

5 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

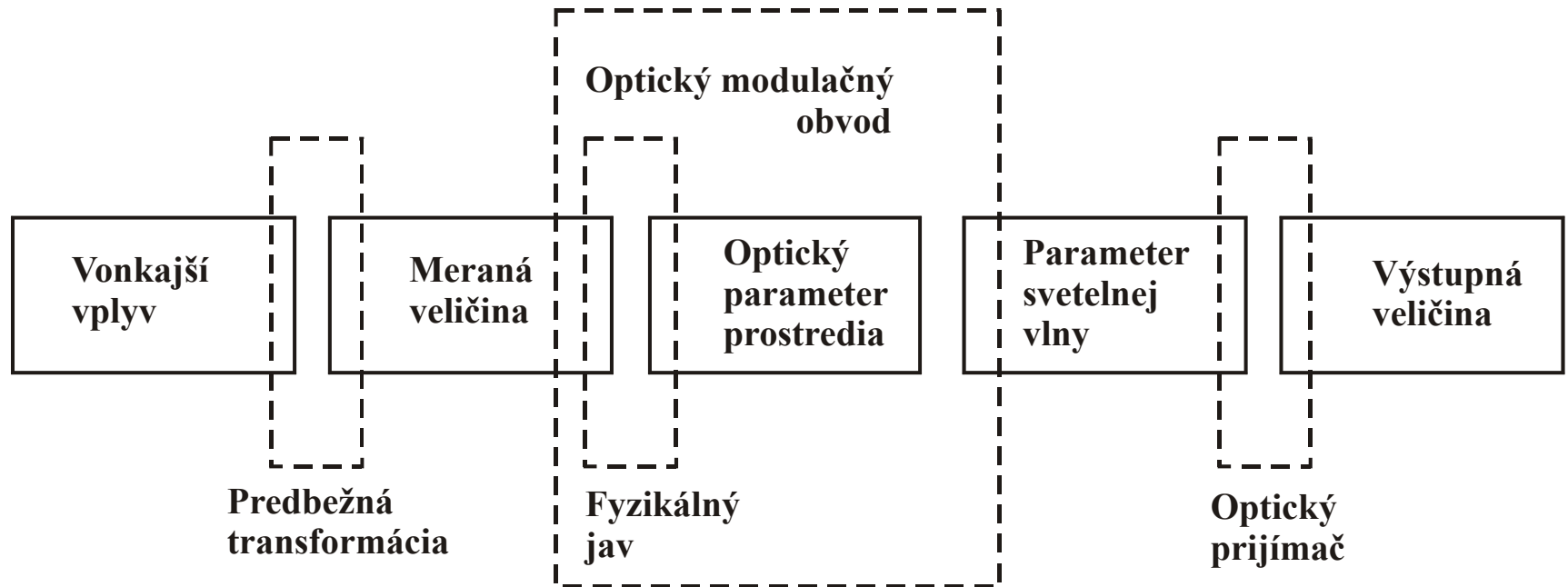
Dr.h.c. Prof. Ing. RNDr. Ján Turán, DrSc.

- Využitie optických vláknién v **“neprenosových” aplikáciách**
 - **Osvetľovanie a pozorovanie**
 - **V nekonvenčných displejoch**
 - **Prenos optickej energie**
 - **V spínačoch**
 - **V systémoch pre spracovanie signálov**
(oneskorovacie vedenia, transverzálne filtre, kodéry, dekodéry, korelátory atď.)
 - **V optických vláknových senzoch rôznych fyzikálnych veličín**
- **Z nekonvenčných aplikácií majú najväčší význam optické vláknové senzory (OVS)**
- **Prvé výskumné práce a aplikácie OVS - **Vojenské účely****
- r. 1972 - hydrofóny
- **Systematický výskum OVS – od r. 1977**

- **Systemy OVS rádioaktívneho žiarenia**
- **V nevojenskej oblasti OVS polohy, elektrického a magnetického poľa, tlaku, teploty a pod.**
- **OVS sa uplatňujú v automatizácii výrobných procesov, v robotike, v kozmonautike, v energetike, v medicíne, v chemickom priemysle a v mnohých iných oblastiach**
- **OVS vynikajú predovšetkým vysokou citlivosťou, geometrickou variabilitou a možnosťami použitia pri vysokých napätiach a teplotách, vo výbušných a ľahko zápalných prostrediach a pod.**

5.1 KLASIFIKÁCIA A ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI OVS

- **Vstup OVS zdroj svetla** (**LED**, polovodičový laser, alebo iný laserový zdroj žiarenia)
- **Výstup OVS fotodetektor** (**PIN** dióda, APD, **PIN – FET** modul)
- **Senzorový prvok je elektrický pasívny prvok**
- **Optický vláknový senzor – Prenosový**
– **Reflexný**
- **OVS**
 - Optické vlákno používa ako **citlivý prvok**
 - Optické vlákno používa ako **prvok vstupu – výstupu** optického signálu
 - Modulácia optického signálu sa uskutočňuje **mimo optického vlákna**
- Rôzne meracie prístroje (**Interferometre, Dopplerove** merače rýchlosti, merače vibrácií a pod.) **s využitím vláknovej optiky**

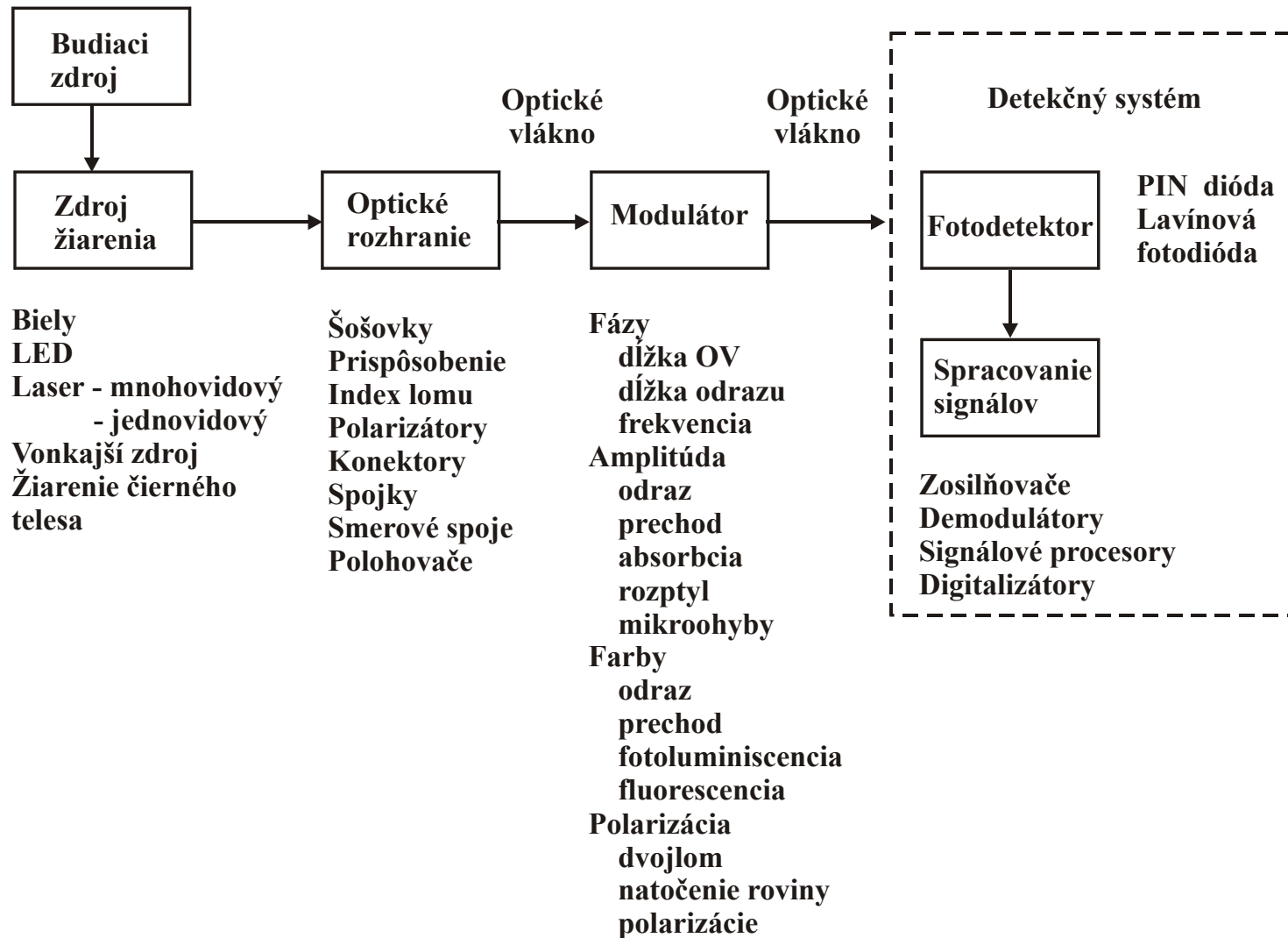


Obr. 5.1 Transformácia fyzikálnych veličín v OVS.

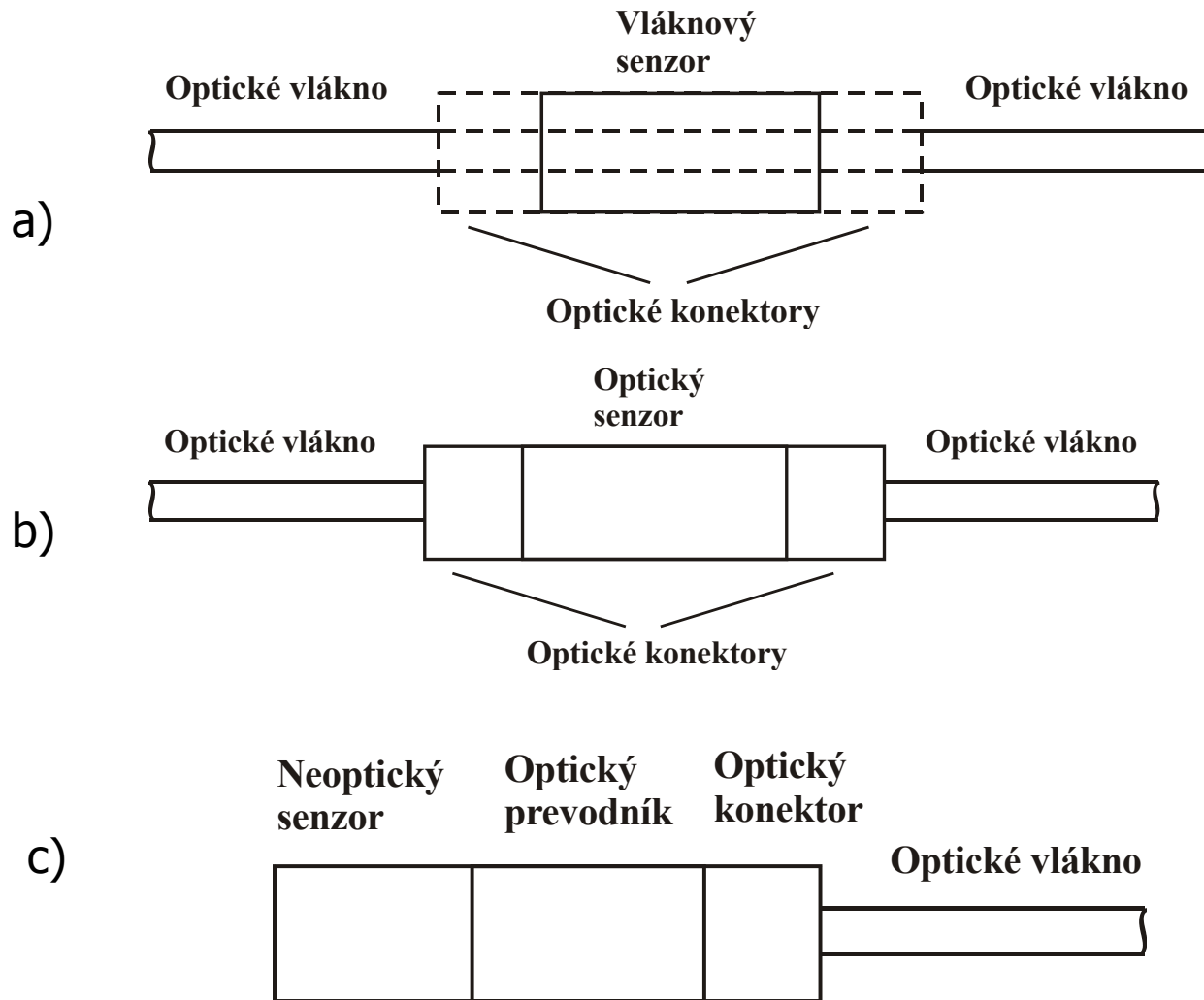
- **Typy konštrukcií OVS**
 - **Vláknovo – optická konštrukcia**
 - **Optické vlákno len ako prvok vstupu – výstupu optického signálu**
 - **Neoptický senzor, optické vlákno sa používa iba na prenos mieronosného signálu**

- **OVS podľa typu použitých optických vlákien**
 - **Jednovidové**
 - **Mnohovidové**

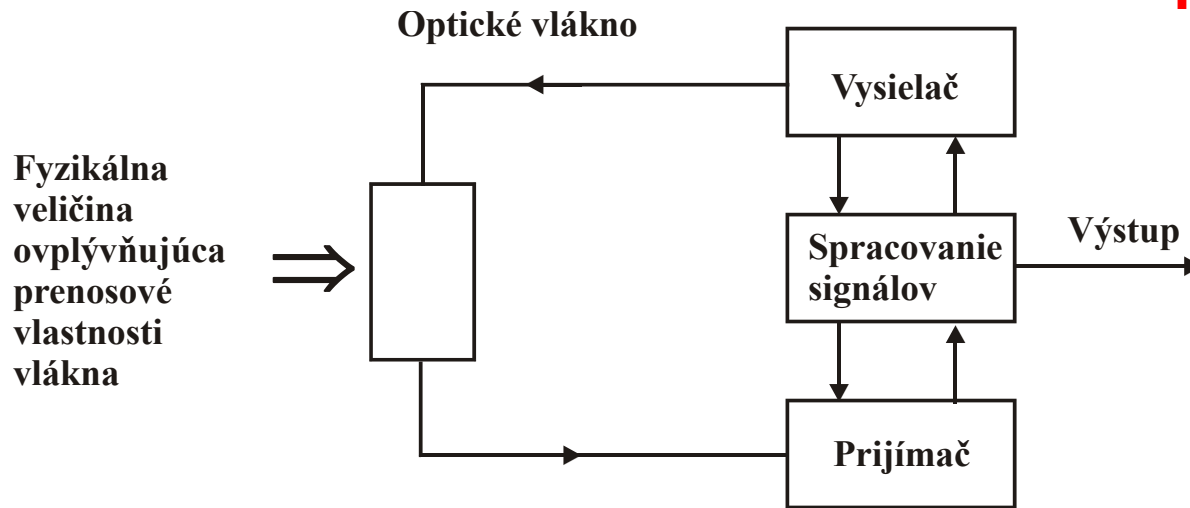
- **Klasifikácia OVS podľa spôsobu modulácie optického signálu**
 - a) **Amplitúdové OVS**
 - b) **Fázové OVS**
 - c) **Polarizačné OVS**
 - d) **Frekvenčné OVS**
 - e) **OVS s moduláciou vlnovej dĺžky**
 - f) **OVS s moduláciou šírky a polohy prenášaných optických impulzov**
- **Parametre OVS**
 - a) **Citlivosť**
 - b) **Prah citlivosti**
 - c) **Dynamický rozsah**
 - d) **Linearita**



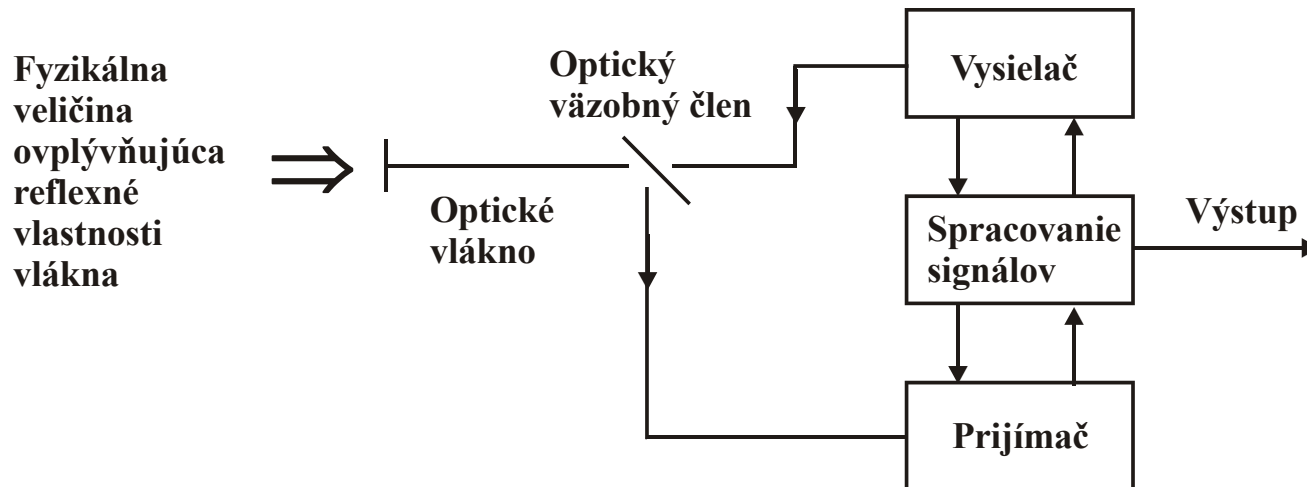
Obr. 5.2 Hlavné konštrukčné prvky OVS.



Obr. 5.5 Konštrukcia OVS: a) vlákňovo – optická, b) optická, c) neoptická.



OBR. 5.3 Základné zapojenie prenosového OVS.



Obr. 5.4 Základné zapojenie reflexného OVS.

5.2 AMPLITÚDOVÉ OVS

- **Amplitúdová modulácia optického signálu**

1. Priamym zoslabením svetla
2. Zmenou priečneho prierezu optického kanála
3. Zmenou odrazových vlastností
4. Ovládaním optického signálu
5. Generáciou doplňujúceho žiarenia

- **Modulačný index**

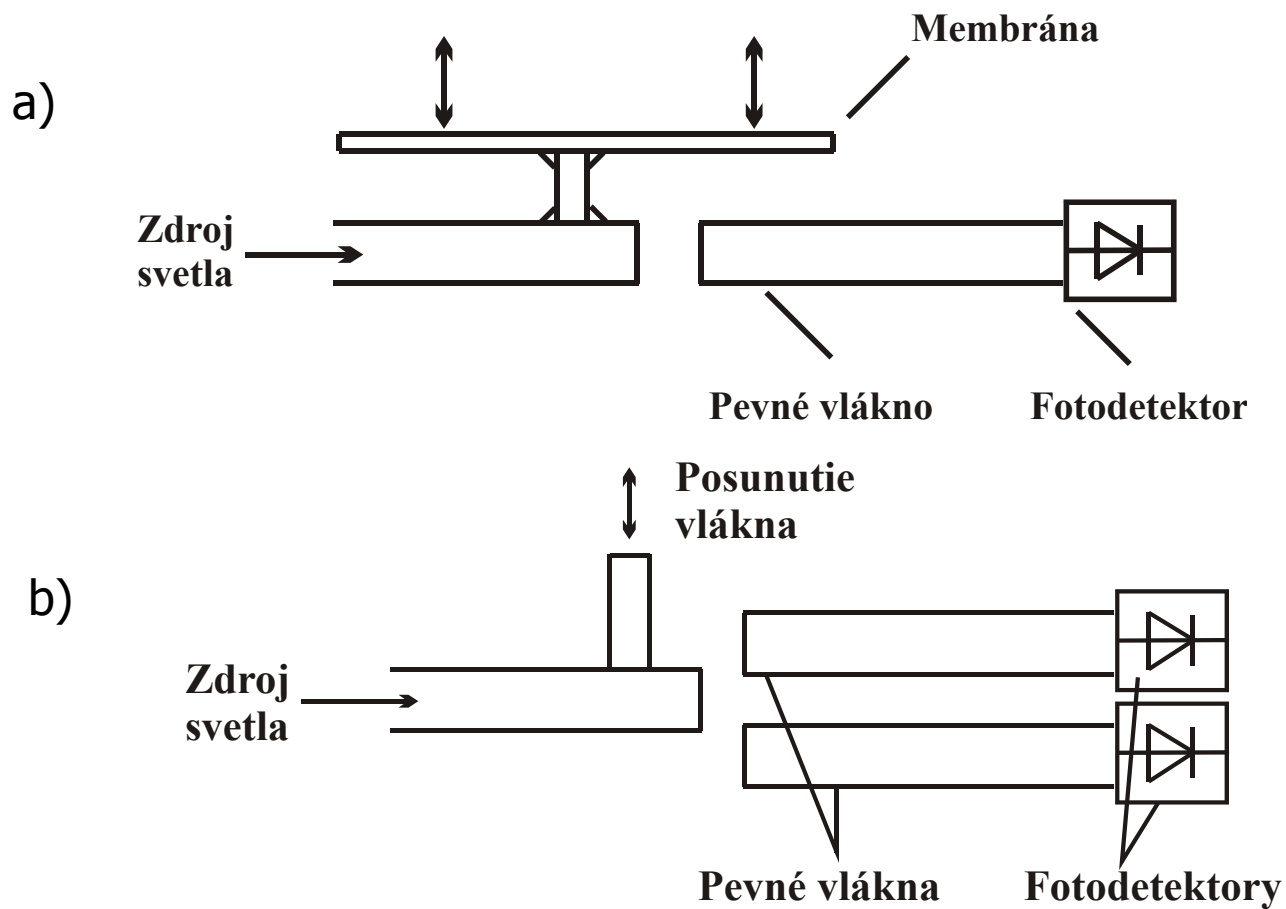
$$Q = \frac{\Delta I}{I_0 P} \quad (5.2.1)$$

ΔI je zmena optického výkonu, I_0 je vstupný optický výkon a P je pôsobiaci tlak

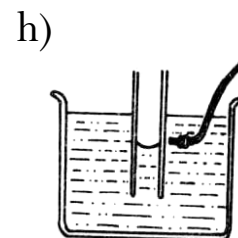
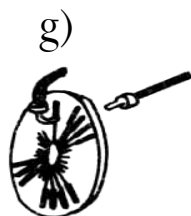
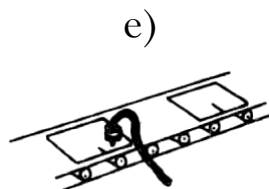
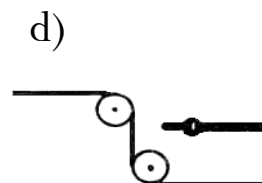
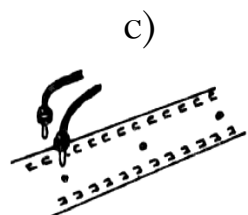
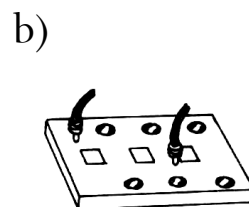
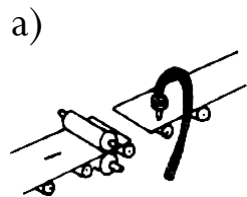
- **Citlivosť'**

$$S = R I_0 R_L Q \quad (5.2.2)$$

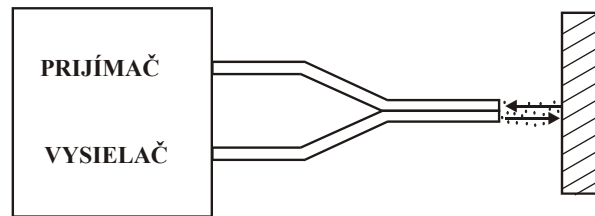
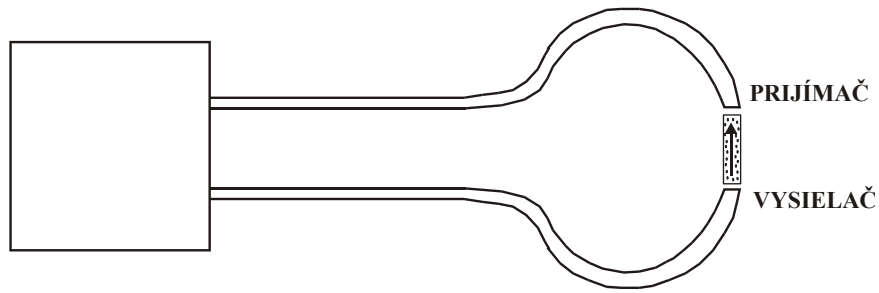
R je citlivosť' fotodetektora (AW^{-1}) a R_L je zaťažovací odpor fotodetektora v (Ω)



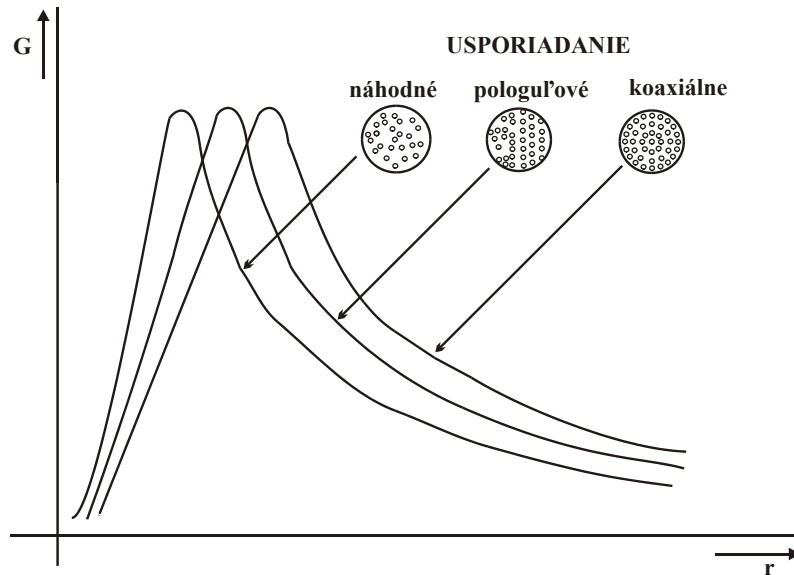
Obr. 5.6 Jednoduché amplitúdové OVS: a) senzor tlaku, b) senzor posunutia.

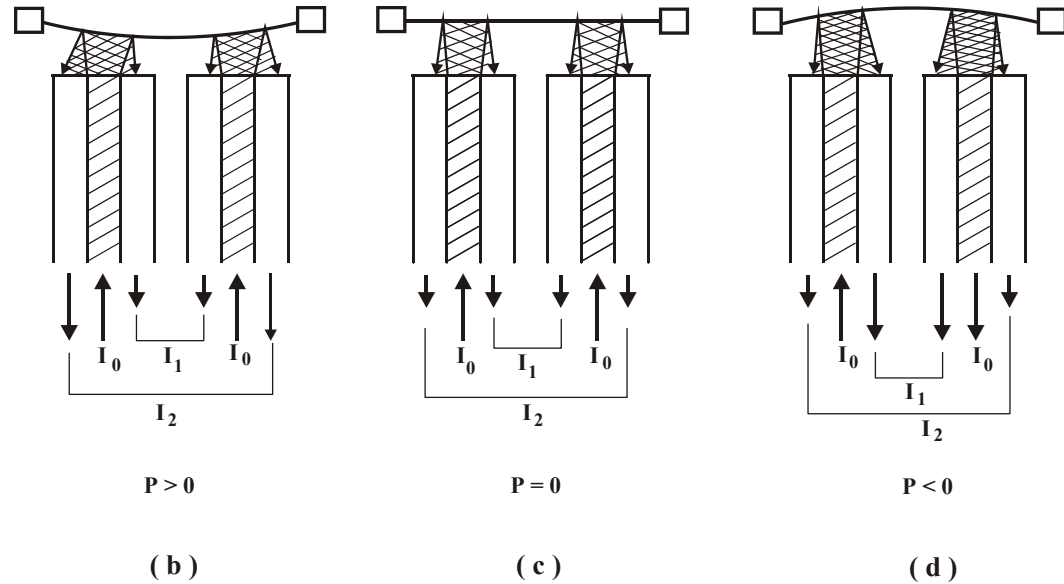
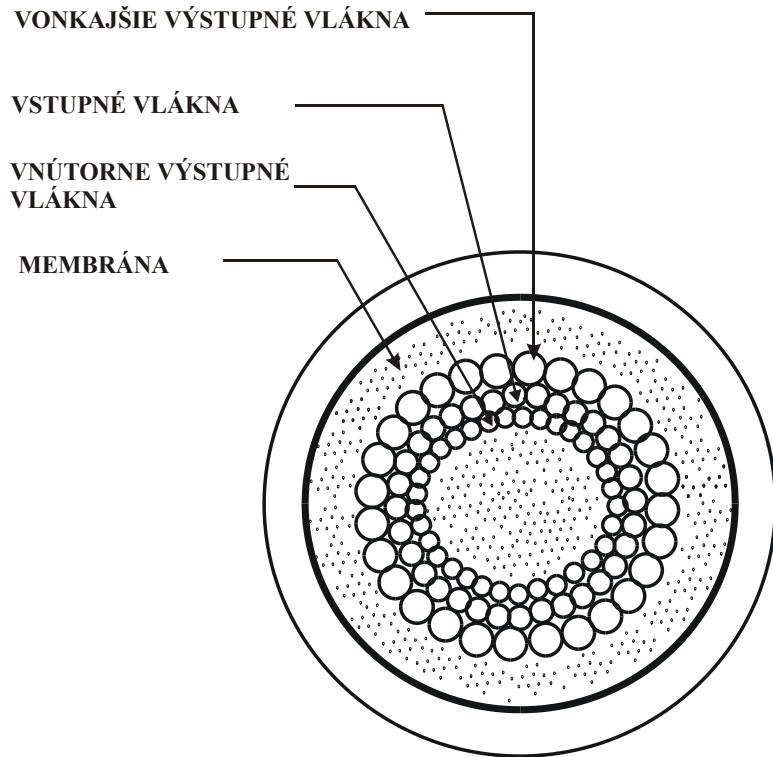


Obr. 5.7 Priemyslové aplikácie jednoduchého amplitúdového OVS.



Obr. 5.8 Senzor prerušenia a blízkosti s využitím zväzku optických vlákien.





Obr. 5.9 Senzor tlaku s využitím zväzku optických vlákien.

- **Prah citlivosti**

$$P_{\min} = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{2eB}{RI_0}}$$

e je náboj elektrónu a **B** je šírka frekvenčného pásma

- **OVS s využitím zväzkov optických vlákien**
- **Senzory prerušenia a blízkosti**
- **Senzor tlaku**
- **MM OF s priemerom jadra 0,1 mm má skoro lineárny prenos pri vzájomnom posunutí do 0,05 mm a 100 % moduláciou pri vzájomnom posunutí o 0,1 mm s dynamickým rozsahom 119 dB**

- **Modulačný index**

$$P_{\min} = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{2eB}{RI_0}}$$

x je vzdialenosť vlákien

a je priemer jadra **OV**

ω je kruhová frekvencia akustického signálu

R_A je akustická impedancia

- **Prah citlivosti 80 dB vzhľadom na $1\mu\text{ Pa}$**
- Citlivosť možno zvýšiť umiestnením vhodných optických prvkov medzi prerušované konce optických vlákien

$$Q = \frac{1}{\pi\omega R_A a \sin \theta} (1 - \cos 2\theta)$$

$$\cos \theta = x / 2a$$

- Pohyblivá guľová šošovka
- Absorpčná optická mriežka
- **Modulačný index**

$$Q = \frac{2}{R_A \omega \Gamma}$$

kde Γ je perióda mriežky ($< 5 \mu\text{m}$)

- **Ďalšia úprava koncov optických vlákien je ich šikmé obrúsenie**

Prah citlivosti je okolo 60 dB

- **Tieto OVS vhodné na konštrukciu senzorov teploty, zrýchlenia, prietoku, tlaku, deformácie a vibrácií**

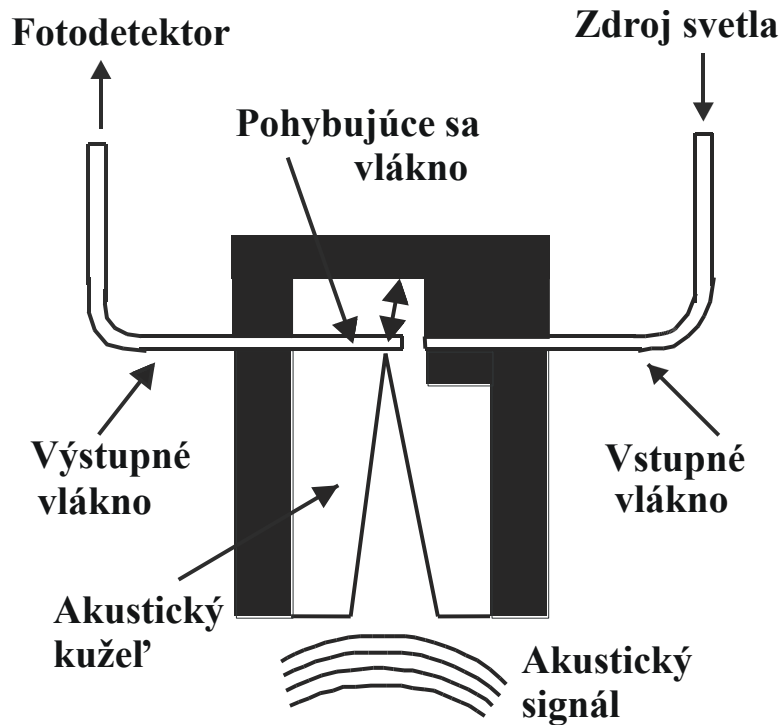
- **Modulačný index**

$$Q = \frac{dT}{dx} \frac{dx}{dP} \quad (5.2.6)$$

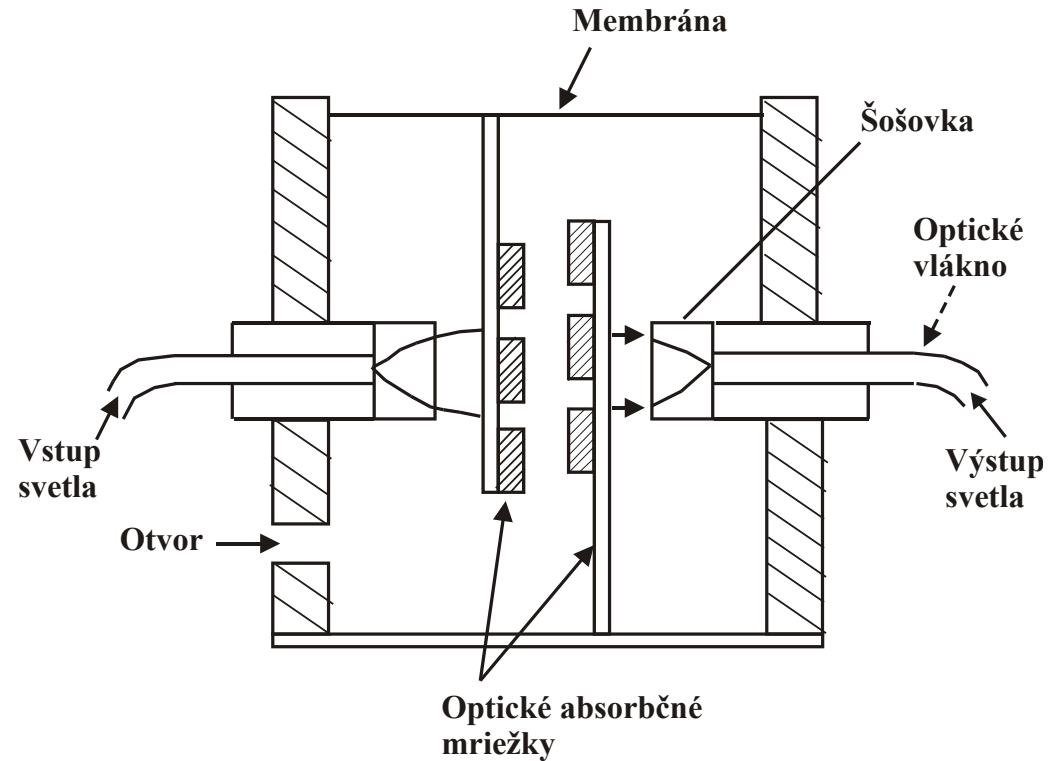
kde **dT** je zmena prenosu **OV** a **dx** je zmena vzdialenosti medzi tlakovými platničkami, spôsobená zmenou tlaku **dP**

- **Prah citlivosti týchto OVS býva ~ 60 dB**
- **Holé jadro ponorené v kvapaline**
 - Na tomto princípe sú založené citlivé **OVS** optickej hustoty, koncentrácie, úrovne kvapaliny a pod.
 - Presnosť merania je 10^{-3} až 10^{-4}
 - Meranie koncentrácie oleja vo vode (v rozsahu 0 až 200 **ppm**)
- **Modulácia intenzity svetla odrazeného** od rozhrania konca jadra **OV** a prostredia, ktoré ho obklopuje, možno využiť v **OVS** akustických signálov, teploty a tlaku, ale aj ako senzory úrovne hladiny kvapaliny

