

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optické vláknové senzory

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej TÝMA**
Osobní číslo: **E12B0309P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Optické vláknové senzory**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Prostudujte principy optických vláknových senzorů (OVS). Materiály zpracujte přehledně tak, aby je bylo možno použít pro výuku problematiky OVS.
2. Podrobněji se zaměřte zejména na OVS pro měření síly, tlaku, polohy a teploty.
3. Získané poznatky a využití informační zdroje v práci pečlivě zdokumentujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Koucký, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na optické vláknové senzory, popisuje vlastnosti a použití optických vláken v sensorické oblasti průmyslu. Dále jsou v práci uvedeny používané druhy zdrojů a detektorů elektromagnetického záření pro tyto sensorické účely. Tato práce obsahuje také zapojení jednotlivých druhů senzorů, jejich principy, používané materiály na tyto účely a také jejich konstrukci a náročnou výrobu.

Klíčová slova

Optické vlákno, foton, index lomu, emise, absorpce, útlum, elektron, polovodič, optický signál, optický vláknový senzor, multiplex, citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah, linearita, zdroj záření, fotodetektor, optický výkon, intenzita, fáze, polarizace, frekvence, vlnová délka, teplota, tlak, síla, poloha.

Abstract

This bachelor thesis is focused on optical fiber sensors, describes the features and usage of optical fibers in the sensory area of the industry. There are also listed used types of sources and detectors of electromagnetic radiation for these sensory purposes. This thesis also includes the involvement of the various types of sensors, their principles, materials used for these purposes, and also their construction and difficult production.

Key words

Optical fiber, photon, refractive index, emission, absorption, attenuation, electron, semiconductor, optical signal, optical fiber sensor, multiplex, sensitivity, threshold of sensitivity, dynamic range, linearity, radiation source, photodetector, optical power, intensity, phase, polarization, frequency, wavelength, temperature, pressure, force, position.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2016

Ondřej Týma

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavovi Kouckému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	13
1 VLASTNOSTI A POUŽITÍ OPTICKÝCH VLÁKEN A SENZORŮ	14
1.1 HISTORIE OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ.....	14
1.2 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN	14
1.3 VLASTNOSTI, PARAMETRY A POUŽITÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ	15
2 KONSTRUKCE OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ	16
2.1 KONSTRUKČNÍ PRVKY A PRINCIP OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SENZORU	16
2.1.1 LED dioda a polovodičový LASER.....	18
2.1.2 Detektory světelného záření.....	19
2.1.2.1 Fotodioda PIN	20
2.1.2.2 Lavinová fotodioda (APD).....	22
3 ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ	23
3.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....	23
3.1.1 Rozdělení podle konstrukce	23
3.1.2 Rozdělení podle použitého typu optického vlákna	24
3.1.2.1 Jednovidové senzory	24
3.1.2.2 Vícevidové senzory	24
3.1.3 Rozdělení podle typu modulace optického signálu.....	25
3.2 FÁZOVÉ SENZORY	25
3.2.1 Machův – Zehnderův interferometr.....	26
3.2.1.1 M. – Z. interferometr pro měření tlaku	29
3.2.1.2 M. – Z. interferometr pro měření teploty	29
3.2.1.3 Další možné konstrukce M. – Z. interferometru	30
3.2.2 Michelsonův interferometr.....	31
3.2.3 Sagnakův interferometr.....	32
3.2.4 Mezividový interferometr	33
3.2.4.1 Mezividový interferometr pro měření teploty.....	33
3.2.5 Interferometr s Fabryho-Perotovým rezonátorem.....	34
3.3 AMPLITUDOVÉ (NEBOLI INTENZITNÍ) SENZORY	35
3.3.1 Senzory se změnou útlumu	36
3.3.1.1 Senzory se změnou útlumu pro měření teploty.....	36
3.3.2 Senzory s porušením okrajových podmínek šíření optického signálu.....	37
3.3.2.1 Senzory s porušením okrajových podmínek pro měření tlaku a síly	37
3.3.2.2 Senzory s porušením okrajových podmínek pro měření teploty.....	39
3.3.3 Senzory se změnou přechodu a odrazu optického signálu.....	39

3.3.4	<i>Senzory pracující s generací záření</i>	41
3.3.4.1	Senzory teploty pracující s generací záření.....	41
3.4	MŘÍŽKOVÉ OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY	43
3.4.1	<i>Princip a konstrukce mřížkových OVS</i>	43
3.4.2	<i>Výrobní proces mřížkových OVS</i>	44
3.4.2.1	Metoda fázovou maskou	45
3.4.2.2	Metoda bod po bodu (point-by-point).....	45
3.4.3	<i>Senzorické využití mřížkových OVS</i>	46
3.4.3.1	Měření fyzikálních veličin pomocí optického spektrálního analyzátoru	47
3.4.3.2	FBG senzor teploty	48
3.4.3.3	FBG senzor tlaku s teplotní kompenzací	49
3.4.3.4	FBG senzor posunutí s teplotní kompenzací.....	50
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM TABULEK	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59

Seznam symbolů a zkratek

Hz.....	Hertz
WDM.....	Wavelength Division Multiplex
CDM.....	Code Division Multiplex
TDM.....	Time Division Multiplex
dB.....	Decibel
LASER.....	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED.....	Light Emitting Diode
APD.....	Avalanche photodiode
FET.....	Field-Effect Transistors
λ	Vlnová délka
m.....	Metr
I.....	Elektrický proud
A.....	Ampér
U.....	Elektrické napětí
V.....	Volt
$E_{1,2,3}$	Intenzita osvětlení
lx.....	Lux
h.....	Planckova konstanta
f.....	Frekvence
E_c	Vodivostní pás (conductivity)
E_f	Fermiho energie
E_v	Valenční pás (valence)
P.....	Optický výkon (intenzita)
W.....	Watt
R.....	Citlivost fotodiody
E.....	Intenzita elektrického pole
x_0	Hloubka vniku
α_a	Spektrální koeficient absorpce
OV.....	Optické vlákno
OVS.....	Optický vláknový senzor
rad.....	Radián
Φ	Fáze

n	Index lomu
k	Vlnové číslo
β	Konstanta šíření
L	Délka
S	Citlivost senzoru
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
p	Tlak
Pa	Pascal
Y	Youngův modul pružnosti
N	Newton
σ	Poissonův koeficient
p_{ij}	Fotoelastické koeficienty materiálu optického vlákna
T	Termodynamická teplota
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsia
K	Kelvin
α_T	Koeficient lineární teplotní roztažnosti
B	Magnetická indukce
T	Tesla
Ω	Úhlová rychlost
N	Počet závitů
c	Rychlost světla
T_t	Teplota tavení
Q	Modulační index
R_L	Zatěžovací odpor fotodiody
Θ_d	Úhel dopadu
R_c	Kritický poloměr zakřivení
Λ	Perioda
T_f	Přenos optického vlákna
x	Vzdálenost
F	Síla
K_f	Koeficient deformace optického vlákna
I_0	Vstupní optický výkon
M_λ	Spektrální hustota intenzity vyzařování
UV	Ultraviolet

FBG.....	Fiber Bragg Grating
λ_B	Braggova vlnová délka
n_{eff}	Efektivní index lomu
ε	Deformace optického vlákna
α_Λ	Koeficient teplotní roztažnosti materiálu
α_{neff}	Termo – optický koeficient
SLED	Superluminescent Light Emitting Diode
OSA	Optical Spectrum Analyzer
GB.....	Guard Band
FC.....	Šroubovací konektor
APC.....	Angled Physical Contact

Úvod

Tato práce představuje principy optických vláknových senzorů a to především optické vláknové senzory pro měření tlaku, teploty, síly a polohy. První zmínky o optických vláknových senzorech pocházejí z roku 1972 a od té doby probíhá jejich značný rozvoj. Optická vlákna mají mnoho výhodných vlastností, a proto se kromě komunikačních aplikací používají právě na konstrukci optických vláknových senzorů. Použití optických vláknových senzorů je v současné době velice široké a jedná se zejména o vojenskou oblast, oblast průmyslu, medicíny, kosmonautiky, energetiky, robotiky a v dalších oblastech. Výhodami těchto senzorů jsou jejich vysoká citlivost vůči vnějším vlivům, geometrická variabilnost a také jejich použití v extrémním prostředí.

Tato práce je rozdělena do třech částí. První část se zaměřuje především na výhodné vlastnosti a dané použití optických vláken a optických vláknových senzorů. Druhá část popisuje konstrukční prvky optického vláknového senzoru zejména používané zdroje a detektory světelného záření a je zde také popsán samotný princip senzoru. Ve třetí části je uvedeno základní rozdělení optických vláknových senzorů a dále jsou podrobně rozebrány jednotlivé typy optických vláknových senzorů.

Cílem této práce je přehledně zpracovat problematiku optických vláknových senzorů tak, aby tato práce mohla být v případě potřeby použita jako doplněk pro výuku optických vláknových senzorů.

1 Vlastnosti a použití optických vláken a senzorů

1.1 Historie optických vláknových senzorů

Z roku 1972 pocházejí první zmínky o optických vláknových senzorech, které byly poprvé tohoto roku laboratorně odzkoušeny. Jednalo se o optické vláknové senzory akustických signálů ve vodě neboli hydrofony. K rozvoji optických vláknových senzorů přispěl také vznik optického vláknového gyroskopu. Výzkum optických vláknových senzorů byl především zaměřen na vojenskou oblast a později pronikal i do dalších oblastí průmyslu. [1]

1.2 Vlastnosti optických vláken

Optická vlákna mají mnoho výhodných vlastností, a proto se v dnešní době využívají stále více. Mezi výhodné vlastnosti optických vláken patří: [1], [2]

- foton má oproti elektronu nulovou hmotnost, a proto je foton vhodný pro přenos signálů (foton se může za určitých podmínek pohybovat rychlostí světla)
- fotony nemají žádný náboj, tudíž nemohou být ovlivňovány elektromagnetickým rušením (jsou tedy odolné vůči rušení)
- fotony tedy kolem sebe nevytvářejí elektromagnetické pole a tím pádem fotony nelze odposlouchávat, pokud tam tedy přímo do optické trasy nevložíme optický rozbočovač, abychom odchytili optický signál
- zde je větší kapacita přenosového kanálu než u metalických vedení
- velká přenosová rychlost, šířka frekvenčního pásma několik GHz
- jednoduchý multiplex signálů
- nízká cena, větší odolnost vůči vlivům okolního prostředí, malý útlum signálu
- menší rozměry, menší hmotnost a větší ohebnost optických kabelů

Díky těmto vlastnostem se optická vlákna používají také na konstrukci optických vláknových senzorů a také postupně nacházejí uplatnění i v dalších odvětvích (např. v průmyslu a medicíně) na pozorování a osvětlení, v nekonvenčních displejích, spínačích a systémech na zpracování signálů. [1], [2]

1.3 Vlastnosti, parametry a použití optických vláknových senzorů

U optických vláknových senzorů se právě využívá těch vlastností optických vláken, které jsou při přenosu optického signálu nepříznivé. Optické vláknové senzory v porovnání s ostatními senzory vynikají díky jejich vysoké citlivosti vůči vnějším vlivům (např. teplotě a mechanickým vlivům), geometrickou variabilitou a použití v extrémním prostředí. Existují optické vláknové senzory skoro všech fyzikálních, chemických a biologických veličin. [1], [2]

Tabulka 1 Výhody optických vláknových senzorů [1]

Optická metoda: použití interferometrických metod – extrémní citlivost
Odolnost vůči elektromagnetickému rušení
Jednoduchá mechanická konstrukce (ve většině případů bez pohyblivých částí), kompaktnost, malé rozměry, chemická odolnost
Bezkontaktní snímání
Odolnost vůči vysokým teplotám, nárazům, mechanickým vibracím a nepříznivým vlivům prostředí
Rychlá odezva, velká šířka frekvenčního pásma (často ohraničená pouze odezvou a šířkou frekvenčního pásma elektronického detekčního systému optických vláknových senzorů)
Možnost použití ve výbušných a hořlavých prostředích, možnost měření na povrchu objektů
Dielektrické materiály – elektrická izolace, žádné elektricky vodivé spojení
Možnost sterilizace bez změny parametrů senzoru
Nízká energetická náročnost
Vysoká pevnost v tahu (vyšší než u ocelových vláken stejného průřezu)
Velká mechanická pružnost
Malý útlum signálu (mnohem menší než u kovových kabelů při vysokých frekvencích)
Velká odolnost vůči radioaktivnímu záření
Velký dynamický rozsah
Jednoduchá adaptace na použití v číslicových systémech
Široké možnosti multiplexování signálů (spektrální multiplex (WDM), multiplex jader optických vláken (CDM), časový multiplex (TDM), úhlový multiplex, polarizační multiplex, fázový multiplex, číslicové kódování)
Pasivní způsob činnosti většiny optických vláknových senzorů, optické vláknové senzory ovlivňují málo nebo vůbec neovlivňují měřený objekt
Většinou velmi jednoduchá konstrukce spojena s vysokou spolehlivostí a nízkými nároky na údržbu
Možnosti měření tam, kde konvenční senzory nelze použít
Větší utajenost systémů optických vláknových senzorů

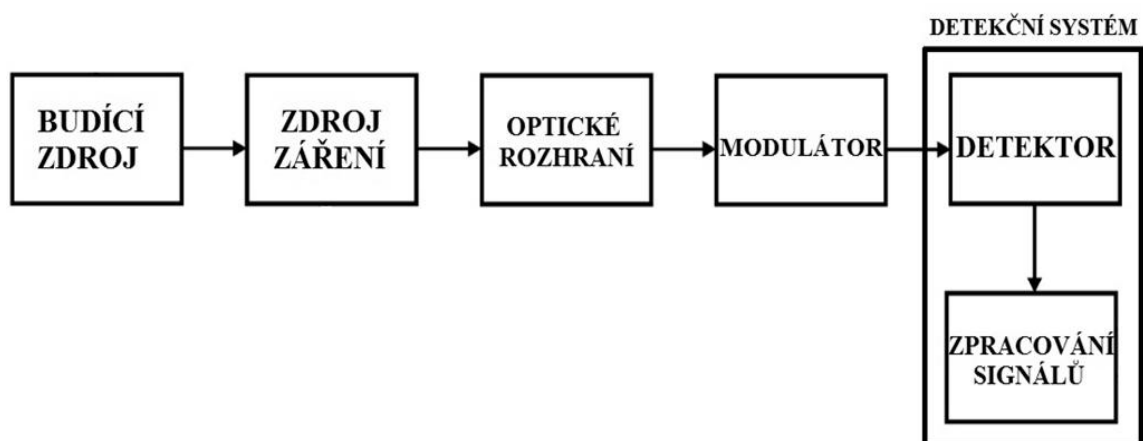
V dnešní době se optické vláknové senzory používají ve vojenské technice, v automatizaci průmyslových výrobních systémů, robotice, kosmonautice, energetice, chemickém průmyslu, medicíně a v dalších oblastech. [1]

Důležitými parametry těchto optických vláknových senzorů jsou citlivost, práh citlivosti, dynamický rozsah a linearita. Citlivost lze vyjádřit výstupním napětím senzoru, na který působí jednotková měřená veličina. Práh citlivosti je nejnižší hodnota měřené veličiny, kterou lze detekovat a odstup měřenosného signálu od šumu požadujeme obvykle 10 dB (šumy vznikající v optickém vlákně mají vliv na práh citlivosti a jsou způsobeny například různou hodnotou konstanty šíření pro různé vidy, mezividovou konverzí, vybuzením navzájem ortogonálních vidů v jednovidovém optickém vlákně nebo nestabilitou polarizace optické vlny). Dynamický rozsah je definován poměrem nejmenší a největší hodnoty měřené veličiny, kterou lze změřit. Linearita označuje maximální odchylku od odpovídajícího bodu, který se nachází na ideální charakteristice. Linearita je vyjádřena v procentech a pojem nelinearita představuje chybu linearitu senzoru. [1]

2 Konstrukce optických vláknových senzorů

2.1 Konstrukční prvky a princip optického vláknového senzoru

Vstup optického vláknového senzoru tvoří polovodičový LASER či jiný laserový zdroj, dioda LED nebo jiný zdroj optického záření a výstup tvoří fotodetektor (fotodioda PIN, lavinová fotodioda APD nebo to může být dvojice PIN - FET). [1]

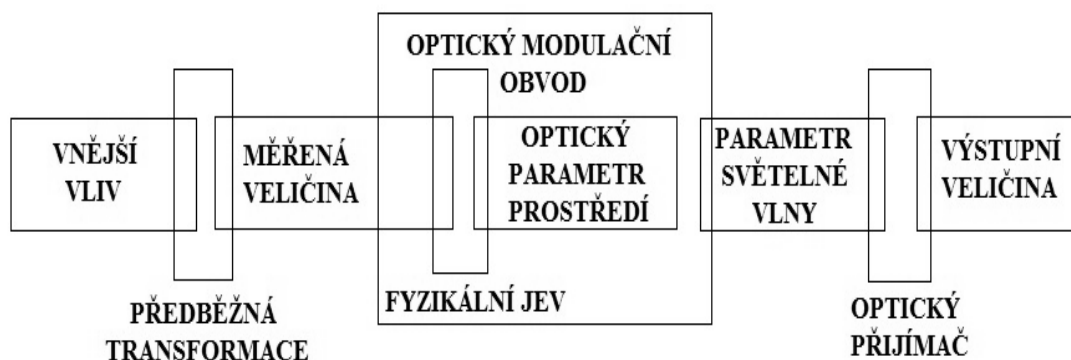


Obr. 1 Hlavní konstrukční prvky optického vláknového senzoru [1]

Jsou zde použity elektronické prvky, obvody na řízení zdroje, fotodetektoru a pro

zpracování signálu. Jako optické rozhraní se používají např. čočky, konektory a spojky. [1]

Princip optického vláknového senzoru spočívá v tom, že měřená veličina (např. intenzita magnetického pole) prostřednictvím daného fyzikálního (optického) jevu (např. magnetooptického jevu) zapříčiní změnu optických parametrů daného prostředí (např. změnu indexu lomu). [1], [2]



Obr. 2 Transformace fyzikálních veličin [1]

Vnější vliv souvisí s měřenou veličinou a může být elektrický, magnetický, tepelný, mechanický, chemický a radiační. Měřenými veličinami jsou například intenzita elektrického pole, intenzita magnetického pole, elektrický proud, teplota, lineární zrychlení, úhlová rychlost, lineární rychlost, síla a tlak. Modulační optického signálu je realizována v optickém modulačním obvodu, který spojuje změnu optického parametru prostředí se změnou parametru světelné vlny. [1], [2]

