíří proti sobě v cívce z optického vlákna.

Příklad: vlákno je obaleno materiálem, kterým prochází elektrický proud, a které se s proudem tepelně roztahuje - OVS elektrického proudu.

POLARIZAČNÍ OVS

Polarizace světla procházejícího optickým prostředím se může měnit vlivem různých fyzikálních veličin (intenzita magnetického a elektrického pole, tlaku, apod.). Snímaná fyzikální veličina může přitom způsobovat buď otočení elipsoidu polarizace bez změny jeho eliptičnosti, nebo může tento elipsoid deformovat. Podle toho dělíme polarizační OVS na:

1. OVS s modulací otočení roviny polarizace. Sem patří např. OVS s využitím Faradayova jevu (tj. otočení roviny polarizace vlivem magnetického pole), který se používá jako senzor intenzity magnetického a elektrického proudu.
2. OVS s indukovaným dvojlomem jsou založeny na vzniku dodatečného dvojlomu v optickém prostředí (vzniká např. namotáním optického vlákna do tvaru cívky, resp. jeho příčným anizotropním stlačením).

K převodu polarizačních změn na změny intenzity světla je výhodné použít dvojlomový analyzátor (Wollastonův hranol), který světlo vystupující z OVS rozdělí na dvě navzájem kolmé polarizované složky, které se detekují odděleně.

FREKVENČNÍ OVS

Nejrozšířenější v této skupině jsou laserové Dopplerovy měřiče rychlosti s využitím optických vláken. Měří se rychlost průtoku plynů a kapalin na těžko přístupných místech. Princip činnosti je založen na měření rychlosti s využitím Dopplerova posuvu kmitočtu optického signálu odraženého od pohybujícího se objektu.

OVS S MODULACÍ VLNOVÉ DÉLKY

Řada fyzikálních jevů ovlivňuje spektrální rozložení odraženého nebo procházejícího světla, což se projevuje modulací vlnové délky (resp. barvy) přenášeného optického signálu. Hlavní součástí OVS je spektrometr, který je svojí mechanickou i optickou konstrukcí přizpůsoben k napojení na optické vlákno. Využití: chemická analýza s využitím indikačních roztoků, analýza fosforescence a luminiscence, analýza záření černého tělesa, pyrometrie (měření teploty).