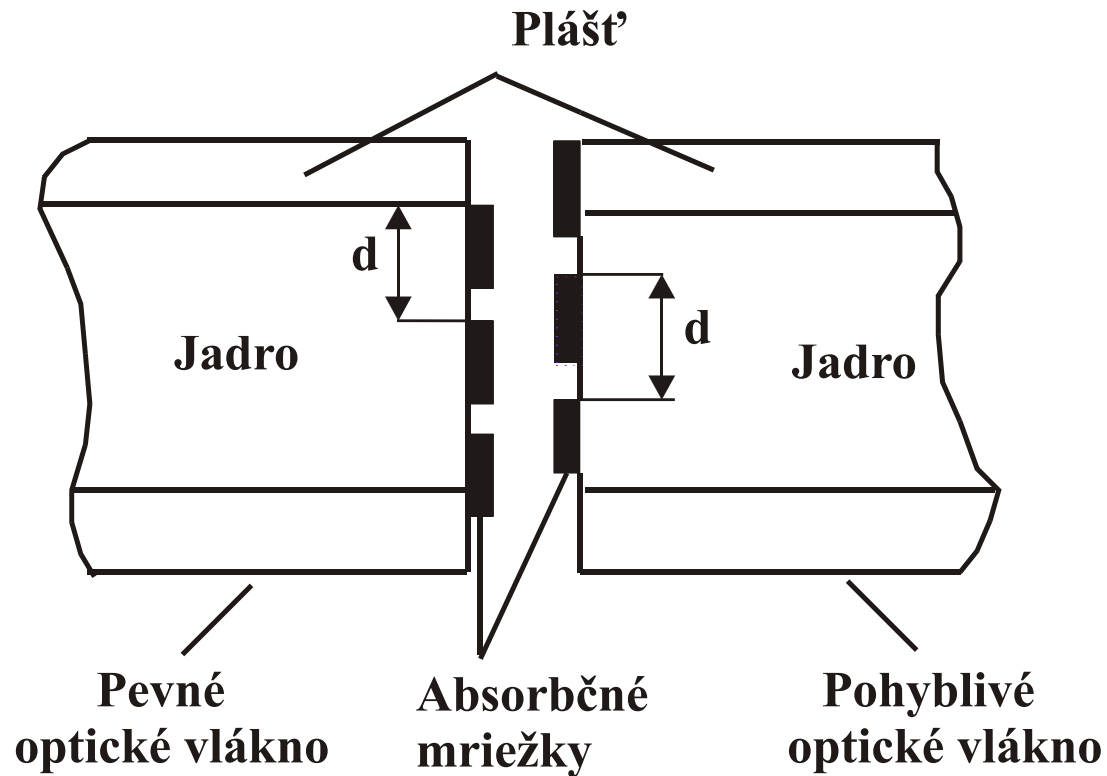
- Mienenie Intenzity svetla **zmenou koeficientu väzby** medzi dvoma navzájom viazanými optickými vláknami
- Prah citlivosti ~ 50 **dB**
- **OVS** založené na **meraní zmien tlmenia** optického vlákna, vyvolaného snímanou fyzikálnou veličinou (tlakom, rádioaktívnym žiarením a pod.)
- **Zmena priezračnosti vplyvom pôsobenia rádioaktívneho žiarenia**
- **OVS** rádioaktívneho žiarenia v oblasti od 10^{-3} do 10^6 **Rad**
- **Optické vláknové prietokometre**
 - Využitie silového pôsobenia pretekajúceho média na senzorový plavák
 - Využitie vzniku periodických kmitov optického vlákna vplyvom turbulencie pretekajúceho média



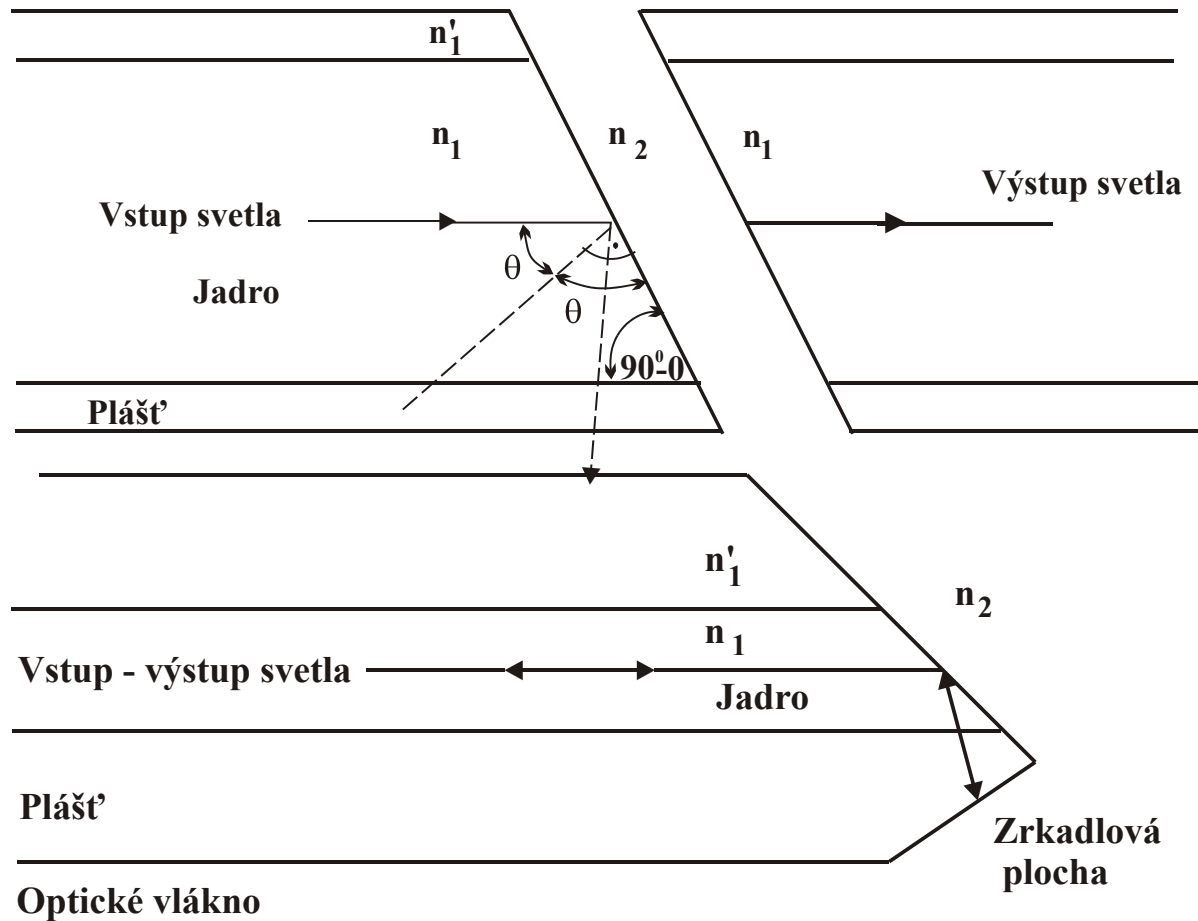
Obr. 5.10 Optický vláknový mikrofón.



Obr. 5.11 Optický vláknový hydrofón s pohyblivými optickými mriežkami.

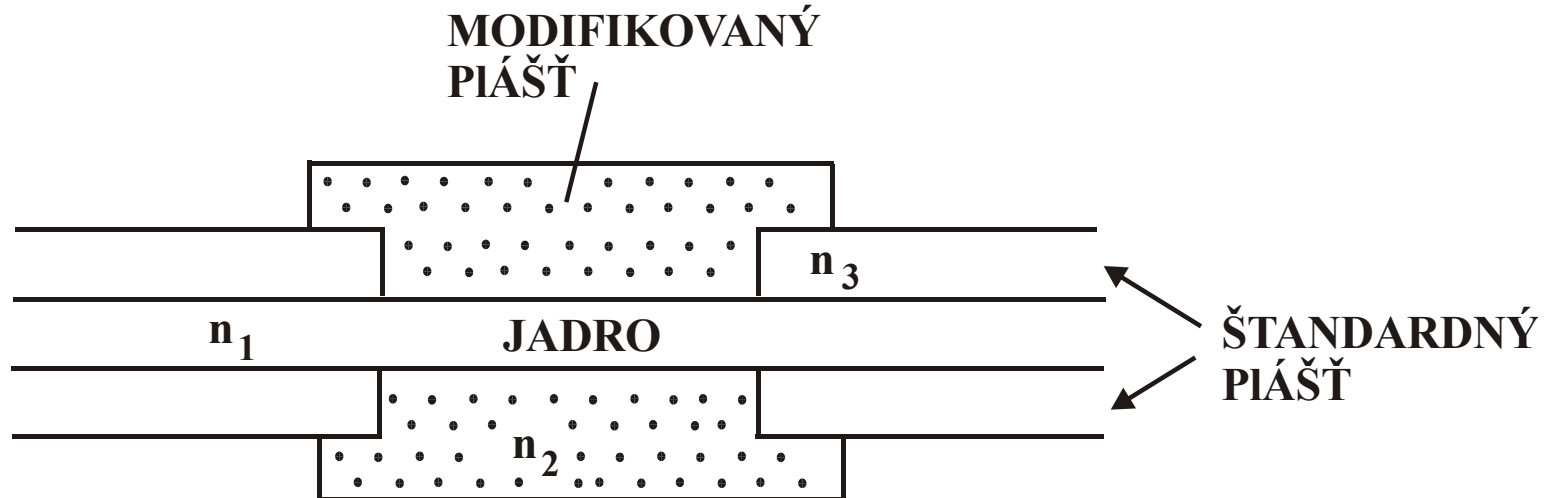


Obr. 5.12 Zvýšenie citlivosti amplitúdového OVS nanesením optických mriežok na optické vlákno.



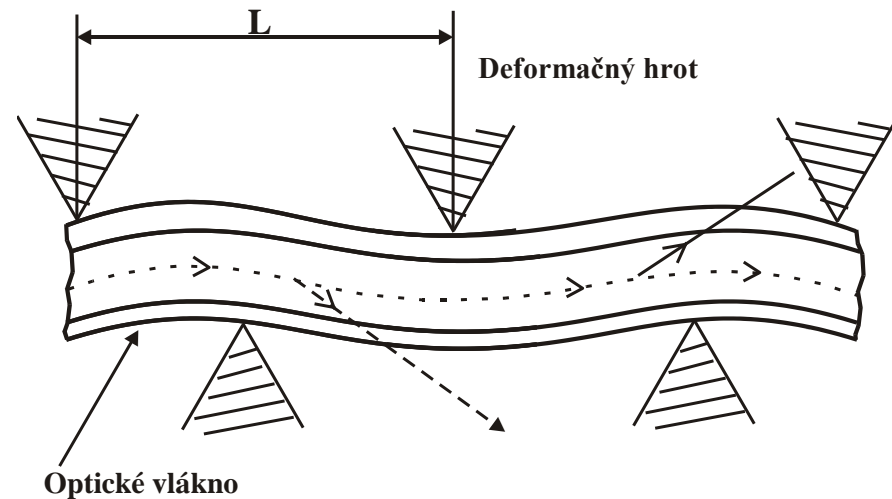
Obr. 5.13 Reflexný OVS využívajúci totálny odraz na rozhraní vlákno - prostredie.

- Citlivejšie metódy modulácie intenzity optického signálu sú založené na zmene okrajových podmienok pre šírenie svetla v jadre optického vlákna
- Modifikácia plášťa optického vlákna na určitom úseku
Senzory chemických veličín, koncentrácie oleja, ale aj biologických objektov



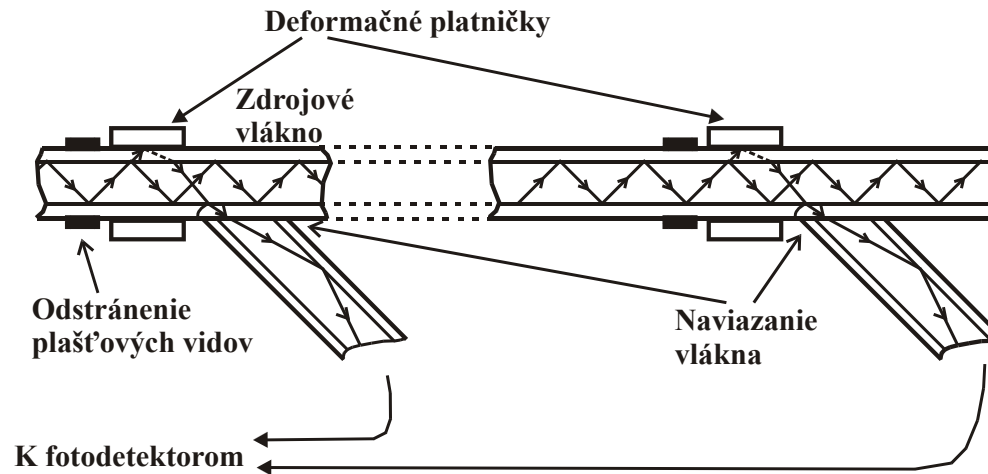
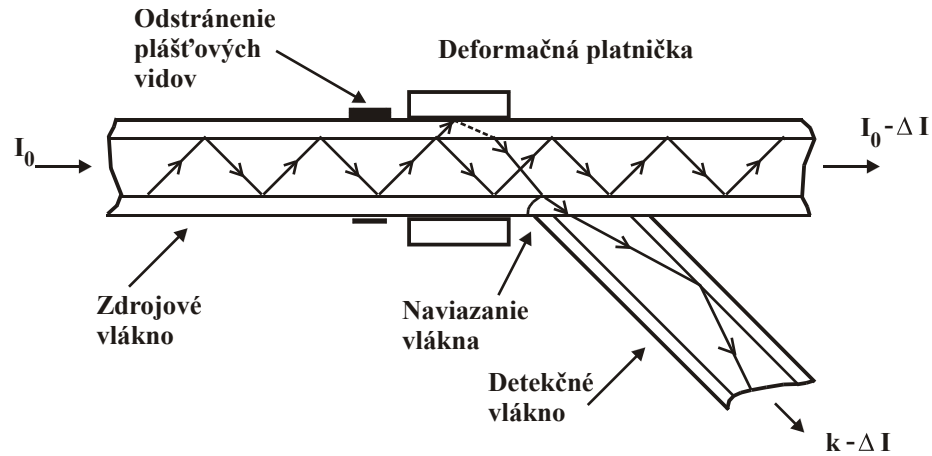
Obr. 5.14 Amplitúdový OVS s využitím modifikovaného plášťa.

- **Vytvorenie periodických mikroohybov**
- **Mikroohybový OVS s využitím žiarenia**
- **V tmavom poli**
- **Vo svetlom poli**

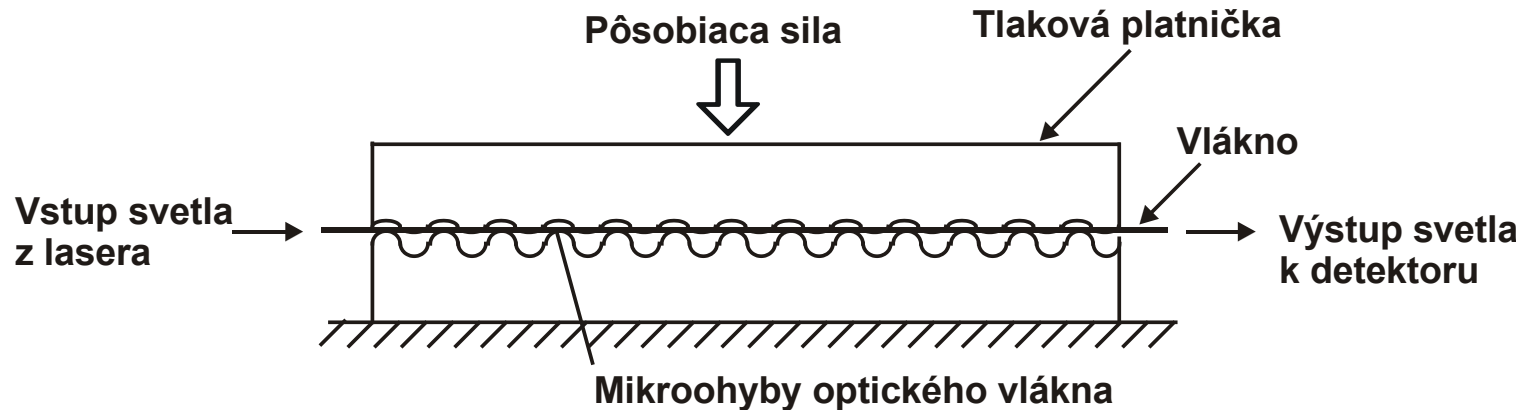


a)

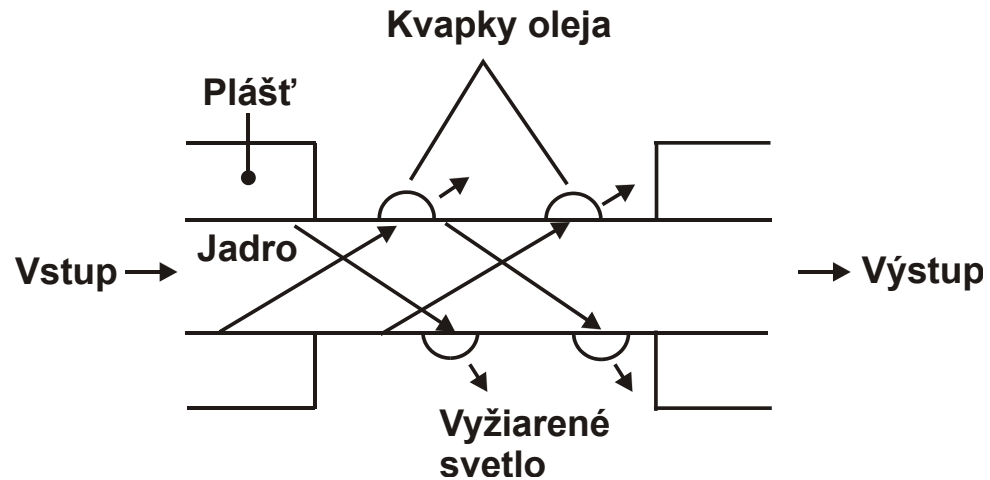
Obr. 5.15 Princíp činnosti amplitúdových OVS s využitím periodických mikroohybov: a) modulácia optického signálu pomocou periodických Mikroohybov.



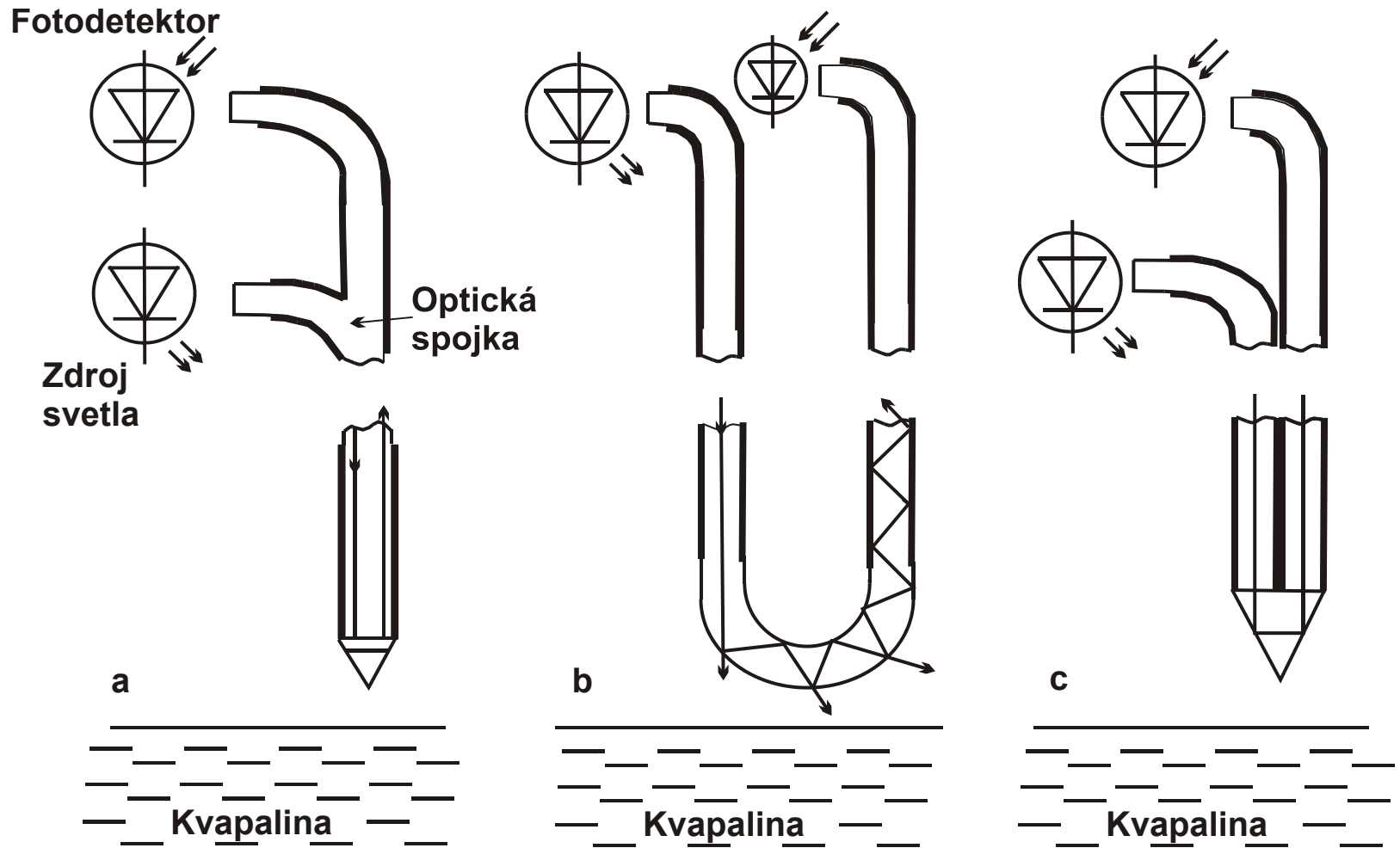
Obr. 5.15 Princíp činnosti amplitúdových OVS s využitím periodických mikroohybov:
b) mikroohybový OVS s využitím žiarenia v tmavom poli,
c) sústava mikroohybových OVS s využitím žiarenia v tmavom poli.



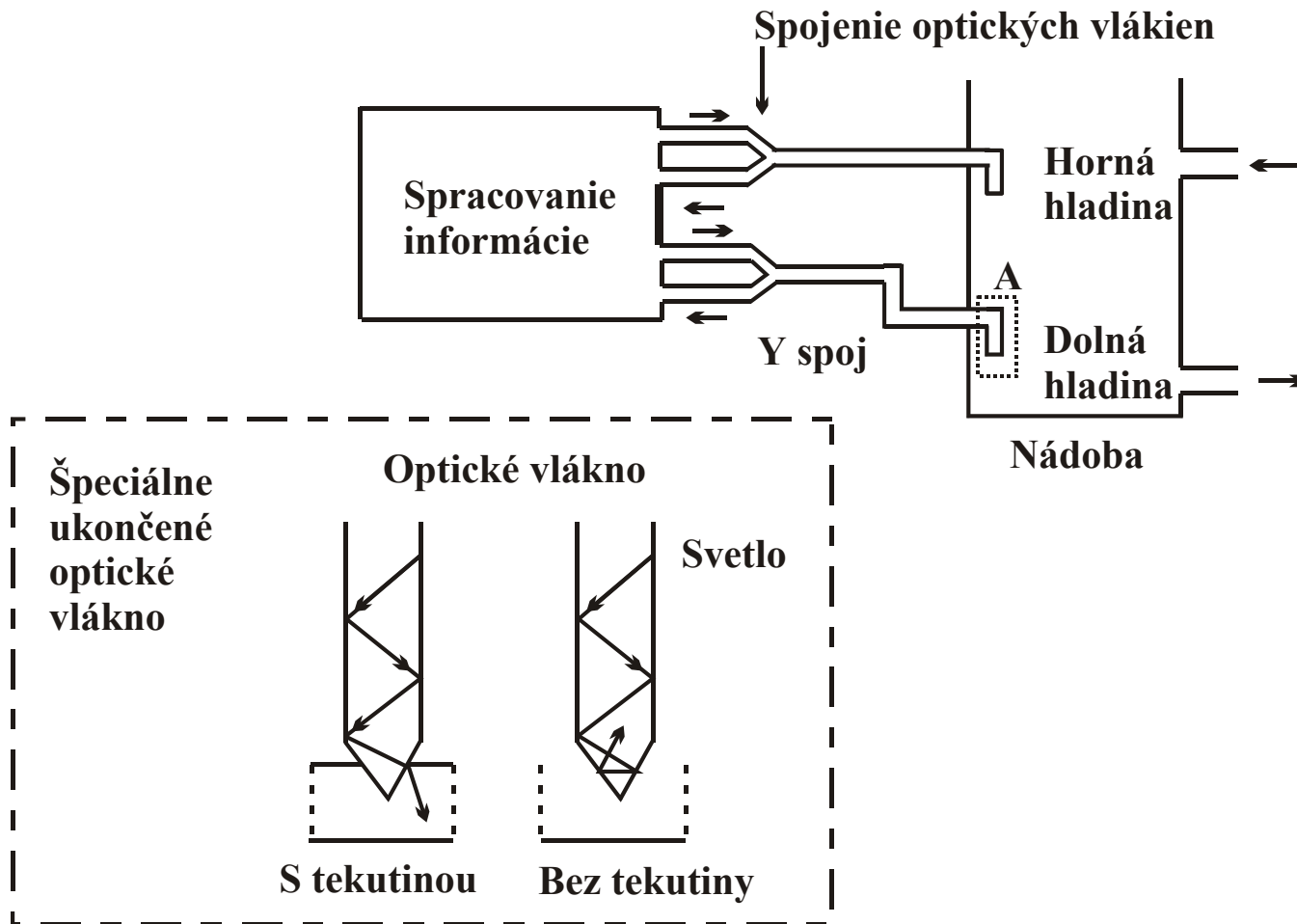
Obr. 5.16 OVS tlaku s využitím mikroohybov.



Obr. 5.17 OVS koncentrácie oleja vo vode.

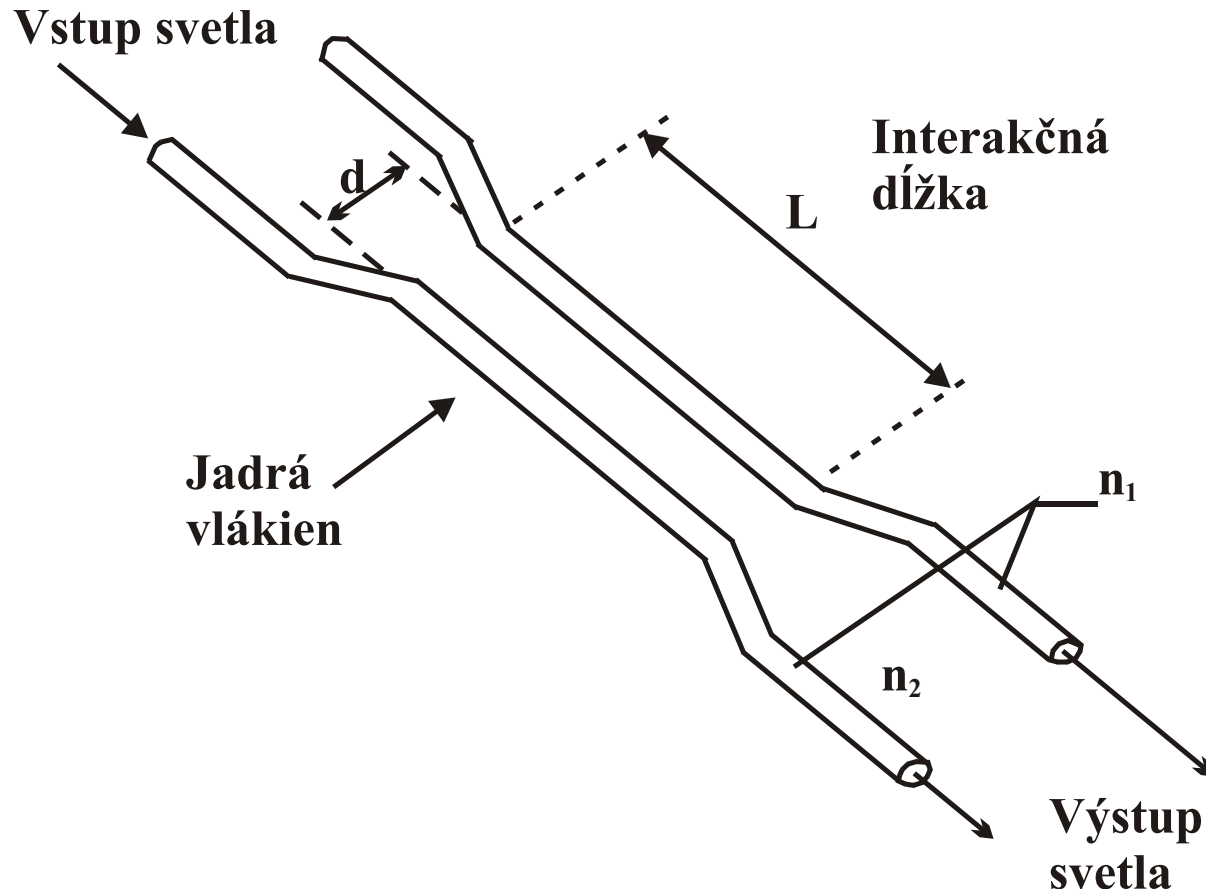


Obr. 5.18 Rôzne varianty OVS úrovne v kvapaline.

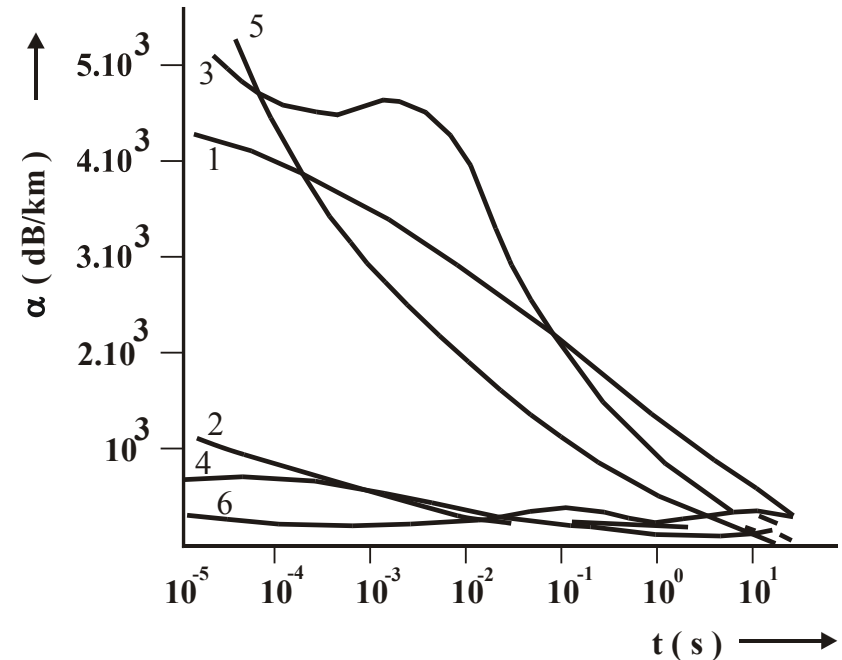
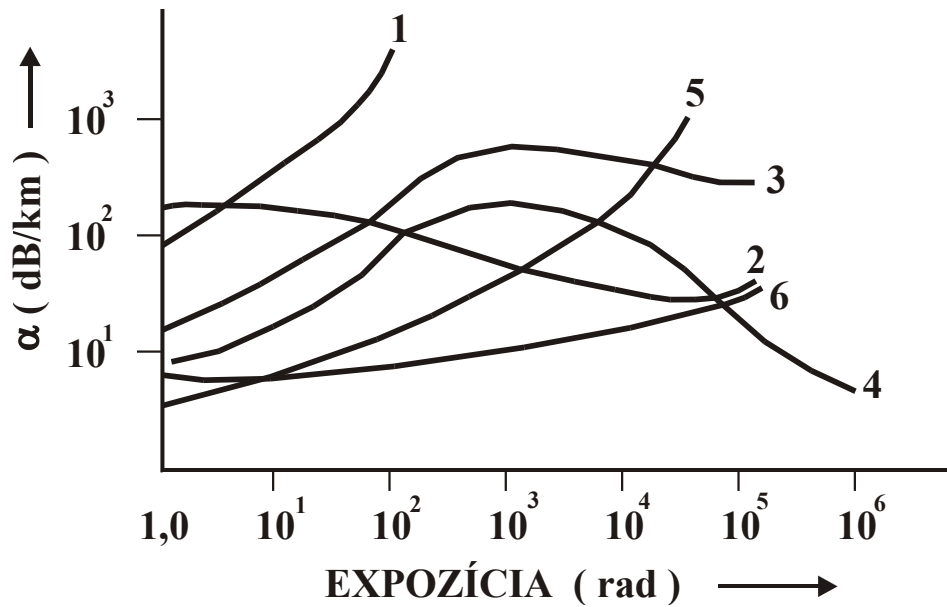


Detail " A "

Obr. 5.19 Aplikácia OVS úrovne kvapaliny.

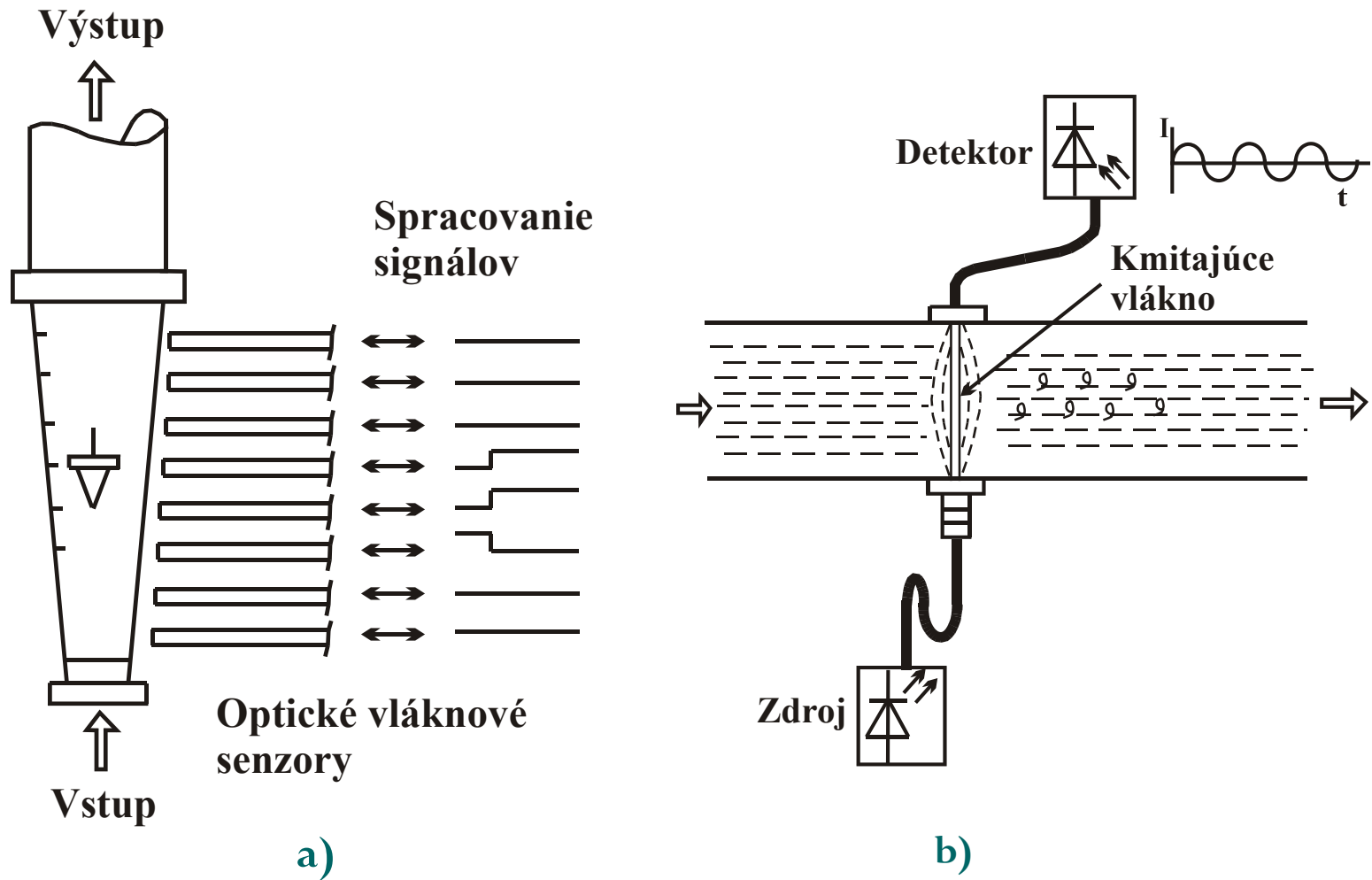


Obr. 5.20 OVS s využitím „optického tunelového javu“.