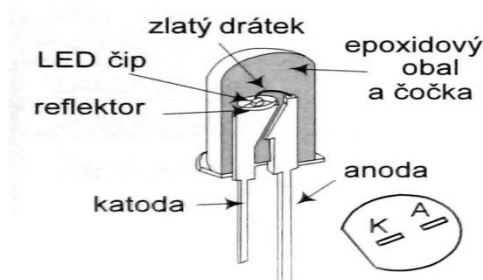
Tabulka 2 Souvislosti vlastností optického vlákna a snímané veličiny [1], [2]

Vnější působení	Odezva optického vlákna
Mechanická síla	Indukovaný dvojlom
Mechanický tlak	Piezelektrický jev Mikroohyby optického vlákna
Ohnutí	Piezoabsorpce
Změna hustoty	Luminiscence
Elektrické pole	Elektro – optický jev
Dielektrická polarizace	Elektrochromatizmus
Elektrický proud	Elektroluminiscence
Magnetické pole	Magneto – optický jev Faradayův jev
Magnetická polarizace	Magnetoabsorpce

Teplota	Teplotní změna indexu lomu Absorpční vlastnosti nebo fluorescence Termoluminiscence
Světlo	Poruchy optického vlákna vedoucí ke změně indexu lomu a absorpčních vlastností
X – paprsky, gama paprsky	Radiační luminiscence Poruchy optického vlákna Vzrůst útlumu
Změny chemického složení	Změny indexu lomu a odrazových vlastností působením chemických procesů, chemoluminiscence

2.1.1 LED dioda a polovodičový LASER

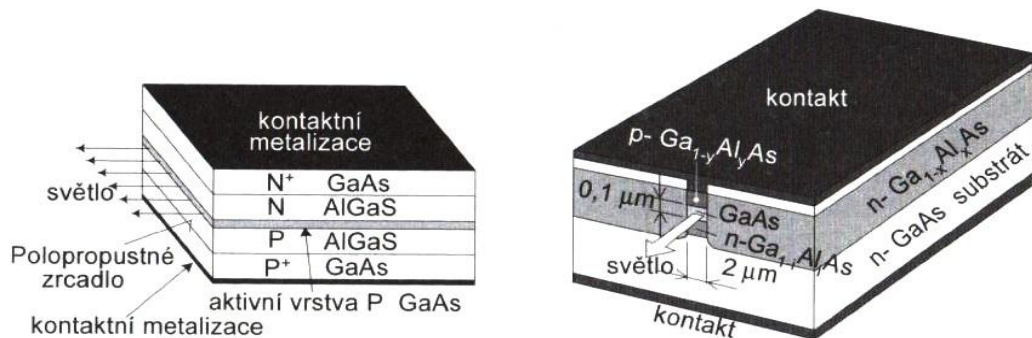
Principem LED diod je injekční luminiscence, kdy dochází k čerpání (dodání energie valenčnímu elektronu; dodaná energie musí být větší nebo alespoň rovna, než je šířka zakázaného pásu; poté nastane přechod elektronu na vyšší energetickou hladinu čili z valenčního pásu do vodivostního pásu a vznikne pár elektron - díra) a následně dochází k zářivé rekombinaci (po určité době, pokud přestane působit vnější energie, zanikne pár elektron - díra; pak dochází k uvolnění energie ve formě světla; při zářivé rekombinaci tedy dochází k vyzáření fotonů; 1 elektron vyzáří 1 foton; zde se jedná o spontánní emisi). U luminiscenčních diod se využívá přímá rekombinace a také nepřímá přes rekombinační centrum. Luminiscenční dioda vyzařuje monochromatické nekoherentní záření (monochromatické záření má jednu vlnovou délku; nekoherentní záření – jednotlivé elektromagnetické vlny se nacházejí v různých fázových posunech). [2], [3]



Obr. 3 Příklad standardního uspořádání LED [3]

Polovodičový LASER vyzařuje monochromatické koherentní záření (koherentní záření – jednotlivé elektromagnetické vlny jsou ve stejné fázi). Principem je stimulovaná neboli řízená emise. Dodáním vhodné příměsi do polovodiče vytvoříme v zakázaném pásu rekombinační

hladinu. Nejprve musí nastat čerpání (dodání energie). Stimulace, která zde nastane, je na základě cizího fotonu, který proletí a způsobí hromadnou rekombinaci elektronů, kdy dojde k uvolnění energie. Tato rekombinace probíhá přes rekombinační centrum, kdy nastane nejdříve přechod elektronů na tuto hladinu a následně dojde k rekombinaci. V tomto případě dochází přes čočku k vyzáření úzkého svazku fotonů, které mají stejnou energii a tudíž i směr. Laserové diody se dají použít jako zesilovač světla nebo jako zdroj světla. V konstrukci laseru je použit rezonátor, který je tvořen optickou dutinou s jedním odrazivým a druhým polopropustným zrcadlem, kterým se z laseru vyzáří tento úzký svazek fotonů. [2], [3]



Obr. 4 Příklad laserové diody s dvojitým heterogenním přechodem (vlevo – princip heterostruktury; vpravo – uspořádání pro úzký svazek paprsků) [3]

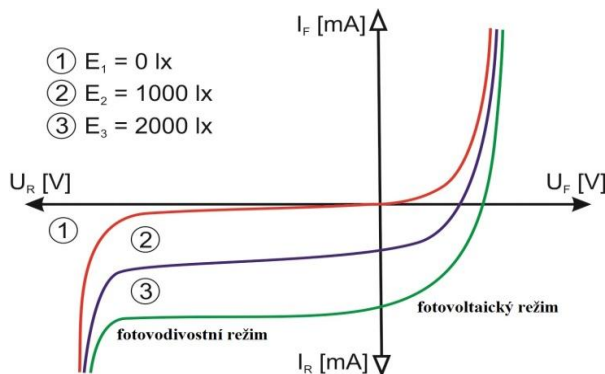
2.1.2 Detektory světelného záření

Jako fotodetektor v optických sdělovacích systémech se používají polovodičové fotodiody. Nejčastěji používanými detektory světelného záření jsou hlavně fotodiody PIN a lavinová fotodiody (APD). [2], [3], [4]

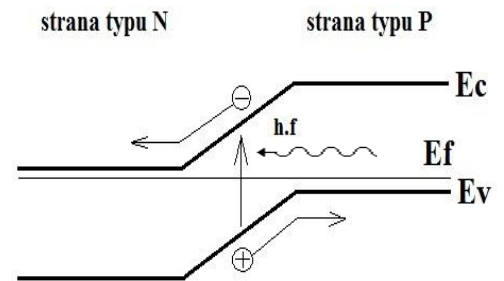
Tyto fotodetektory musí při daném použití splňovat určité požadavky. Prvním požadavkem je vysoká citlivost v pásmu vlnových délek $\lambda \approx 0,8 - 1,3 \mu\text{m}$. Dalšími požadavky jsou dostatečná šířka přenášeného frekvenčního pásma, malá doba odezvy, vlastní šum by měl být v určitých mezích (velikost šumu působí na citlivost fotodetektoru) a také je to požadavek na minimální rozměry detektoru. Průměr příčných rozměrů detekční plochy musí být menší než $100 \mu\text{m}$. [4]

Fotodiody jsou fotocitlivé součástky, které jsou založeny na PN přechodu. Na PN přechod dopadají fotony. Jedná se o opticko – elektrický převodník, kdy se převádí optická energie na elektrickou. Energie dopadajícího fotonu musí být větší nebo alespoň rovna, než je šířka zakázaného pásu. V opačném případě foton není pohlcen a prochází materiálem. Poté nastane excitace elektronů z valenčního pásu do vodivostního pásu a dochází k lokálnímu vzniku párů elektron - díra. Principem fotodiody je, že nedochází okamžitě k rekombinaci, ale

dochází k prostorovému oddělení párů nosičů náboje čili elektronů a děr. Elektrony jdou do oblasti N, kde se začnou hromadit a díry se začnou hromadit naopak do oblasti P. Fotodiodu lze použít ve dvou režimech a to fotovodivostním (jako fotodetektor) a fotovoltaickém režimu (jako zdroj elektrické energie). [2], [3]



Obr. 5 V-A charakteristika fotodiody [3]



Obr. 6 Prostorové oddělení nosičů [2]

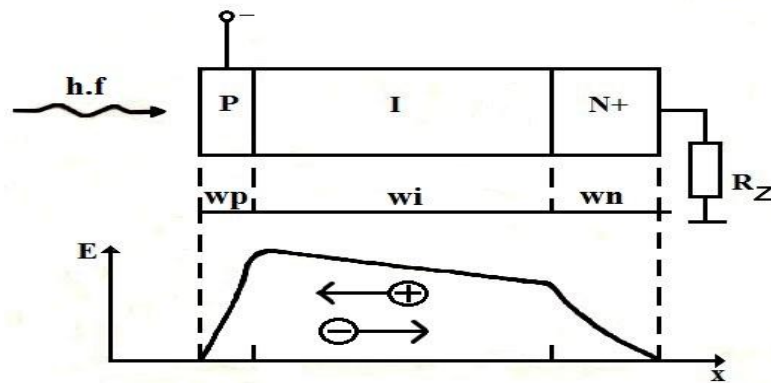
Polovodičové materiály, které se používají pro detektory, jsou Ge, Si, GaAs (gallium arsenid), InSb (antimonid india), InAs (arsenid india) a některé další. U těchto materiálů je důležitá absorpce (neboli pohlcení) optického záření. Pohlcení fotonů materiálem je závislé na jejich vlnové délce. Každý materiál absorbuje světelné záření v jiném rozsahu vlnových délek. [3], [4]

Dalším důležitým parametrem fotodiody je jejich citlivost, pro kterou platí vztah (1), kde I_f (měřený v A/cm^2) je výstupní proud fotodiody a P (měřena ve W/cm^2) je přijímaný optický výkon. [3]

$$R = \frac{I_f}{P} \quad [A \cdot W^{-1}; A; W] \quad (1)$$

2.1.2.1 Fotodioda PIN

Fotodioda PIN je vytvořena ze tří polovodičových vrstev. Skládá se tedy ze silně dotovaného polovodiče typu P o tloušťce w_p , silně dotovaného polovodiče typu N o tloušťce w_n a slabě dotovaného téměř vlastního polovodiče o tloušťce w_i . Fotodioda PIN je připojena v závěrném směru a tomu také odpovídá průběh intenzity elektrického pole. Zde vzniknou dva přechody mezi vrstvami P a I a mezi vrstvami I a N. K omezení odrazu fotonů od detektoru se používá antireflexní vrstva, která je nanášena na aktivní oblast detektoru. [2], [3], [4]

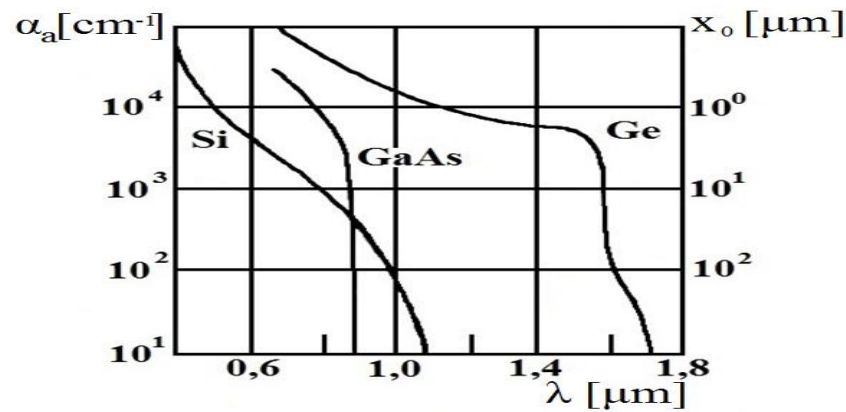


Obr. 7 Princip fotodiody PIN a průběh intenzity el. pole ve vrstvě I [4]

Fotony dopadají na tenkou vrstvu silně dotovaného polovodiče typu P, ale většina z nich je pohlcena ve vrstvě I a následně zde dochází k prostorovému oddělení generovaných párů nosičů náboje, které se pohybují driftovou rychlostí. Z hlediska účinnosti generování párů nosičů náboje požadujeme širokou oblast I a úzké oblasti silně dotovaných polovodičů P a N. Vrstva slabě dotovaného vlastního polovodiče má vysoký měrný odpor oproti ostatním vrstvám. V této vrstvě se nachází silné elektrické pole. Rychlost nosičů náboje se díky tomuto silnému elektrickému poli zvyšuje a tím se také zvyšuje mezní frekvence této fotodiody PIN. Existuje také provedení fotodiody PIN, kdy fotony dopadají z boku přímo do vrstvy I a v silně dotovaných oblastech se tak sníží pravděpodobnost rekombinace. To má za následek zlepšení frekvenčních vlastností a zvýšení kvantové účinnosti, která je definována jako poměr počtu vzniklých párů nosičů náboje k počtu pohlcených fotonů. [2], [3], [4]

Frekvenční vlastnosti zde určuje driftová rychlost a šířka oblasti I. Frekvenční vlastnosti zde tedy určuje kapacita, kdy elektrody tvoří silně dotované oblasti a dielektrikum představuje vrstvu I. Po připojení fotodiody PIN v závěrném směru ke zdroji napětí se rozšíří oblast I a v důsledku toho se sníží velikost kapacity. [4]

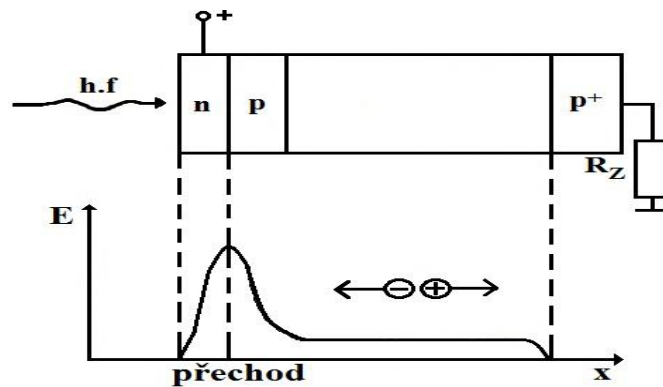
Obrázek 8 představuje frekvenční meze některých používaných materiálů, kde x_0 je hloubka vniku dopadajícího záření do materiálu a α_a je spektrální koeficient absorpce. Z tohoto obrázku je tedy patrné, že mezní vlnová délka použití pro Si $\sim 1,1 \mu\text{m}$, pro GaAs $\sim 0,9 \mu\text{m}$ a pro Ge $\sim 1,6 \mu\text{m}$. Fotodiody na bázi křemíku mají určité výhody a to menší teplotní závislost a menší proud při osvětlenosti 0 luxů, neboť velikost tohoto proudu při osvětlenosti 0 luxů ovlivňuje citlivost fotodetektoru. Čím menší bude proud za absolutní tmy, tím větší bude poté citlivost fotodetektoru. [2], [3], [4]



Obr. 8 Frekvenční meze materiálů [4]

2.1.2.2 Lavinová fotodioda (APD)

Lavinové fotodiody jsou náročnější na výrobu, a tudíž jsou také v porovnání s fotodiodami PIN dražší. Lavinové fotodiody mají několik nevýhod a to větší teplotní závislost oproti fotodiodám PIN a nutnost použití vysokých polarizačních napětí. Lavinová fotodioda má také oproti fotodiodě PIN větší citlivost, a proto se využívá v aplikacích, kdy světelné záření má malou intenzitu. Zde požadujeme velkou intenzitu elektrického pole v oblasti daného přechodu a tomu odpovídá také dotování vrstev lavinové fotodiody (viz obrázek 9). [3], [4]



Obr. 9 Princip lavinové fotodiody [4]

Dopadající foton je opět pohlcen a generuje pár elektron – díra. V těchto fotodiodách se využívá jevu, který se nazývá lavinové násobení nosičů. Tento jev se odehrává ve vyčerpané oblasti, kde se nenachází volné nosiče náboje a elektrony jsou zde pevně vázány k jádrům atomů. Šířka vyčerpané oblasti pro tento jev musí být dostatečná. Tato fotodioda je připojena v závěrném směru ke zdroji velkého napětí, které je příčinou silného elektrického pole. Toto silné elektrické pole zrychlí vzniklé elektrony. Princip je takový, že elektron vletí vysokou kinetickou energií do vyčerpané oblasti a po určité době dojde ke srážce tohoto elektronu

s nějakým neionizovaným atomem a tím se vyrazí elektron z vazby atomu a pokračují dva elektrony. Tyto dva volné elektrony vyrazí další elektrony a vznikají tak další páry elektron - díra. Tento proces lavinového násobení probíhá až na konec vyčerpané oblasti. Koeficient lavinového násobení bývá obvykle v rozsahu desítek až stovek. Jelikož lavinové násobení je náhodný proces, proto se zde objevuje přídatný šum. [3], [4]

V případě použitého napětí, které je větší než průrazné napětí na dané diodě, dojde k tepelnému průrazu a tedy ke snížení citlivosti fotodiody. Nejlepší situace v tomto případě nastává, kdy napětí je rovno průraznému napětí na dané fotodiodě. Například pro materiál InGaAs se používá pro tento jev závěrné napětí od 30 do 70 V a pro lavinové fotodiody na bázi křemíku se toto závěrné napětí pohybuje nad hodnotou 300 V. [3], [4]

3 Rozdělení optických vláknových senzorů

3.1 Základní rozdělení

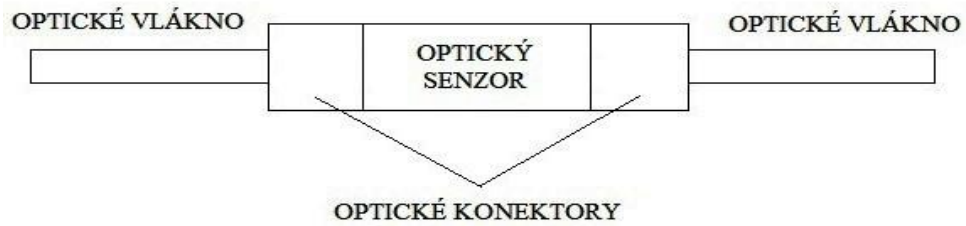
Optické vláknové senzory (OVS) rozdělujeme podle měřené veličiny, konstrukce, typu optického vlákna a podle modulace optického signálu. Snímání veličin může být provedeno jako bodové nebo rozprostřené. [1], [2]