Obr. 5.21 Závislosť tlmenia rôznych optických vlákien od expozície (a) ;
a pokles prídavného tlmenia po ožiarení (b)

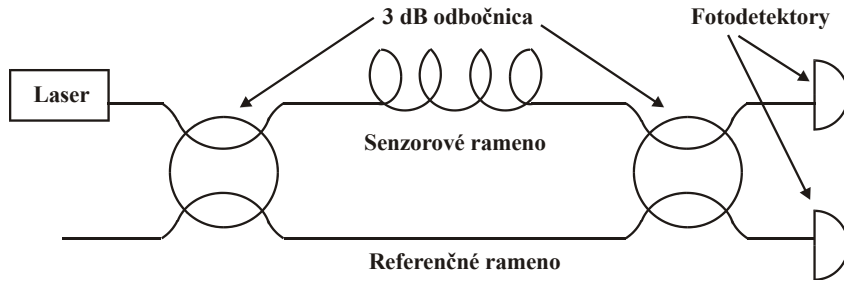
- 1 – vlákno typu Galileo Pb Silicate ,
- 2 – vlákno Du Pont PFX-PIK ,
- 3 – vlákno Times Wiro $B_2O_3 - SiO_2$,
- 4 – vlákno Galileo PIK ,
- 5 – vlákno Gorning IVPO ,
- 6 – vlákno Gorning OVPO.



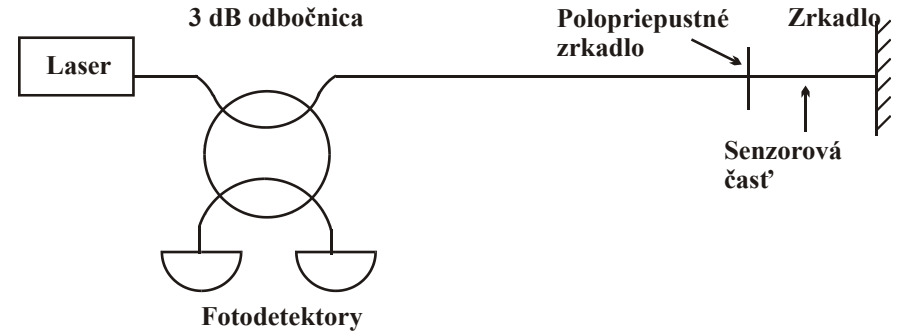
Obr. 5.22 Optické vláknové prietokomery:
 a) s využitím silového pôsobenia na plavák,
 b) s kmitajúcim optickým vláknom.

5.3 FÁZOVÉ OVS

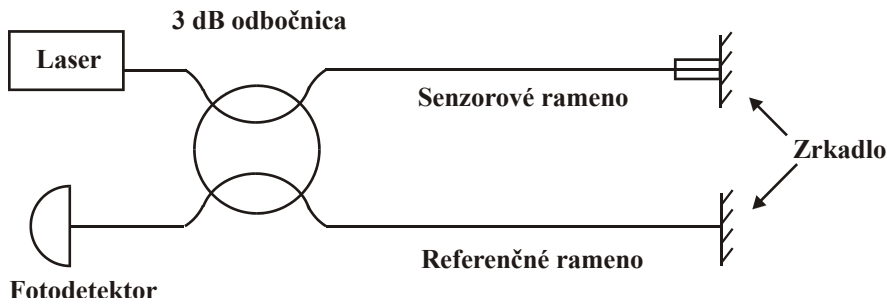
- **Najcitlivejšie OVS**
- **Možnosť merať zmeny fázy rádovo 10^{-8} rad**
(pričom vlnová dĺžka svetla v OVS je rádovo $1 \mu\text{m}$)
- **Optické vláknové interferometre**
 1. **Dvojramenný jednovidový interferometer**
(Machov – Zehnderov alebo Michelsonov)
 1. **Medzividový interferometer**
 2. **Jednovláknový interferometer**
s obojsmernou optickou väzbou
(**Sagnacov interferometer**)
- **Nevýhody fázových OVS**
 - **Zložitá optická konštrukcia**
 - **Nutnosť použitia jednovidových optických vlákien**
 - **Problémy s odstránením interferencie rôznych fyzikálnych veličín** (napr. tlaku a teploty, tlaku a magnetického poľa a pod.)



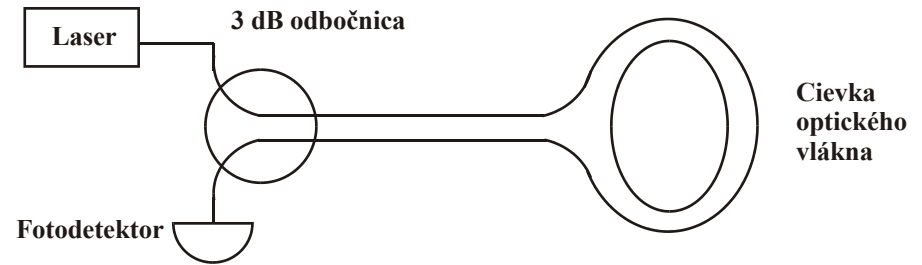
a)



b)



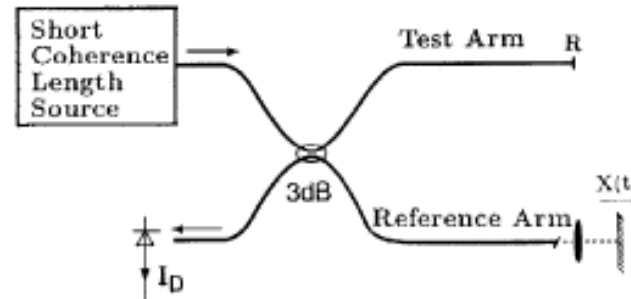
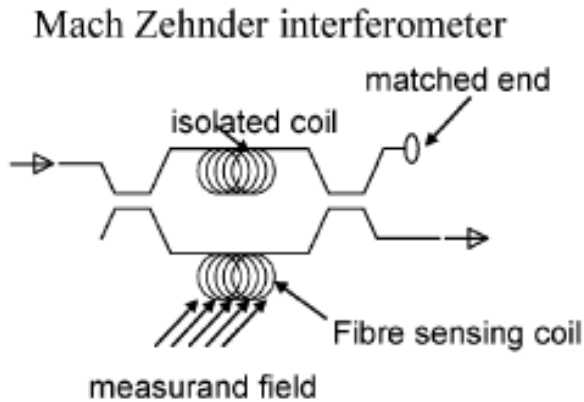
c)



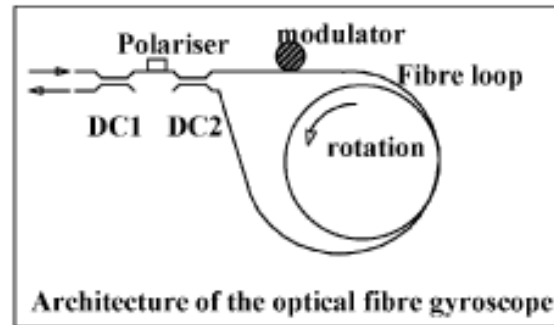
d)

Obr. 5.23 Optické fázové interferometre:
a) Machov-Zehnderov interferometer,
b) Fabryho-Perotov interferometer,
c) Michelsonov interferometer,
d) Sagnacov interferometer.

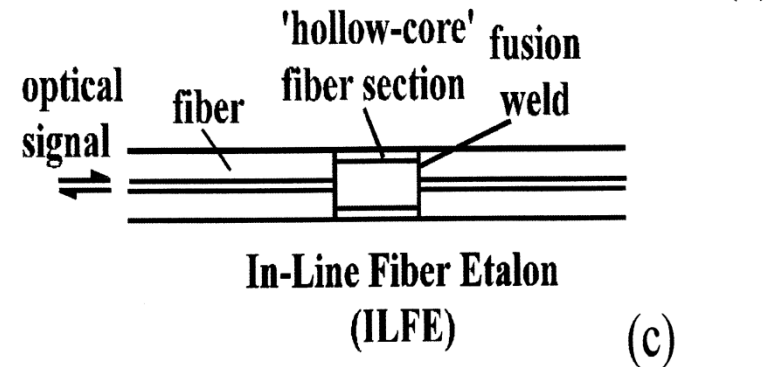
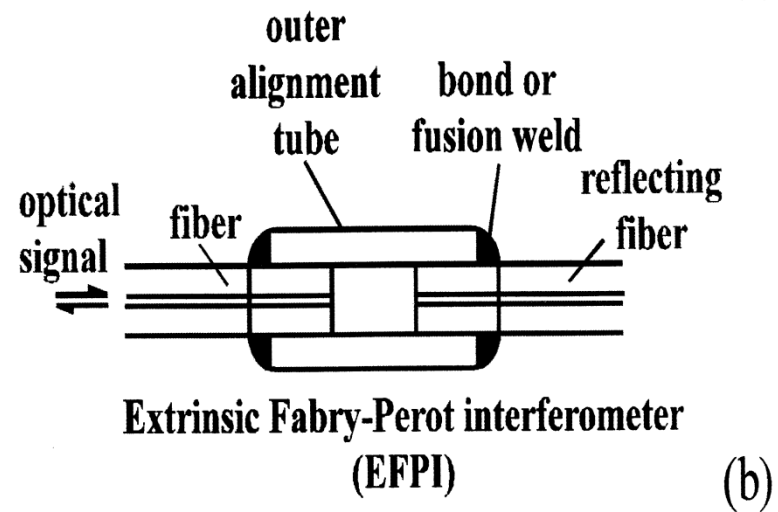
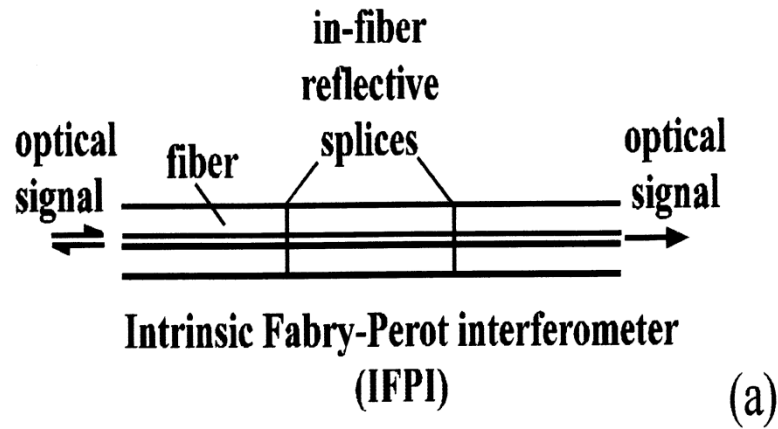
All fibre Michelson
(configured for White
Light Interferometry)



Fibre Sagnac interferometer

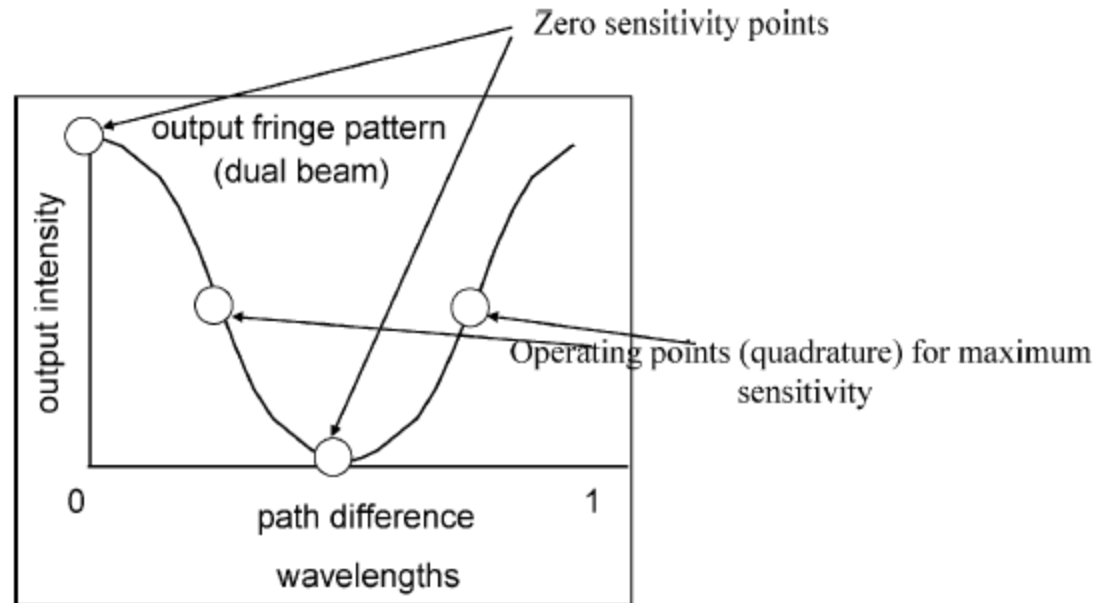


Dual path interferometer configurations realized in optical fiber.



Interferometric fiber FP implementations:

- a) Intrinsic fiber FP,
- b) Extrinsic fiber FP,
- c) In-line fiber etalon.



Quadrature bias on the fringe pattern in dual beam interferometers.

- **Fáza optického signálu**

$$\Phi = \beta L$$

L je dĺžka optického vlákna, $\beta = k n$ je konštanta šírenia, n je efektívny index lomu pre uvažovaný vid a k je vlnové číslo

- **Zmena fázy pôsobením tlaku P**

$$\Delta\Phi = k_0 n \Delta L + L k_0 \Delta n$$

- **Citlivosť na tlak P**

$$\frac{\Delta\Phi}{L\Delta P} = \frac{k_0 n}{E} (1 - 2\sigma) \left[1 - \frac{n^2 (p_{11} - 2p_{12})}{2} \right]$$

E je Youngov modul, σ je Poissonov koeficient a p_{ij} sú fotoelastické koeficienty

- **Youngov** modul sa mení od $5 \cdot 10^{10}$ do $9 \cdot 10^{10}$ **Nm⁻²**
- **Poissonov** koeficient sa mení od 0,17 do 0,32
- Fotoelastické koeficienty môžu nadobúdať hodnoty od 0,1 do 0,3

- **Citlivosť na teplotu**

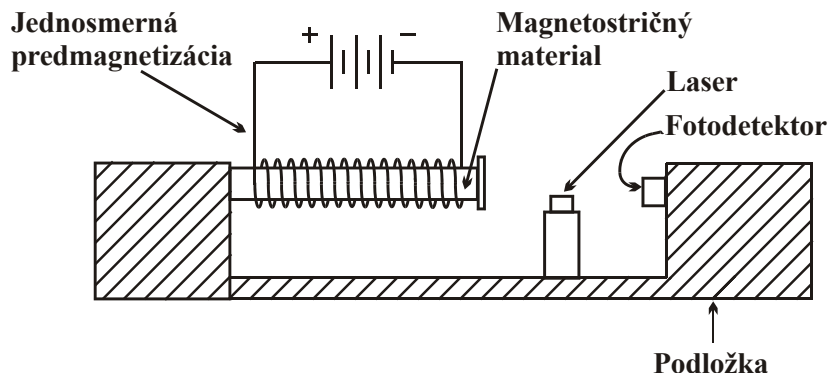
$$\frac{\Delta\Phi}{L\Delta T} = k_0 n \alpha + k_0 \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_p$$

α je koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti

- **Citlivosti optických vlákien na báze SiO₂ sú vzhľadom na pôsobenie**
Tlaku 10⁻⁵ rad m⁻¹ Pa⁻¹
Teploty 100 rad m⁻¹ K⁻¹

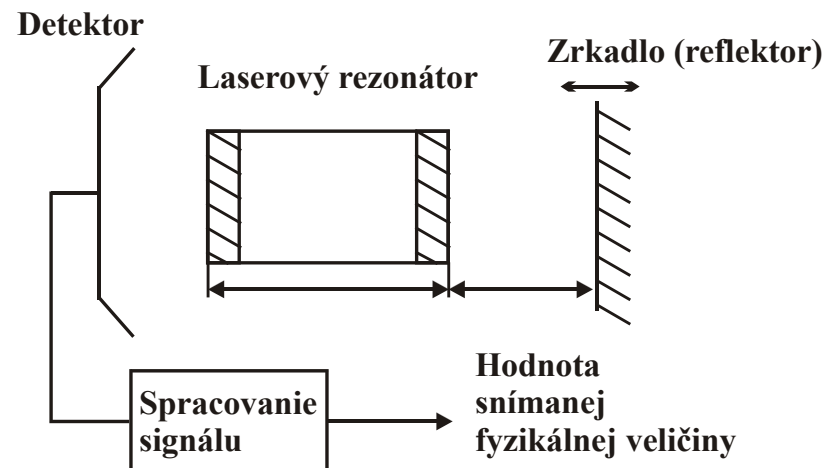
Diódový laserový senzor

- ❑ Na frekvencii 100 Hz môžu byť merané posunutia $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ nm
- ❑ Na 1 kHz posunutia $\sim 9 \cdot 10^{-5}$ nm
- ❑ Diódový laserový senzor akustických signálov
- ❑ Diódový laserový senzor intenzity magnetického poľa

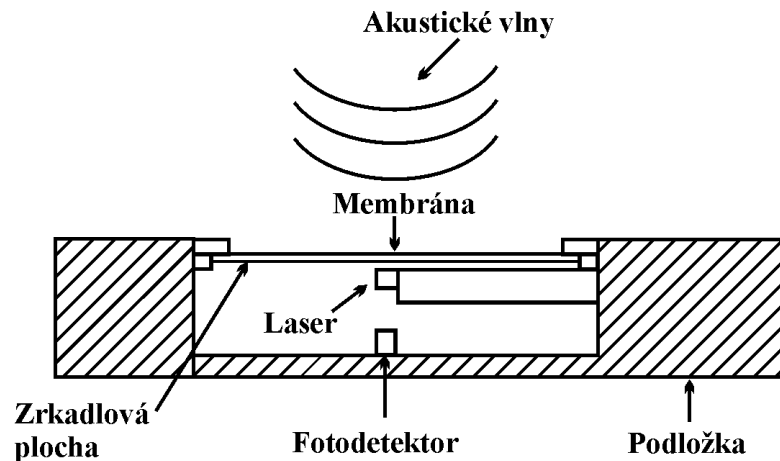


Obr. 5.26 Diódový laserový senzor intenzity magnetického poľa.

Fotonika



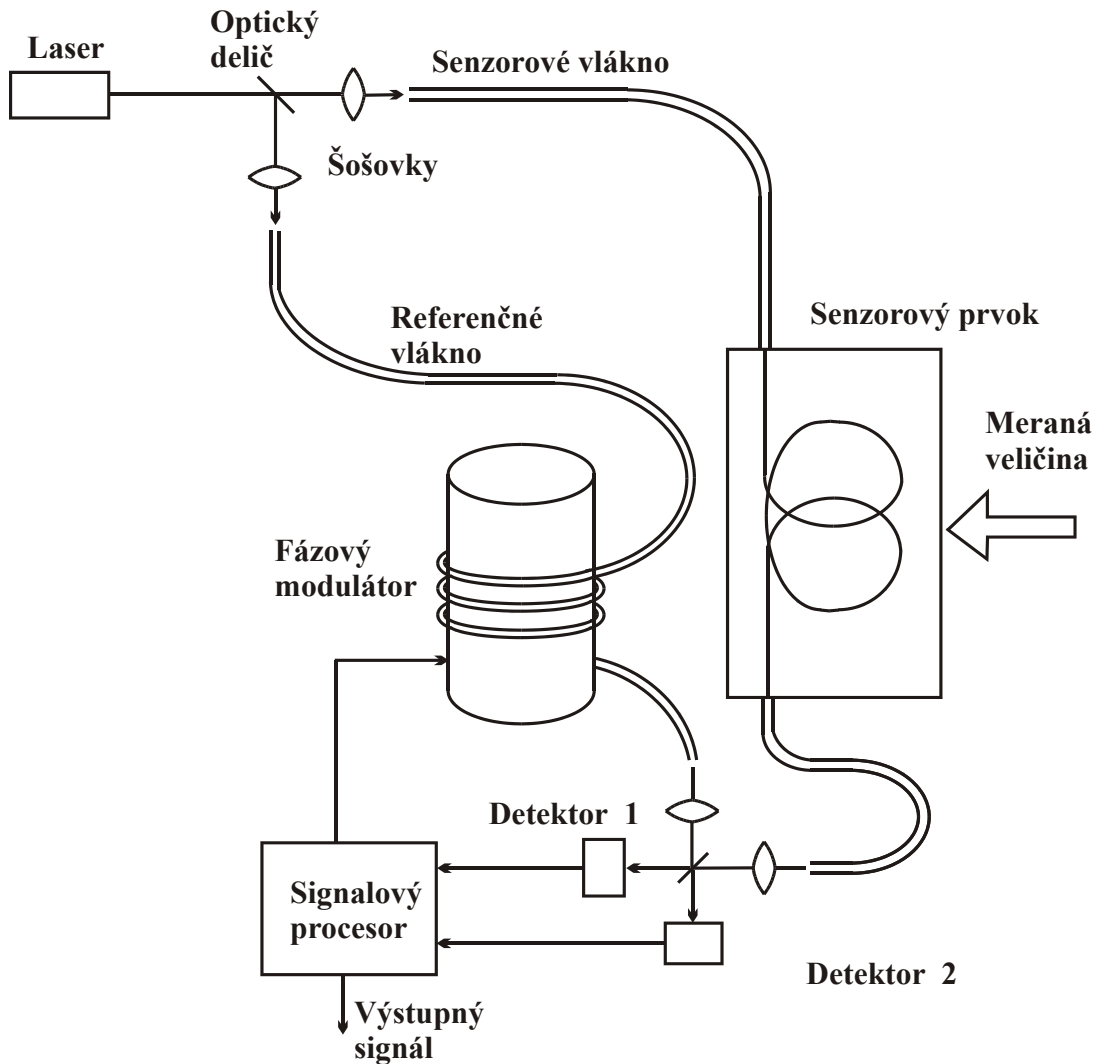
Obr. 5.24 Schéma diódového laserového senzora.



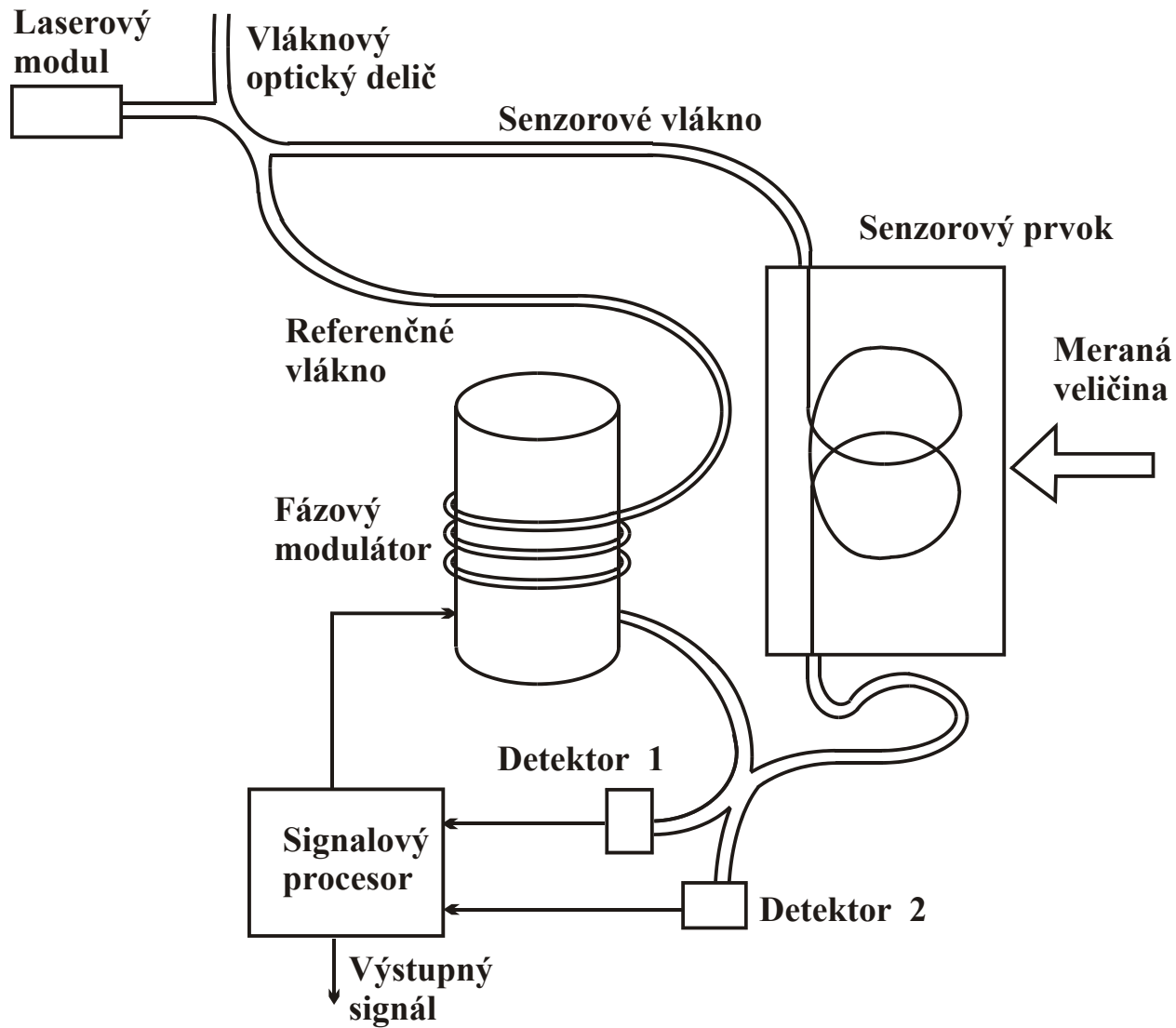
Obr. 5.25 Diódový laserový senzor akustických signálov.

- **Fázové OVS sú zložité, technologicky náročné optoelektronické zariadenia a majú vysokú cenu**
- **OVS na báze Machovho - Zehnderovho interferometra**
- **Schopnosť merať fázový posun rádovo 10^{-7} rad**
- **Šumové obmedzenie je pri fázovom posune 10^{-8} rad**
- **Teplotný rozdiel 10^{-3} °C** senzového vlákna voči referenčnému vláknu spôsobí merateľné fázové posunutie
- **Na zvýšenie citlivosti - senzové vlákno namotané v tvare cievky**

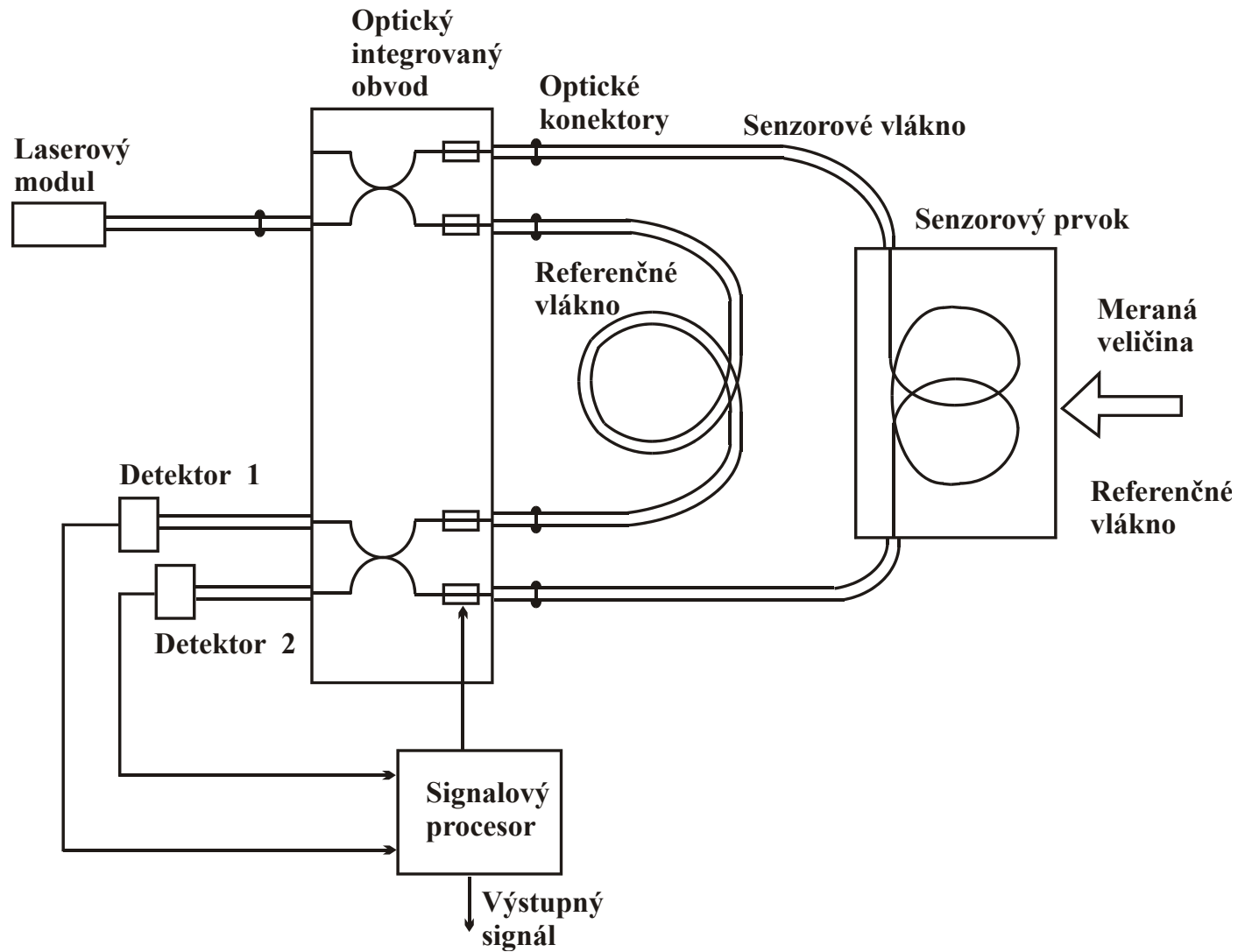
- **Konštrukcia fázového OVS s využitím diskretných optických prvkov**
- Nevýhody diskretných optických väzobných prvkov (citlivosť na vibrácie, prácne nastavenie a pod.) - odstraňuje **celovláknovou konštrukciou** fázového **OVS**
- Typickým prípadom interferometrického fázového **OVS** je **hydrofón**
- **Jednotná konštrukčná báza** pre realizáciu veľmi citlivých senzorov rôznych fyzikálnych veličín (akustických signálov, tlaku, teploty, intenzity magnetického poľa, elektrického prúdu a pod.)



Obr. 5.27 Machov - Zehnderov interferometer s diskretnými optickými prvkami.

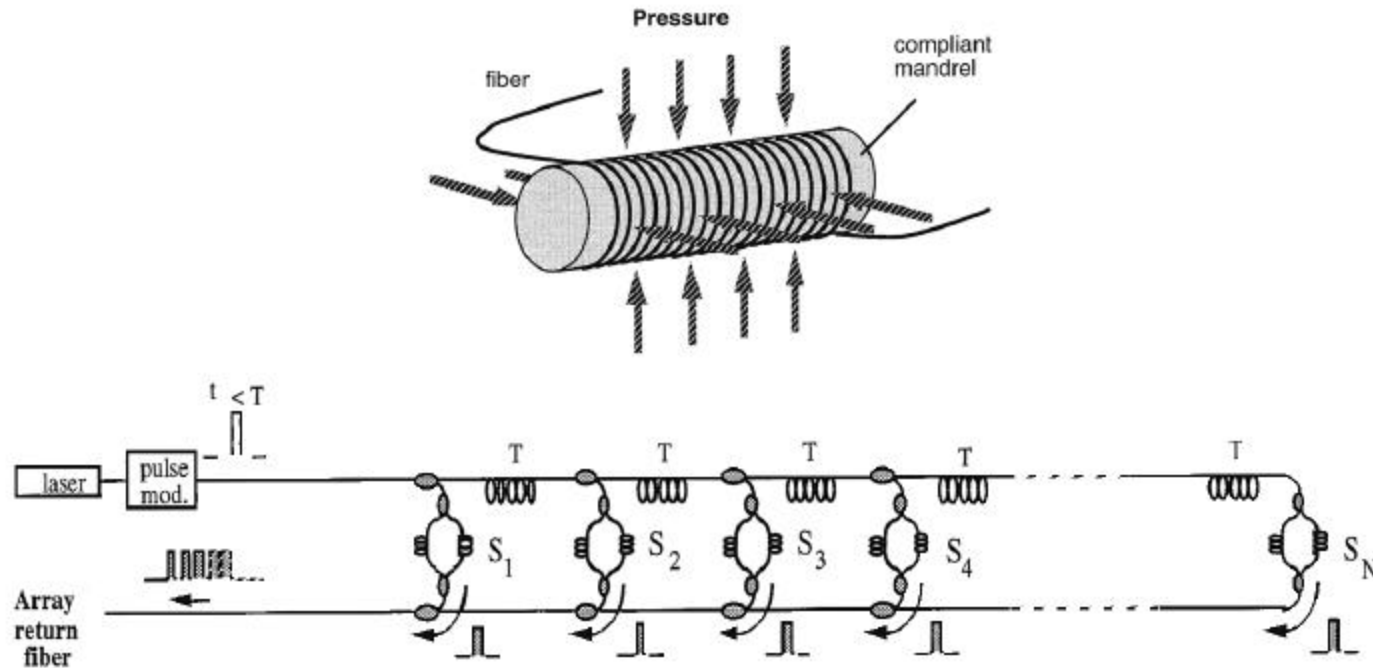


Obr. 5.28 Celovláknový Machov - Zehnderov interferometer.

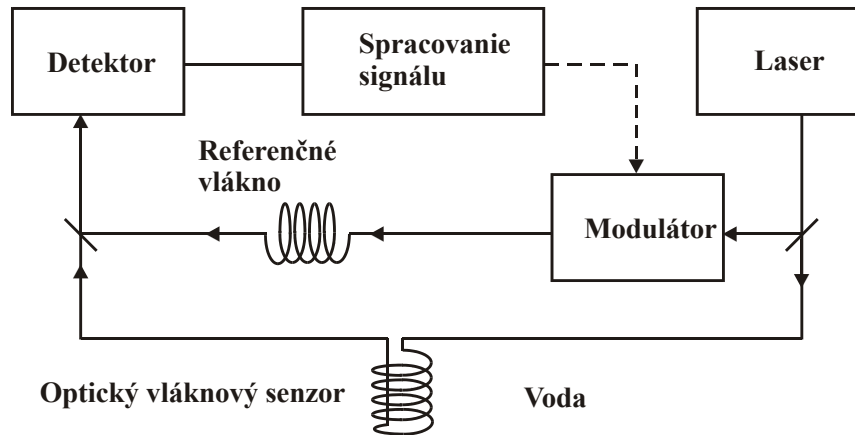


Obr. 5.29 Integrovaný Machov - Zehnderov interferometer.

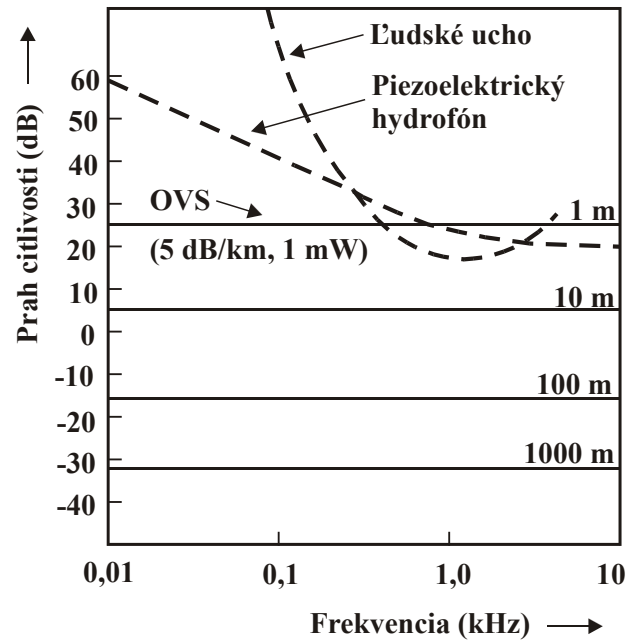
- **Prah citlivosti fázových OVS akustických signálov je 30 až 40 dB**
- Frekvenčná závislosť prahu citlivosti ľudského ucha
- **Pri frekvenciách pod 100 Hz umožňuje detekovať veľmi slabé akustické signály**
($10^{-3} \text{ dyn cm}^2 = 100 \text{ } \mu\text{Pa} = 10^{-9} \text{ atm.}$)
- **Maximálna veľkosť prípustného tlaku do 10^7 Pa čo zodpovedá hĺbke $\sim 10^3 \text{ m}$**
- Voľbou tvaru konštrukcie možno **potlačiť**, alebo naopak **zvýrazniť** smerové vlastnosti optického vláknového **hydrofónu**



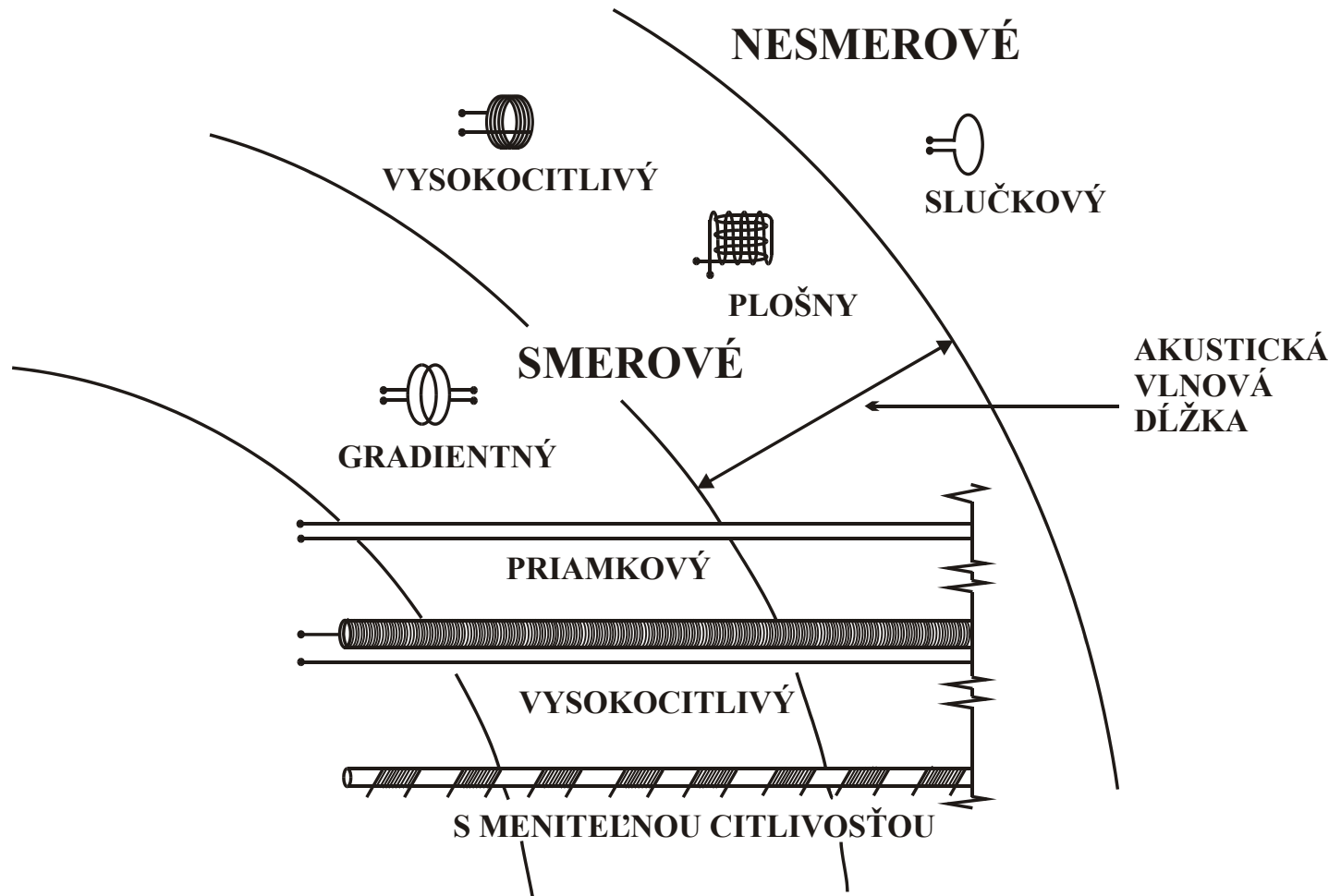
Hydrophone schematic above and an array based on Mach–Zehnder interferometer sensors.



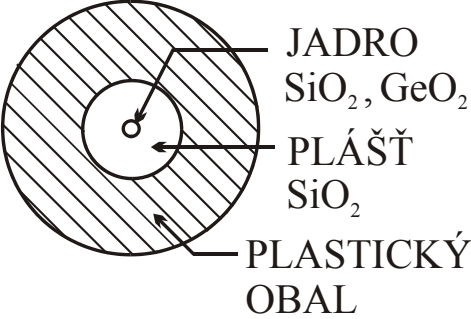
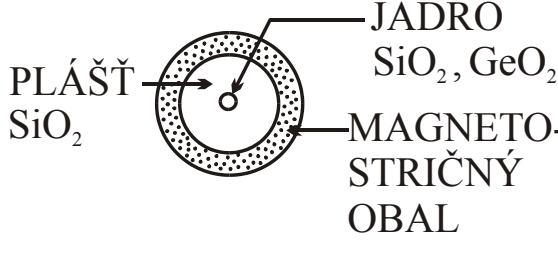
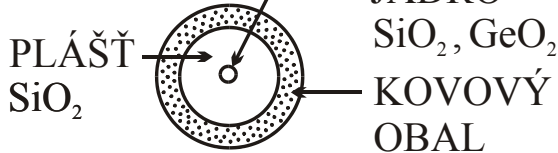
Obr. 5.30 Bloková schéma dvojramenného interferometrického hydrofónu.



Obr. 5.31 Frekvenčné závislosti prahu citlivosti OVS, piezoelektrického hydrofónu a ľudského ucha.



Obr. 5.32 Niektoré konfigurácie senzorového vlákna hydrofónu.

OVS	USPORIADANIE	PRAH CITLIVOSTI ($\Delta\Phi = 10^{-6}$ RAD, 1 METER VLÁKNA)
TLAKU	 <p>JADRO SiO₂, GeO₂ PLÁŠŤ SiO₂ PLASTICKÝ OBAL</p>	$P_{\text{MIN}} \approx 60 \text{ dB}$ (VZHLADOM NA 1 Pa)
MAGNETICKÉHO POĽA	 <p>JADRO SiO₂, GeO₂ PLÁŠŤ SiO₂ MAGNETO- STRIČNÝ OBAL</p>	$B_{\text{MIN}} \approx 5.10^{-13} \text{ T}$
TEPLOTY	 <p>JADRO SiO₂, GeO₂ PLÁŠŤ SiO₂ KOVOVÝ OBAL</p>	$\Delta T_{\text{MIN}} \approx 10^{-8} \text{ K}$

Obr. 5.33 Konštrukčné usporiadanie sensorového vlákna a citlivosť fázového OVS tlaku, intenzity magnetického poľa a teploty.

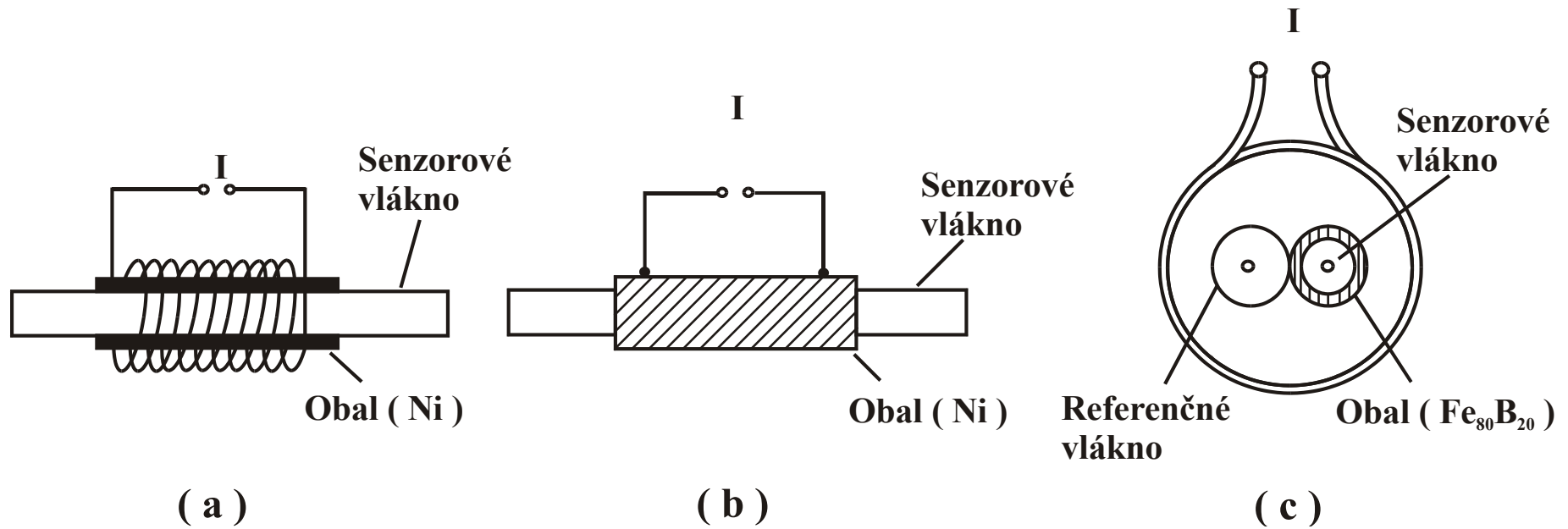
- Konštrukcie **OVS elektrického prúdu** s využitím fotoelastického javu využívajú

1. Magnetické účinky elektrického prúdu

- Prah citlivosti takýchto OVS je v rozmedzí 10^{-12} až 10^{-14} T na 1 m dĺžky optického vlákna (zodpovedá meraniu prúdu $\sim 10^{-7}$ až 10^{-9} A)
- **Citlivosť týchto OVS je porovnateľná s supravodivými senzormi (tzv. SQUID), ktoré však vyžadujú chladenie ~ 4 K**

2. Tepelné účinky elektrického prúdu

- Citlivosť takýchto OVS je porovnateľná s citlivosťou magnetostrieknych OVS elektrického prúdu, merajú prúdy s frekvenciou do 10 kHz
- Maximálna frekvencia OVS s využitím tepelných účinkov obmedzená na 100 Hz



Obr. 5.34 OVS (a)elektrického prúdu, (b) - s využitím teplotnej rozt'ažnosti obalu optického vlákna, (c) - s využitím magnetostrikčného javu.

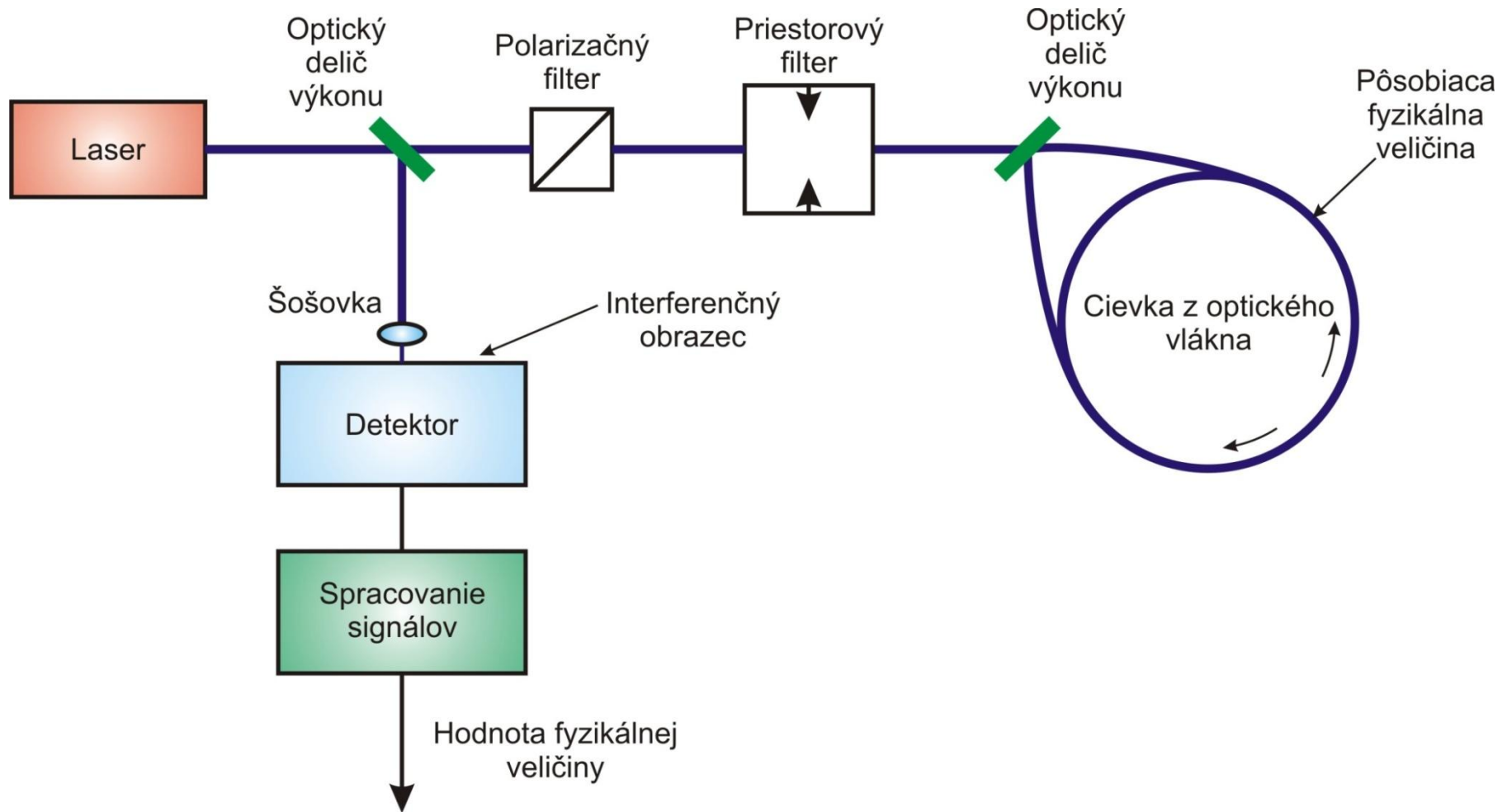
- **V Sagnacovom interferometri možno vytvoriť OVS uhlovej rýchlosti (gyroskopy)**
- **Sagnacov jav**

$$\Phi = \frac{8\pi NS\Omega}{\lambda_0 c} = \frac{4\pi LR\Omega}{\lambda_0 c}$$

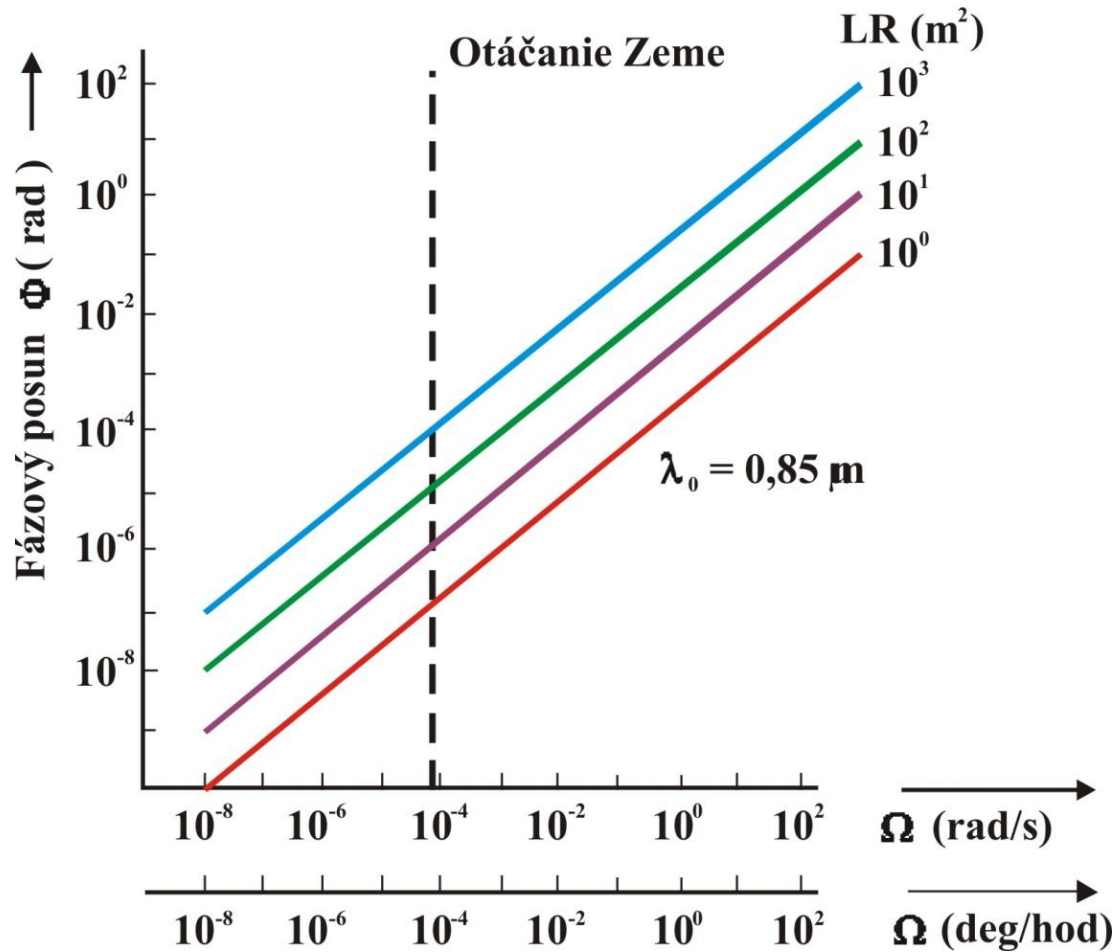
Kde Ω je uhlová rýchlosť otáčania, S je plocha cievky, λ_0 je dĺžka vlny vo vákuu, c je rýchlosť svetla, N je počet závitov cievky a L je celková dĺžka optického vlákna

- **Vláknové gyroskopy využívajú $L \sim 500$ m, v tvare cievky s polomerom $R = 10$ cm**
- **Na detekciu rýchlosti rotácie $\Omega = 1^\circ/\text{hod}$ sa vyžaduje meranie fázového posunu 10^{-5} rad**
- **Detekčný limit vyhodnotenia fázového posunu $\sim 4 \cdot 10^{-8}$ rad, čo zodpovedá detekcii rotácie $\sim 0,1$ až $0,01^\circ/\text{hod}$**

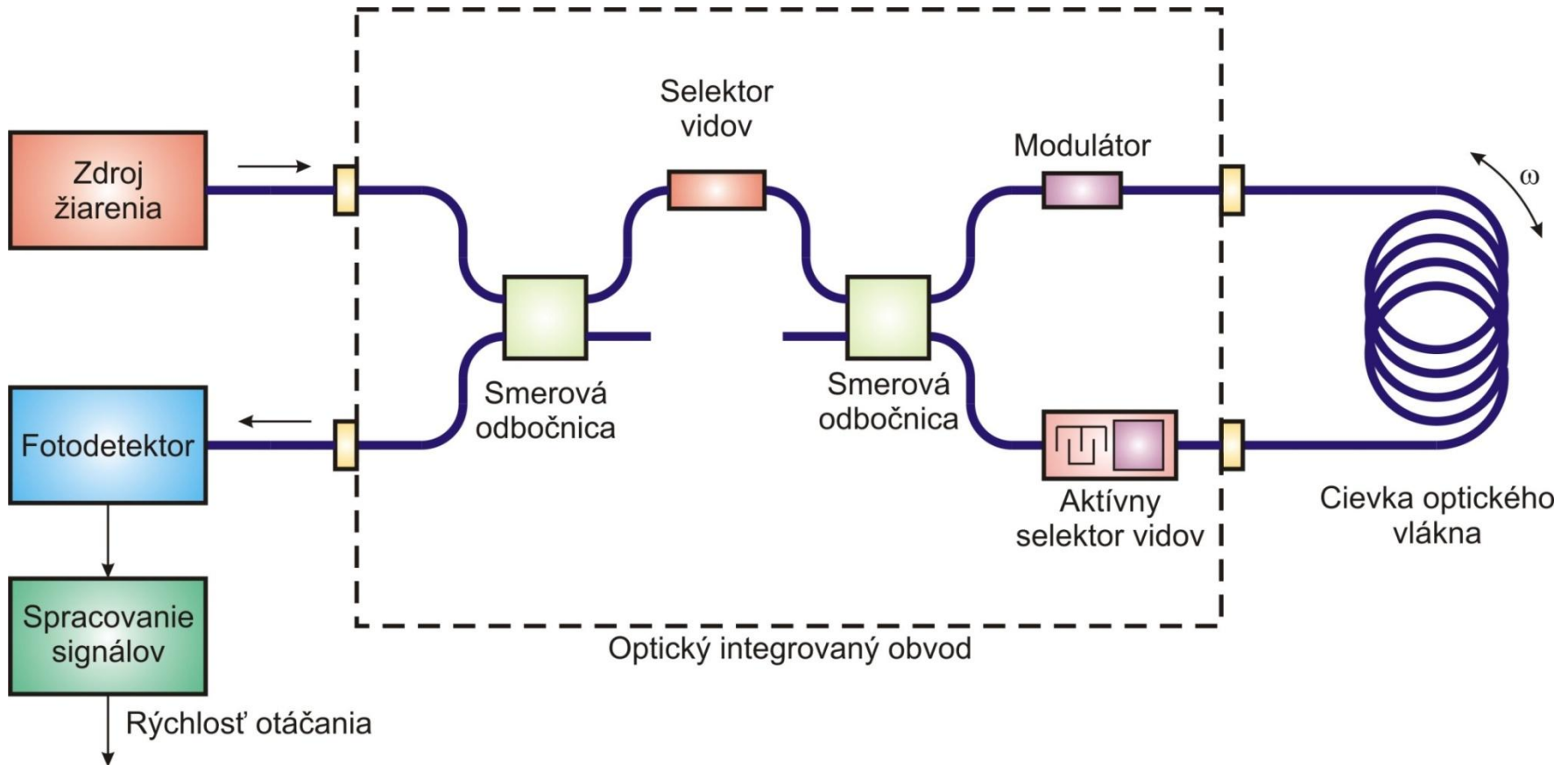
- **Vyhody optického vláknového gyroskopu**
 - **Bez mechanických pohyblivých častí**
 - **Malé rozmery**
 - **Malá hmotnosť**
 - **Účinná plocha NS Sagnacovho javu (~ 50 m²)**
 - **Odolný voči otrasom**
 - **Pri použití prvkov integrovanej optiky môže mať veľmi kompaktnú konštrukciu**
- **Sagnacov interferometer - OVS intenzity magnetického poľa a elektrického prúdu**
 - **Fázový posun ~ 10⁻⁵ rad A⁻¹ na závit elektrického vodiča a závit optického vlákna**
 - **Meranie jednosmerných aj striedaných elektrických prúdov** (s frekvenciou do niekoľko sto **kHz**) v rozmedzí od niekoľko ma do niekoľko sto **A** s rozlíšením ~ 10⁻⁵ časti plného dynamického rozsahu



Obr. 5.35 Schéma zapojenia fázového OVS so Sagnacovým interferometrom.



Obr. 5.36 Sagnacov fázový posun Φ v závislosti od rýchlosti otáčania Ω a veličiny RL .



Obr. 5.37 Integrovaný optický vláknový gyroskop.

5.4 POLARIZAČNÉ OVS

- **Polarizačné OVS**

1. **OVS s moduláciou otočenia roviny polarizácie**
- s využitím Faradyovho javu

1. **OVS s indukovaným dvojlomom**

- Citlivosťou a technologickou náročnosťou polarizačné **OVS** sa zaraďujú na rozhranie medzi amplitúdové a fázové **OVS**

- **Rovina polarizácie lineárne**

polarizovaného svetla sa otočí o uhol

$$\theta = V \int_0^L H_1 dl$$

- H_1 je zložka intenzity magnetického poľa v smere šírenia svetla a V je **Verdetova konštanta**

$$\theta = VHL$$

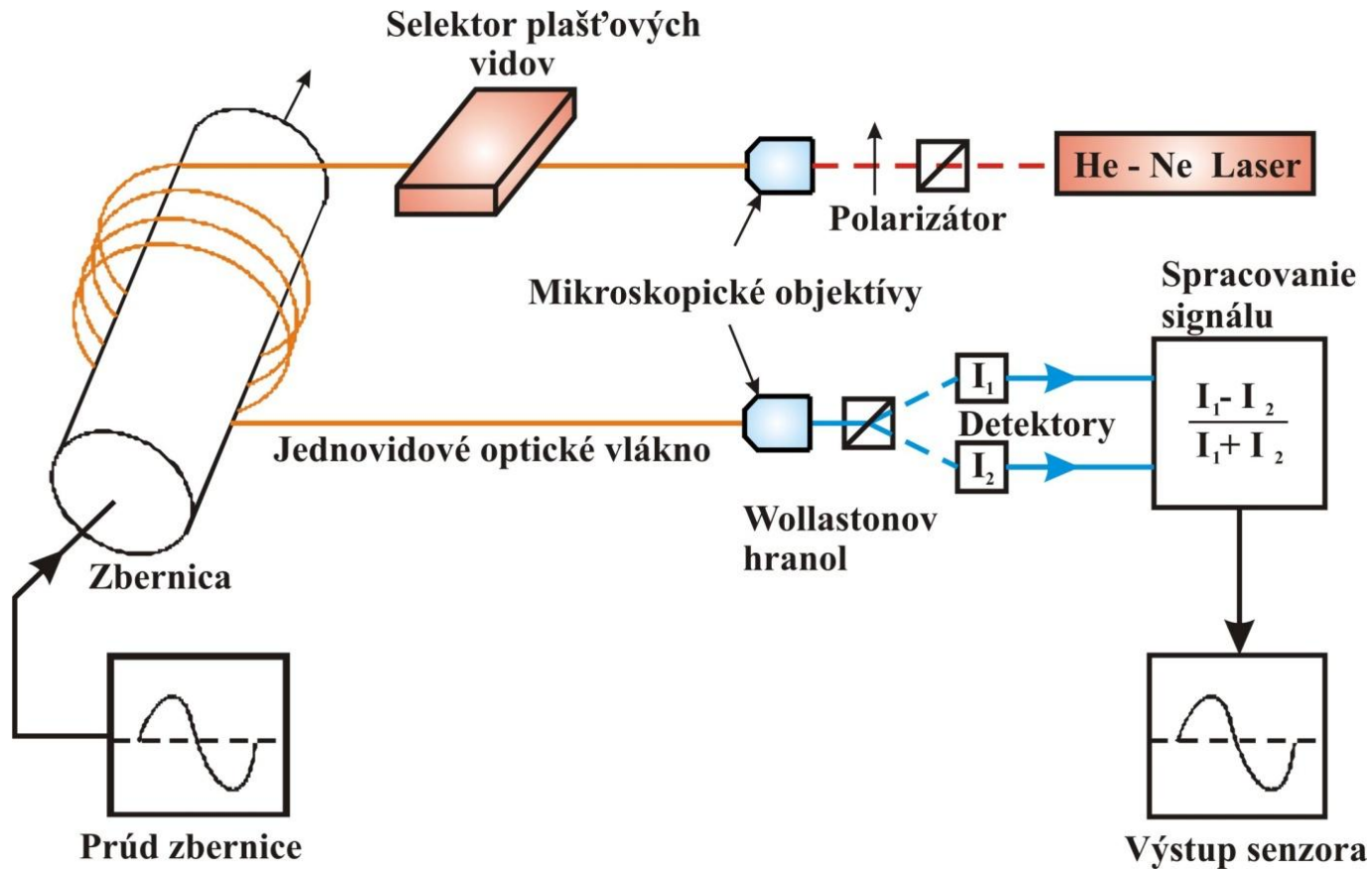
$$H = I / 2\pi R$$

$$L = 2\pi RN$$

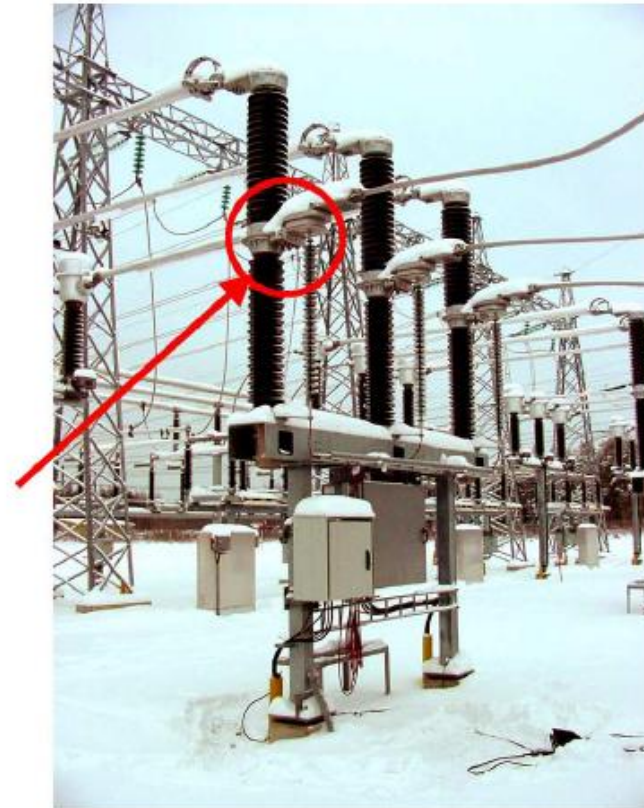
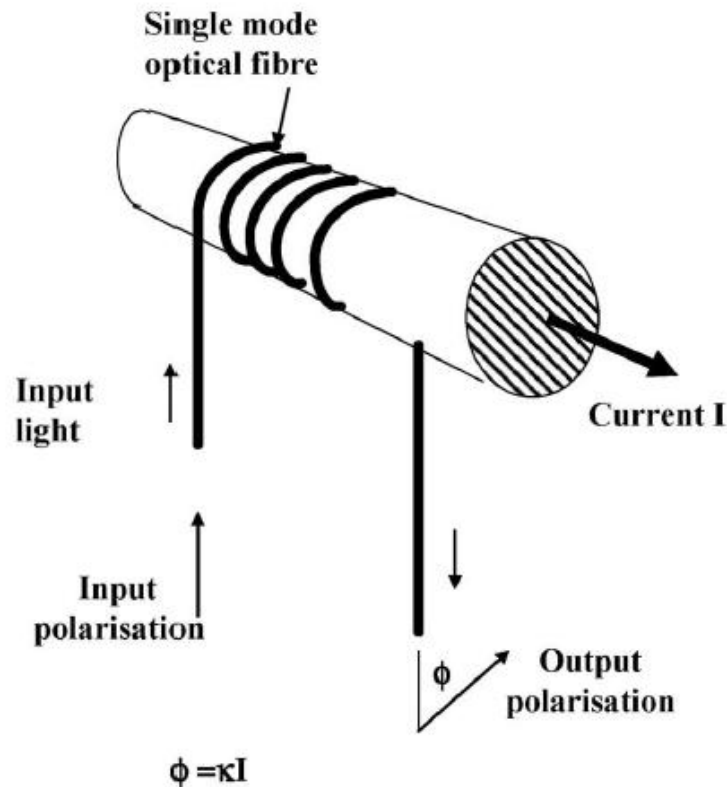
Kde I je prúd tečúci vodičom $\theta = VIN$

- **Magnetické pole (elektrický prúd) moduluje uhol θ**

- **Túto moduláciu možno snímať použitím Wollastonovho hranola**



Obr. 5.38 Polarizačný OVS elektrického prúdu využívajúci Faradayov jav.



Basic features of (left) a Faraday rotation optical fiber current monitor and (right) an installation.

- **Dve kolmé polarizované zložky**

$$J_1 = \frac{J_0}{2}(1 + \sin 2\theta) \quad J_2 = \frac{J_0}{2}(1 - \sin 2\theta) \quad \mathbf{I_i \approx J_i \text{ pre } i = 1, 2}$$

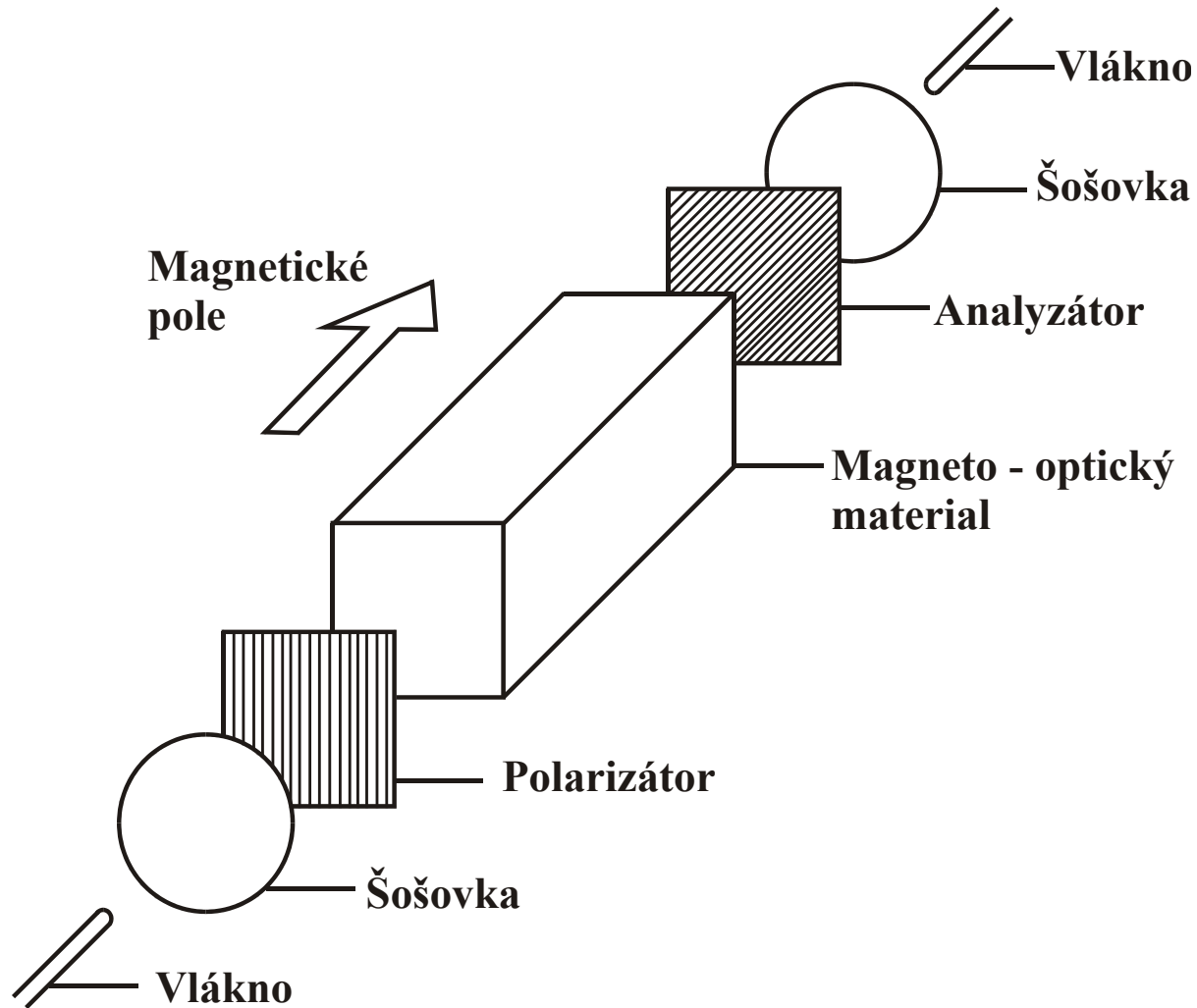
- **Výstupný signál**

$$S = C \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = C \sin 2\theta$$

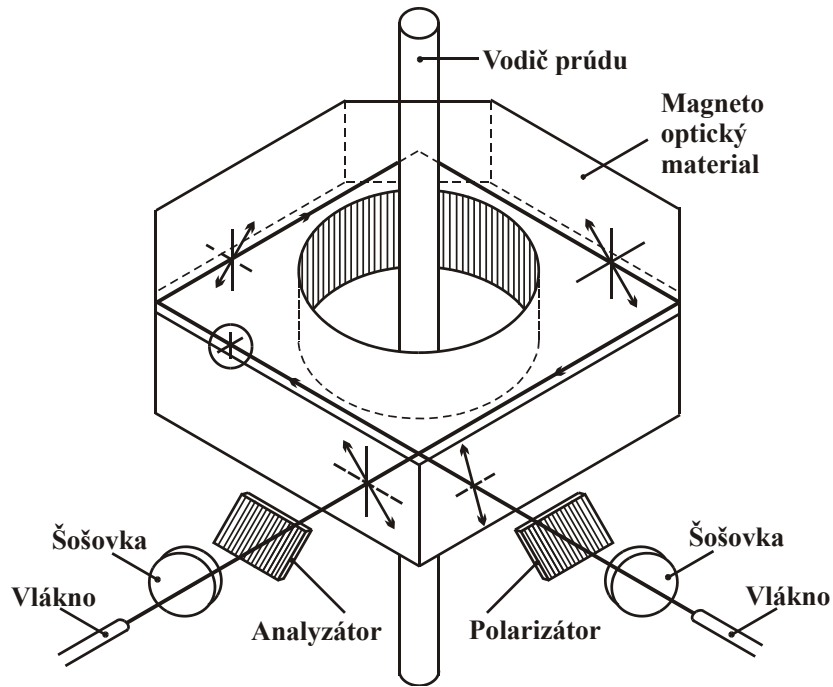
C je konštanta

- **Typická hodnota $V \approx 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad A}^{-1}$**
- **Dynamický rozsah od 0,2 do 2000 A**
- **Citlivosť rádove $10^{-5} \text{ rad A}^{-1} \text{ m}^{-1}$**
- **Snímanie akustických signálov - citlivosť 40 dB**
- **V oblasti silnoprúdovej elektroniky - polarizačné OVS s využitím Faradayovho javu v magnetooptických kryštáloch**

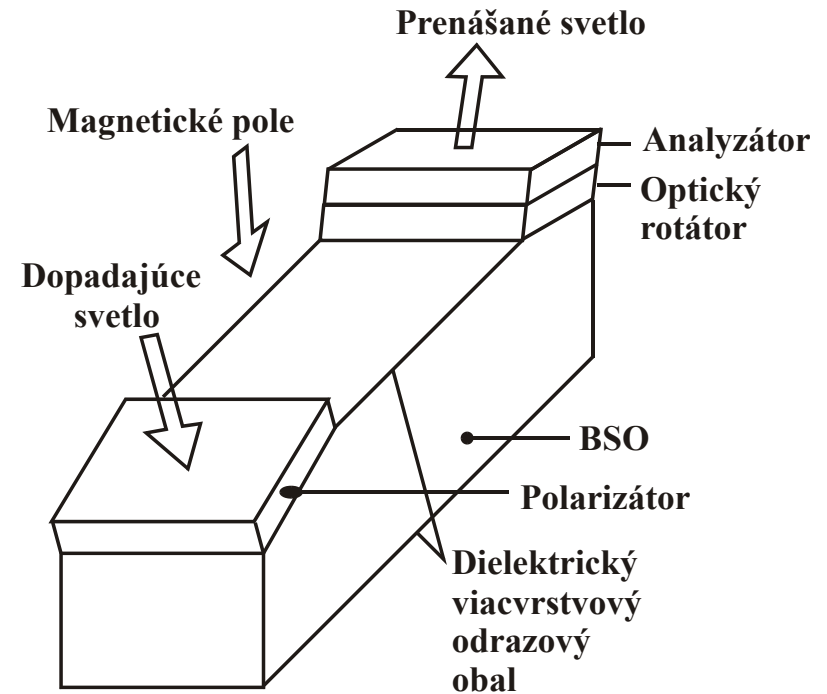
- **Meranie intenzity magnetického poľa alebo elektrického prúdu**
- **Lineárna štruktúra senzora**
- **Kruhová štruktúra senzora** - na meranie prúdu v zberniciach
- **Môže nahradiť klasicky používané prúdové transformátory**
- **Pozdĺžny, priečny**
Elektro -optický Pockelsonov jav
- **Polarizačné OVS elektrického napätia**
- **Polarizačné OVS možno využiť aj na súčasné meranie prúdu a napätia vo výkonových vedeniach**



Obr. 5.39 Lineárna štruktúra polarizačného OVS magnetického poľa.