3.1.1 Rozdělení podle konstrukce

Dále lze rozdělit OVS na vlastní (viz obrázek 10) a nevlastní (viz obrázek 11). U vlastních OVS je optické vlákno (OV) použito jako snímací (neboli citlivý) prvek, snímaná veličina ovlivní přenosové vlastnosti optického vlákna a poté se změní např. intenzita, fáze, frekvence, spektrální rozložení nebo polarizační stav přenášeného optického signálu. U nevlastních OVS je optické vlákno použito jako přenosové médium, modulace optického signálu probíhá mimo optické vlákno a optické vlákno v tomto případě nesmí způsobit změnu vlastností přenášeného optického signálu. Do nevlastních OVS spadají i měřicí přístroje (např. interferometry a Dopplerovy měřiče rychlosti) pro měření vzdáleností a rychlostí na těžko přístupných místech, ve strojích nebo v nebezpečném prostředí. [1], [2]

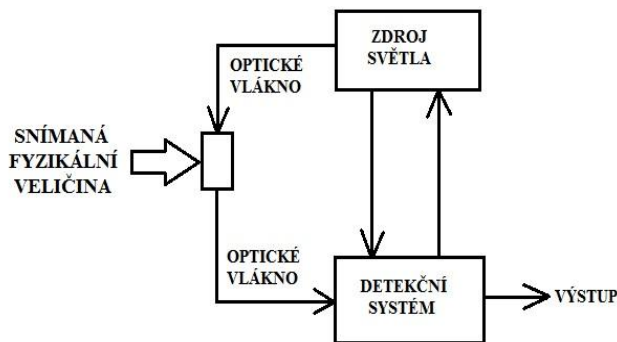


Obr. 10 Vlastní OVS [1]

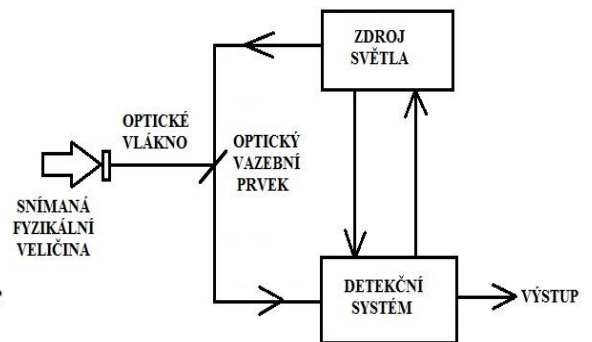


Obr. 11 Nevlastní OVS [1]

Také lze rozlišit optický vláknový senzor na přenosový (dané vstupní a výstupní optické vlákno, senzor zde funguje jako pasivní převodník a způsobuje modulaci, viz obrázek 12) a odrazový (optický signál prochází po modulaci a odrazu stejným optickým vláknem, viz obrázek 13). [1]



Obr. 12 Zapojení přenosového senzoru [1]



Obr. 13 Zapojení odrazového senzoru [1]

3.1.2 Rozdělení podle použitého typu optického vlákna

3.1.2.1 Jednovidové senzory

V tomto případě se jedná o jednovidová optická vlákna (středem tohoto optického vlákna se šíří jeden světelný paprsek) a po zdroji optického záření požadujeme, aby vyzařoval koherentní záření. Většinou je zde optické vlákno použito jako snímací prvek a měřenou veličinu lze vyhodnotit podle změny různých vlastností optického vlákna (například optické dráhy, indexu lomu, rozdílu mezi indexem lomu jádra a pláště, rozdílu v optické dráze dvou navzájem ortogonálně polarizovaných vidů). Nejčastěji jsou sestaveny jako interferometry. [1], [2]

3.1.2.2 Vícevidové senzory

Zde se používají vícevidová optická vlákna (tímto optickým vláknem prochází jeden světelný paprsek středem vlákna a zbylé světelné paprsky odrazem), nekoherentní záření a podle dané aplikace elektro-optické, mechanicko-optické, akusticko-optické, fotoelastické nebo radiační jevy. [1], [2]

Zde způsobují modulaci intenzity (amplitudy) optického signálu tyto případy: [1], [2]

- odvod části intenzity světla z optického vlákna
- přerušení optického vlákna
- změnu útlumu optického vlákna

3.1.3 Rozdělení podle typu modulace optického signálu

- amplitudové (intenzitní) senzory
- fázové senzory
- polarizační senzory
- frekvenční senzory – modulace frekvence optického signálu například pomocí Dopplerova jevu
- senzory s modulací rozložení vlnové délky (barevné a spektrální senzory)
- senzory s modulací šířky přenášených optických impulzů

Fotodetektory detekují pouze intenzitu optického signálu, proto pro modulace jiné než intenzitní bývá v detekčním procesu modulovaného optického signálu ještě transformační stupeň, abychom získali signál v požadovaném tvaru. [1], [2], [3]

3.2 Fázové senzory

Fázové senzory neboli interferometry jsou považovány za nejcitlivější OVS, mají vysokou pořizovací cenu, jsou konstrukčně a technologicky složité. Tyto senzory pracují s interferencí světla (výsledná vlnová funkce je součtem vlnových funkcí jednotlivých vln) a používají se pro velice přesná měření. Interference (neboli skládání vlnění) probíhá za těchto současně probíhajících podmínek – alespoň dvě a více vlnění, vlnění mají stejnou frekvenci, vlnění jsou koherentní a mezi interferujícími vlněními musí být fázový rozdíl. U těchto senzorů dochází vlivem snímané veličiny k modulaci fáze světelné vlny, která se šíří optickým vláknem. Těmito senzory můžeme změřit změny fáze řádově o 10^{-8} rad (světlo v OVS má vlnovou délku přibližně 1 μm) a díky tomu jsme schopni zachytit velice malé

dráhové změny optického signálu. [5], [6], [7], [8], [9]

Parametry optického vlákna, které se vlivem působení měřené veličiny (x) mění, jsou délka optického vlákna (L), index lomu jádra (n) a průřez optického vlákna (většinou zanedbatelná změna). Pro fázi (monochromatického záření) platí vztah (2) a pro změnu fáze světelné vlny platí tvar (3), kde k ($k = 2\pi/\lambda$) je vlnové číslo, β je konstanta šíření, Δx je změna měřené veličiny a předpokladem je neměnný charakter profilu indexu lomu. [1], [2], [9]

$$\Phi = \beta * L = n * k * L \quad (2)$$

$$\Delta\Phi = \left(n * k * \frac{dL}{dx} + k * L * \frac{dn}{dx} \right) * \Delta x \quad (3)$$

Citlivost těchto fázových senzorů určíme následujícím způsobem (4), kde $\Delta\Phi$ představuje změnu fáze světelné vlny, ke které dojde změnou měřené veličiny Δx . [1]

$$S = \frac{\Delta\Phi}{\Delta x} \quad (4)$$

Interferometry lze rozdělit na tyto skupiny: [1], [2], [5], [8]

- dvouramenný jednovidový interferometr (příkladem je Machův-Zehnderův nebo Michelsonův interferometr)
- jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou (příkladem je Sagnakův interferometr)
- mezividový interferometr

3.2.1 Machův – Zehnderův interferometr

Konstrukce tohoto interferometru (viz obrázky 15, 16 a 17) tvoří základ pro ostatní typy fázových senzorů. Nejprve je optický signál ze zdroje rozdělen pomocí optického děliče do dvou ramen, která jsou tvořena dvěma jednovidovými optickými vlákny. Jedno optické vlákno je sensorové a druhé referenční. Citlivá část je tedy umístěna v rameni sensorového vlákna a na toto sensorové optické vlákno působí daná snímaná veličina, vlivem této snímané veličiny dojde zde ke změně parametrů optického vlákna a následně k modulaci fáze světelné vlny. Nakonec dochází k interferenci světelných vln z těchto dvou ramen, takto vzniklý signál přijímá fotodetektor ((6) a (7)) a je zjišťován jejich fázový posun. Je tedy detekována výsledná intenzita I , která je závislá na fázovém rozdílu. U_1 a U_2 jsou komplexní amplitudy, které spolu interferují a U je výsledná vlna (5). I_1 a I_2 jsou jednotlivé intenzity světelných vln,

Φ_1 a Φ_2 jsou jednotlivé fáze světelných vln. [1], [2], [5], [6]

$$U = U_1 + U_2 = \sqrt{I_1} * e^{i*\Phi_1} + \sqrt{I_2} * e^{i*\Phi_2} \quad (5)$$

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + 2 * U_1 * U_2 + |U_2|^2 \quad (6)$$

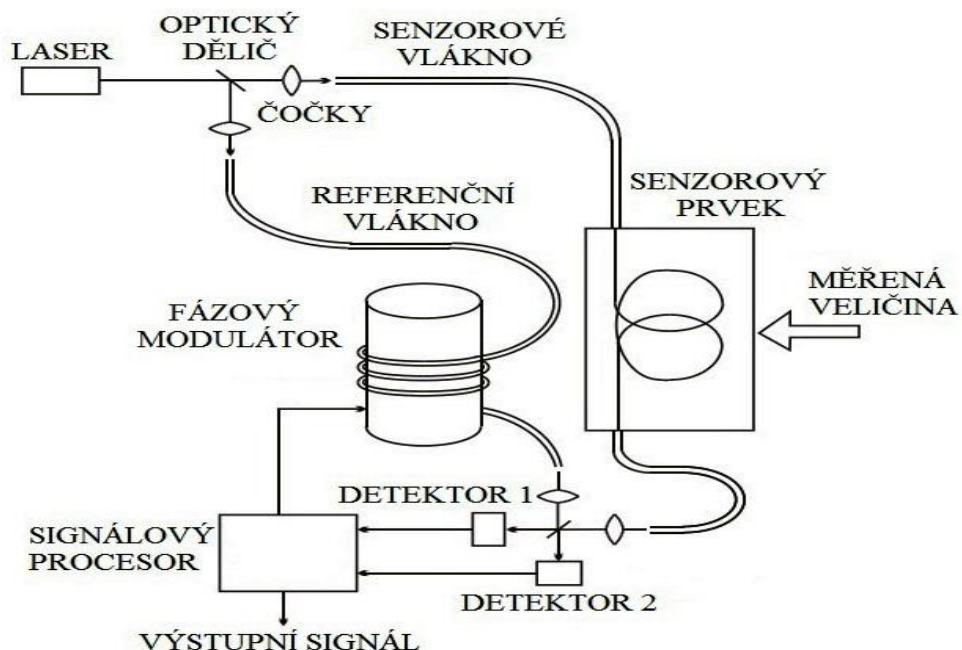
$$I = I_1 + I_2 + 2 * \sqrt{I_1 * I_2} * \cos \Delta\Phi = I_1 + I_2 + 2 * \sqrt{I_1 * I_2} * \cos (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (7)$$

Zdroj je tvořen laserem s paprskem TEM₀₀ (TEM = Transverse Electromagnetic Mode), který představuje jeden malý bod a tento paprsek v porovnání s ostatními TEM módy má největší sílu a nejlepší kvalitu (viz obr. 14). [1], [2], [10], [11]



Obr. 14 Laser s paprskem TEM₀₀ [10]

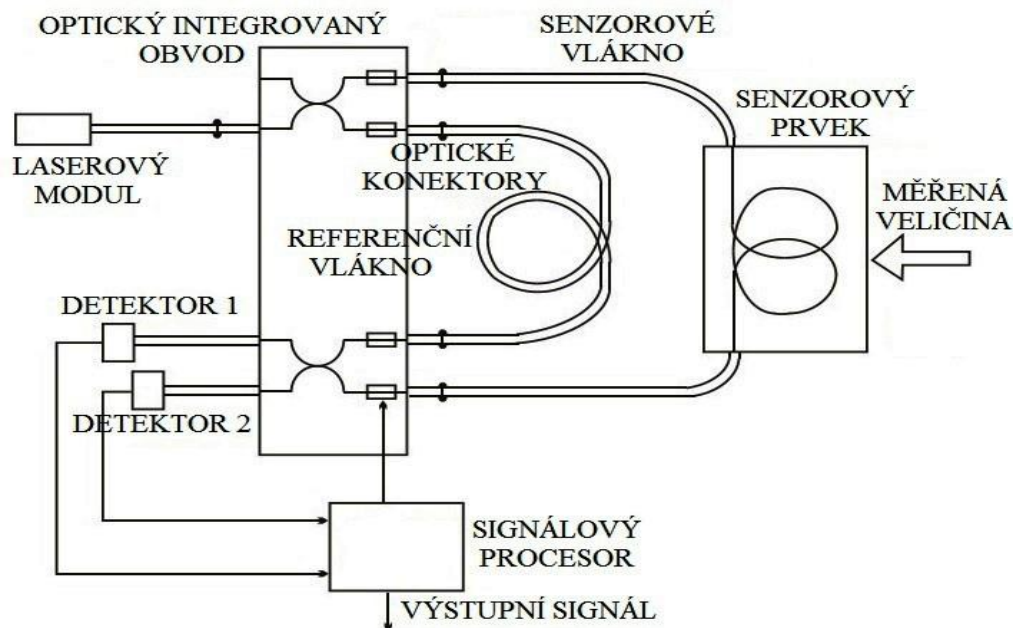
Zapojení tohoto interferometru může být provedeno těmito třemi způsoby (viz obrázky 15, 16 a 17). [1]



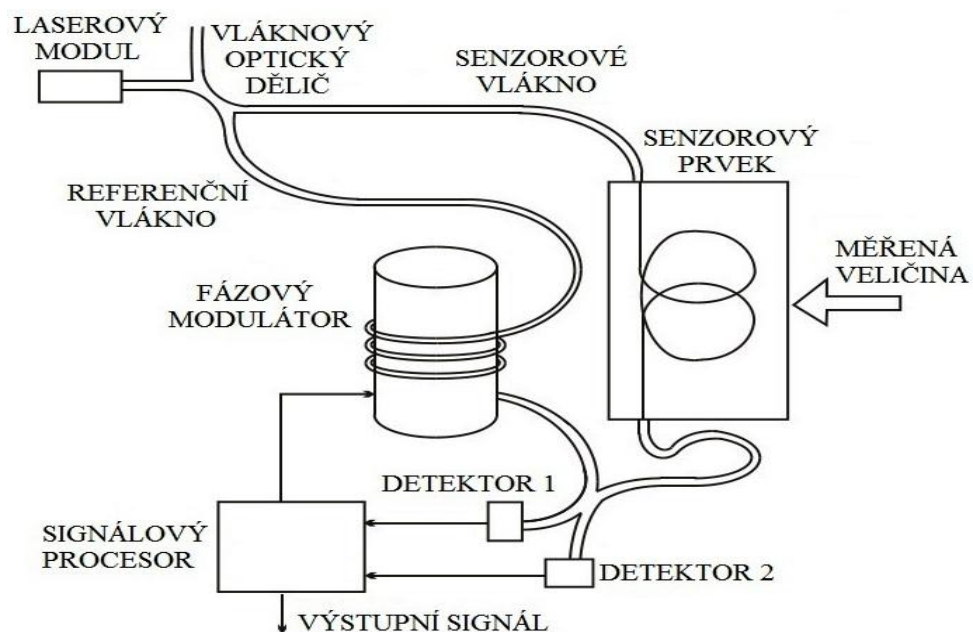
Obr. 15 Diskrétní zapojení [1]

Celovláknové zapojení má určité výhody oproti diskrétnímu zapojení, které je citlivé na vibrace a pracně se nastavují optické vazební prvky. Integrované zapojení představuje nižší pořizovací náklady, ovšem ve výsledku se jedná o zhoršení dosahovaných parametrů. Veličiny, které lze tímto interferometrem snímat jsou tlak, teplota, akustické signály ve vodě (hydrofon), elektrický proud, intenzita magnetického pole a také se používá jako senzor

vibrační a zrychlení. [1], [9]



Obr. 16 Integrované zapojení [9]

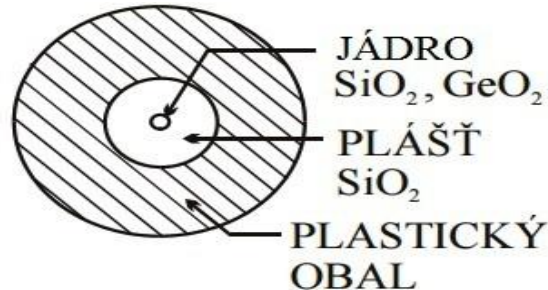


Obr. 17 Celovláknové zapojení [9]

Používá se homodynní detekce (kdy interferují vlnění se stejnou frekvencí) a heterodynní detekce (kdy interferují vlnění s různou frekvencí a výsledkem je zánějová frekvence). Nevýhodami těchto dvouramenných jednovidových interferometrů jsou složitá optická konstrukce, je zde nutné jednovidové vlákno a problémem je odstranění interference různých fyzikálních veličin (např. tlaku a teploty). [1], [2], [9], [12]

3.2.1.1 M. – Z. interferometr pro měření tlaku

Konstrukce sensorového optického vlákna na bázi SiO_2 pro měření tlaku je znázorněna na obrázku 18. Využívá se zde fotoelastický jev, který je vyvolán mechanickým namáháním a dochází k deformaci jádra optického vlákna a tím ke změně jeho indexu lomu. [9], [13], [14]



Obr. 18 Konstrukce pro měření tlaku [9]

Pokud na optické vlákno působí rovnoměrně tlak p , pak lze vyjádřit jeho citlivost na tuto veličinu vztahem (8), kde Y je Youngův modul pružnosti (je vyjádřen poměrem napětí v tahu a relativní deformací; mění se v rozsahu $5 \cdot 10^{10}$ až $9 \cdot 10^{10}$ N/m^2), σ označuje Poissonův koeficient (ten se může měnit v rozsahu 0,17 až 0,32), p_{11} a p_{12} jsou fotoelastické koeficienty materiálu optického vlákna (pro tyto koeficienty je dán rozsah změn 0,1 až 0,3). [1], [2], [9], [15]

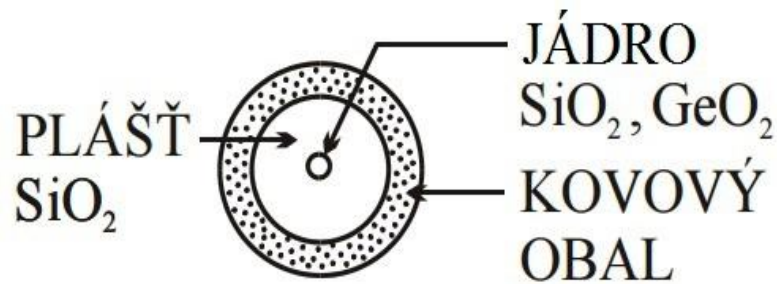
$$\frac{\Delta\Phi}{L \cdot \Delta p} = \frac{k_0 \cdot n}{Y} \cdot (1 - 2\sigma) \cdot \left[1 - \frac{n^2 \cdot (p_{11} - 2 \cdot p_{12})}{2} \right] \quad (8)$$