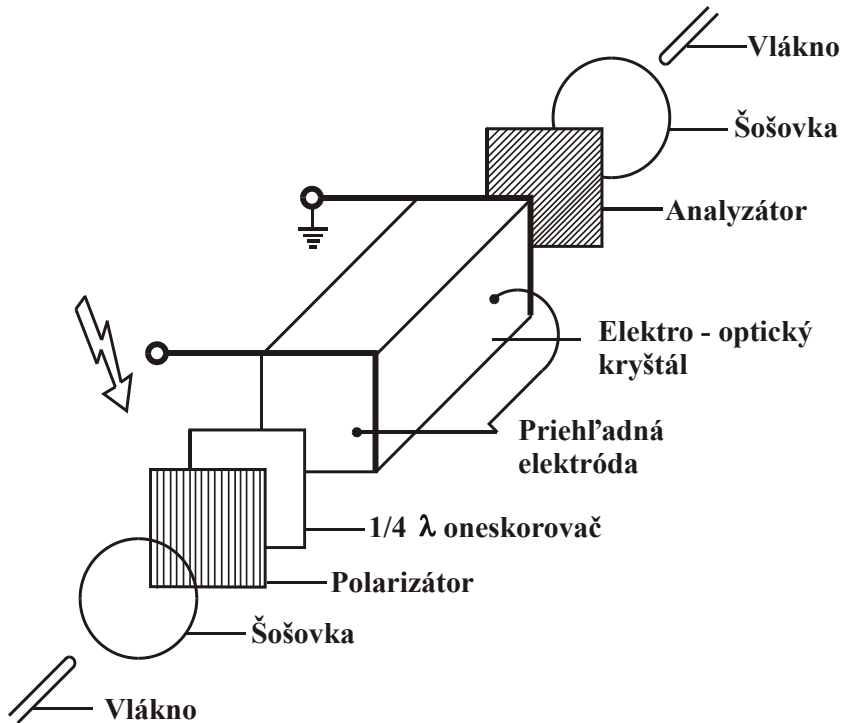


Obr. 5.40 Kruhová konštrukcia polarizačného OVS elektrického prúdu.

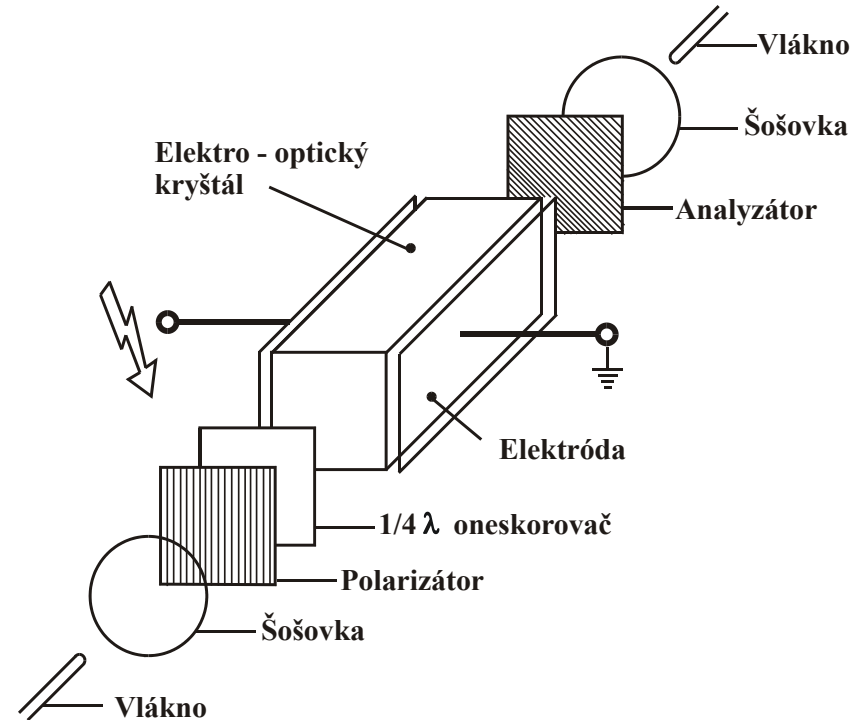


Obr. 5.41 Zväčšenie interakčnej dráhy metódou viacnásobných odrazov.

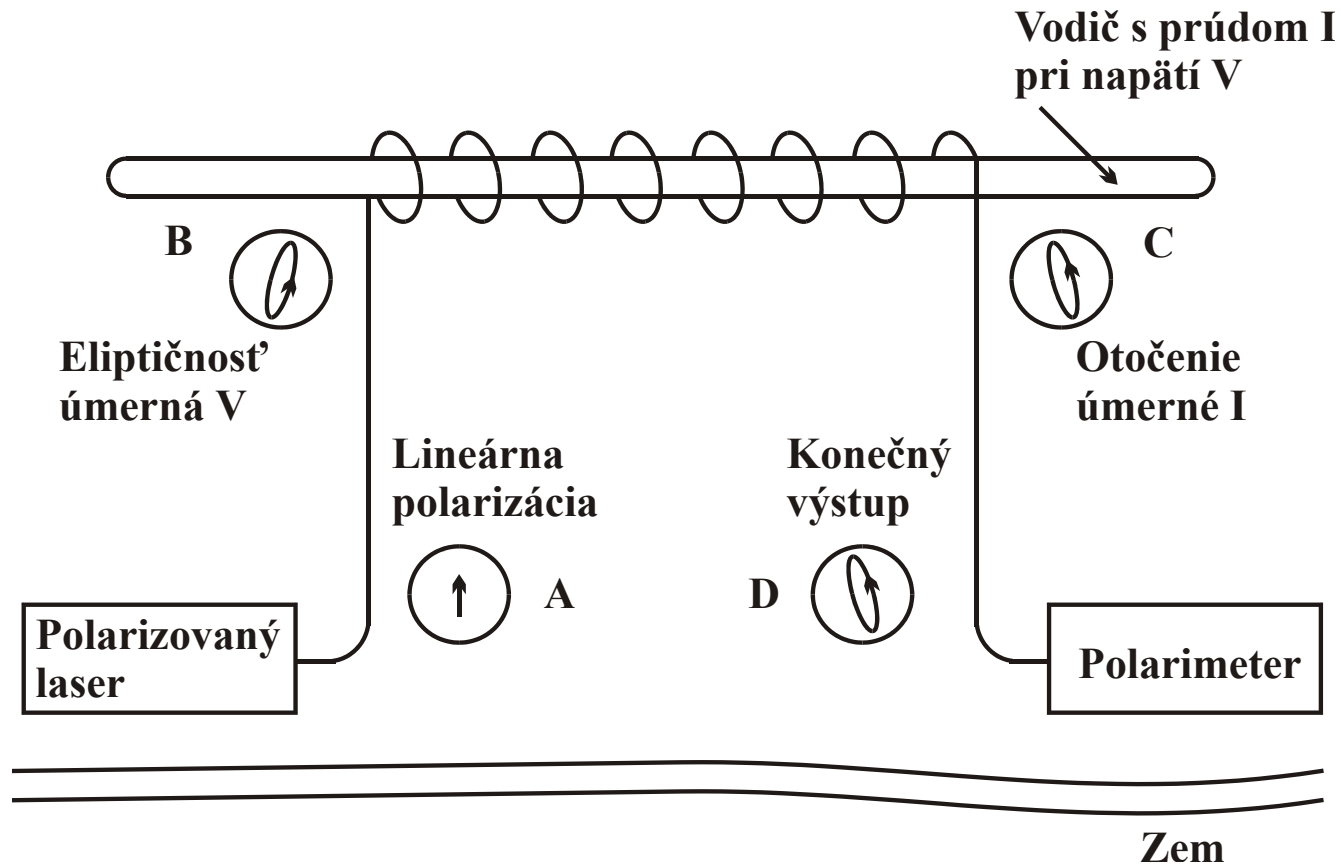
a)



b)



Obr. 5.42 Polarizačný OVS elektrického napätia: a) pozdĺžny, b) priečny.



Obr. 5.43 OVS na súčasné meranie prúdu a napätia vo výkonových vedeniach.

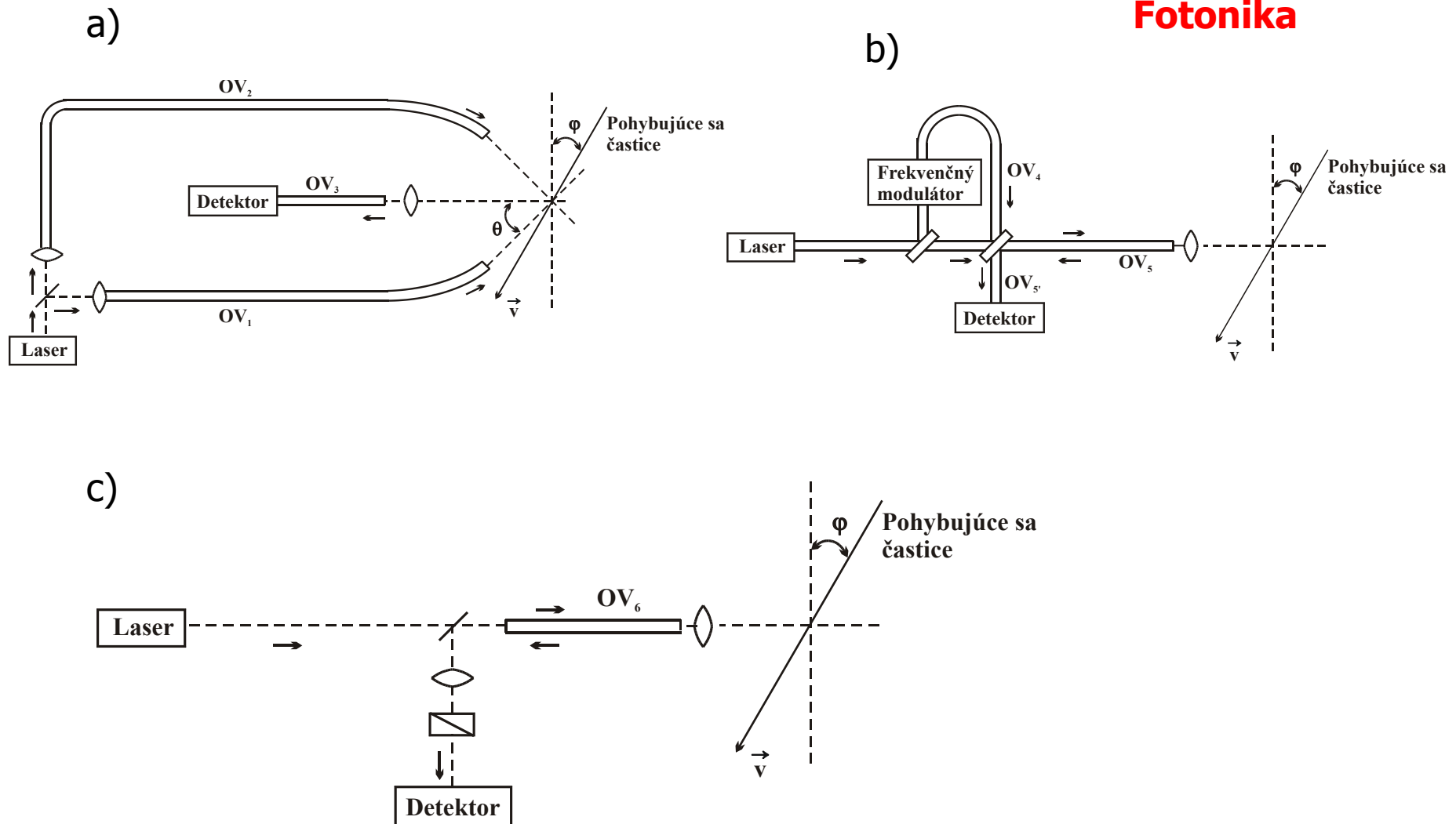
5.5 FREKVENČNÉ OVS

- **Dopplerove merače rýchlosti**

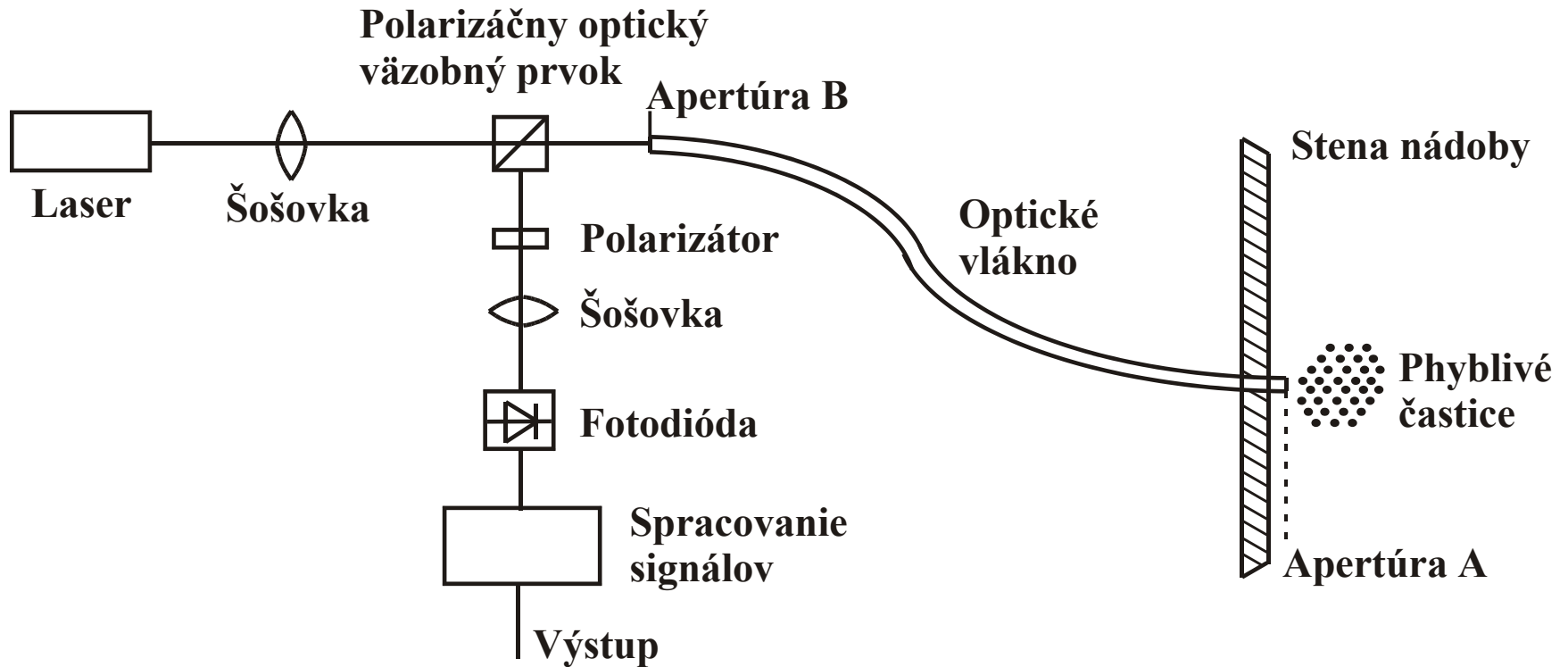
$$f_d = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \approx f \left[1 + \frac{v}{c} \right]$$

f frekvencia dopadajúceho signálu, **v** je rýchlosť pohybu objektu a **c** je rýchlosť svetla

- **Diferenciálne zapojenie – Machov - Zehnderov interferometer**
- **Heterodynne zapojenie – Michelsonov interferometer**
- Problémom je **malý efektívny interakčný objem** - ukončenie senzorového vlákna vhodným optickým prvkom, tzv. **zobrazovacím systémom** mikrošošovkou, alebo kremenným blokom s gradientnou šošovkou
- **Merat' rýchlosť** v intervale 10^{-4} až 10^2 **ms⁻¹** s relatívnou chybou 5 až 8 %, dĺžka optického vlákna - až niekoľko sto metrov
- **Možnosti merania vektora rýchlosti**
- **Štúdiu Brownovho pohybu, pohybu mikroorganizmov**

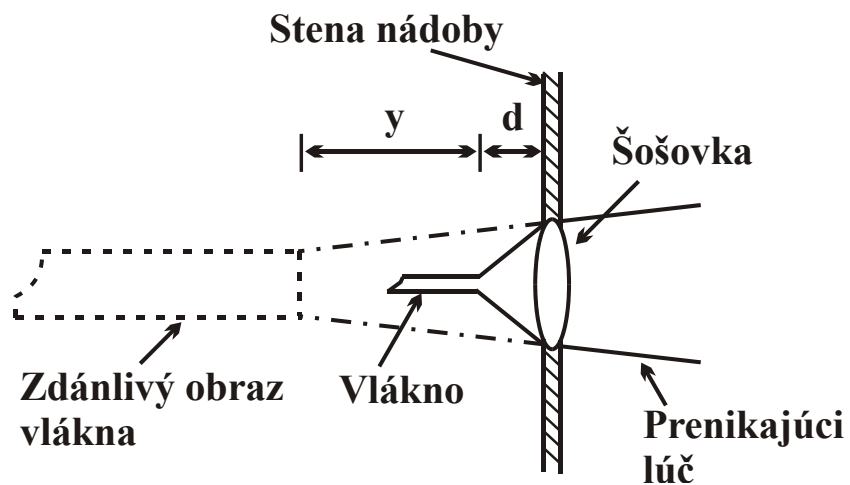


Obr. 5.44 Schémy zapojenia laserových Dopplerových meračov rýchlosti s využitím optických vlákien: a) diferenciálne zapojenie, b) heterodynné zapojenie, c) s využitím jediného optického vlákna.

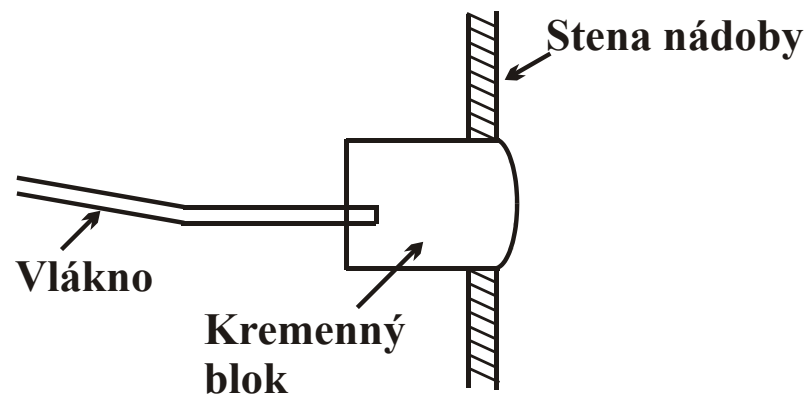


Obr. 5.45 Bloková schéma optického vlákňového Dopplerovho merača rýchlosti.

a)



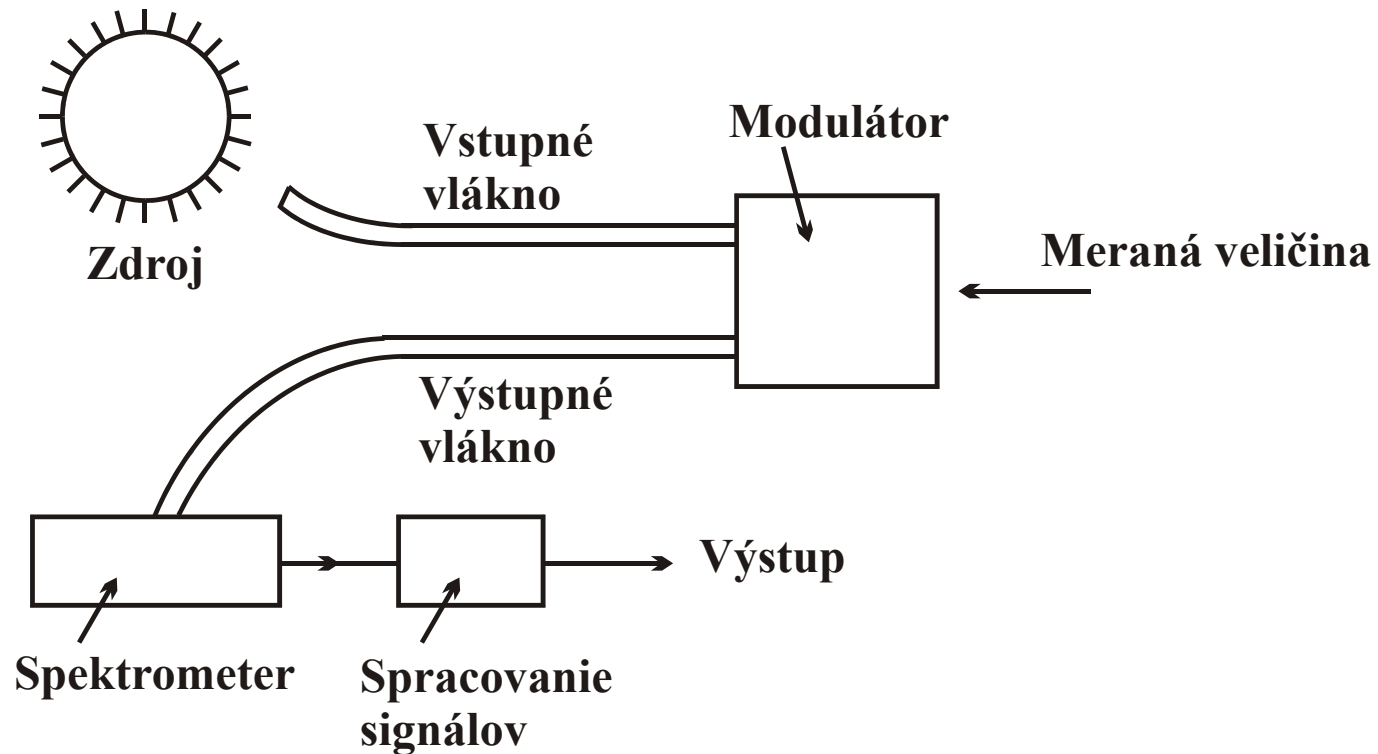
b)



Obr. 5.46 Ukončenie senzorového vlákna: a) mikrošošovkou, b) kremenný blok.

5.6 OVS S MODULÁCIOU VLNOVEJ DĹŽKY

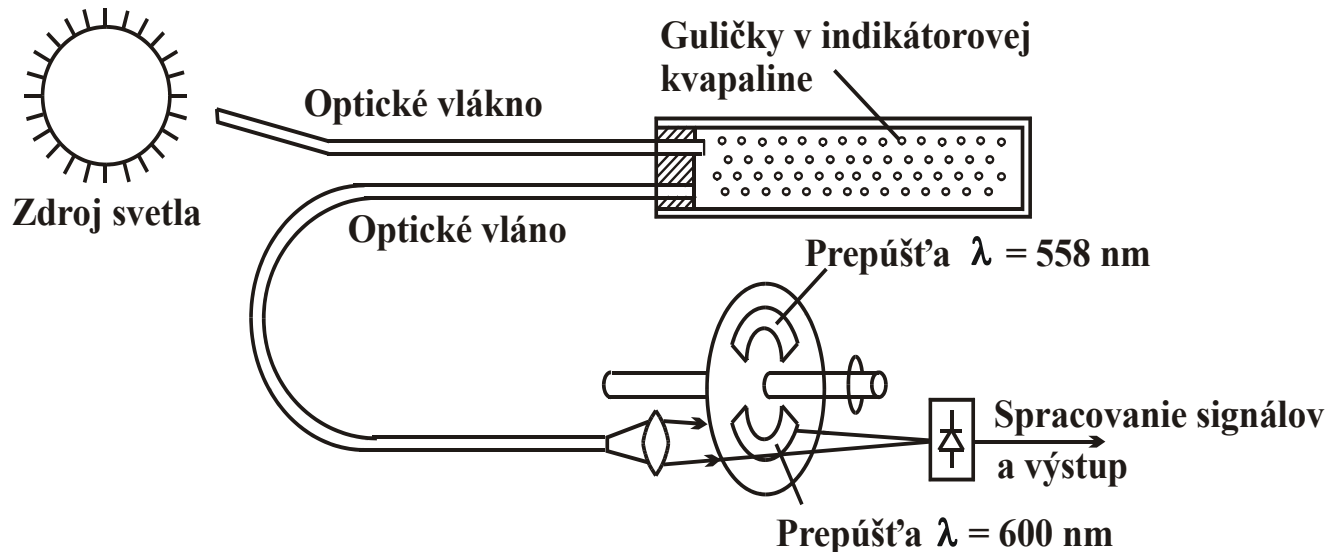
- **Fyzikálne javy vplývajú na spektrálne rozloženie odrazeného alebo prechádzajúceho svetla**
- **Hlavnou súčasťou OVS je spektrometer**
- **OVS s moduláciou vlnovej dĺžky**
 1. **Pri chemickej analýze s využitím indikátorových roztokov**
 1. **Pri analýze fosforencie a luminiscencie**
 2. **Pri analýze žiarenia čierneho telesa**
 3. **Pri použití Fabryho – Perotovho, Lyotovho (polarizačného) alebo podobných optických filtrov**
- **Aplikácie týchto OVS**
 - **V chemickej analýze (meranie pH)**
 - **V pyrometroch (meranie teploty)**



Obr. 5.48 Zapojenie OVS s moduláciou vlnovej dĺžky.

- **OVS hodnoty pH**

- **Indikátor - fenolova červená zafarbenie polyakrimidových guľičiek s priemerom 5 až 10 μm**
- **Meranie pH krvi v rozmedzí od 7 do 7,4 s presnosťou 0,01**

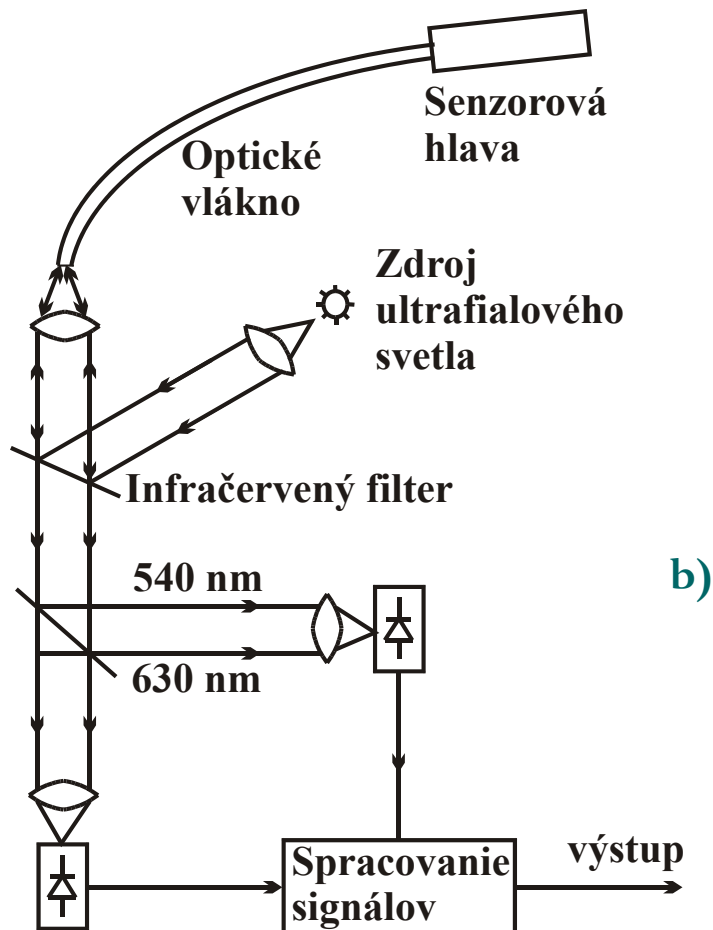


a)

Obr. 5.49 OVS s moduláciou vlnovej dĺžky: a) senzor hodnoty pH.

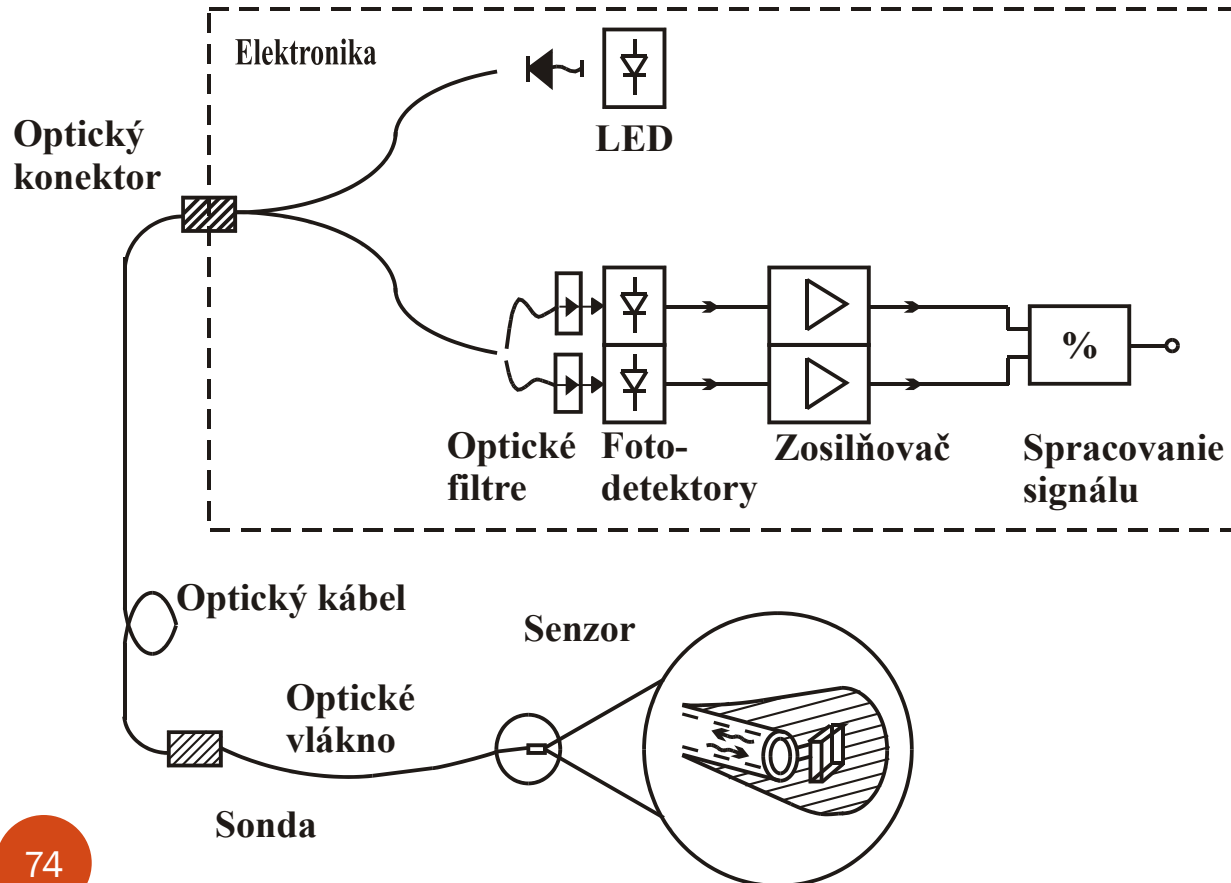
- **OVS teploty**

- Teplotné zmeny spektra fosforencie fosforu s prímiesou prvkov vzácnych zemín
- Presnosť merania ~ 1°C
- Komerčne vyrábané fotoluminiscenčné OVS teploty



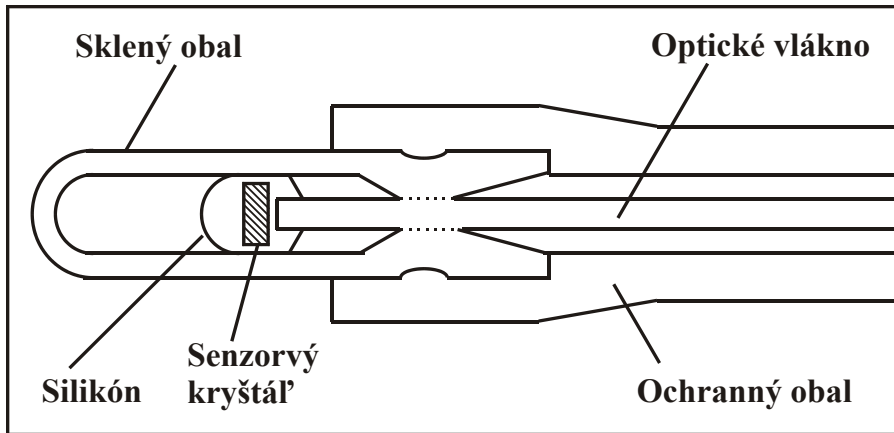
**Obr. 5.49 OVS s moduláciou vlnovej dĺžky:
b) senzor teploty s využitím teplotných zmien fosforencie.**

- ❑ **Meranie teplotnej závislosti spektra fotoluminiscencie vhodného polodičového kryštálu**
 - **Meranie teploty vo vzdialenosti až 500 m od prístroja v rozsahu 0 až 200 °C s absolútnou chybou menšou ako $\pm 1^\circ\text{C}$ a s rozptylom menším ako $0,1^\circ\text{C}$**
 - **Výmenou sensorovej hlavy možno využiť ako **OVS vibrácií****

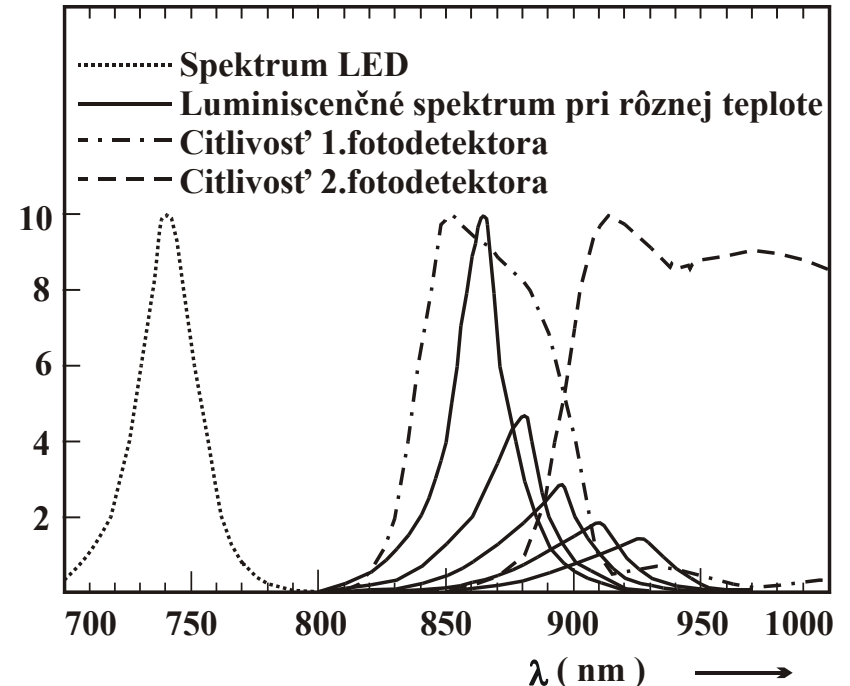


Obr. 5.50 Bloková schéma zapojenia fotoluminiscenčného OVS teploty.

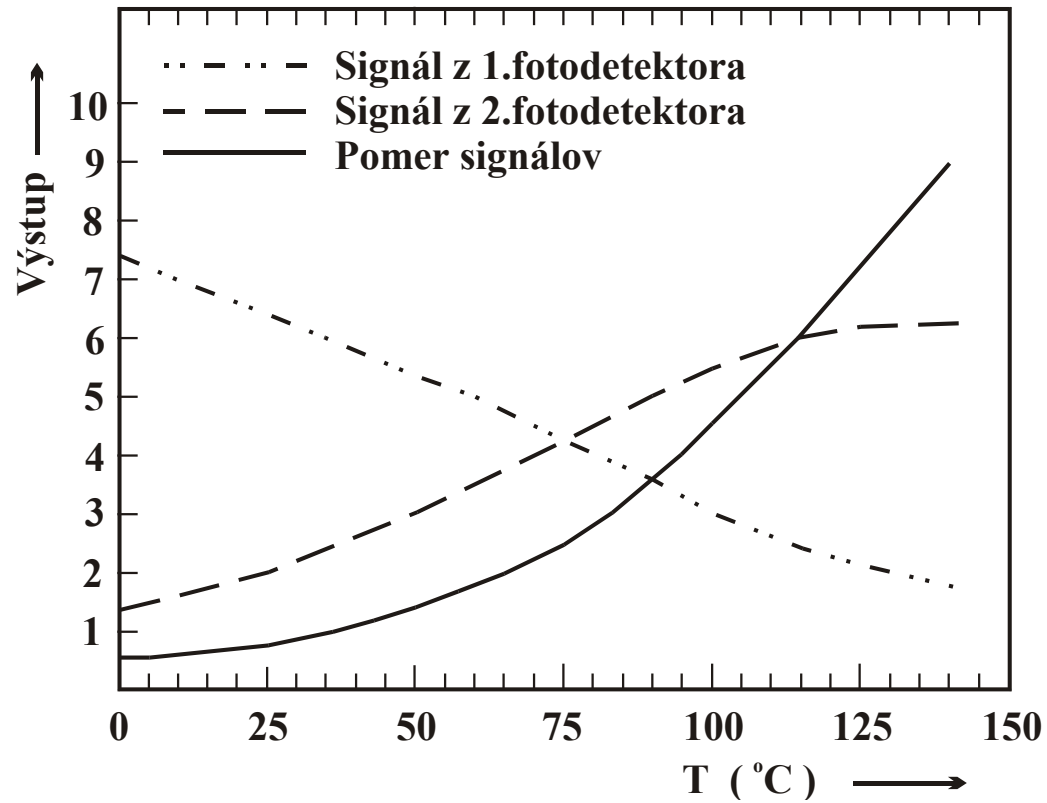
- **OVS teploty s využitím teplotného posunu absorpčnej hrany polovodičového kryštálu**
 - **Meranie teploty vo vzdialenosti až 100 m od prístroja v rozsahu 0 °C až 150 °C, s relatívnou chybou menšou ako $\pm 0,5$**



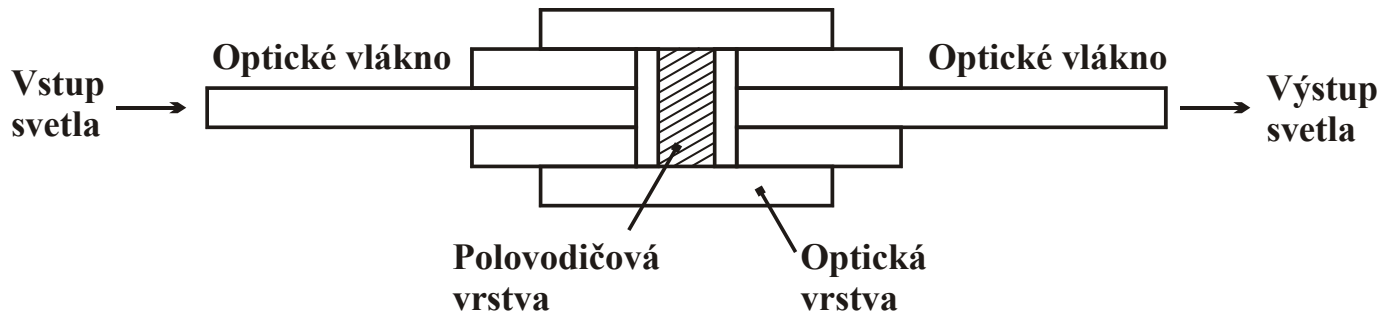
Obr. 5.51 Konštrukcia senzorovej hlavy.



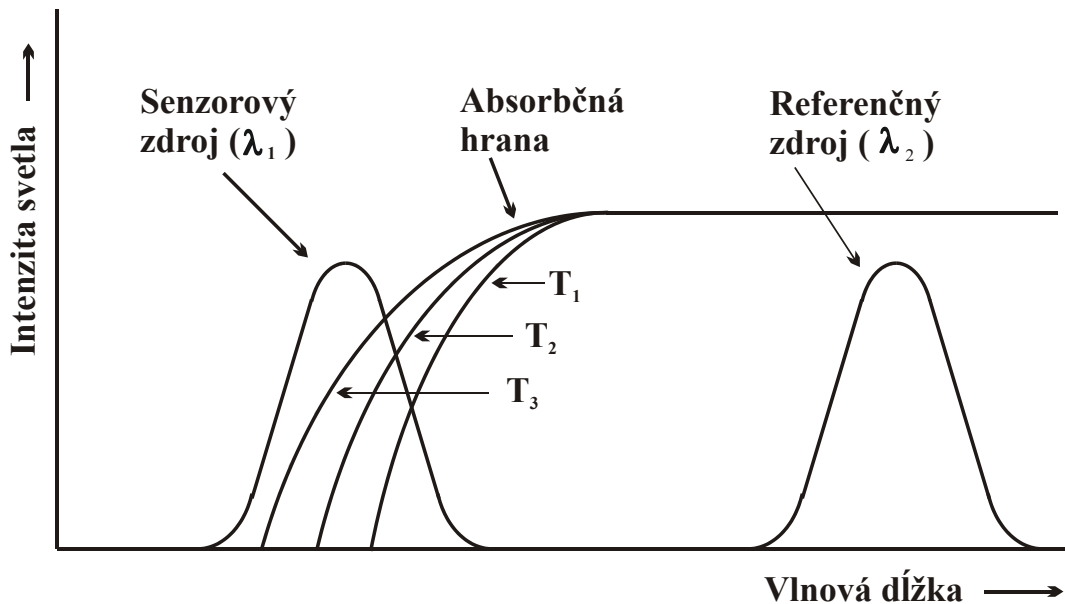
Obr. 5.52 Spektrálne krivky optických a optoelektronických prvkov OVS teploty.



Obr. 5.53 Priebehy signálov v OVS teploty.



Obr. 5.54 Konštrukcia sensorovej hlavy OVS teploty s využitím teplotného posunu absorbčnej hrany polovodičového kryštálu.



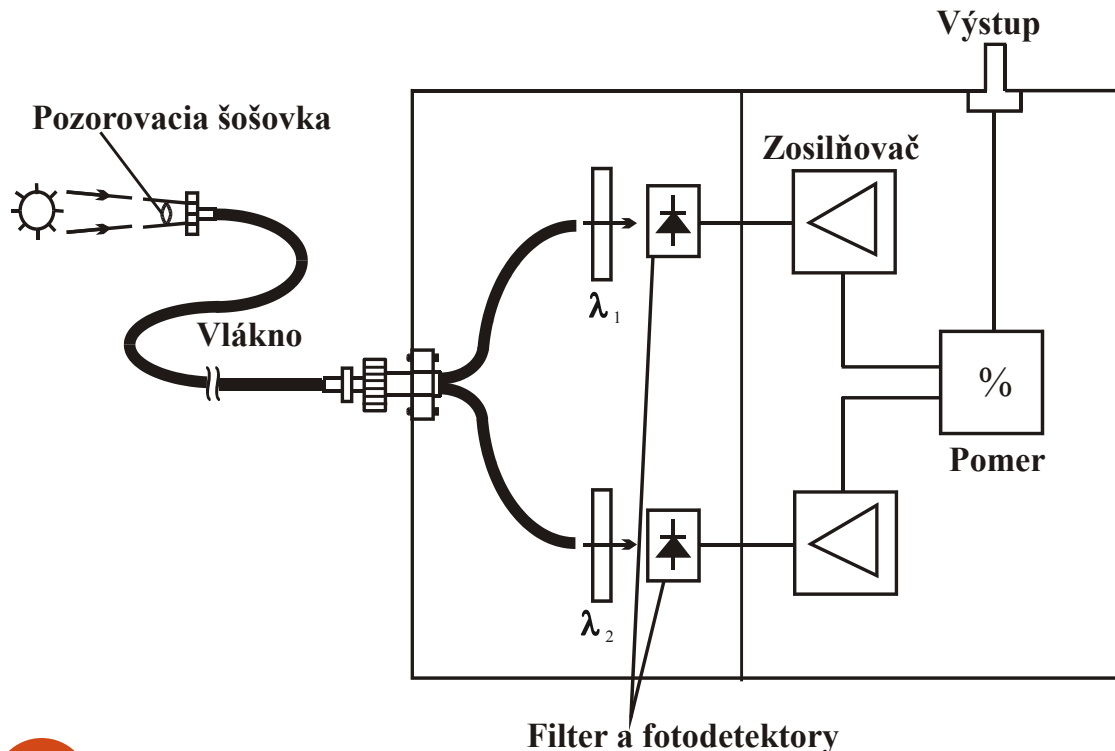
Obr. 5.55 Princíp činnosti OVS teploty s využitím teplotného posunu absorbčnej hrany polovodičového kryštálu.

- **Jednoduché OVS teploty sú založené na meraní spektrálneho rozloženia žiarenia (absolútne) čierneho telesa**
- **Rozlíšenie je 1 °C v rozsahu teplôt od 250 do 650 °C**

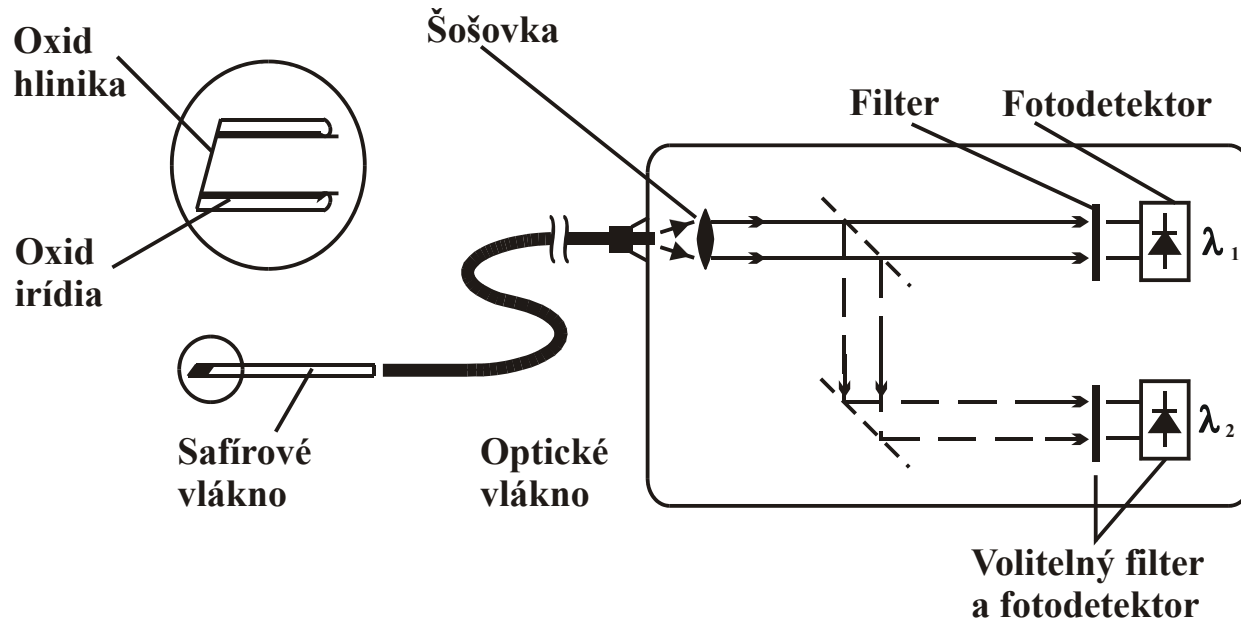


Obr. 5.56 OVS teploty s meraním spektrálneho rozloženia žiarenia čierneho telesa.

- **Optický vláknový pyrometer**
 - **Senzorová hlava je tvorená 0,3 až 1 m dlhým safírovým vláknom zakončeným pokrytím z oxidu irídia a hliníka**
 - **Presnosť merania je 100-krát väčšia, ako pri použití termočlánkov**

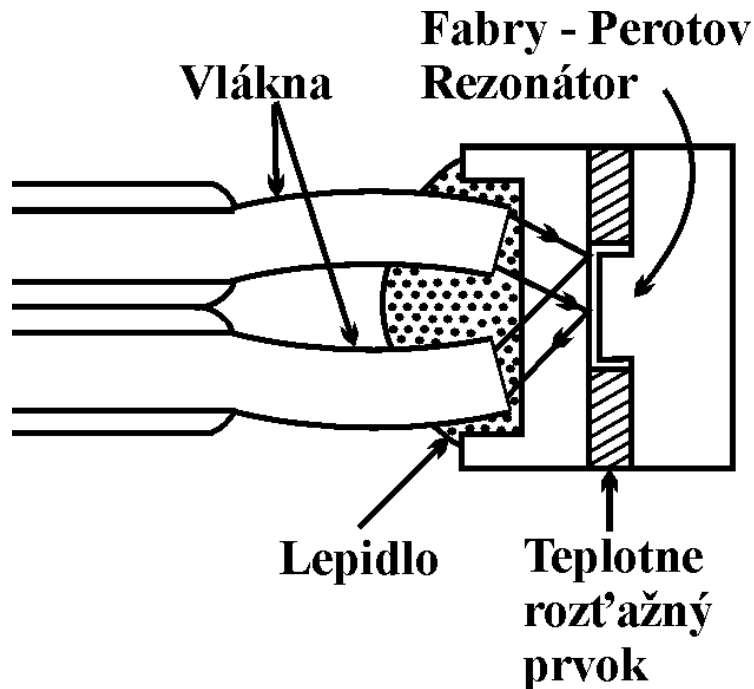


Obr. 5.57 Optický vláknový pyrometer.

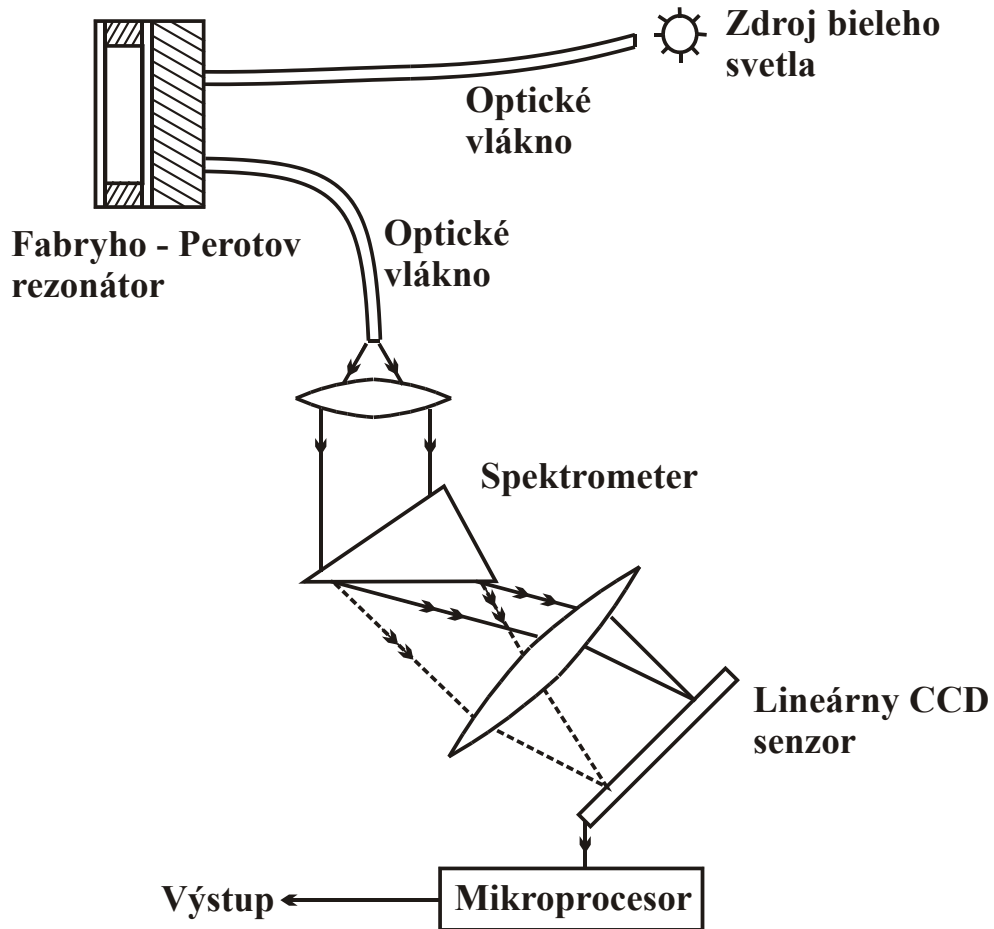


Obr. 5.58 OVS na meranie vysokých teplôt.

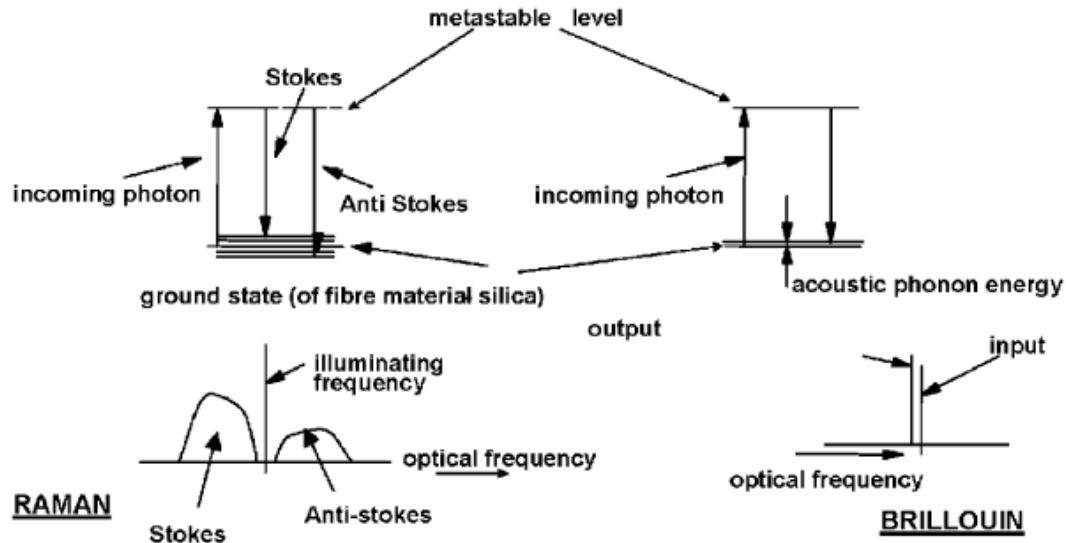
- **Veľmi citlivé OVS s moduláciu vlnovej dĺžky využívajú Fabryho-Perotovho rezonátor a meranie citlivým spektrometrom na báze CCD prvkov**
 - **Konštrukcia sensorovej hlavy OVS pre senzor teploty**



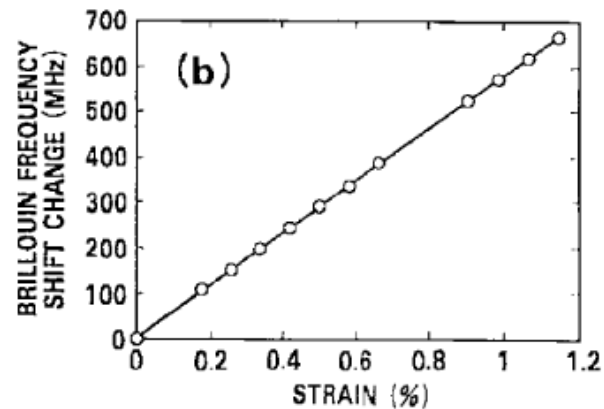
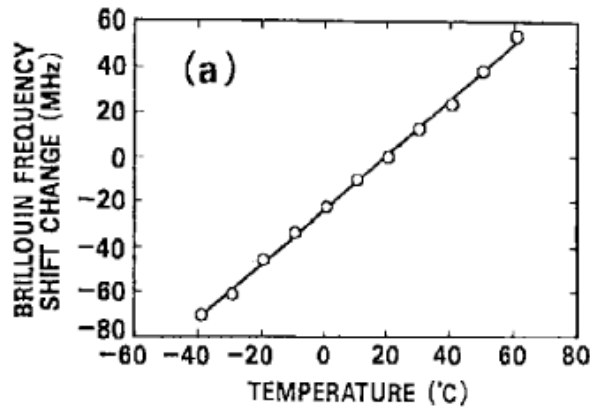
Obr. 5.60 Konštrukcia sensorovej hlavy pre snímanie teploty.



Obr. 5.59 Zapojenie citlivého OVS s moduláciou vlnovej dĺžky s využitím Fabryho - Perotovho rezonátora.

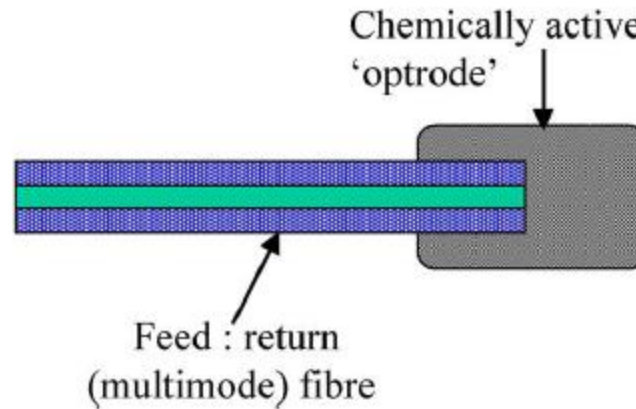


Non linear (inelastic) scattering processes in optical fibre



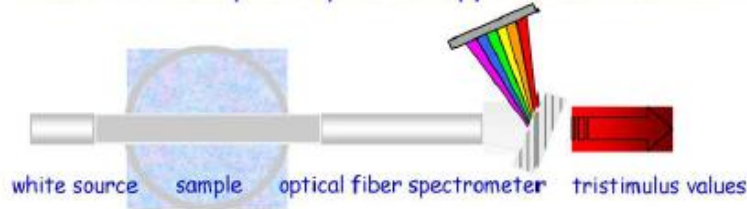
Basic mechanisms of Raman and stimulated Brillouin scatter and typical stimulated Brillouin frequency shifts.

- Frequently used as a basis for chemical measurement e.g. *incorporating indicator dyes*
- Requires stable source to which to refer scattered colour

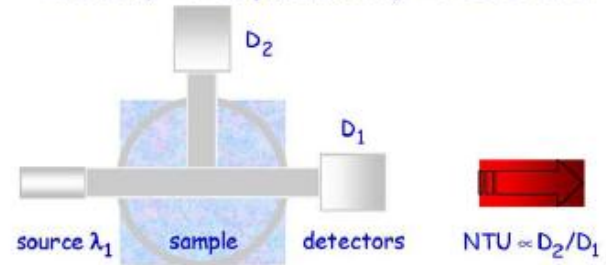


Optrodes for chemical sensing.

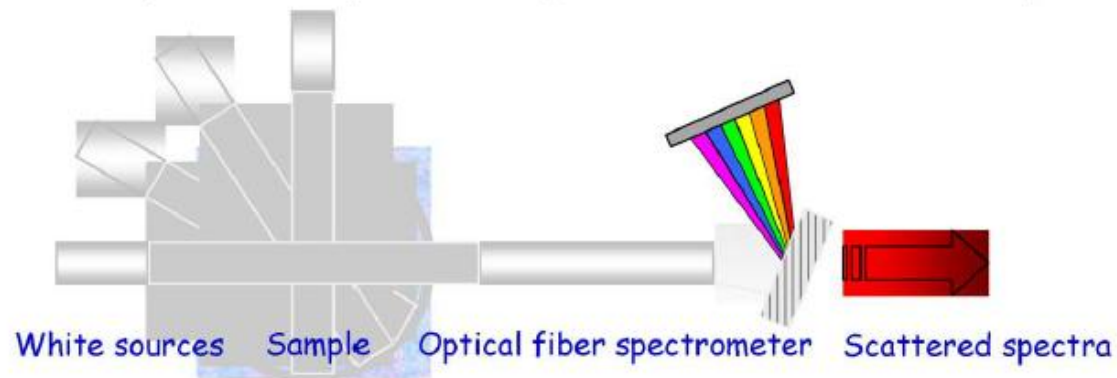
Colour \Rightarrow Absorption Spectroscopy \Rightarrow CIE Standards



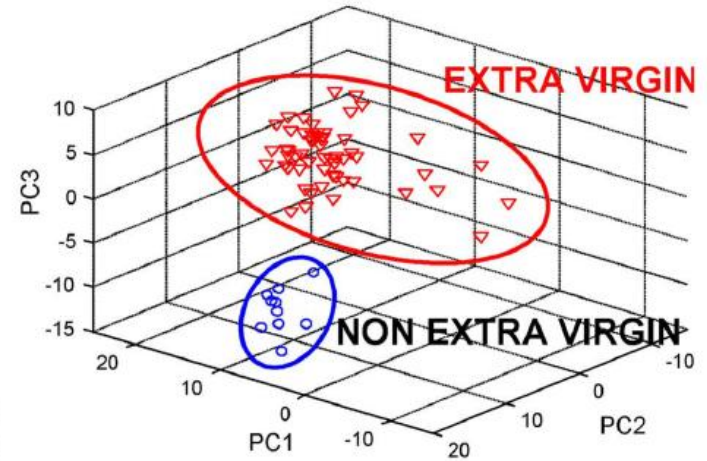
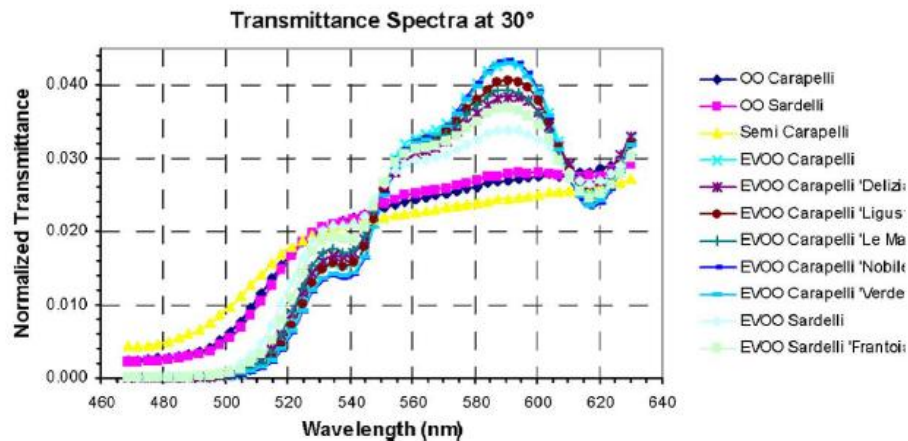
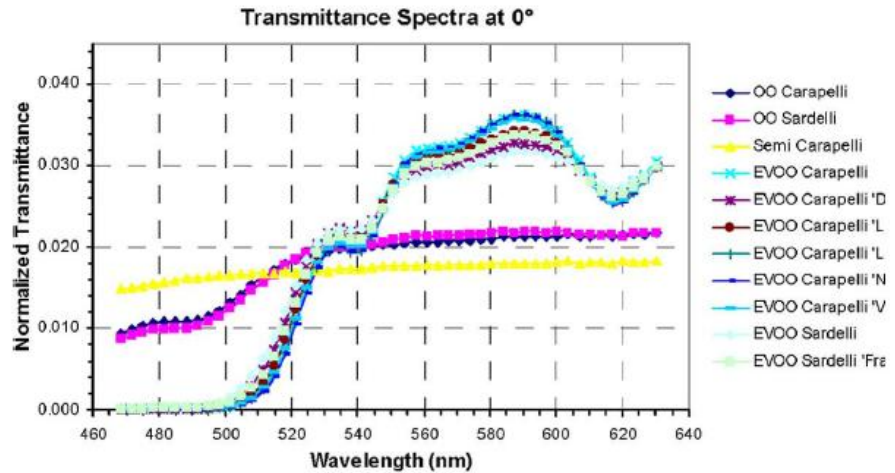
Turbidity \Rightarrow Nephelometry \Rightarrow ISO7072



Spectral Nephelometry \Rightarrow Color AND Turbidity



Combining spectral measurement in direct absorption and scatter to characterize, even slightly, turbid liquids.



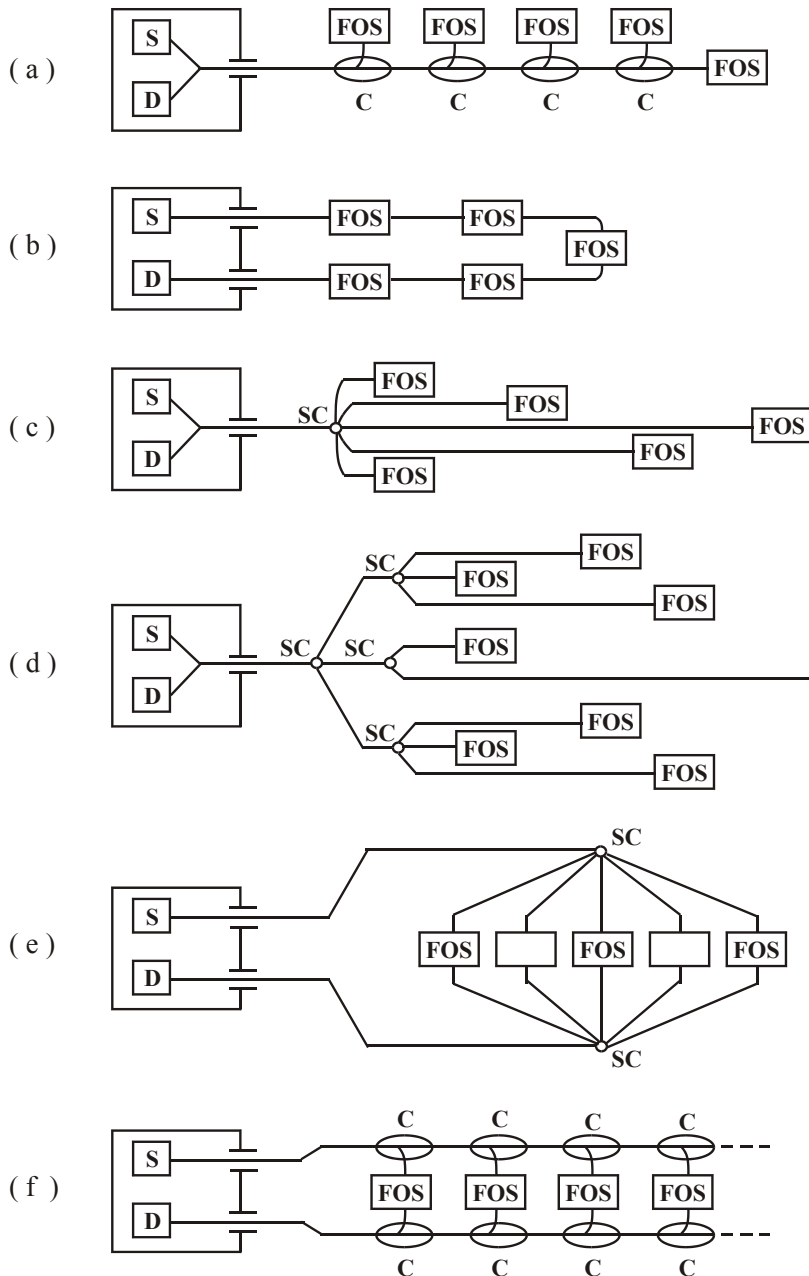
Processing the data to obtain signatures—here for olive oils. Data from measurements as at left is put through PCA or similar analysis to give the clustering at right.

5.7 SYSTÉMY OVS

- **Ak je potrebné použiť viac OVS, hovoríme o systémoch OVS**
- **Príklady systémov OVS**
- **Hydroakustické anténové sústavy lodí a ponoriek**
- **Monitorovanie a komplexné riadenie lietadiel, lodí, automobilov**
- **Riadenie automatizovaných výrobných systémov, robotov a pod.**

5.7 SYSTÉMY OVS

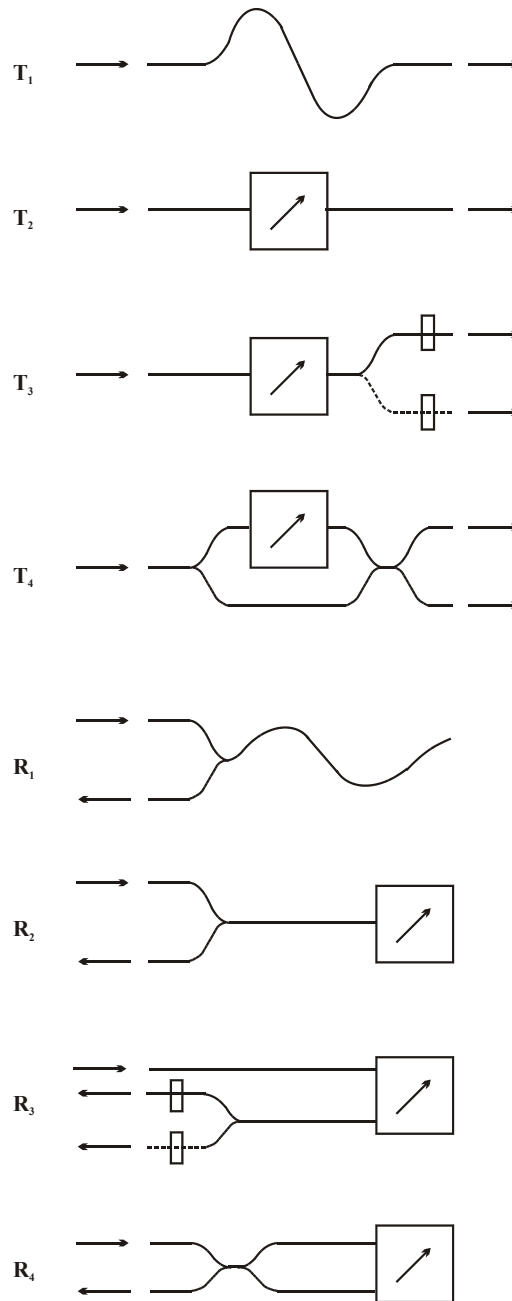
- **Základné prvky systémov OVS**
 1. Centralizované napájanie
 2. Pasívny systém optických vlákien
 3. Elektricky pasívne OVS
 4. Pasívny systém optických vlákien na prenos signálu
 5. Detekčný systém
- **Architektúra systémov: zbernica, kruh, reflexná hviezda, strom, transmisná hviezda a priečková štruktúra**
- **Senzorové elementy**
 - Transmisné
 - Reflexné

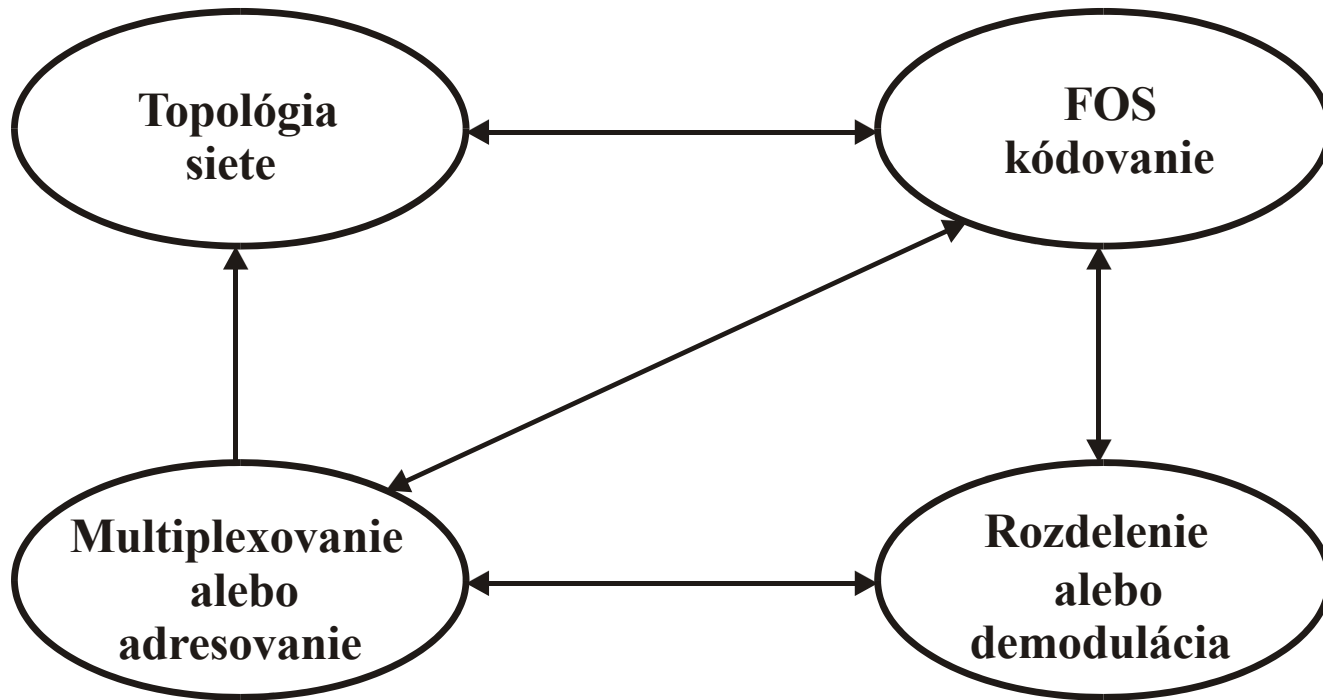


Obr. 5.62 Architektúry systémov OVS:
a) zbernica, b) kruh, c) odrazná hviezda.