Optická vlákna na bázi SiO_2 mají obvykle hodnotu citlivosti na působení tlaku p 10^{-5} $\text{rad/m} \cdot \text{Pa}$. Citlivost samotného senzoru (S) bývá 4,5 rad/Pa a práh citlivosti (P_{MIN} ; při $\Delta\Phi = 10^{-6}$ rad a 1 metr vlákna) odpovídá hodnotě 60 $\text{dB/1 } \mu\text{Pa}$. [1], [9], [16]

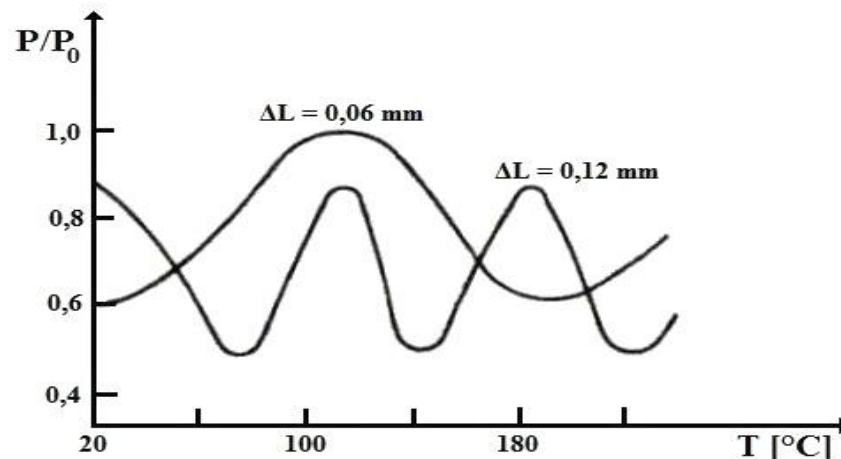
Běžná optická vlákna, která se používají ve sdělovací technice, můžeme použít pro měření tlaku, teploty a akustických signálů. Citlivost na tyto veličiny lze zvýšit použitím vhodného materiálu na pokrytí sensorového OV (například pomocí plastů lze zvýšit citlivost na tlak a akustické signály) a díky použití vhodných materiálů ke konstrukci senzorů lze také v tomto případě měřit např. intenzitu magnetického pole a elektrický proud. [1], [2]

3.2.1.2 M. – Z. interferometr pro měření teploty

Konstrukce sensorového optického vlákna na bázi SiO_2 pro měření teploty je znázorněna na obrázku 19. Z hlediska konstrukce v tomto případě nemají sensorové a referenční optické vlákno stejnou délku (př. viz obr. 20). Modulace fáze optického záření při změně teploty OV probíhá podobným způsobem jako v případě pro měření tlaku. [1], [2], [9]



Obr. 19 Konstrukce pro měření teploty [9]



Obr. 20 Závislost relativní výstupní intenzity záření z interferometru na teplotě pro dva různé rozdíly délek referenčního a sensorového OV [1]

V případě působení teploty na optické vlákno lze vyjádřit jeho citlivost na tuto veličinu vztahem (9), kde α_T označuje koeficient lineární teplotní roztažnosti daného materiálu, ze kterého je OV vyrobeno. Citlivost optického vlákna z materiálu SiO_2 na teplotu má obvykle hodnotu $100 \text{ rad/m} \cdot \text{K}$ a citlivost samotného senzoru bývá $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ rad}/^\circ\text{C}$. [1], [2], [9]

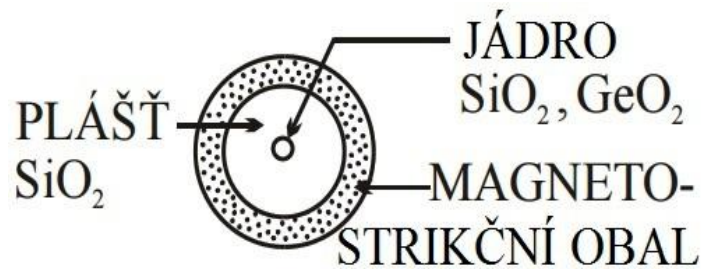
$$\frac{\Delta\Phi}{L \cdot \Delta T} = k_0 \cdot n \cdot \alpha_T + k_0 \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_p \quad (9)$$

Těmito fázovými senzory lze měřit teplotu v rozsahu 0 až $700 \text{ }^\circ\text{C}$ s rozlišovací schopností $2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$. Práh citlivosti (ΔT_{MIN} ; při $\Delta\Phi = 10^{-6} \text{ rad}$ a 1 metr vlákna) odpovídá hodnotě 10^{-8} K . [1]

3.2.1.3 Další možné konstrukce M. – Z. interferometru

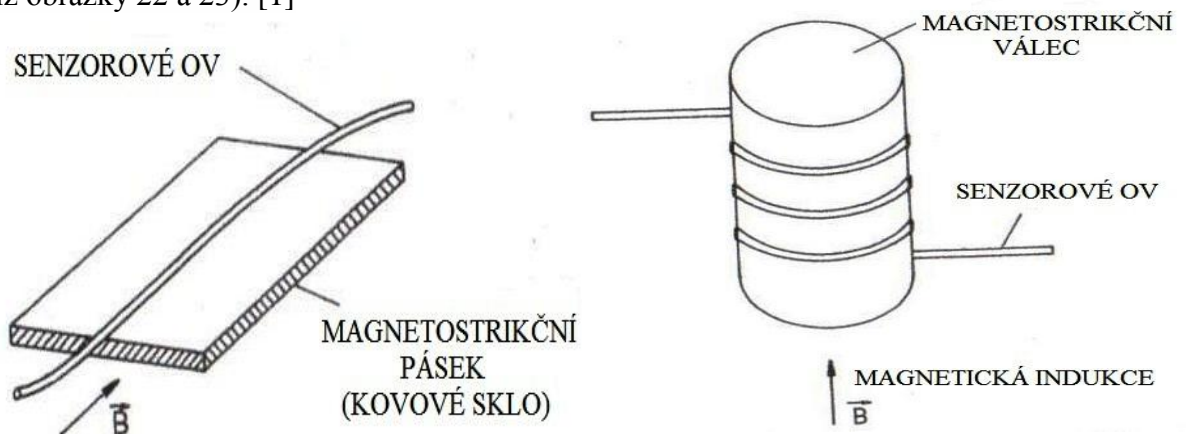
U senzoru magnetického pole je sensorové optické vlákno pokryto vhodnou vrstvou magnetostrikčního materiálu (viz obr. 21), kterým je např. nikl (Ni) nebo se používají také kovová skla. Kovová skla mají speciální mechanické vlastnosti, kterými jsou vysoká pružnost, vysoká tvrdost, odolnost vůči korozi a obtížně se vyrábějí. U magnetostrikčních materiálů se využívá magnetostrikční jev, kdy tyto materiály změni svoje rozměry, pokud

jsou umístěny v magnetickém poli. Práh citlivosti tohoto senzoru při $\Delta\Phi=10^{-6}$ rad a 1 metr vlákna bývá $B_{\text{MIN}}\approx 5\cdot 10^{-13}$ T. Lze měřit magnetickou indukci v rozsahu těchto hodnot $\Delta B = 0,1 - 10^5$ nT ($\Delta f = 0,013 - 200$ kHz). [1], [2], [9], [17], [18], [19]



Obr. 21 Konstrukce senzoru magnetického pole [9]

Dalšími variantami měření intenzity magnetického pole je přilepení magnetostrickního pásku k sensorovému OV nebo namotané sensorové OV na magnetostrickní válec (příklady viz obrázky 22 a 23). [1]



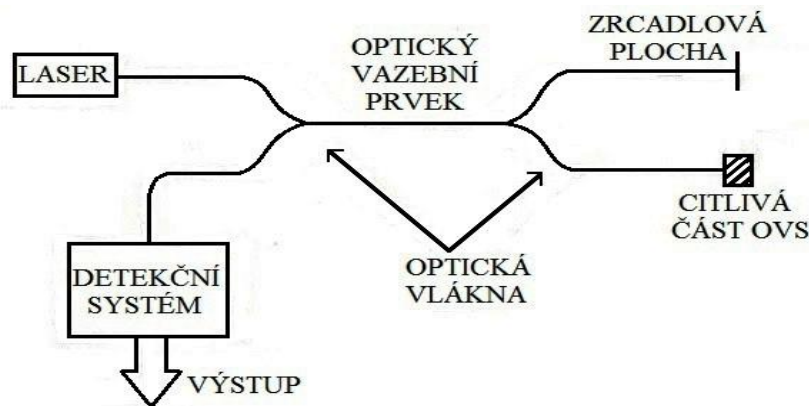
Obr. 22 Senzor intenzity mag. pole a el. proudu [1] Obr. 23 Senzor intenzity mag. pole [1]

Citlivosti senzorů na obrázcích 21 a 22 jsou přibližně totožné. Senzorem na obr. 23 lze snímat i jiné veličiny než jen intenzitu mag. pole a el. proud, ale v ostatních případech musí být válec zhotoven z daných materiálů, válec z gumy se používá pro měření tlaku a z kovu se používá pro měření teploty. Zde se využívá toho, že válec se určitým způsobem deformuje v radiálním směru. [1]

3.2.2 Michelsonův interferometr

Konstrukce Michelsonova interferometru je zobrazena na obrázku 24. Optický signál ze zdroje záření je opět rozdělen do dvou ramen, kterými prochází až na konec daného OV a

poté se světelné vlny odrazí a míří k detektoru záření, kde je zjišťován jejich fázový posun. Michelsonův interferometr je v porovnání s Machovým – Zehnderovým interferometrem citlivější, protože zde optický signál v sensorovém rameni prochází dvakrát měřenou částí. Lze ho používat pro měření podobným způsobem jako Machův – Zehnderův interferometr, ovšem častěji se používá pro měření mikroposuvů a rychlosti pohybujících se plynů a kapalin za použití Dopplerova jevu, který se projeví změnou frekvence signálu. [1], [11], [20], [21]



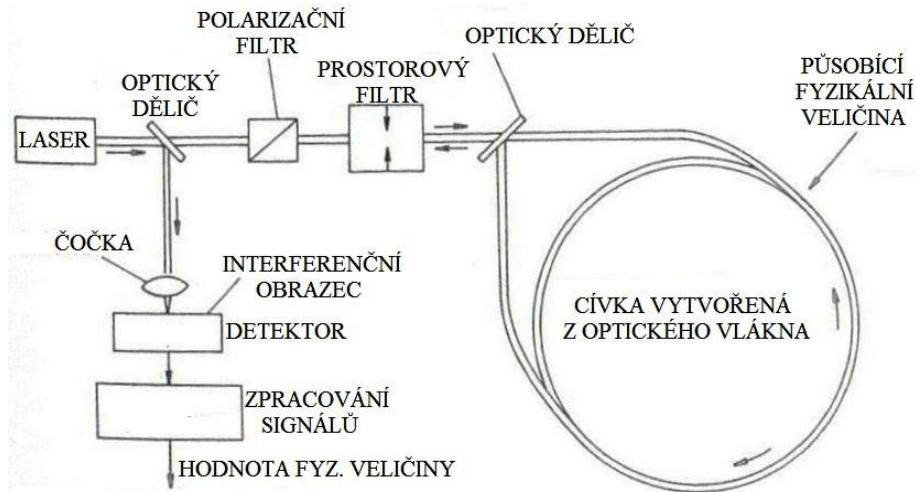
Obr. 24 Konstrukce Michelsonova interferometru [1]

3.2.3 Sagnakovův interferometr

Konstrukce Sagnakova interferometru je zobrazena na obrázku 25. Zde se využívá Sagnakova jevu, kdy prochází dva optické signály proti sobě v cívce vytvořené z jednovidového optického vlákna a pokud tato cívka z OV rotuje úhlovou rychlostí Ω , potom optické signály urazí danou optickou dráhu v jiném časovém okamžiku (změna interferenčního obrazce). Opět je zjišťován fázový posun mezi těmito dvěma optickými signály. [1], [2], [8], [22]

Představitelem této skupiny interferometrů je gyroskop neboli senzor úhlové rychlosti. Fázový posun lze vyjádřit vztahem (10), kde N je počet závitů, S je plocha cívky, λ_0 je vlnová délka ve vakuu, c je rychlost šíření světla, R je poloměr cívky a L označuje celkovou délku optického vlákna. [1], [2], [9], [23]

$$\Delta\Phi = \frac{8\pi N S \Omega}{\lambda_0 c} = \frac{4\pi L R \Omega}{\lambda_0 c} \quad (10)$$



Obr. 25 Konstrukce Sagnakova interferometru [1]

3.2.4 Mezividový interferometr

V této konstrukci se používá jedno sensorové rameno, které může být tvořené vícevidovým optickým vláknem. V tomto optickém vlákně prochází dva nebo více světelných paprsků (vidů), které spolu na výstupu interferují. Při použití vícevidových OV detekujeme ovšem složitější interferenční obrazec. Působí-li daná fyzikální veličina na toto rameno, dojde vlivem působení měřené veličiny u jednotlivých vidů k rozdílné změně fáze. Lze tento interferometr použít většinou jako senzor teploty, akustických signálů, rychlosti proudění kapalin, magnetického pole a elektrického proudu. [1], [2], [8], [24]

3.2.4.1 Mezividový interferometr pro měření teploty

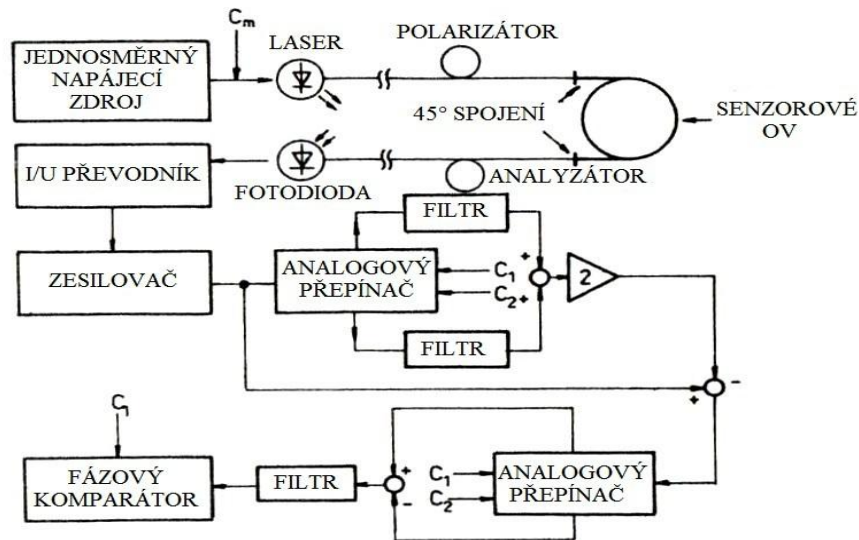
Celovláknová konstrukce dvouvidového OVS teploty je zobrazena na obr. 26. Polarizátor je zhotoven ze smyček běžného jednovidového OV. Zde se využívá dvojlomu sensorového optického vlákna s eliptickým tvarem pláště, který je způsoben mechanickými nebo v tomto případě teplotními vlivy působícími na OV. Ve vlákně poté vznikají rozdílné hodnoty indexu lomu v rovnoběžném a kolmém směru osy vlákna. V konečném důsledku se tento dvojlom pro dva navzájem kolmé polarizované vidy projeví různou rychlostí šíření těchto vidů a dochází k určitému fázovému rozdílu. Závislost fázového posunu na dvojlomu lze vyjádřit vztahem (11), kde f je frekvence světla, L je délka sensorového OV, $B(T)$ je vidový dvojlom sensorového OV, T je teplota a c je rychlost světla: [1], [25], [26]

$$\Delta\Phi(T) = 2 * \pi * f * L * B(T)/c \quad (11)$$

Dvouvidový senzor teploty má citlivost vyjádřenou vztahem (12), kde L je délka OV, k je vlnové číslo, Δn je rozdíl efektivních indexů lomu pro dané vidy, T_0 je pokojová teplota a T_t

je teplota tavení pláště OV. V případě sensorového OV délky 25 metrů bývá citlivost senzoru 37,5 rad/°C a teplotu zde měříme s přesností ±0,01 °C. [1]

$$\frac{1}{L} * \frac{d(\Delta\Phi)}{dT} = \frac{k}{L} * \left[L * \frac{\Delta n}{n} * \frac{dn}{dT} + \Delta n * \frac{dL}{dT} + L * \frac{\Delta n * T_0}{T_0 - T_t} \right] \quad (12)$$

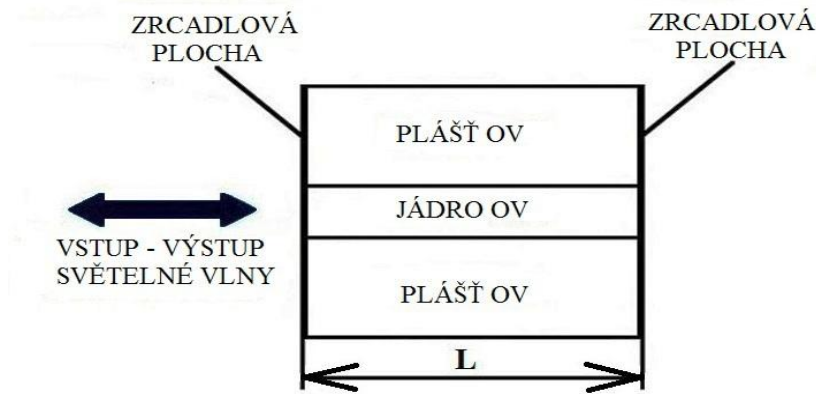


Obr. 26 Konstrukce dvouvidového OVS teploty [1]

3.2.5 Interferometr s Fabryho-Perotovým rezonátorem

Tento interferometr v porovnání s ostatními interferometry je velmi citlivý a lze s ním bodově měřit téměř všechny fyzikální veličiny na hůře přístupných místech (tedy např. kromě úhlové rychlosti), které měříme s ostatními interferometry. Nevýhodou je náročná výroba rezonátoru. Může být také součástí např. Machova-Zehnderova interferometru, kde je umístěn v měřené části sensorového ramene. [1], [12], [27]

Externí konstrukce Fabryho-Perotova optického vláknového rezonátoru je zobrazena na obr. 27, kde by OV sloužilo jako vstupní a výstupní přenosové medium pro optický signál. Rezonátor je tvořen dvěma rovnoběžnými polopropustnými zrcadly. Optický signál projde prvním zrcadlem a směřuje k druhému, kde dochází k jeho částečnému průchodu a odrazu. Odražená světelná vlna dopadá na první zrcadlo a nastává opět částečný průchod a odraz. Tento jev se několikrát opakuje (odražená světelná vlna prochází mezi zrcadly někdy až stokrát) a dochází k mnohonásobné interferenci těchto světelných vln s klesající intenzitou a konstantním fázovým rozdílem. Požadavkem konstruktivní interference je, aby délka rezonátoru (L) byla celočíselným násobkem poloviny dané vlnové délky optického signálu ze zdroje záření. [1], [12], [27], [28], [29]



Obr. 27 Konstrukce Fabryho-Perotova rezonátoru [1]

3.3 Amplitudové (neboli intenzitní) senzory

Amplitudové neboli intenzitní optické vláknové senzory patří v současné době k nejrozšířenějším optickým vláknovým sensorům. Tyto senzory používají koherentní i nekoherentní zdroje záření. Konstrukčně nejsou příliš složité a tomu odpovídá i jejich příznivá cena na trhu. Z hlediska konstrukce se zde dají využít tyto mechanismy – přenos, odraz, mikroohyby, absorpce, rozptyl, fluorescence, polarizace a optické mřížkování. [8], [24]

U těchto sensorů dochází vlivem změny měřené veličiny k modulaci amplitudy optického signálu, který se šíří v optickém vlákně. K modulaci amplitudy optického signálu může dojít následujícím způsobem: [1], [2], [8], [9], [24]

- změnou útlumu optického vlákna nebo optického prostředí mezi vstupním a výstupním OV
- změnou přechodu a odrazu optického signálu
- porušením okrajových podmínek šíření optického signálu
- změnou vzájemné vazby světlovodů
- generací záření

Pro amplitudové senzory se používají pojmy citlivost a modulační index Q . Citlivost S lze vypočítat ze vztahu (13), kde R je citlivost fotodetektoru, R_L je zatěžovací odpor fotodetektoru v Ohmech a I_0 je vstupní optický výkon. [9]

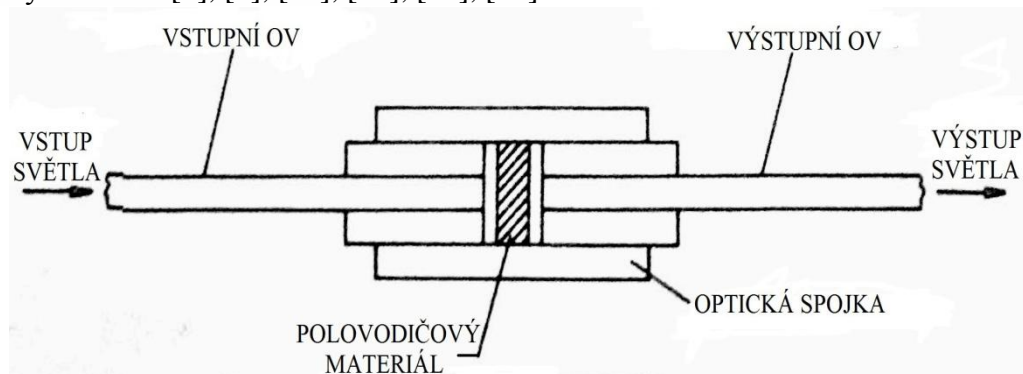
$$S = R * I_0 * R_L * Q \quad (13)$$

3.3.1 Senzory se změnou útlumu

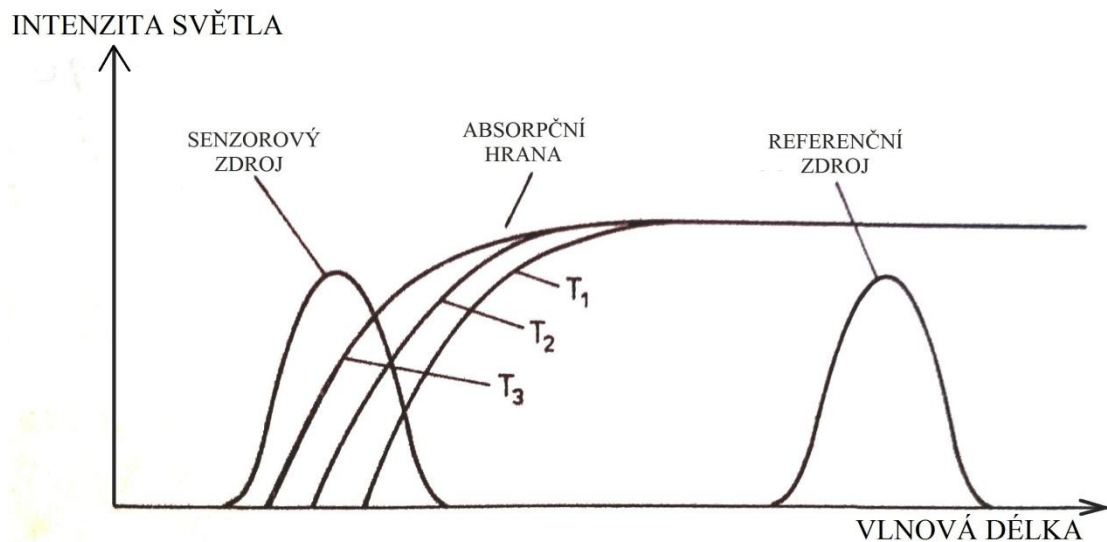
Z hlediska konstrukce lze rozlišit tyto senzory na dva druhy, v jednom případě se působením měřené veličiny změní koeficient útlumu OV (koeficient útlumu OV neboli měrný útlum je poměr útlumu OV a jednotkové délky OV) a v druhém případě se změní útlum optického prostředí mezi vstupním a výstupním OV. Hlavními zástupci tohoto senzoru jsou senzory radioaktivního záření (vlivem působení radiačního záření dochází ke zvýšení absorpce neboli pohlcení záření optického vlákna a tím dojde k zeslabení intenzity záření) a senzory teploty (konstrukce senzorů teploty mohou být provedeny několika způsoby). [1], [8], [30]

3.3.1.1 Senzory se změnou útlumu pro měření teploty

Konstrukce senzoru teploty pracujícího se změnou útlumu optického prostředí mezi vstupním a výstupním OV je zobrazena na obrázku 28. V této konstrukci je polovodičová destička z materiálu GaAlAs (Gallium Aluminium Arsenide) vložena v těsném kontaktu mezi vstupní a výstupní OV. U polovodičů je absorpce fotonů závislá na vlnové délce λ dopadajícího záření (foton je pohlcen v případě, že energie fotonů je větší nebo alespoň rovna šířce zakázaného pásu polovodiče, která se zmenšuje s rostoucí teplotou; absorpční hrana představuje průběh absorpce). Z konstrukčního hlediska musí být splněno několik podmínek, aby sensor správně fungoval (OV musí být umístěna ve stejné ose a konce OV musí být vhodně upraveny). Tyto senzory využívají posunu absorpční hrany polovodiče (viz obr. 29, kde sensorový zdroj světla vyzařuje na jiné vlnové délce než referenční zdroj, který se používá na automatickou kalibraci senzoru), ke kterému dochází vlivem teploty působící na polovodič. V optickém prostředí tvořeného polovodičem dochází poté k pohlcení určité části intenzity záření. Tímto senzorem lze měřit teplotu v rozsahu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost měření bývá $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1], [2], [31], [32], [33], [34]



Obr. 28 Konstrukce senzoru teploty pracujícího se změnou útlumu [34]



Obr. 29 Závislost intenzity světla na vlnové délce pro zdroje záření a absorpční hranu polovodiče při určité teplotě [34]

3.3.2 Senzory s porušením okrajových podmínek šíření optického signálu

Tyto senzory využívají porušení podmínky totálního odrazu (tato podmínka je vyjádřena vztahem (14), kde Θ_d je úhel dopadu světelného paprsku na rozhraní dvou daných prostředí, n_1 je index lomu jádra OV a n_2 je index lomu pláště OV), ke kterému dochází vlivem působení měřené veličiny. Podmínka totálního odrazu říká, že se paprsek na rozhraní dvou prostředí zcela odrazí a v případě porušení podmínky dochází k částečnému lomu paprsku do druhého prostředí. K porušení podmínky totálního odrazu může dojít dvěma způsoby. Jedním způsobem je změna úhlu dopadu paprsku při ohybu OV (mikroohyby) a druhým je změna poměru indexů lomu. Fyzikální veličiny, které lze těmito senzory snímat, jsou síla, tlak, teplota, zrychlení, intenzita elektrického a magnetického pole, koncentrace oleje ve vodě a např. také úroveň hladiny kapaliny. [1], [2], [8]

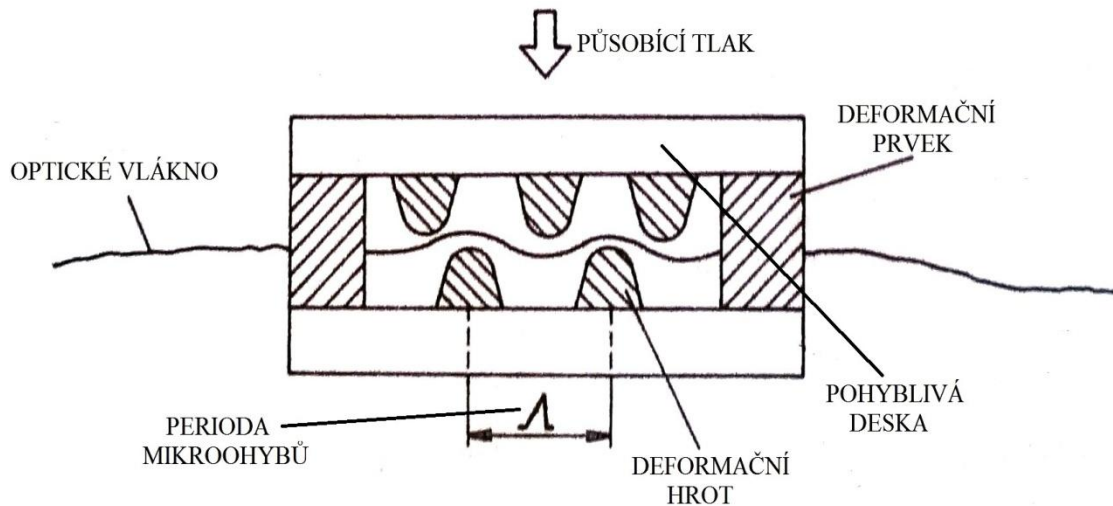
$$\Theta_d \geq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (14)$$

3.3.2.1 Senzory s porušením okrajových podmínek pro měření tlaku a síly

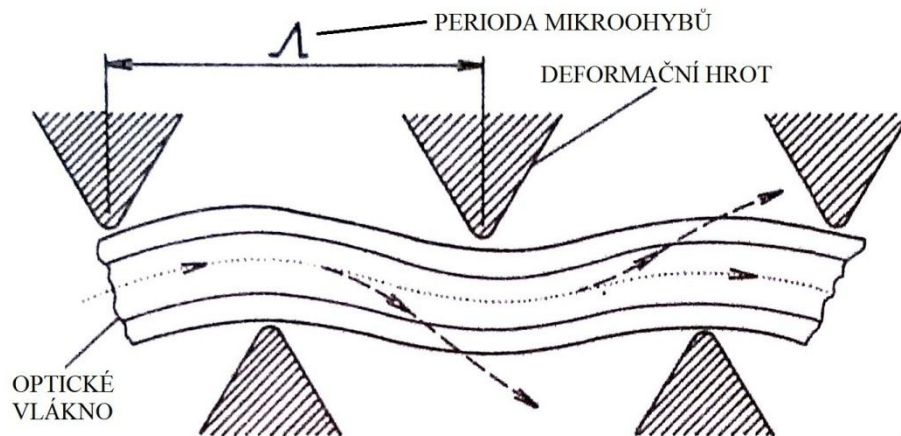
Konstrukce popisovaného senzoru tlaku (síly) je zobrazena na obrázku 30 a 31. Tento senzor pracuje s mikroohyby OV, které vzniknou působením tlaku p (neboli síly F) mezi deformačními hroty a představují periodické zakřivení osy OV. U vidů vyšších řádů (ve vícevidovém OV vidy vyšších řádů urazí delší dráhu oproti vidům nižších řádů) dochází tedy k porušení podmínky totálního odrazu. Pokud použité vícevidové OV při ohybu nedosahuje kritického poloměru zakřivení (viz vztah (15)), poté tyto vidy prostupují do pláště OV nebo až do okolního prostředí mimo OV a v důsledku toho dochází ke zmenšení intenzity záření.

Pokles tohoto optického výkonu je na výstupu následně měřen. [1], [2], [13], [16], [35]

$$R_c = \frac{3 \cdot n_1 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad (15)$$



Obr. 30 Konstrukce senzoru tlaku pracujícího s mikroohyby OV [1]



Obr. 31 Detail OV pro senzor tlaku [1]

Pro senzor tlaku (síly) pracujícího s mikroohyby lze modulační index (jeho hodnota u těchto senzorů bývá $Q = -204 \text{ dB/1 } \mu\text{Pa}$) vyjádřit následujícím vztahem (16), kde T_f je přenos OV, x je vzdálenost mezi deformačními deskami senzoru a p je působící tlak. [1]

$$Q = \frac{dT_f}{dx} * \frac{dx}{dp} \quad (16)$$

Změnu přenosu OV ΔT_f v závislosti na změně působící síly ΔF na deformační desku nebo také na změně tlaku Δp lze vyjádřit následujícími vztahy (17) a (18), kde K_f je koeficient deformace OV, A_s je plocha průřezu, Y_s je Youngův modul, L_s je délka deformačního prvku a A_p je vyjádřený parametr pro senzor tlaku. [1]

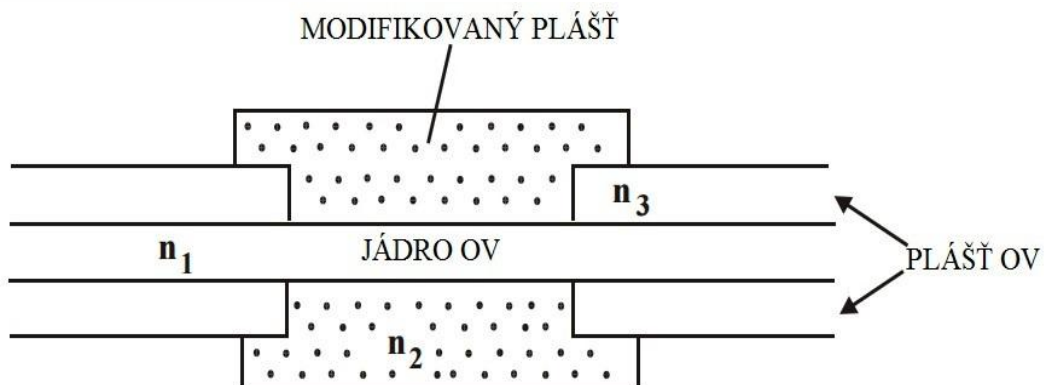
$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * \Delta F * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} \quad (17)$$

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * A_p * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} * \Delta p \quad (18)$$

Práh citlivosti (P_{\min}) zde odpovídá hodnotě cca 62 dB/1 μ Pa a použitelná frekvence zdroje záření je v rozsahu 0,1 do 10 kHz. Dynamický rozsah senzoru bývá 140 dB. Výhodou těchto senzorů je poměrně velká citlivost. [1]

3.3.2.2 Senzory s porušením okrajových podmínek pro měření teploty

Konstrukce popisovaného senzoru teploty je zobrazena na obrázku 32. Zde je využívána závislost indexu lomu OV na působící teplotě, kdy při zvyšující se teplotě klesá hodnota indexu lomu. V tomto případě je citlivá část senzoru (neboli modifikovaný plášť OV s indexem lomu n_2) vyrobena z polyamidu, což je druh termoplastu. Díky těmto změnám indexu lomu pláště OV dochází opět k porušení podmínky totálního odrazu a následně k určitému zmenšení intenzity záření. Tímto senzorem lze měřit teplotu v rozsahu od 45 °C až do cca 85 °C. [1], [9], [31], [36]



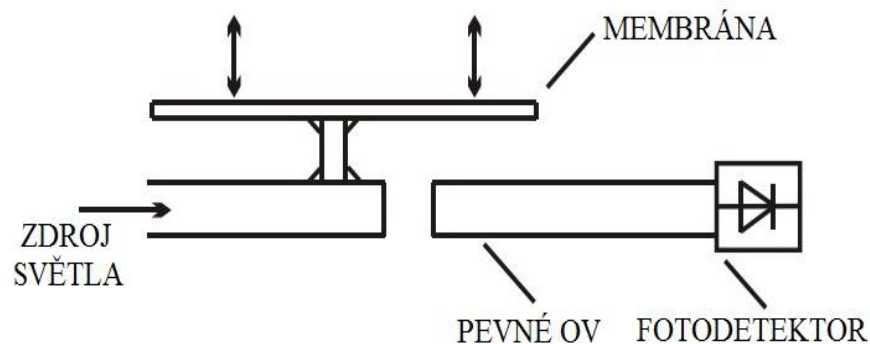
Obr. 32 Konstrukce senzoru teploty využívajícího závislost indexu lomu na teplotě [31]

3.3.3 Senzory se změnou přechodu a odrazu optického signálu

Tyto intenzitní senzory pracují s modulací amplitudy záření a využívají přitom dvou mechanismů, kterými jsou přenos nebo odraz optického signálu. Pro tyto senzory lze vyjádřit modulační index vztahem (19), kde ΔI je změna optického výkonu, I_0 je vstupní optický výkon a p je působící tlak. Z hlediska konstrukce se používá několik variant zapojení. Zde se nejčastěji uplatňují v zapojení vícevidová OV a nevýhodou je požadavek na přesné vyrobení mechanických částí. Těmito senzory lze měřit posunutí a další veličiny (např. tlak a sílu), které můžeme na posunutí převést. [1], [2], [8], [24]