- **Výber architektúry** sieťovej topológie súvisí s použitou kódovacou metódou **OVS**,
Multiplexom a demoduláciou optického signálu
- **Priestorový multiplex**
(SDM – Space Domain Multiplex)
jednoduchý ale nevyužíva veľkú prenosovú kapacitu
OV
- **Multiplex s delením podľa vlnovej dĺžky**
(WDM) spektrálny multiplex
- **Multiplex v časovej oblasti**
(TDM – Time Domain Multiplex)
- **Systemy OVS s využitím**
Metód optickej reflektometrie (OTDR)

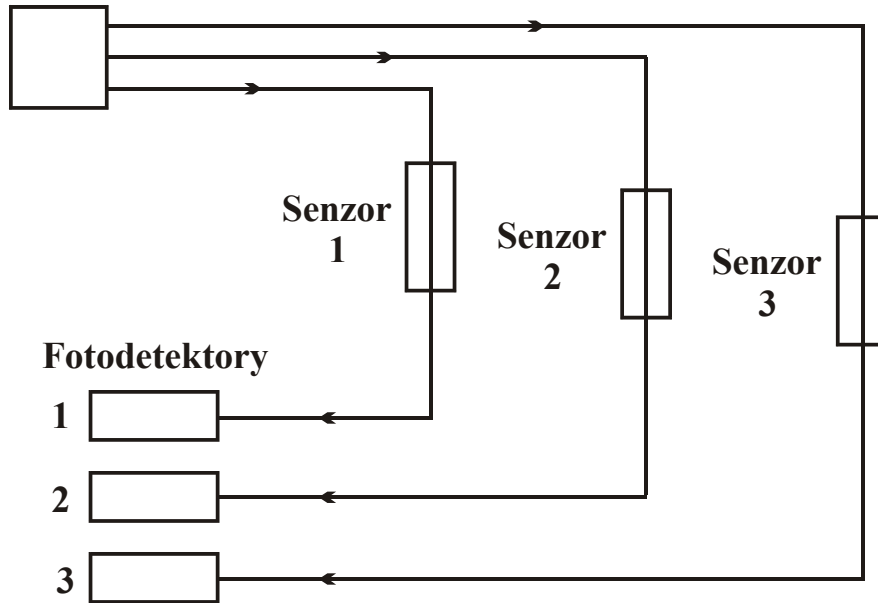
Obr. 5.63 Topológie OVS:
R-reflexné, T - transmisné.



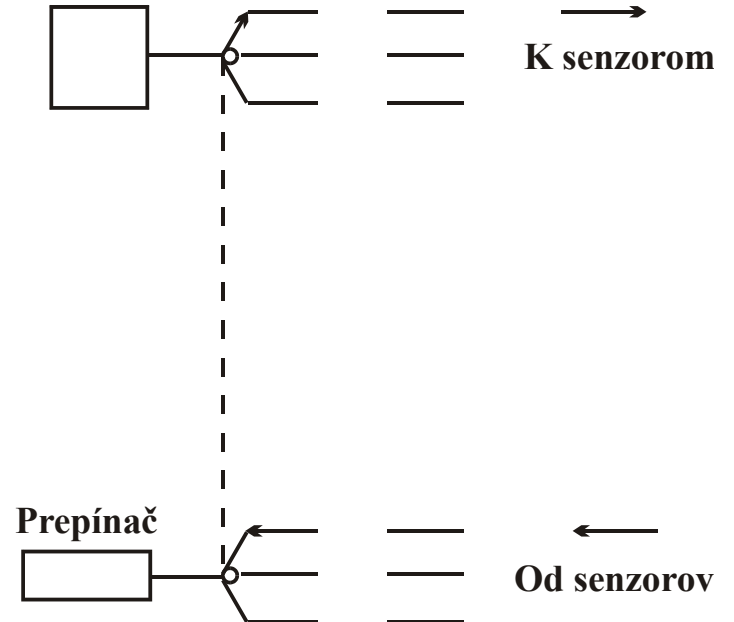


Obr. 5.64 Hlavné funkčné celky systému OVS a ich vzájomné interakcie.

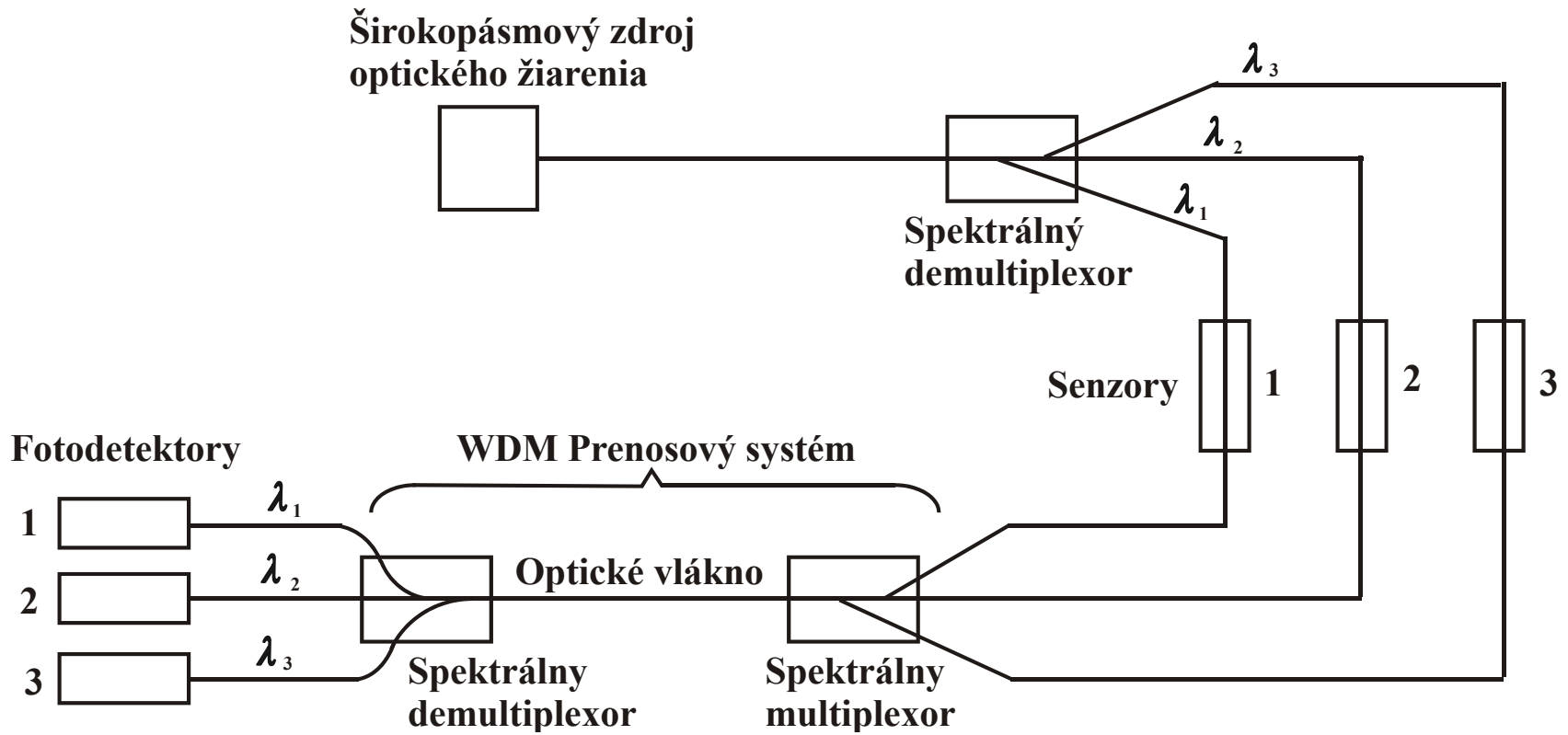
**Zdroj
optického
žiarenia**



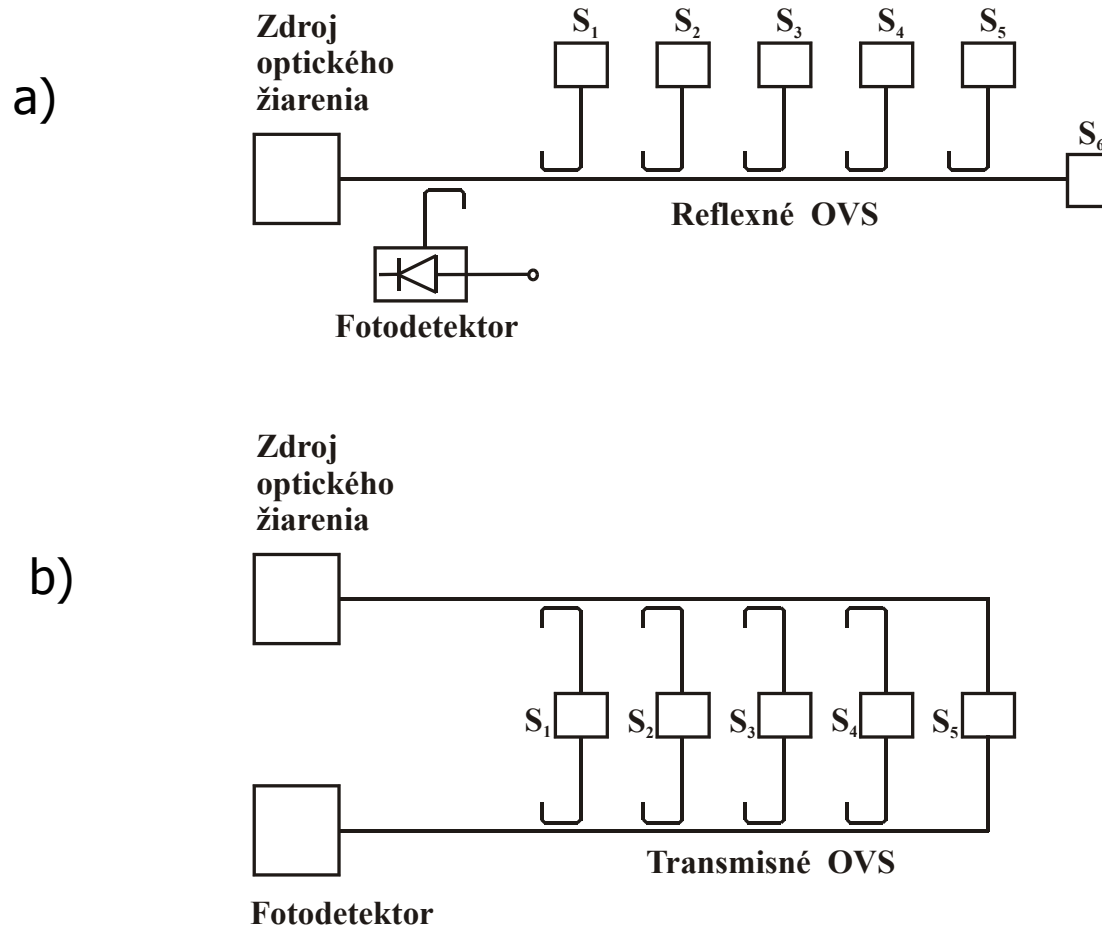
**Zdroj
optického
žiarenia**



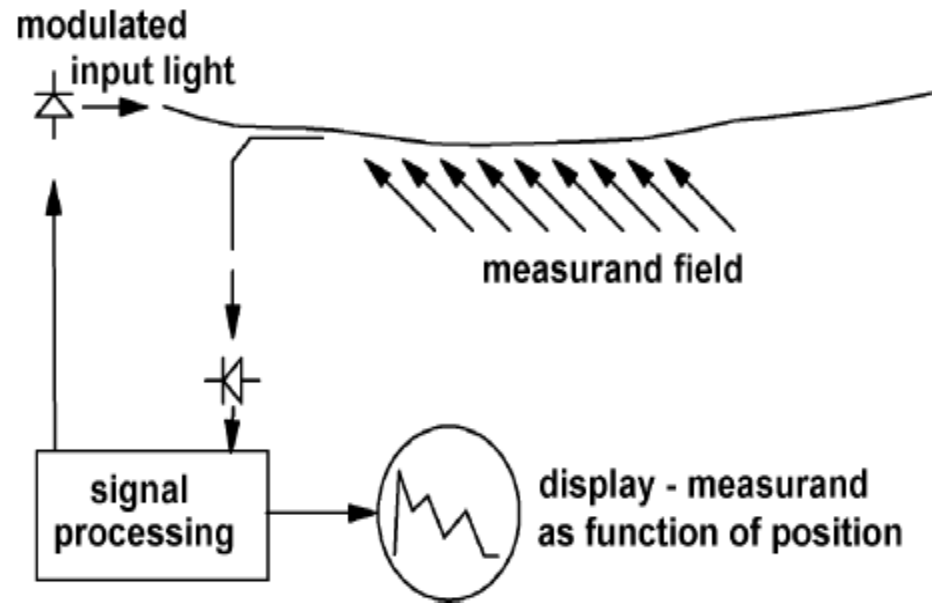
Obr. 5.65 Priestorový multiplex OVS.



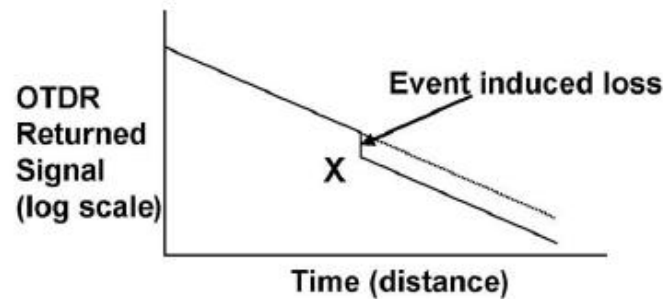
Obr. 5.66 Systém OVS s využitím WDM.



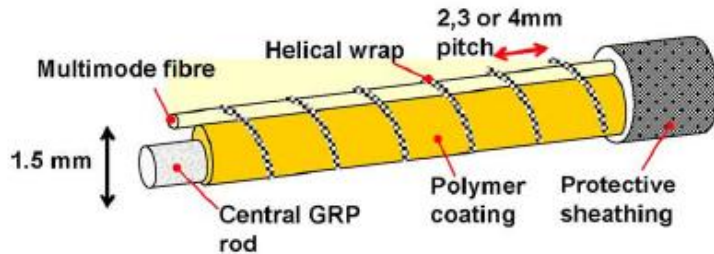
Obr. 5.67 Systém a) reflexných, b) transmisných OVS s využitím TDM.



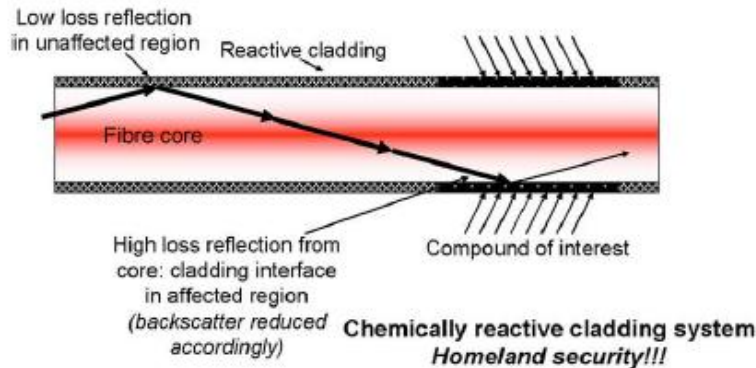
**Distributed sensing—a technique unique to FOS.
OTDR - FODAR**



Time domain reflectometer trace for sensor activated at point X by a loss induced by the local measurand

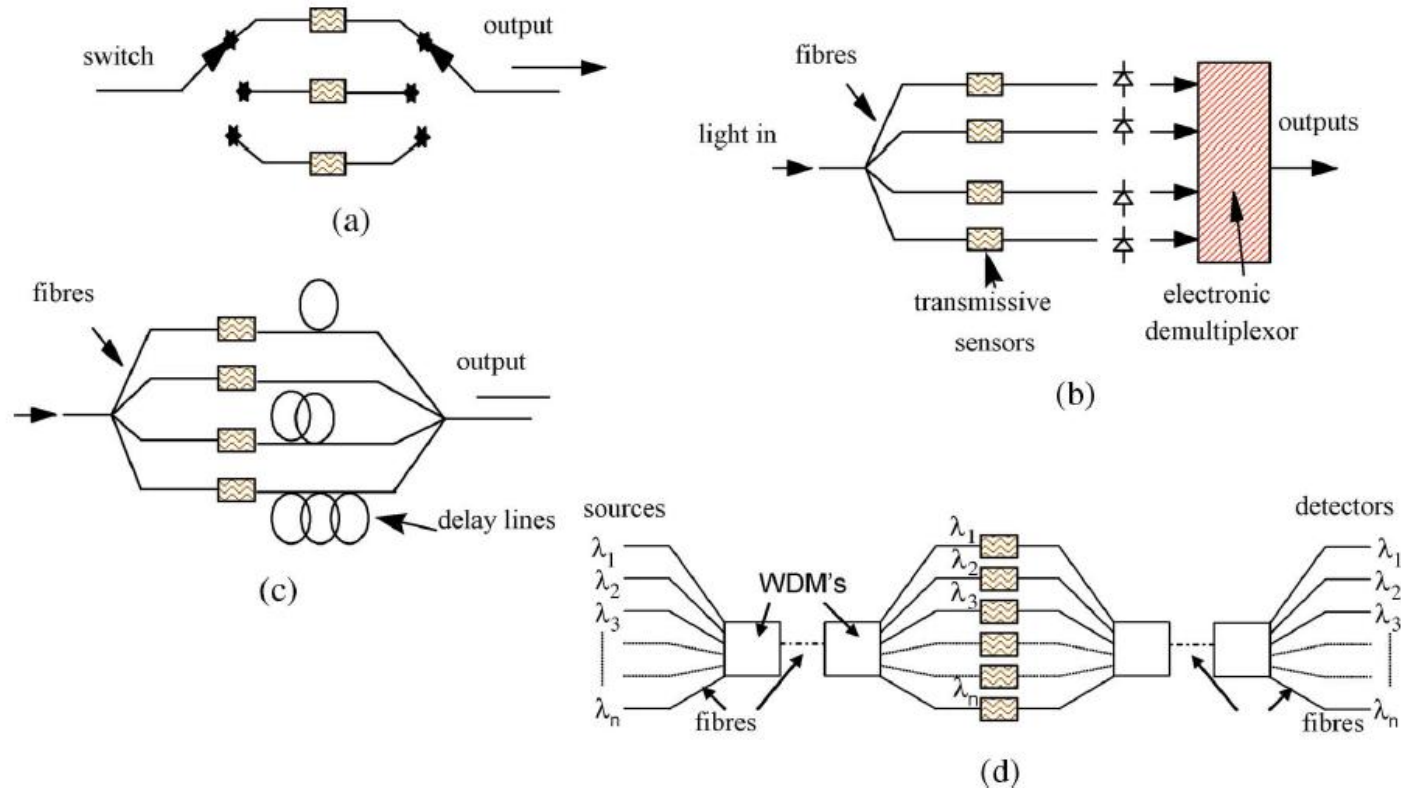


(a) Microbend loss distributed sensor using chemically sensitive polymers responding to selected liquids

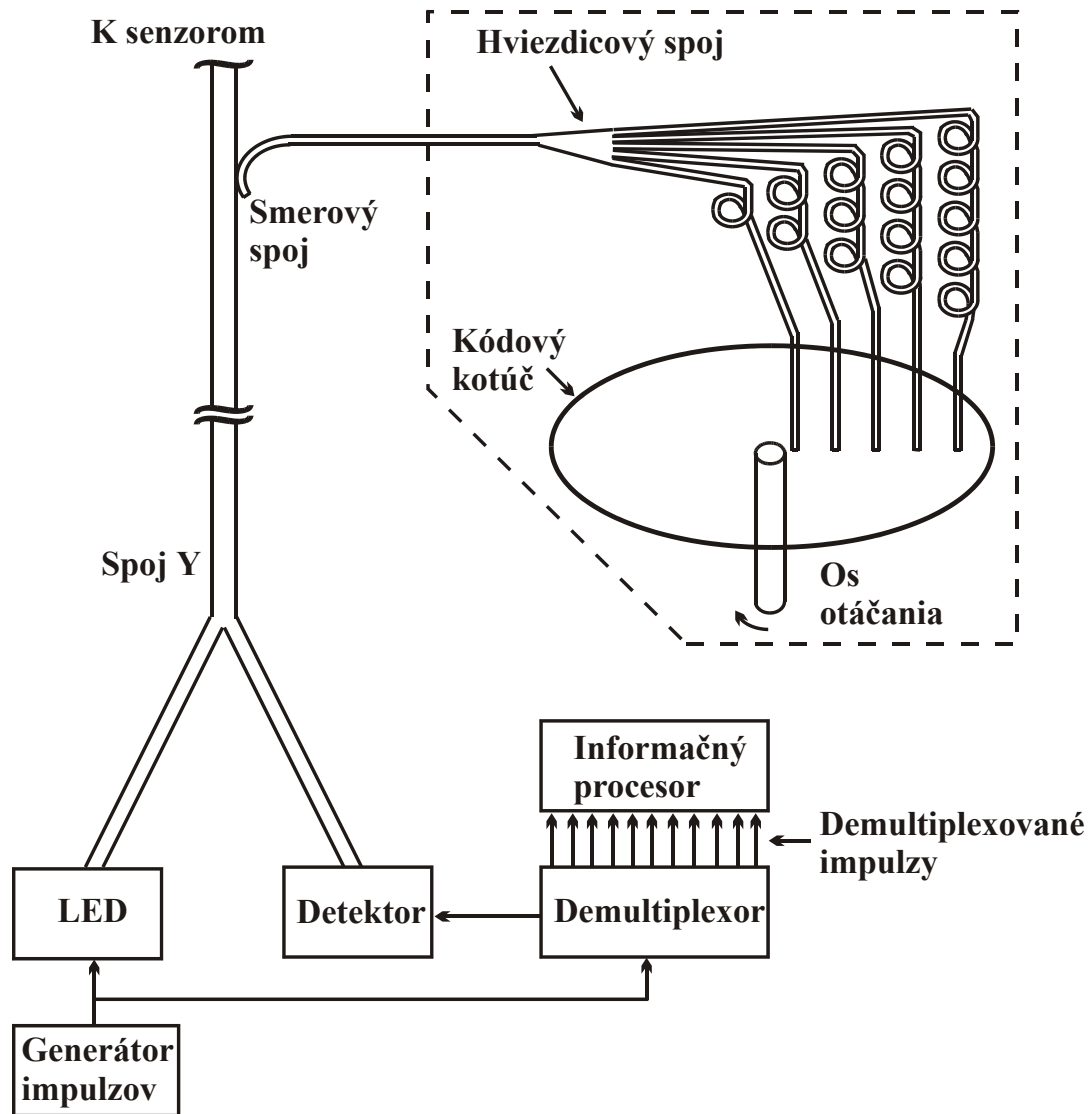


(b) Chemically sensitive cladding system responding selectively to gases. The loss is usually wavelength dependent and can often be reset e.g. by ultra violet irradiation.

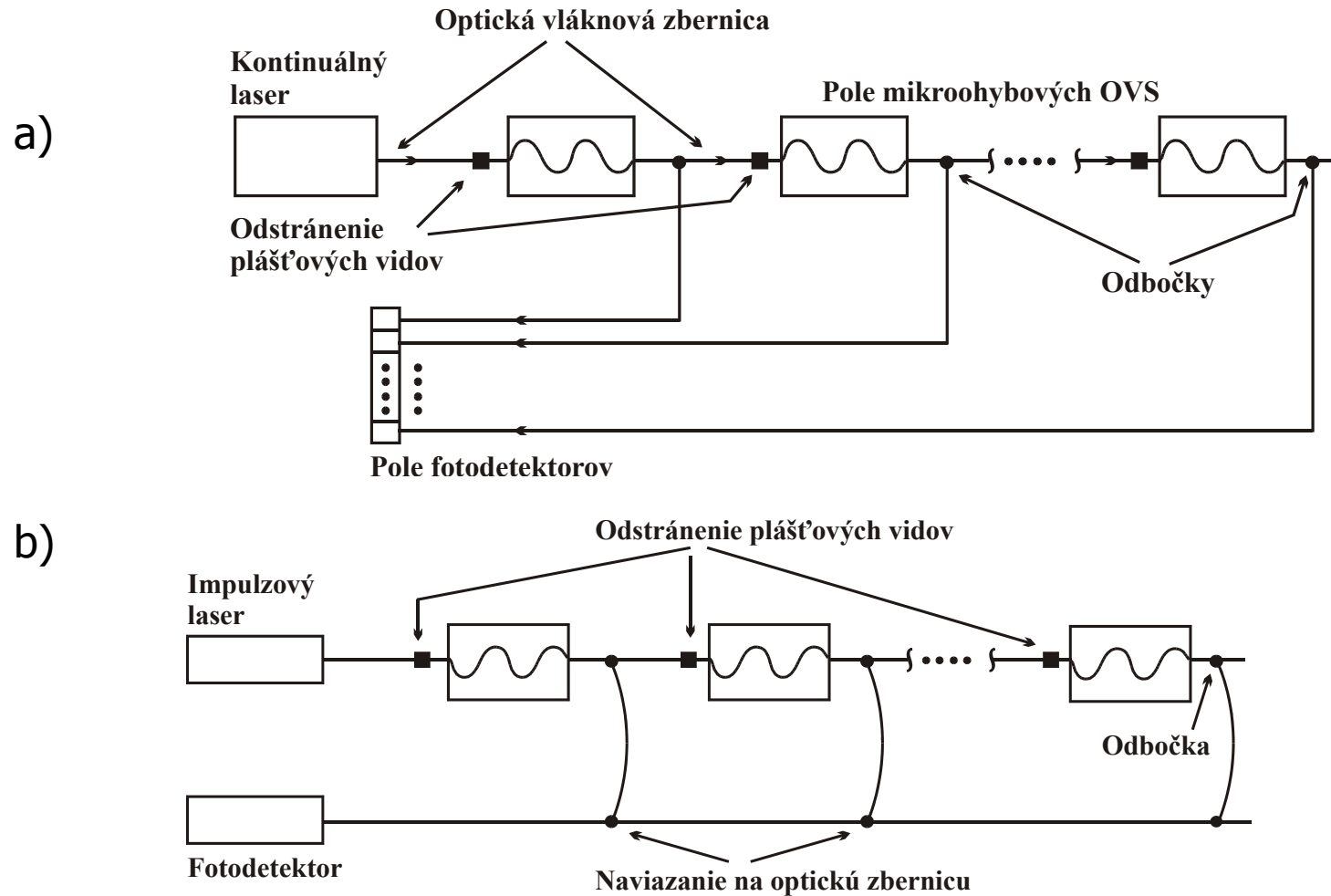
Loss-based distributed sensors using: (a) microbend and (b) cladding loss modulation mechanisms.



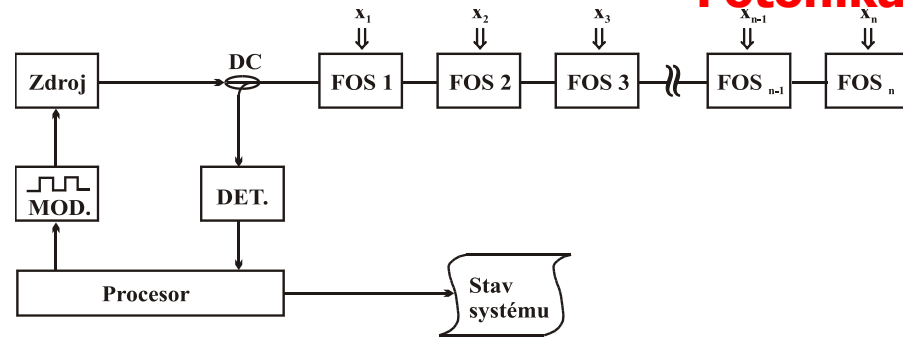
Examples of fiber-optic passive point sensor networks:
(a) Switched multiplex system with single channel optoelectronics;
(b) Transmissive star system with electronic demultiplexer;
(c) Fully time multiplexed system; (d) WDM system with single point sensor per channel.



Obr. 5.68 Zapojenie číslicového systému OVS, použitého na meranie natočenia osi.



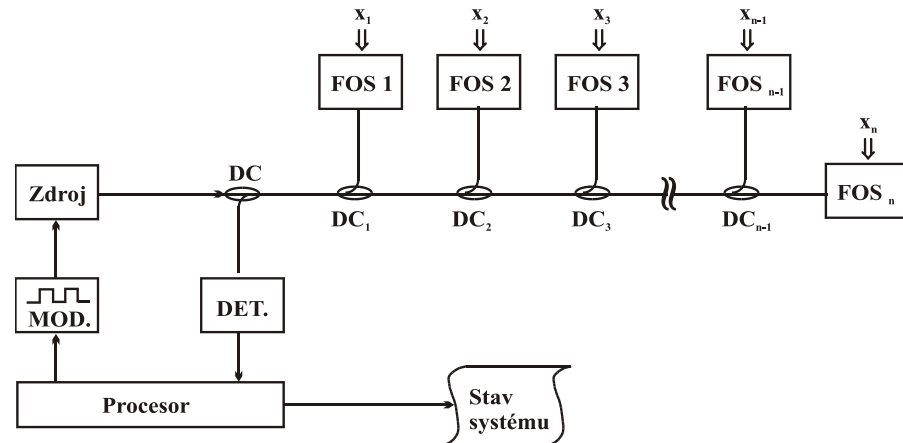
Obr. 5.69 Zapojenie systému mikrohybových amplitúdových OVS s využitím: a) kontinuálneho, b) impulzového laserového zdroja žiarenia.