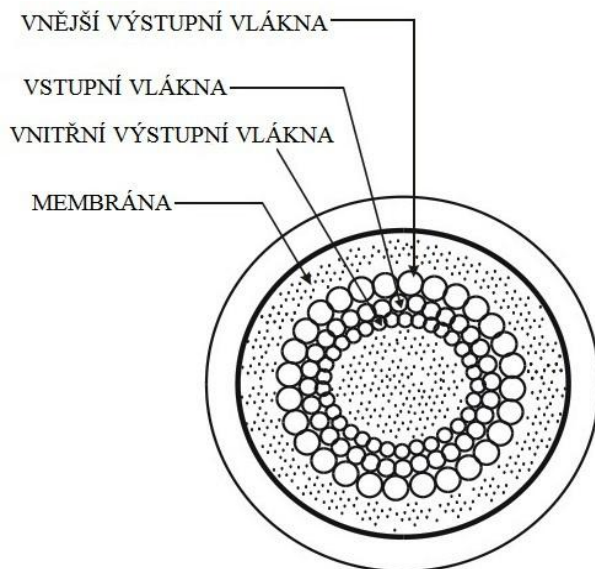
$$Q = \frac{\Delta I}{I_0 * p} \quad (19)$$

Jeden typ konstrukce (viz obr. 33) je vytvořen pomocí zakončených OV, vlivem měřené veličiny dochází ke vzájemnému posunu konců OV v radiálním směru, poté dojde k modulaci intenzity záření a je tedy zjišťována proměnná vazba mezi nimi. Obrázek 33 představuje senzor tlaku, zde se nachází jedno vysílací a jedno přijímací OV a lze zde měřit posunutí v řádech pikometrů. U těchto senzorů lze zvýšit citlivost pomocí optických absorpčních mřížek, které se umísťují na konce OV. [1], [2], [8], [9], [24]

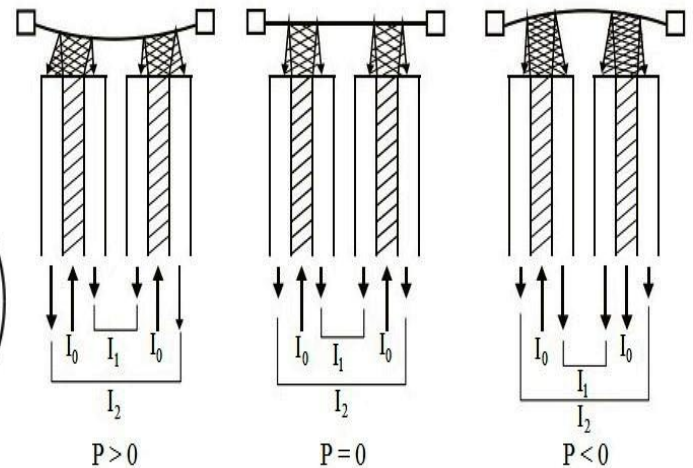


Obr. 33 Senzor tlaku využívající posunutí OV [9]

Další typ konstrukce senzoru tlaku je zobrazen na obrázku 34 a 35. Zde je využíván odraz optického signálu od pohyblivé membrány ze vstupních do výstupních svazků OV. Tím je vytvářena optická vazba mezi nimi a následně je toto odražené záření měřeno. Pohyb membrány je ovlivňován působením měřené veličiny (tlaku). Mezi membránou a OV musí být vytvořena vhodná vzdálenost. Někdy se toto zapojení označuje jako Y-sonda. Práh citlivosti (P_{\min}) zde odpovídá hodnotě cca 80 dB/1 μ Pa, použitelná frekvence zdroje záření je v rozsahu 0,1 do 5 kHz a hodnota modulačního indexu bývá -206 dB/1 μ Pa. Dynamický rozsah senzoru bývá 115 dB. [1], [2], [9], [24]



Obr. 34 Příčný průřez senzoru tlaku [9]



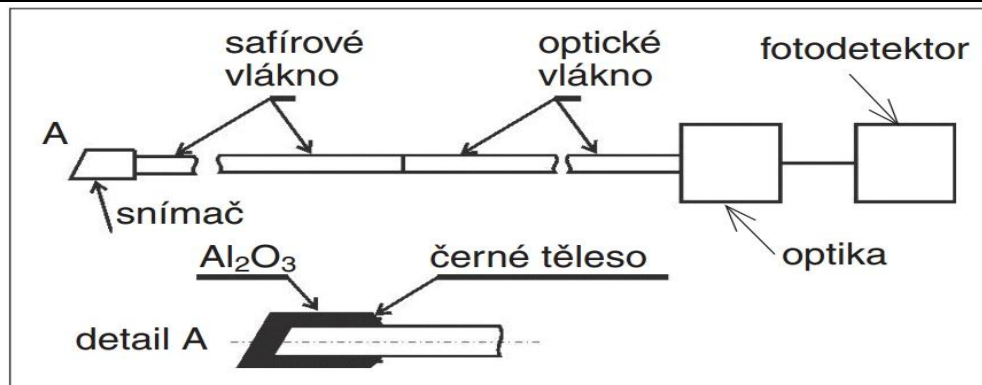
Obr. 35 Princip činnosti senzoru tlaku [9]

3.3.4 Senzory pracující s generací záření

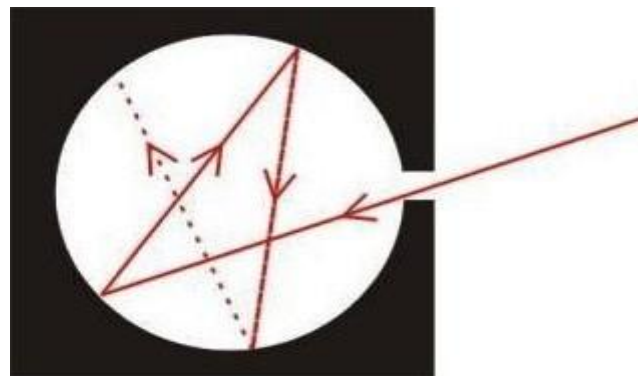
Vlivem působení tepelných, optických, radiačních nebo dalších vlivů dochází u těchto amplitudových senzorů pomocí optického materiálu k pohlcení (případně také k částečnému odrazu) a následnému vyzáření elektromagnetického záření. Těmito senzory lze měřit např. teplotu a intenzitu vysokofrekvenčního magnetického pole. [1], [8]

3.3.4.1 Senzory teploty pracující s generací záření

Tyto senzory teploty bodového provedení (viz obr. 36) využívají pro svojí funkci tzv. černé těleso, které je v tomto případě zhotoveno z uměle vyrobeného monokrystalu oxidu hlinitého (Al_2O_3) s určitou příměsí neboli ze safíru. Samotné černé těleso představuje dutinu, která má malý otvor a vnitřní stěny jsou tvořeny černou matnou plochou (viz obr. 37). Pro určité zjednodušení se používá pojem absolutně (neboli dokonale) černé těleso, což je idealizovaný model, který dokonale pohlcuje a vyzáruje veškerou energii (emisivita absolutně černého tělesa je 1, ale reálná hodnota emisivity je menší než 1). Reálné těleso záření pohlcuje a vyzáruje hůře, protože zde dochází také k částečnému odrazu záření. Princip je takový, že dopadající tepelné záření na povrch černého tělesa je při mnohonásobných odrazech od stěn dutiny pohlcováno a následně dochází k vyzáření elektromagnetického vlnění, které obsahuje různé vlnové délky a ty mají různou intenzitu. Vyzáření elektromagnetické vlnění je přenášeno pomocí oddělovacího safírového vlákna, poté optickým vláknem a dále prochází optickými filtry až k detektoru záření. Na výstupu je posléze detekován signál, který odpovídá měřené teplotě. [1], [8], [31], [37], [38]

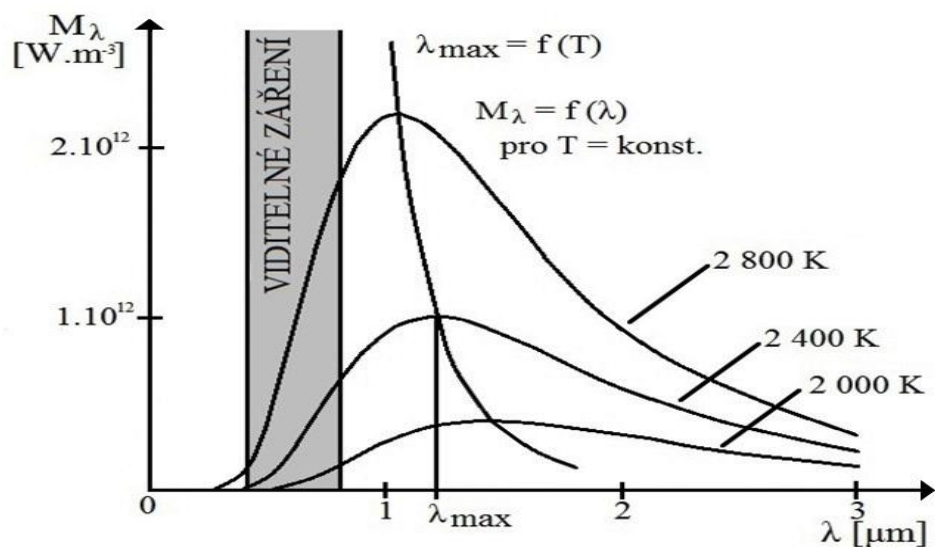


Obr. 36 Senzor teploty pracující s generací záření [31]



Obr. 37 Černé těleso [37]

Princip senzoru lze odvodit ze závislosti spektrální hustoty intenzity vyzařování (M_λ) na vlnové délce vyzařovaného záření (λ) při dané termodynamické teplotě T černého tělesa. Tato závislost je definována Planckovým vyzařovacím zákonem, který lze vyjádřit graficky podle obr. 38. Z grafu vyplývá, že celkové množství vyzářené energie se bude zvětšovat s rostoucí teplotou a dochází k posunu maxima M_λ ke kratším vlnovým délkám. Elektromagnetickému vlnění, které má při určité teplotě největší intenzitu, odpovídá hodnota λ_{\max} . [37], [39], [40]



Obr. 38 Planckův vyzařovací zákon [40]

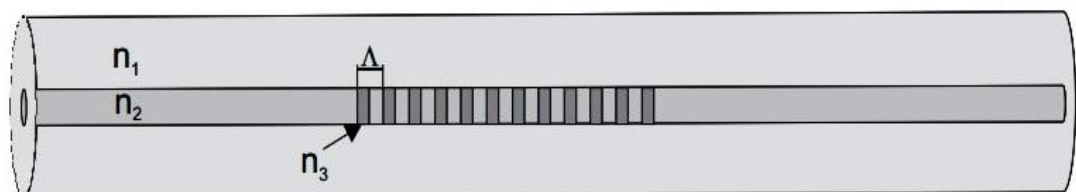
Těmito senzory můžeme měřit teplotu v rozsahu od 500 do 2000 °C, přesnost měření bývá ± 1 °C a lze dosáhnout citlivosti cca 10^{-3} K při teplotě 1000 °C. Tyto senzory vykazují dlouhodobou stabilitu, odolnost vůči vysokým teplotám a korozi. Výhodou těchto senzorů je, že zde není vyžadován klasický zdroj záření (zdroje Laser či LED) jako u většiny senzorů a nevýhodou je technologická náročnost výroby. [1], [8], [31]

3.4 Mřížkové optické vláknové senzory

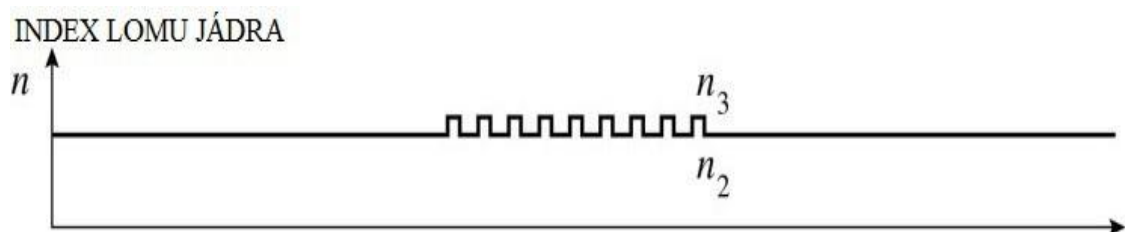
3.4.1 Princip a konstrukce mřížkových OVS

Mřížkové optické vláknové senzory představují optické vlákno určité velikosti a daných parametrů, ve kterém je vytvořena UV zářením struktura optických mřížek (viz obr. 39 a 40). Tato struktura se nachází v jádře optického vlákna a jedná se o trvalou změnu indexu lomu (n_3). Stejná změna indexu lomu této struktury je provedena po určité periodě. Vytvářenou periodu vláknové mřížky můžeme rozdělit na dva druhy: [13], [24], [41], [42], [43]

- vláknové mřížky s periodou 100 – 500 μm
- vláknové mřížky s periodou do 1 μm a menší – tyto vláknové mřížky se nazývají Braggovy vláknové mřížky a jsou označovány zkratkou FBG (z anglického Fiber Bragg Grating)



Obr. 39 Struktura Braggovské vláknové mřížky [13]

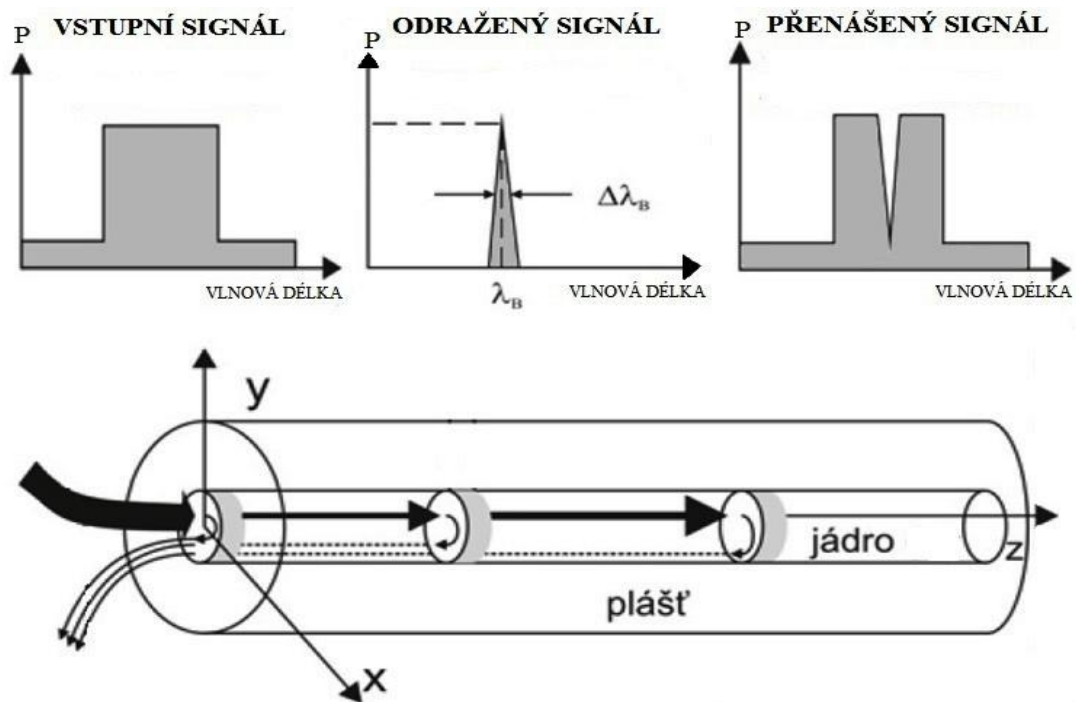


Obr. 40 Profil indexu lomu jádra předešlého obrázku [13]

Optický signál ze zdroje záření je napřed přiveden do této struktury vláknových mřížek. Princip je takový, že pokud přivedené spektrum elektromagnetického záření obsahuje

vlnovou délkou, která odpovídá Braggovské vlnové délce λ_B (viz vztah (20), kde n_{eff} označuje efektivní index lomu mřížky a Λ je perioda vláknové mřížky), poté dochází k odrazu záření o této vlnové délce a zbylé spektrum optického signálu prochází Braggovou vláknovou mřížkou (viz obr. 41). Odražený optický signál je vytvořen z jednotlivých odrazů na každém rozhraní a jednotlivé odrazy jsou ve fázi. [24], [28], [41], [42], [43]

$$\lambda_B = 2 * n_{\text{eff}} * \Lambda \quad (20)$$



Obr. 41 Princip funkce Braggovy vláknové mřížky [24]

Optické vlákno s Braggovou vláknovou mřížkou bývá z důvodu ochrany vůči nepříznivým vlivům prostředí pokryto polymerním materiálem (polyamidem), kovem nebo případně keramikou. V současné době jsou Braggovy vláknové mřížky často používány v telekomunikační technice (filtry) a sensorické oblasti průmyslu (např. ve stavebnictví, energetice, vojenském průmyslu, dopravě, kosmonautice a lékařství). [24], [41], [42]

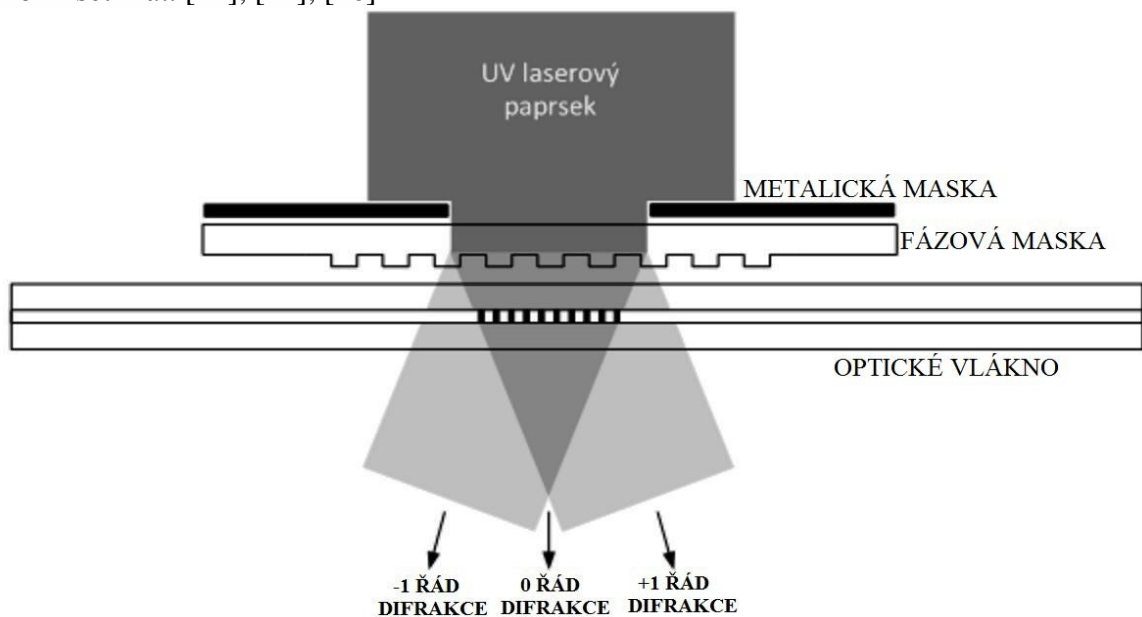
3.4.2 Výrobní proces mřížkových OVS

Braggovy vláknové mřížky lze vytvořit různými metodami, kterými jsou vnitřní zapisování (tato metoda je ze všech nejstarší a je poměrně snadná), interferometrická metoda, fázová maska nebo v současné době nejdokonalejší metoda, která se nazývá bod po bodu (point-by-point). Pomocí těchto metod lze vytvořit různé Braggovy vláknové mřížky (v této práci je popisováno základní provedení, kdy jsou vláknové mřížky vytvořeny kolmo na osu

OV; ale existuje jich celá řada dalších např. vláknové mřížky s fázovým posunem, šikmo vytvořené vláknové mřížky nebo vláknové mřížky s měnící se periodou). Jev, pomocí kterého UV zářením lze změnit index lomu dotovaného jádra na daném místě, se nazývá fotosenzitivita. [24], [44], [45]

3.4.2.1 Metoda fázovou maskou

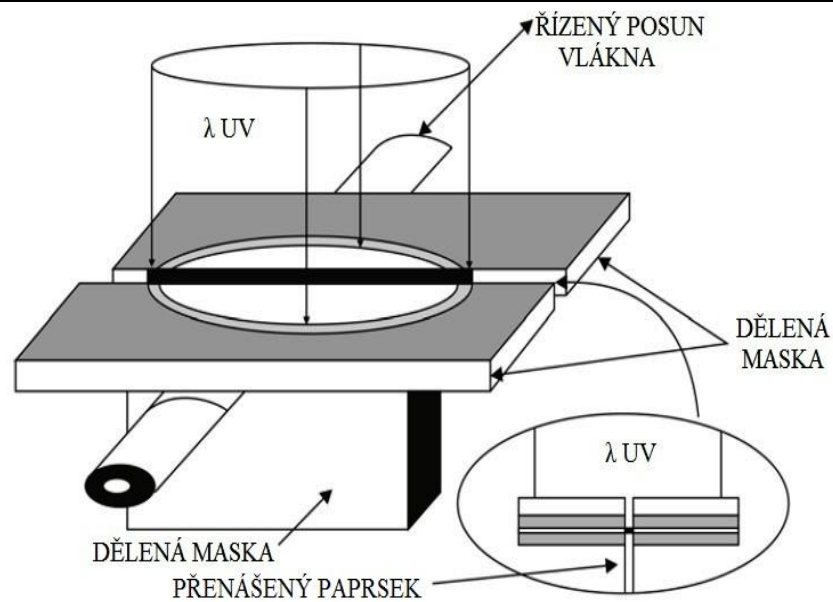
Mřížková fázová maska je optický prvek, který se při výrobě příslušné Braggovy vláknové mřížky nachází nad OV s příměsí germania (Ge). Tato mřížková fázová maska rozděljuje určitým způsobem laserový paprsek, který na ni dopadá kolmo, do dvou difrakčních řádů (označují se ± 1 a nulový řád se snažíme minimalizovat) a tím vzniká daný interferenční obrazec (viz obr. 42). Nakonec se vytvoří perioda vláknové mřížky, která je poloviční než perioda dané mřížkové fázové masky. Tato metoda je velmi efektivní, protože jednu fázovou masku můžeme používat na výrobu stejných Braggových vláknových mřížek opakovaně až několik set krát. [24], [44], [46]



Obr. 42 Metoda fázovou maskou [44]

3.4.2.2 Metoda bod po bodu (point-by-point)

Pomocí této metody lze vyrobit různé druhy vláknových mřížek v závislosti na tom, jakým způsobem budeme dané fotocitlivé OV posouvat při výrobě vláknové mřížky nebo v závislosti na intenzitě záření laseru. Používají se zde pro výrobu pulzní zdroje (lasery), které opět vyzařují ultrafialové záření o dané vlnové délce. Toto záření proniká velice malou šěrbinou až na OV a poté dochází k vytvoření příslušné vláknové mřížky (viz obr. 43). Nevýhodou je časová náročnost výroby. [24], [44]



Obr. 43 Metoda bod po bodu [24]

3.4.3 Senzorické využití mřížkových OVS

Braggovy vláknové mřížky jsou velmi citlivé na teplotu, tlak, pnutí a na ohyb, proto se často používají jako senzory těchto veličin a dalších (např. také jako senzor vibrací a posunutí). Zde se využívá právě vztahu (20), kdy Braggovu vlnovou délku změním tím, že vlivem působení teploty nebo mechanickým namáháním dochází k určité změně periody vláknové mřížky nebo hodnoty efektivního indexu lomu mřížky. Poté dochází tedy k odrazu záření o této změněné Braggovské vlnové délce a zbylé spektrum optického signálu opět prochází Braggovou vláknovou mřížkou. Tyto změny odraženého záření jsou závislé na velikosti dané působící měřené veličiny a následně jsou měřeny a vyhodnocovány. [13], [24], [28], [41]

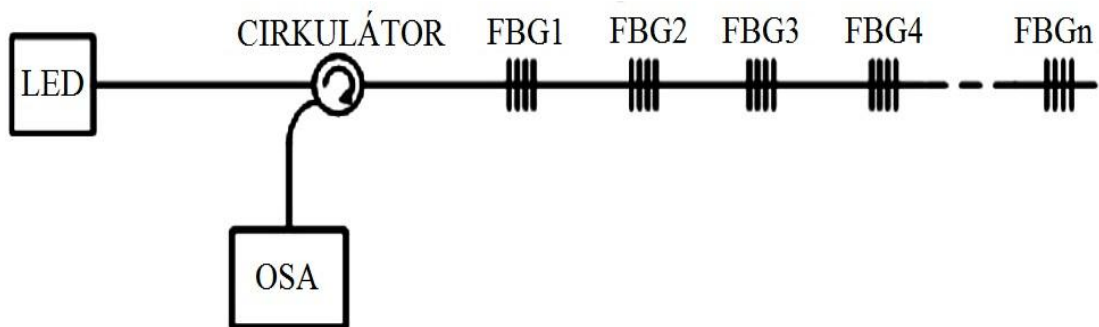
Změnu Braggovy vlnové délky ($\Delta\lambda$), která je závislá na působící teplotě (T) a deformaci OV (ϵ), lze vyjádřit vztahem (21), kde λ_B je počáteční Braggova vlnová délka a p (jeho hodnota bývá 0,22) představuje fotoelastický koeficient daného materiálu. α_Λ označuje koeficient teplotní roztažnosti daného materiálu a dochází tedy k roztahování periody vláknové mřížky. α_{neff} je termo-optický koeficient a v tomto případě dochází ke změně efektivního indexu lomu mřížky. Výraz $(1-p)\epsilon$ popisuje vliv deformace OV na posun Braggovy vlnové délky a druhý výraz popisuje vliv teploty na posun Braggovy vlnové délky. Braggovy vláknové mřížky jsou tedy citlivé na teplotu i deformaci, a proto je potřeba tyto veličiny brát v úvahu a také je od sebe rozlišovat. Předpokladem této rovnice ovšem je konstantní deformace optického vlákna s Braggovou vláknovou mřížkou po celé své délce a ve vlákne by mělo být vytvořeno pouze izotropní prostředí. [41], [47]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - p) * \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_{n_{eff}}) * \Delta T \quad (21)$$

Pro měření více fyzikálních veličin současně se využívá možnosti připojení několika senzorů sériově nebo paralelně (pomocí děliče) na jedno optické vlákno. Každý tento senzor může podle dané aplikace využívat buď odlišnou nebo stejnou Braggovu vlnovou délku. Pokud chceme např. měřit zároveň působící teplotu a deformaci, musíme pro jejich určení použít alespoň dvě Braggovy vláknové mřížky, které mohou právě být stejné nebo různé a pro tyto případy platí určité podmínky. [28], [48]

3.4.3.1 Měření fyzikálních veličin pomocí optického spektrálního analyzátoru

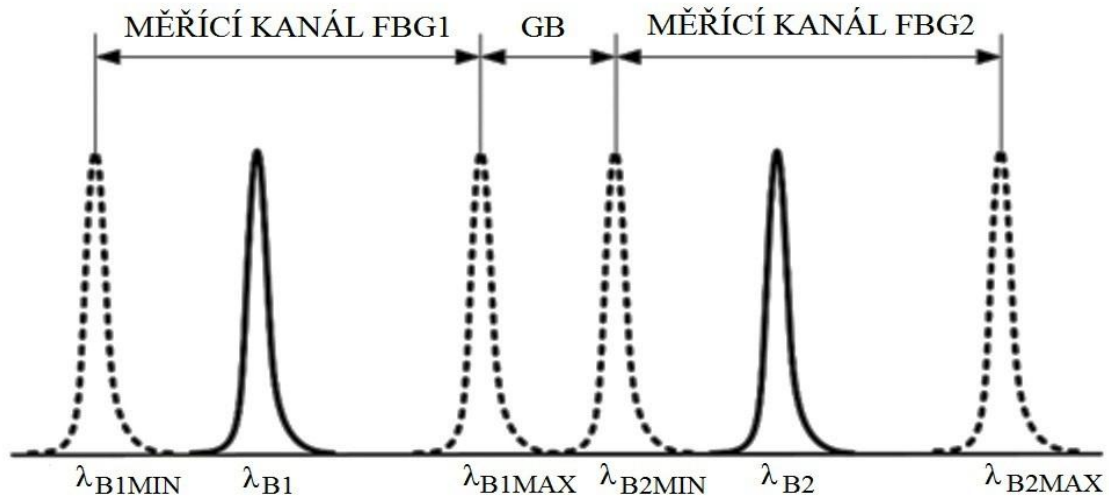
V tomto zapojení se pro měření více fyzikálních veličin současně používá jedno optické vlákno, na kterém je připojeno několik senzorů sériově (viz obr. 44). Obvykle je do série připojeno maximálně 20 FBG senzorů. Každý z těchto senzorů pracuje na jiné Braggovské vlnové délce a můžou měřit různé fyzikální veličiny. Jako zdroj záření může být použit širokospektrální zdroj záření (označován zkratkou SLED). Odražená úzká spektra elektromagnetického záření od jednotlivých Braggových vláknových mřížek prochází přes cirkulátor až k optickému spektrálnímu analyzátoru technikou, která se nazývá vlnový multiplex (označován zkratkou WDM z anglického Wavelength Division Multiplex). Optický spektrální analyzátor (OSA) vyhodnocuje současně všechny tyto odražené signály. [41], [49], [50], [51]



Obr. 44 Měření pomocí optického spektrálního analyzátoru [49]

V takto navrhnutém zapojení je potřeba jednotlivým FBG senzorům předem určit konkrétní fyzikální veličinu, kterou mají měřit, určit také citlivost a měřící rozsah pro danou veličinu. Dále je zapotřebí, v souvislosti s těmito určenými parametry, stanovit měřící kanál, ochranné pásmo (označováno zkratkou GB z anglického Guard Band) a tím také vhodný počet připojených Braggových vláknových mřížek. Měřící kanál představuje možný rozsah změn Braggovské vlnové délky pro jednotlivé vláknové mřížky a ochranné pásmo musíme

stanovit proto, abychom ve výsledném spektru s jistotou rozlišili sousední odražené signály (viz obr. 45, kde index MIN označuje minimální možné působení dané měřené veličiny a index MAX označuje maximální možné působení dané měřené veličiny na danou vláknovou mřížku). [28], [50]



Obr. 45 Měřicí kanál a ochranné pásmo [50]

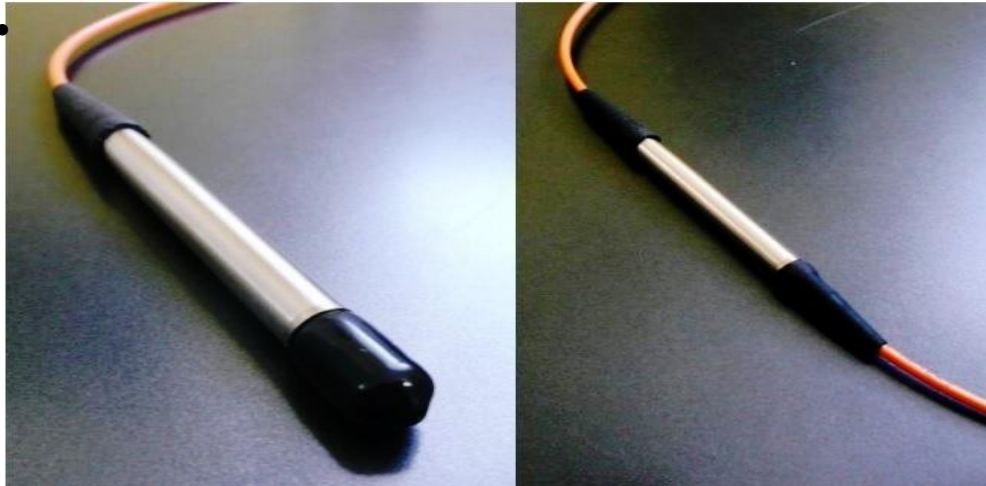
Cena optického spektrálního analyzátoru je poměrně vysoká a z tohoto důvodu se používají i jiné vyhodnocovací techniky, kterými lze převést změnu Braggovy vlnové délky na změnu optického výkonu, frekvence, fáze nebo polohy. Například použitím vlnově závislého filtru lze převádět změnu Braggovy vlnové délky na změnu optického výkonu, kde tento filtr propouští pouze určité vlnové délky. [49]

3.4.3.2 FBG senzor teploty

Konstrukce FBG senzoru teploty je zobrazena na obr. 46 (senzor může být připojen samostatně pomocí jednoho konektoru nebo se může nacházet v sériovém zapojení senzorů se dvěma konektory). Optické vlákno s Braggovou vláknovou mřížkou zde bývá pokryto hliníkem (Al) nebo je k pokrytí použita korozivzdorná ocel (nerezová ocel). Pokrytí optického vlákna je provedeno tak, aby nepůsobil vliv jiných veličin kromě teploty. Vlivem působící teploty dochází k posunu Braggovy vlnové délky prostřednictvím změny efektivního indexu lomu mřížky a změny periody vláknové mřížky. Tyto senzory jsou velmi citlivé na působící teplotu, jsou stabilní a spolehlivé. Jejich použití v průmyslu je velmi široké (např. ve stavebnictví a energetice). Standardními parametry těchto senzorů jsou: [52], [53]

- rozsah vlnových délek: 1525 – 1565 nm

- délka senzoru: 100 mm
- měřicí rozsah: od -20 °C do +80 °C
- přesnost měření teploty: ± 1 °C
- rozlišení teploty: $\pm 0,1$ °C
- typ konektoru: FC/APC (šikmé broušení kontaktních ploch)



Obr. 46 Konstrukce FBG senzoru teploty [52]

3.4.3.3 FBG senzor tlaku s teplotní kompenzací

Konstrukce FBG senzoru tlaku s teplotní kompenzací (neboli vyrovnáváním vlivu teploty) je zobrazena na obrázku 47. Abychom v tomto případě určili deformaci, která je způsobena působícím tlakem, musíme kompenzovat vliv teploty, a proto se zde nachází v těsném kontaktu dvě Braggovy vláknové mřížky. Jedna Braggova vláknová mřížka se používá k měření tlaku a druhá k měření teploty. Velikost požadované veličiny získáme výpočtem pomocí rovnice (21). K pokrytí optického vlákna zde bývá použita korozivzdorná ocel (nerezová ocel). Tento senzor se především používá pro měření tlaku kapaliny v potrubí. Tento senzor také můžeme připojit k různým objektům. Tyto senzory vykazují dlouhodobou spolehlivost, mají široký rozsah měření, vysokou přesnost a rozlišení. Parametry: [54]

- rozsah vlnových délek: 1510 až 1590 nm
- měřicí rozsah tlaku: 0 až 6 MPa
- přesnost měření tlaku: $\pm 1\%$
- měřicí rozsah teploty: -10 až +150 °C

- přesnost měření teploty: ± 1 °C
- rozlišení teploty: $\pm 0,1$ °C
- typ konektoru: FC/APC (šikmé broušení kontaktních ploch)



Obr. 47 Konstrukce FBG senzoru tlaku s teplotní kompenzací [54]

3.4.3.4 FBG senzor posunutí s teplotní kompenzací

Konstrukce FBG senzoru posunutí (rozšíření) s teplotní kompenzací je zobrazena na obrázku 48. Zde se nachází uvnitř konstrukce opět dvě Braggovy vláknové mřížky. Jedna Braggova vláknová mřížka využívá citlivosti mřížky na deformaci pro měření posunutí a druhá mřížka se používá jako teplotní kompenzace. Možnost zapojení do série senzorů. Tento senzor se používá především pro měření posunutí různých konstrukcí ve stavebnictví a jako geologická detekce pohybu. Parametry: [55]

- rozsah vlnových délek: 1510 až 1590 nm
- měřicí rozsah posunutí: 10 až 80 mm
- přesnost měření posunutí: $\pm 1\%$
- rozlišení posunutí: $\pm 0,05\%$
- provozní teplota: -20 až +85 °C
- přesnost měření teploty: ± 1 °C
- rozlišení teploty: $\pm 0,1$ °C
- typ konektoru: FC/APC (šikmé broušení kontaktních ploch)
- použitý materiál: AlMg3



Obr. 48 Konstrukce FBG senzoru posunutí s teplotní kompenzací [55]

Závěr

U optických vláknových senzorů dochází od roku 1972, kdy byly zkonstruovány první optické vláknové senzory akustických signálů ve vodě neboli hydrofony, k obrovskému rozvoji. K tomuto rozvoji přispěly především velmi výhodné vlastnosti optických vláken, které se používají právě na konstrukci optických vláknových senzorů. Těmito výhodnými vlastnostmi jsou nulová hmotnost fotonu oproti elektronu a to je velmi výhodné pro přenos signálů. Foton se může tedy za určitých podmínek pohybovat rychlostí světla, fotony nemají žádný náboj, a proto nemohou být ovlivňovány elektromagnetickým rušením, také kolem sebe nevytvářejí elektromagnetické pole a tím pádem fotony nelze odposlouchávat. K dalším výhodným vlastnostem oproti metalickým vedením patří větší kapacita přenosového kanálu, velká přenosová rychlost a malý útlum signálu. Optická vlákna jsou poměrně levná, ohebná, vysoce pevná v tahu, pružná, vykazují velkou odolnost vůči okolním vlivům, mají malé rozměry, nízkou hmotnost a lze využít široké možnosti multiplexování signálů např. jednoduchý vlnový multiplex, který je označován zkratkou WDM.