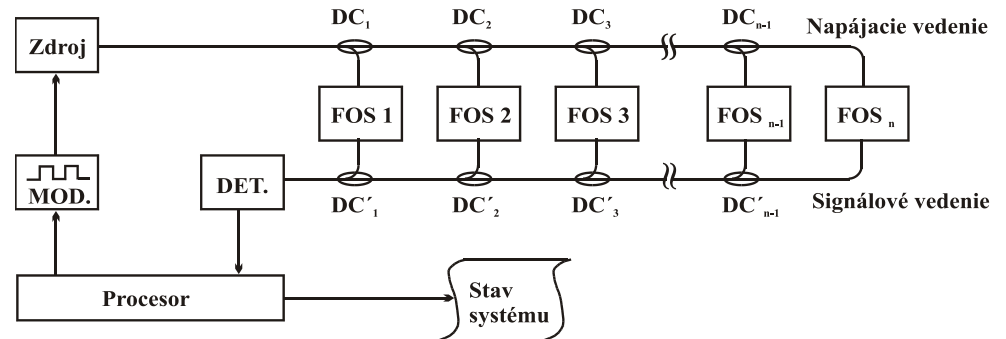
(a)

Obr. 5.70 Systémy OVS s využitím OTDR:

- a) transmisné OVS,**
- b) reflexné OVS,**
- c) adresované OVS.**



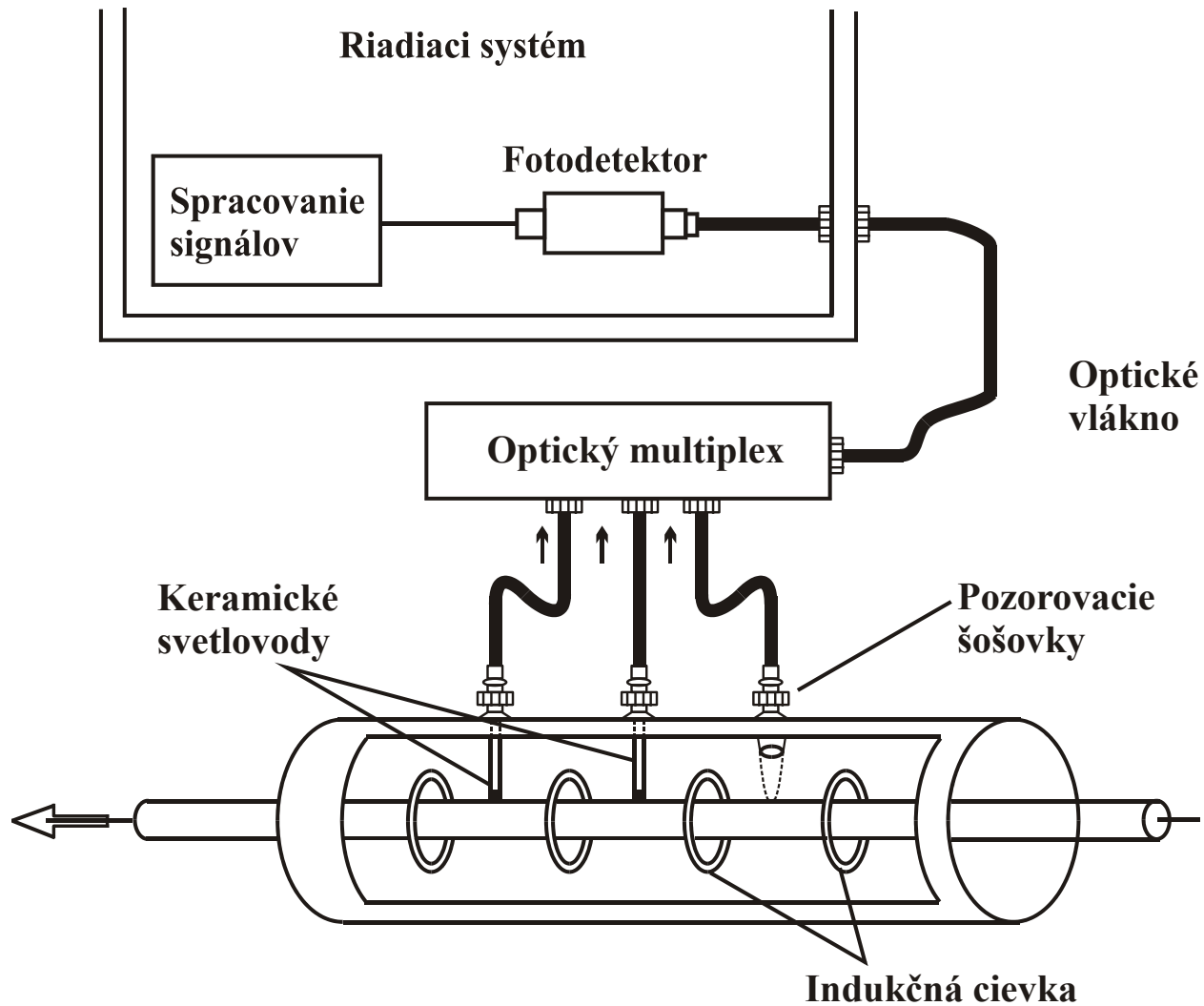
(b)



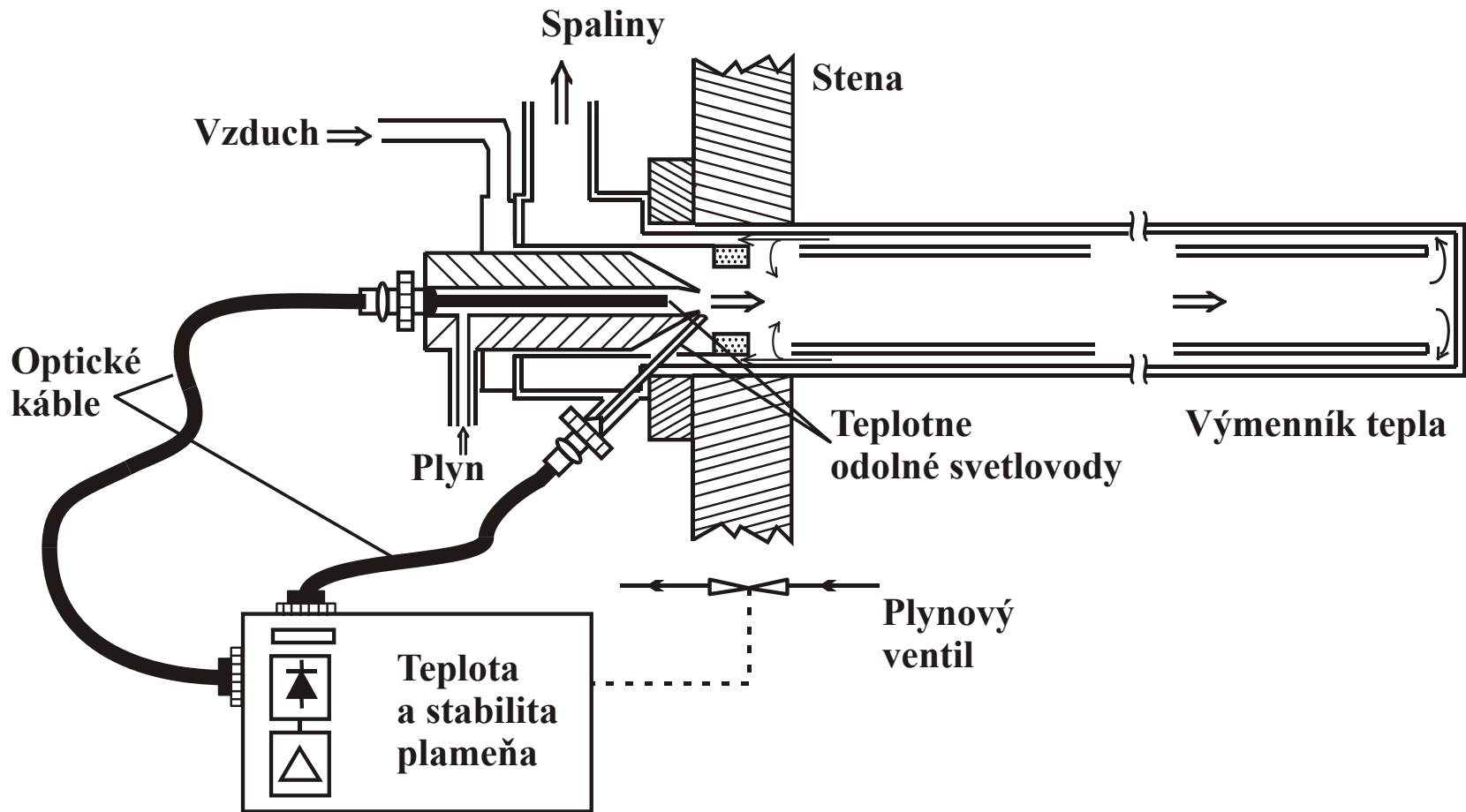
(c)

5.8 PRIEMYSELNÉ APLIKÁCIE OVS

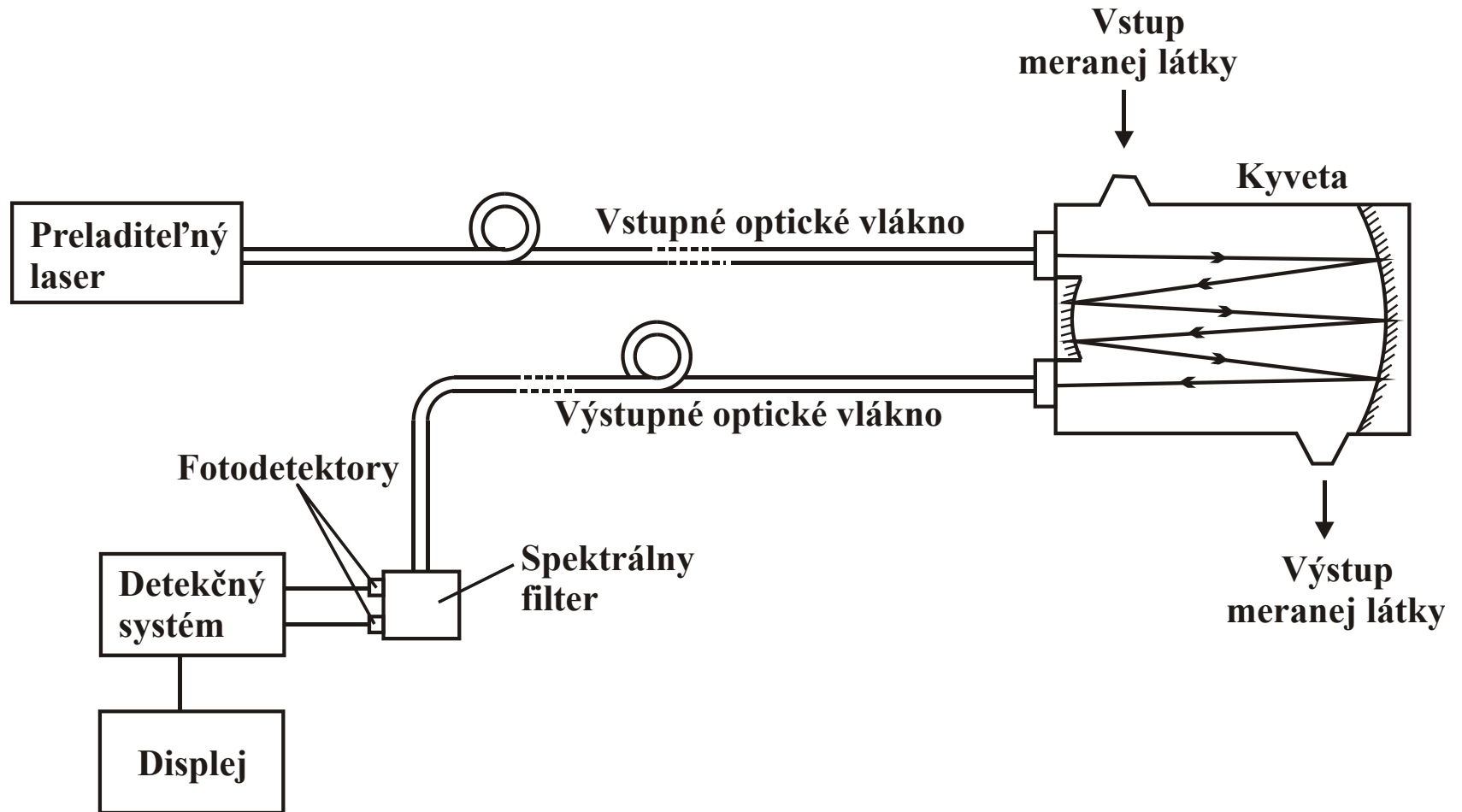
- **Pyrometer** - monitorovanie plynových turbín, indukčných pecí
- **Spektrometrické systémy**
 - Chemická analýza plynov
 - Meranie koncentrácie metánu, O_2 , CO_2 , H_2 , CO , SO_2 , znečistenia ovzdušia a pod.
 - Systém pre meranie úletov (dymu) z komína
- **Kódovacie kotúče s využitím optických vlákien**
- **Systémy optického riadenia servoventilu**
- **Taktilné senzory robotov**
- **Osobitné vizuálne senzory robotov**
- **Inteligentné automobily**
- **Navigačné systémy**
- **Kompozitné materiály**
- **Prenos svetla pre osvetľovacie účely**



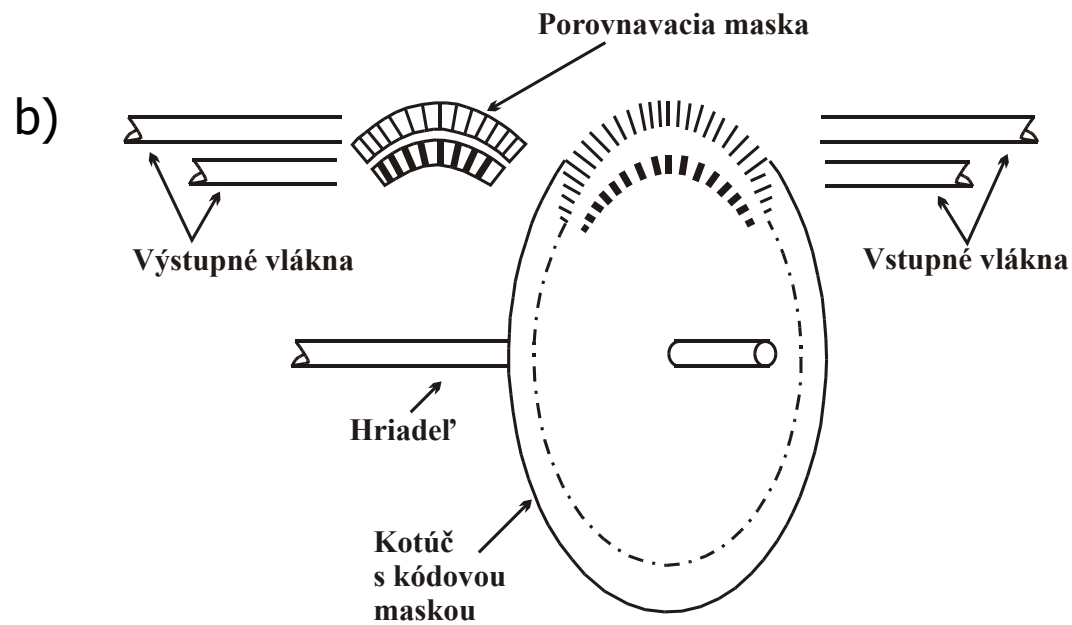
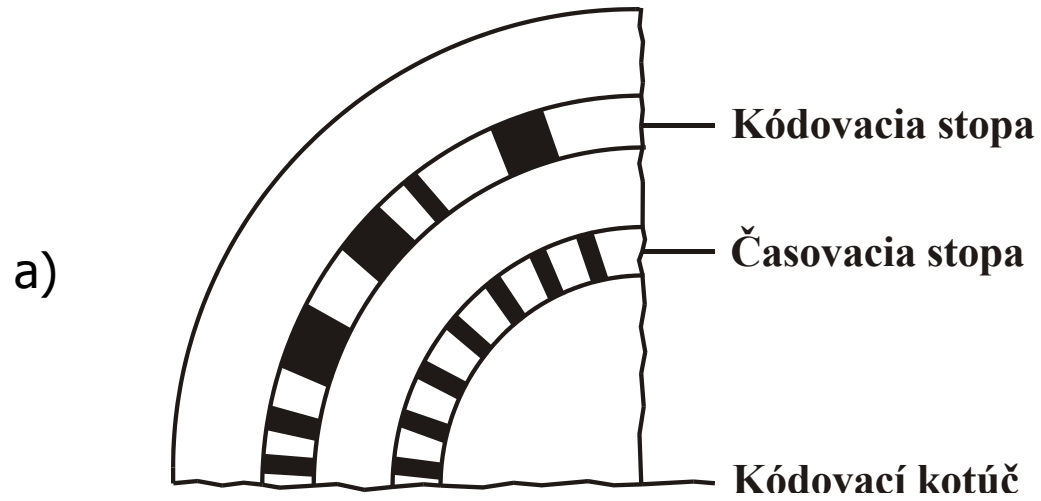
Obr. 5.71 Snímanie teploty v indukčnej peci s využitím optických vlákien.



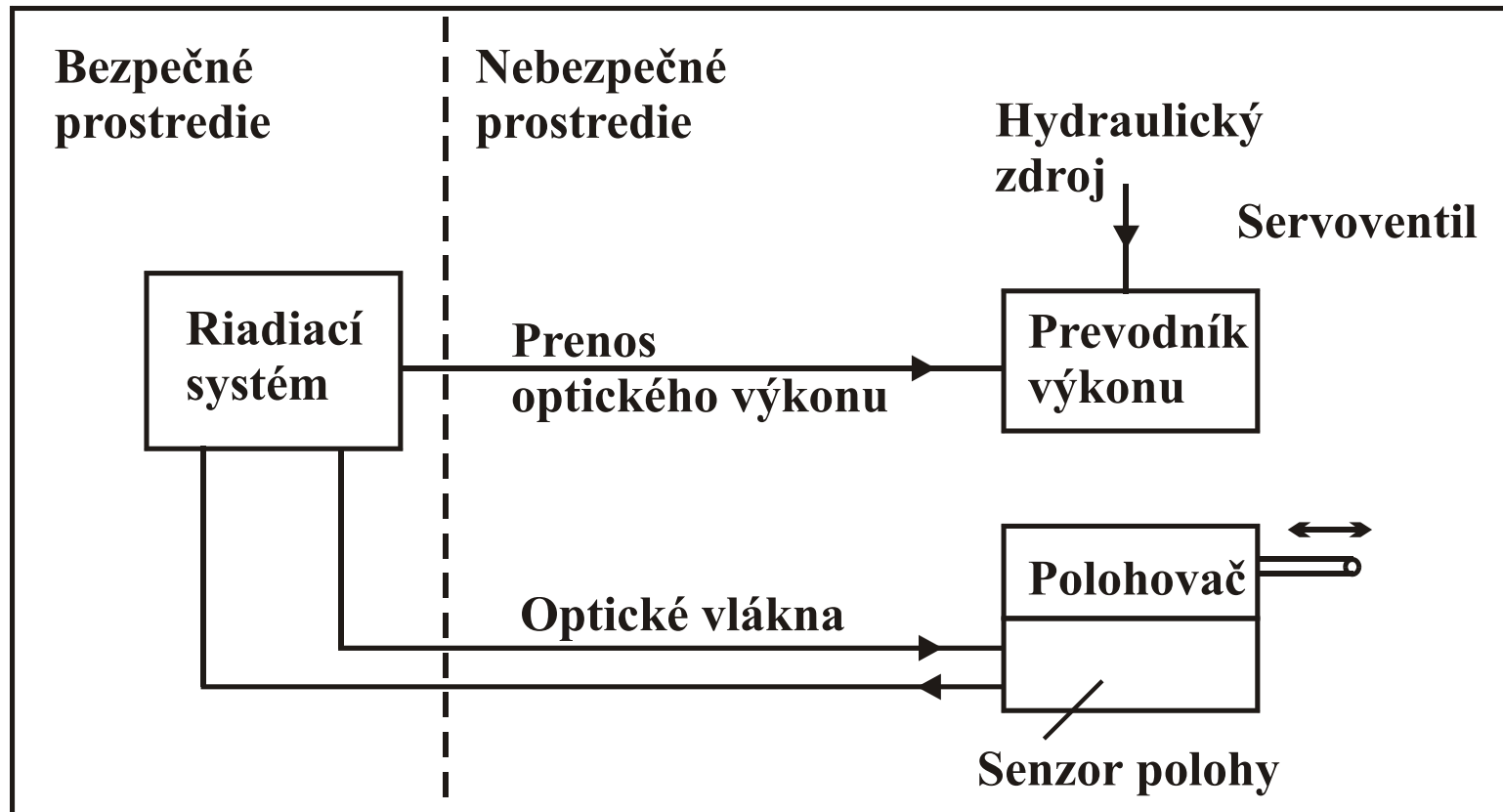
Obr. 5.72 Snímanie prítomnosti, polohy, rozloženia a stability plameňa pomocou systému OVS.



Obr. 5.73 Spektrometria plynov s využitím optických vlákien.

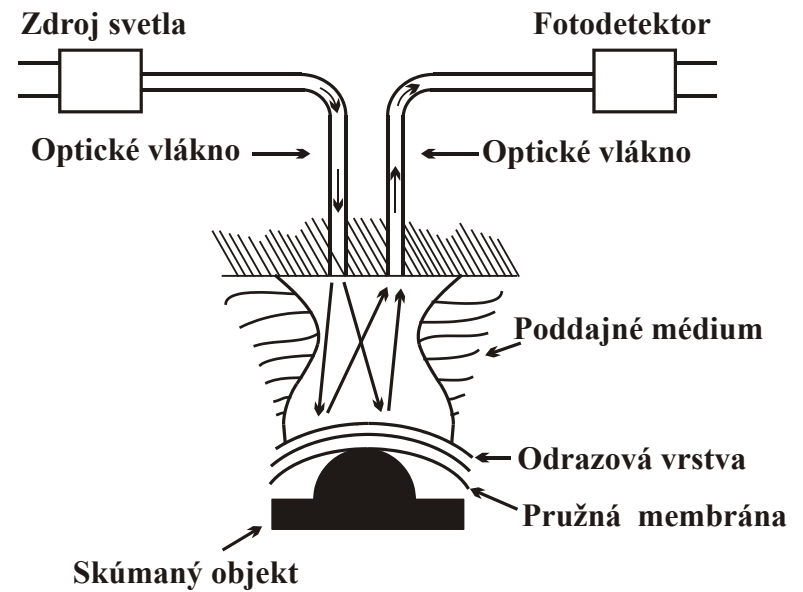


Obr. 5.75 a) Odrazný kódovací kotúč, b) transmisný kódovací kotúč.

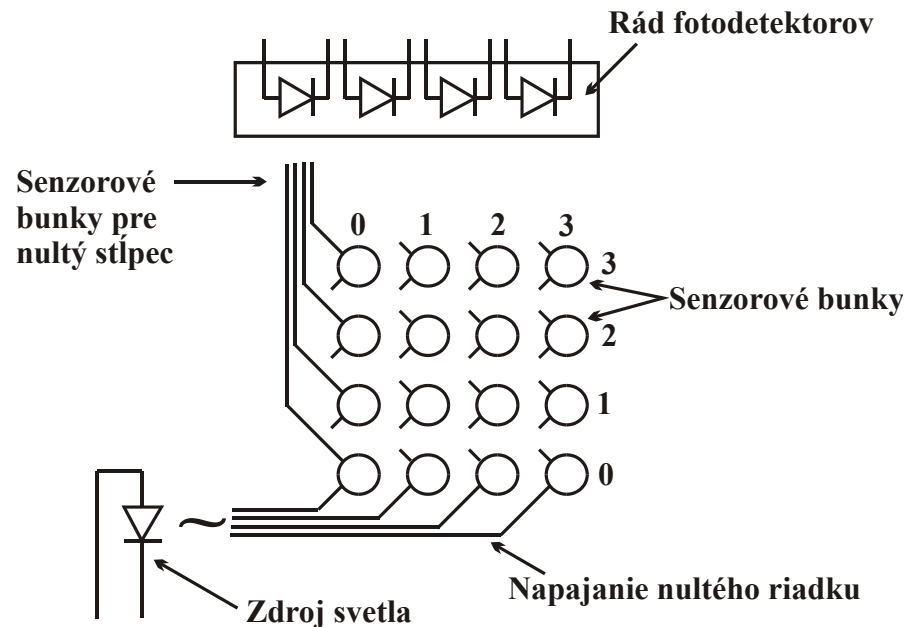


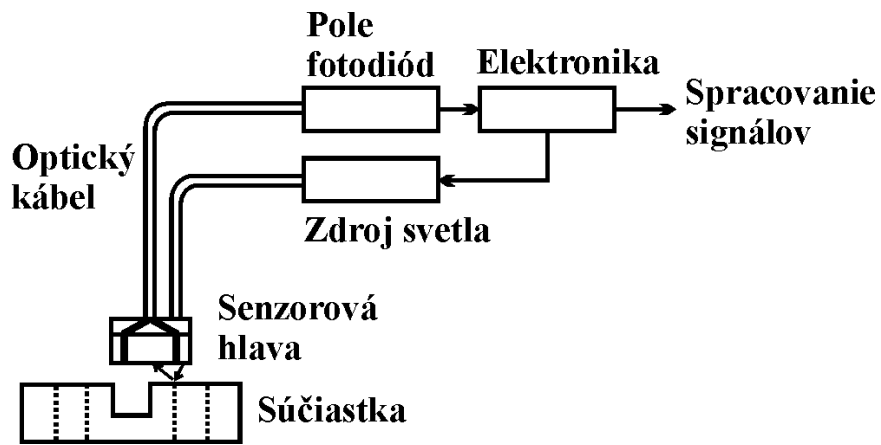
Obr. 5.76 Úplné optické riadenie servoventilu.

Fotonika

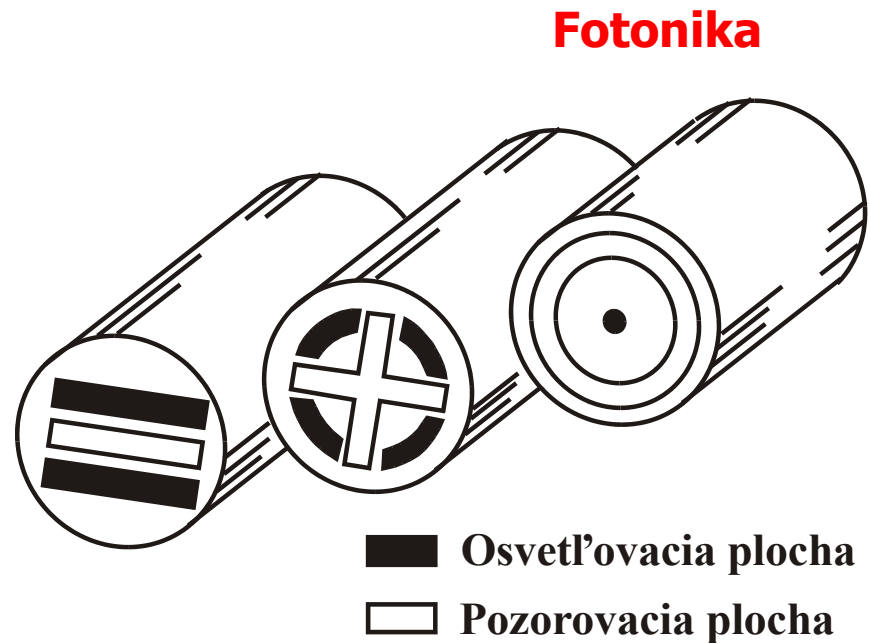


Obr. 5.77 Maticový vláknový taktilný senzor.

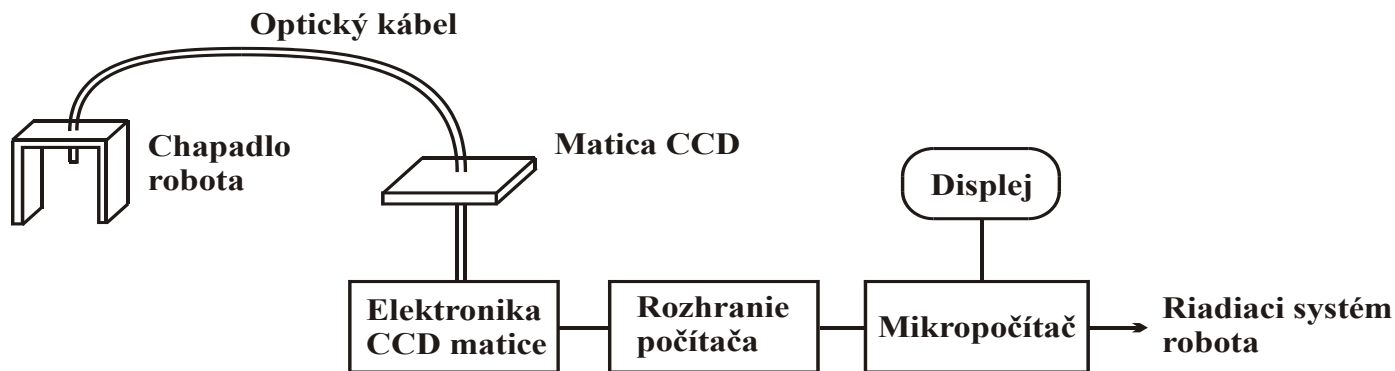




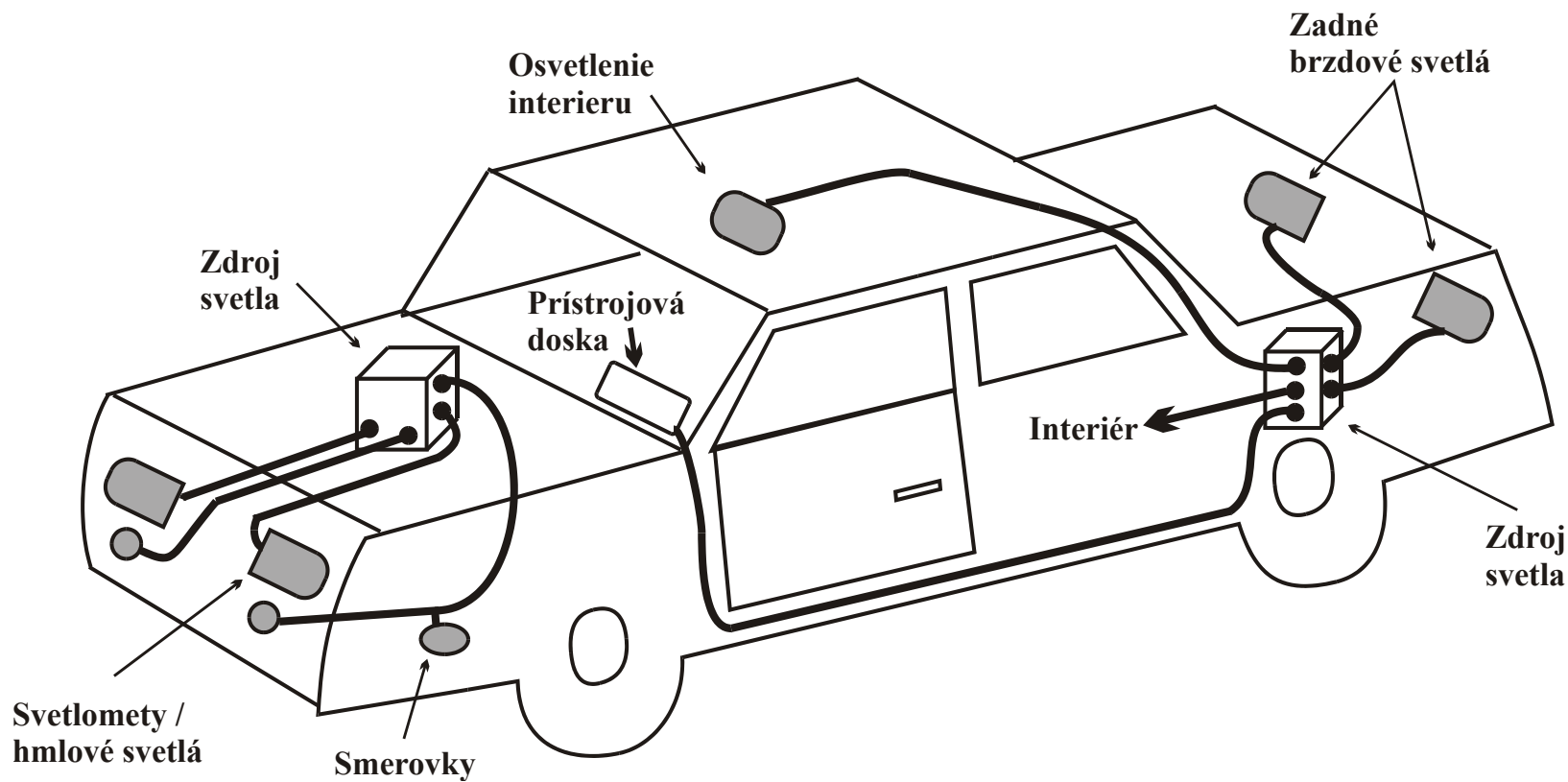
Obr. 5.78 Bloková schéma obrazového senzora s využitím optických vlákien.



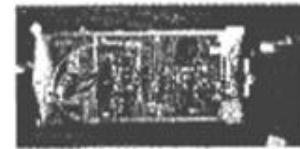
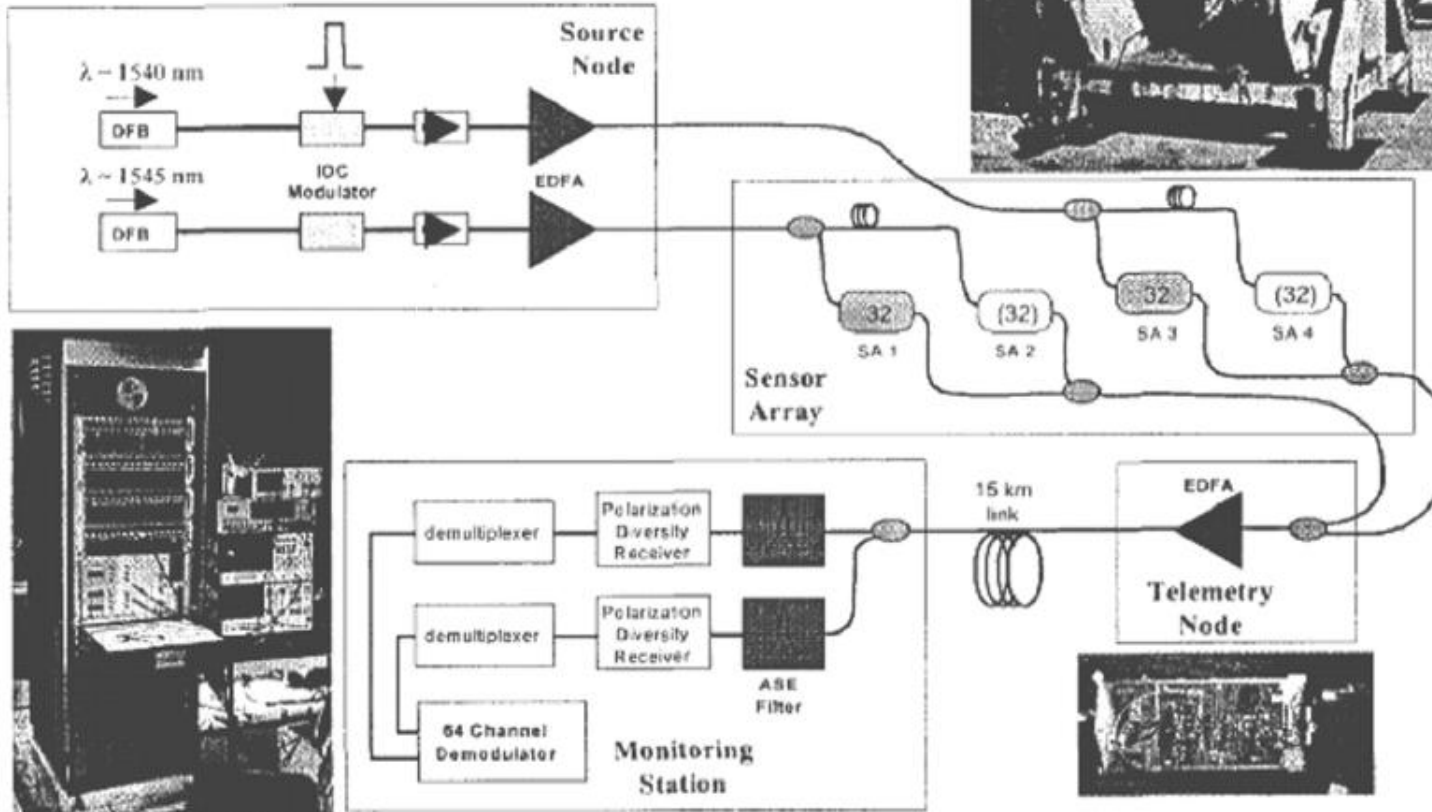
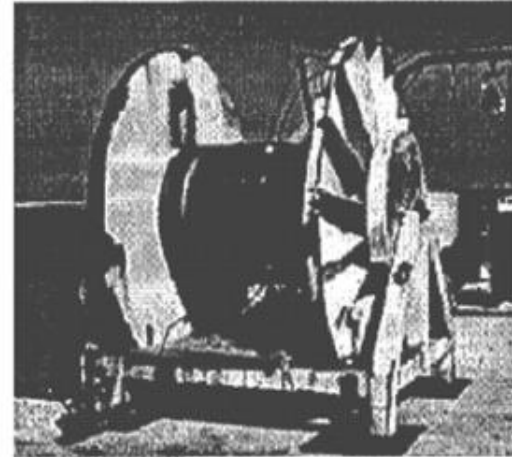
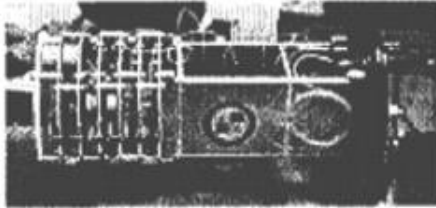
Obr. 5.79 Konštrukcia obrazovej sensorovej hlavy.



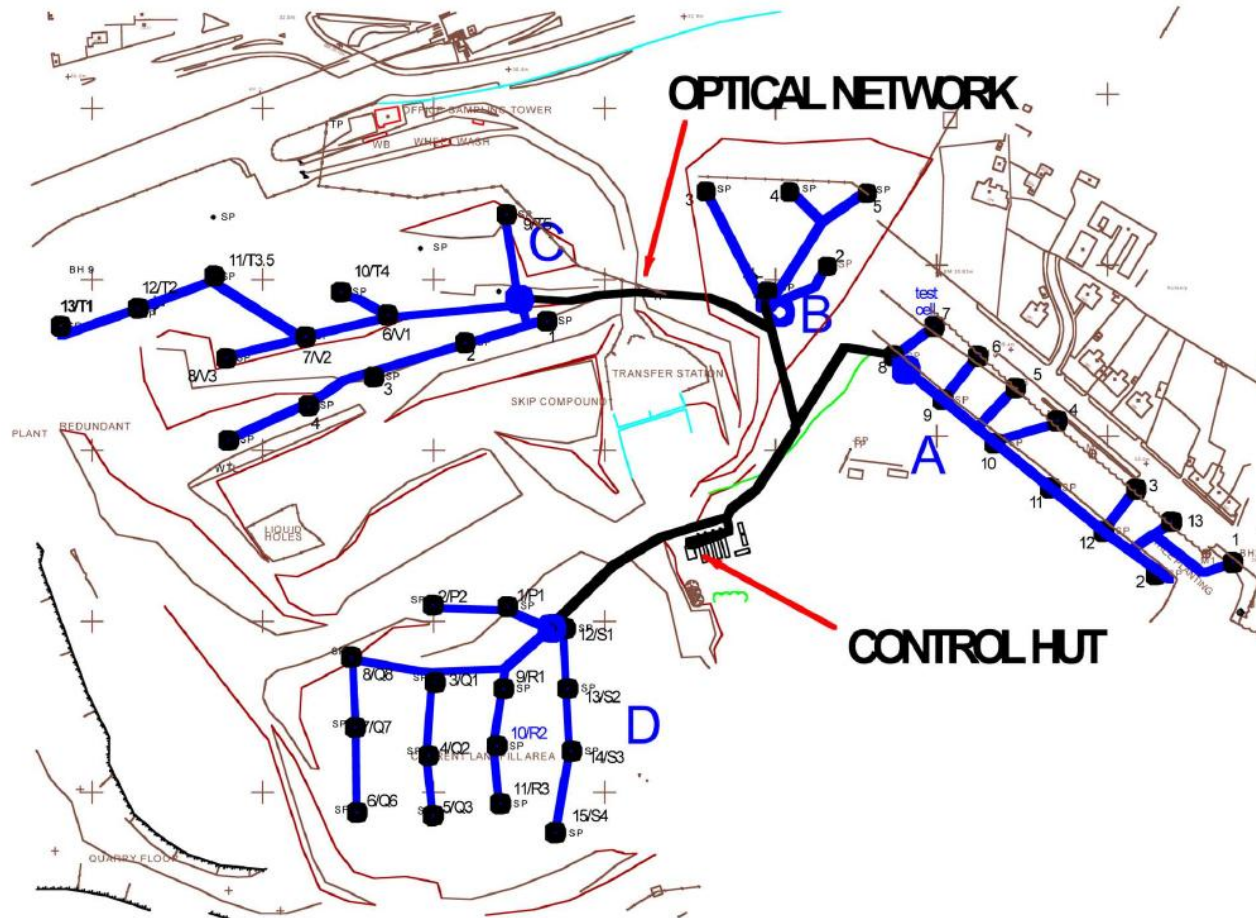
Obr. 5.80 Bloková schéma vizuálneho systému robota.



Obr. 5.81 Optické vláknové osvetľovacie systémy automobilu.



Optical interferometric array-based on WDN and TDM.



Partial map of a trial landfill site with installed multiplexed 60-point TDLS methane concentration monitoring system responding from <math>< 100\text{ ppm}</math> to 100% methane gas concentration by volume.