Z hlediska konstrukčních prvků je vstup optického vláknového senzoru tvořen zdrojem záření, kterým může být polovodičový LASER nebo LED dioda a výstup tvoří fotodetektor, nejčastěji fotodioda PIN nebo lavinová fotodioda APD. Dále jsou použity elektronické prvky, obvody na řízení zdroje, fotodetektoru a pro zpracování signálu. Ke konstrukci se také používají čočky, konektory a spojky.

Principem optických vláknových senzorů je, že daná měřená veličina prostřednictvím daného fyzikálního (optického) jevu zapříčiní změnu optických parametrů daného prostředí. Využívá se přitom vlastností optických vláken, které jsou v oblasti přenosu signálu nepříznivé. V porovnání s ostatními senzory vynikají díky jejich vysoké citlivosti vůči vnějším vlivům, vysokou spolehlivostí, geometrickou variabilitou a také díky možnosti použití těchto senzorů ve výbušných a hořlavých prostředích. Optické vláknové senzory téměř neovlivňují měřený objekt a dokáží měřit téměř všechny fyzikální, chemické a biologické veličiny.

Optické vláknové senzory lze rozdělit podle měřené veličiny, konstrukce, typu použitého optického vlákna (jednovidové nebo vícevidové optické vlákno) a podle modulace optického signálu. Podle typu modulace optického signálu lze rozdělit tyto senzory na intenzitní, fázové, polarizační, frekvenční, senzory s modulací rozložení vlnové délky a senzory s modulací šířky přenášených optických impulzů.

Fázové senzory neboli interferometry většinou využívají v zapojení jednovidová optická vlákna, u těchto senzorů dochází vlivem snímané veličiny k modulaci fáze světelné vlny, která se šíří optickým vláknem, jsou považovány za nejcitlivější optické vláknové senzory a tyto senzory pracují s interferencí světla. Tyto senzory využívají polovodičový LASER jako zdroj záření. Používají se pro velice přesná měření, mají vysokou pořizovací cenu a jsou konstrukčně a technologicky velmi složité. Těmito senzory můžeme měřit změny fáze řádově o 10^{-8} radiánu a díky tomu jsme schopni zachytit velice malé dráhové změny optického signálu.

Intenzitní senzory nejsou oproti fázovým senzorům konstrukčně příliš složité a tomu odpovídá i jejich příznivá cena. Z hlediska konstrukce se v tomto případě využívají určité mechanismy, kterými jsou přenos, odraz, mikroohyby, absorpce, rozptyl, fluorescence, polarizace a optické mřížkování. U těchto senzorů dochází vlivem změny měřené veličiny k modulaci amplitudy optického signálu. Intenzitní senzory většinou využívají v zapojení vícevidová optická vlákna. Tyto senzory používají koherentní i nekoherentní zdroje záření.

V současné době nejpoužívanějšími optickými vláknovými senzory jsou Braggovy vláknové mřížky, které jsou označovány zkratkou FBG. Tyto senzory představují optické vlákno, ve kterém je vytvořena UV zářením struktura optických mřížek. Tato struktura se nachází v jádře optického vlákna a jedná se o trvalou změnu indexu lomu, která je provedena po určité periodě. Braggovy vláknové mřížky jsou velmi citlivé na působení vnějších vlivů a lze je použít jako senzory různých veličin. Pro měření více fyzikálních veličin současně se v tomto případě využívá možnosti připojení několika senzorů sériově na jedno optické vlákno. V senzorickém použití jsou měřeny a vyhodnocovány změny odraženého záření, které jsou závislé na velikosti dané působící měřené veličiny. Jako zdroj záření může být použit širokospektrální zdroj záření, který je označován zkratkou SLED.

Optické vláknové senzory mají v dnešní době velice široké použití a často se používají zejména v oblastech stavebnictví, strojírenství, energetiky, kosmonautiky, ve vojenském průmyslu a v lékařství.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TURÁN, Ján a PETRÍK, Stanislav. *Optické vláknové senzory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. Pokroky v elektronice a elektrotechnice. ISBN 80-05-00655-1.
- [2] JERHOT, Jaroslav a JIRÁČEK, Milič. *Optoelektronika*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1987. skripta 122 s.
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-184-1.
- [4] KUBÍČEK, Zdeněk. *Optické vláknové spoje*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981. 258 s.
- [5] HORTEL, Milan. Interferometry a vlastnosti laserového záření. *Modular laboratory* [online]. , 7 s. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FZPOP%2Finterferometry%2FZPOP_03.pdf
- [6] Interferometry a vlastnosti laserového záření. In: *Optical Physics Group* [online]. 2007 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf
- [7] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Skládání vlnění. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/452-skladani-vlneni>
- [8] HANÁČEK, František. Nový způsob měření pomocí vláknově optických senzorů s frekvenční změnou na výstupu. *Elektrorevue* [online]. 2009 [cit. 2016-04-25]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/50/novy-zpusob-mereni-pomoci-vlaknove-opticky-ch-senzoru-s-frekvencni-zmenou-na-vystupu/>
- [9] TURÁN, Ján. OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY. In: *Department of Electronics and Multimedia Communications* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www.kemt-old.feit.tuke.sk/predmety/KEMT514_F/_materialy/Prednasky/Pr05/FO_5%20Senzory.pdf
- [10] TEM módy laserového paprsku. *Leonardo technology* [online]. 2013 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=14>

- [11] PAVELEK, Milan. MACHŮV - ZEHNDERŮV INTERFEROMETR. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. Brno, 2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [12] ČÍP, Ondřej a BUCHTA, Zdeněk. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie. In: *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií* [online]. 2011 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf
- [13] HOR KEL, Milan. Vlastnosti optických vláken a optické senzory. *Modular laboratory* [online]. , 8 s. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FZPOP%2FOpticke_senzory%2FZPOP_08.pdf&sc=1
- [14] Anizotropní prostředí. In: *Ostravská univerzita, katedra fyziky* [online]. 2005 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/voptp/skriptum/kap08.pdf>
- [15] KRYNICKÝ, Martin. Hookův zákon. In: *Www.realisticky.cz* [online]. 2010 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/4_Pevne_skupenstvi/2406_Hookuv_zakon.pdf
- [16] BEJČEK, Ludvík. Snímače tlaku. *AUTOMA* [online]. Brno, 2011, 4 s. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/42719.pdf>
- [17] KABEŠ, Karel. Magnetostrikční snímače vzdálenosti. *AUTOMA* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=34229
- [18] Kovová skla (Metallic Glasses). In: *Krondol's viewfinder* [online]. 2010 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://krondol.blogspot.cz/2010/05/kovova-skla-metallic-glasses_31.html
- [19] Princip magnetostrikce. *ALPHA INTERNATIONAL s.r.o.* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/slovník/princip-magnetostrikce/>
- [20] PAVELEK, Milan. MICHELSONŮV INTERFEROMETR PRO ZRCADLOVÉ POVRCHY. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. Brno, 2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0901.htm>
- [21] Dopplerův jev a rázová vlna. In: *FyzWeb* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/Doppler/

- [22] VACEK, Radomír. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Optická vlákna. In: *Czech Digital Mathematics Library* [online]. Praha, 1998 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138474/PokrokyMFA_43-1998-1_3.pdf
- [23] FEJT, Radek. Optický vláknový gyroskop. *Senzory* [online]. 2012 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ovg.htm>
- [24] ŠIŠKA, Petr a HANÁČEK, František. Katedra telekomunikační techniky: Nekomunikační Aplikace Optických Vlákén. In: *DocSlide* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://documents.tips/documents/nekomunikacni-aplikace-optickych-vlaken.html>
- [25] HÁJEK, Martin. ZKUŠENOSTI S MĚŘENÍM POLARIZAČNÍ VIDOVÉ DISPERZE (PMD) JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH KABELOVÝCH TRAS. In: *MIKROKOM* [online]. Praha [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/zkusenosti-smerenim.pdf>
- [26] DREXLER, Petr. VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ: Techniky potlačování dvojlomných jevů v optických vláknech. In: *Nakladatelství VUTIUM* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-04-26]. ISBN 978-80-214-4164-4. ISSN 1213-418X. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4164-4.pdf>
- [27] PAVELEK, Milan. FABRYŮV - PÉROTŮV INTERFEROMETR. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. Brno, 2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1305.htm>
- [28] DUŠEK, Martin a MAZANEC, Michal. Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů. In: *Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a sensorických technologií* [online]. 2012 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [29] POSTAVA, Kamil. Fyzika III - Optika: B. Skalární vlnová optika. In: *NANOTECHNOLOGIE NA VŠB - TUO* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzikaIII_optika_2.pdf
- [30] Měření optického výkonu a útlumu. In: *FAKULTA STROJNÍ: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:

www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/optika2/vlakna-cv.doc

- [31] BEJČEK, Ludvík. Optické vláknové snímače teploty. *AUTOMA* [online]. Brno, 2011, 6 s. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/44586.pdf>
- [32] ZÁVĚTOVÁ, Milena. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Absorpční hrana polovodičů. In: *Czech Digital Mathematics Library* [online]. Praha [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139488/PokrokyMFA_08-1963-3_3.pdf
- [33] HRZINA, Pavel. VLASTNOSTI POLOVODIČŮ A JEDNODUCHÝCH POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR. In: *Ing. Pavel Hrzina: OSOBNÍ STRÁNKA* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://hrzinap.wz.cz/vyuka/X13KVE/vlastnosti_polovodicu.pdf
- [34] Senzory. In: *KATEDRA MIKROELEKTRONIKY: Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: micro.feld.cvut.cz/home/X34FOT/prednasky/prednPower/Senzory.ppt
- [35] Výhody použití bend-optimised vláken. *Bel Stewart s.r.o.* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.belstewart.cz/static/_user/uploads/stahuj/dc_bend_optimised_fiber-cz.mq3j2.pdf
- [36] Refraktometrie. *Analýza léčiv: Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola Hradec Králové* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://anl.zshk.cz/vyuka/refraktometrie.aspx>
- [37] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Záření absolutně černého tělesa. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>
- [38] Safir. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Saf%C3%ADr>
- [39] BEZDOTYKOVÉ TEPLoměRY. In: *ÚPŘT: Ústav počítačové a řídicí techniky VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Bc/5-FCHI09-IC-teplom.pdf>

- [40]BRABEC, Petr a BARTŮNĚK, Filip. Tepelné záření, záření černého tělesa. *FYZIKA 007* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/tepeln-zareni-zareni-cerneho-telesa>
- [41]DVOŘÁK, Milan. Optické senzory. In: *Kompozity.info* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf
- [42]Optické senzory: VÝVOJ A VÝROBA VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK PRO SENZORICKÉ ÚČELY. *NETWORK group* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://www.nwg.cz/index.php?module=shop_catalog&action=list_products&id=183
- [43]FAJKUS, Marcel. Braggovské mřížky. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/3-braggovske-mrizky>
- [44]FAJKUS, Marcel. Výroba Braggovských mřížek. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/4-vyroba-braggovskych-mrizek>
- [45]FAJKUS, Marcel. Typy Braggovských mřížek. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/5-typy-braggovskych-mrizek>
- [46]KOLAŘÍK, Vladimír. Sborník příspěvků multioborové konference LASER54. In: *Alisi: Aplikační laboratoře mikrotechnologií a nanotechnologií* [online]. 2014 [cit. 2016-05-04]. ISBN 978-80-87441-13-8. Dostupné z: <http://alisi.isibrno.cz/upload/files/e-sbornik-la54m.pdf>
- [47]Fundamentals of Fiber Bragg Grating (FBG) Optical Sensing. In: *NATIONAL INSTRUMENTS* [online]. 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/11821/en/>
- [48]FAJKUS, Marcel. Křížová citlivost. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/6-krizova-citlivost>
- [49]FAJKUS, Marcel. Vyhodnocovací techniky. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-

- 05-07]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/7-vyhodnocovaci-techniky>
- [50]FAJKUS, Marcel. Měření s FBG využívající vlnový multiplex. In: *OPTICE: OPTICAL COMMUNICATIONS AND OPTOELECTRONICS* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovske-mrizky/8-mereni-s-fbg-vyuzivajici-vlnovy-multiplex>
- [51]PRAVDA, Ivan. Optické přenosové prostředky (WDM). In: *Fel.jahho.cz* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: [http://fel.jahho.cz/5.semestr/pts/X32PTS-slidy/p%FDedn%A0%E7ka_04%20-%20Optick%82%20p%FDenosov%82%20prost%FDedky%20\(WDM\).pdf](http://fel.jahho.cz/5.semestr/pts/X32PTS-slidy/p%FDedn%A0%E7ka_04%20-%20Optick%82%20p%FDenosov%82%20prost%FDedky%20(WDM).pdf)
- [52]Fibre Bragg Grating Temperature Sensor. In: *SAFIBRA* [online]. 2011 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.safibra.cz/download.php?group=stranky3_soubory&id=201
- [53]FBG Temperature Sensor (P/N: ALTS04). *Alxenses: Your Fiber Optic Sensor Partner* [online]. 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.alxenses.com/ALTS04.html>
- [54]FBG Pressure Sensor (P/N: ALPT01). *Alxenses: Your Fiber Optic Sensor Partner* [online]. 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.alxenses.com/ALPT01.html>
- [55]FBG Displacement Sensors (P/N: ALDS01 & ALDS02). *Alxenses: Your Fiber Optic Sensor Partner* [online]. 2009 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.alxenses.com/ALDS01_ALDS02.html

Seznam tabulek

TABULKA 1 VÝHODY OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SENZORŮ	15
TABULKA 2 SOUVISLOSTI VLASTNOSTÍ OPTICKÉHO VLÁKNA A SNÍMANÉ VELIČINY	17

Seznam obrázků

OBR. 1 HLAVNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SENZORU	16
OBR. 2 TRANSFORMACE FYZIKÁLNÍCH VELIČIN	17
OBR. 3 PŘÍKLAD STANDARDNÍHO USPOŘÁDÁNÍ LED	18
OBR. 4 PŘÍKLAD LASEROVÉ DIODY S DVOJITÝM HETEROGENNÍM PŘECHODEM	19
OBR. 5 V-A CHARAKTERISTIKA FOTODIODY	20
OBR. 6 PROSTOROVÉ ODDĚLENÍ NOSIČŮ	20
OBR. 7 PRINCIP FOTODIODY PIN A PRŮBĚH INTENZITY EL. POLE VE VRSTVĚ I	21
OBR. 8 FREKVENČNÍ MEZE MATERIÁLŮ	22
OBR. 9 PRINCIP LAVINOVÉ FOTODIODY	22
OBR. 10 VLASTNÍ OVS	23
OBR. 11 NEVLASTNÍ OVS	24
OBR. 12 ZAPOJENÍ PŘENOSOVÉHO SENZORU	24
OBR. 13 ZAPOJENÍ ODRAZOVÉHO SENZORU	24
OBR. 14 LASER S PAPRSKEM TEM ₀₀	27
OBR. 15 DISKRÉTNÍ ZAPOJENÍ	27
OBR. 16 INTEGROVANÉ ZAPOJENÍ	28
OBR. 17 CELOVLÁKNOVÉ ZAPOJENÍ	28
OBR. 18 KONSTRUKCE PRO MĚŘENÍ TLAKU	29
OBR. 19 KONSTRUKCE PRO MĚŘENÍ TEPLoty	30
OBR. 20 ZÁVISLOST RELATIVNÍ VÝSTUPNÍ INTENZITY ZÁŘENÍ Z INTERFEROMETRU NA TEPLotĚ PRO DVA RŮZNÉ ROZDÍLY DÉLEK REFERENČNÍHO A SENZOROVÉHO OV	30
OBR. 21 KONSTRUKCE SENZORU MAGNETICKÉHO POLE	31
OBR. 22 SENZOR INTENZITY MAG. POLE A EL. PROUDU	31
OBR. 23 SENZOR INTENZITY MAG. POLE	31
OBR. 24 KONSTRUKCE MICHELSONOVA INTERFEROMETRU	32
OBR. 25 KONSTRUKCE SAGNAKOVA INTERFEROMETRU	33
OBR. 26 KONSTRUKCE DVOUVIDOVÉHO OVS TEPLoty	34
OBR. 27 KONSTRUKCE FABRYHO-PEROTOVA REZONÁTORU	35
OBR. 28 KONSTRUKCE SENZORU TEPLoty PRACUJÍCÍHO SE ZMĚNOU ÚTLUMU	36
OBR. 29 ZÁVISLOST INTENZITY SVĚTLA NA VLNOVÉ DÉLCE PRO ZDROJE ZÁŘENÍ A ABSORPČNÍ HRANU POLOVODIČE PŘI URČITÉ TEPLotĚ	37
OBR. 30 KONSTRUKCE SENZORU TLAKU PRACUJÍCÍHO S MIKROOHYBY OV	38
OBR. 31 DETAIL OV PRO SENZOR TLAKU	38
OBR. 32 KONSTRUKCE SENZORU TEPLoty VYUŽÍVAJÍCÍHO ZÁVISLOST INDEXU LOMU NA TEPLotĚ	39
OBR. 33 SENZOR TLAKU VYUŽÍVAJÍCÍ POSUNUTÍ OV	40
OBR. 34 PŘÍČNÝ PRŮŘEZ SENZORU TLAKU	41
OBR. 35 PRINCIP ČINNOSTI SENZORU TLAKU	41
OBR. 36 SENZOR TEPLoty PRACUJÍCÍ S GENERACÍ ZÁŘENÍ	42
OBR. 37 ČERNÉ TĚLESO	42

OBR. 38 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON	42
OBR. 39 STRUKTURA BRAGGOVSKÉ VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY	43
OBR. 40 PROFIL INDEXU LOMU JÁDRA PŘEDEŠLÉHO OBRÁZKU	43
OBR. 41 PRINCIP FUNKCE BRAGGOVY VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY	44
OBR. 42 METODA FÁZOVOU MASKOU	45
OBR. 43 METODA BOD PO BODU	46
OBR. 44 MĚŘENÍ POMOCÍ OPTICKÉHO SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU.....	47
OBR. 45 MĚŘÍCÍ KANÁL A OCHRANNÉ PÁSMO	48
OBR. 46 KONSTRUKCE FBG SENZORU TEPLoty	49
OBR. 47 KONSTRUKCE FBG SENZORU TLAKU S TEPLOTNÍ KOMPENZACÍ	50
OBR. 48 KONSTRUKCE FBG SENZORU POSUNUTÍ S TEPLOTNÍ KOMPENZACÍ	50