

8.5 Optické vláknové senzory teploty

Optické vláknové senzory (dále OVS) vznikly využitím nežádoucích vlivů okolního prostředí na parametry optických sdělovacích kabelů. Základ OVS teploty je ve využití vlivu teploty na vlastnosti optických vláken. Měřená teplota moduluje optický signál, který je vysílán do optického vlákna zdrojem záření (polovodičové elektroluminiscenční diody LED nebo polovodičový laser) a detekován polovodičovou diodou typu PN, PIN nebo lavinového typu).

Optické vlákno používané pro OVS se skládá z válcového jádra s indexem lomu n_j a obalu s indexem lomu n_p dle obr. 8.5. Paprsek prochází jádrem tehdy, pokud dochází na rozhraní jádra a pláště k totálnímu odrazu, tj. pokud index lomu jádra je alespoň o 1 % větší než index lomu pláště. Neboli je nutné splnit podmínku

$$\frac{n_p}{n_j} < 1 \quad (8.11)$$

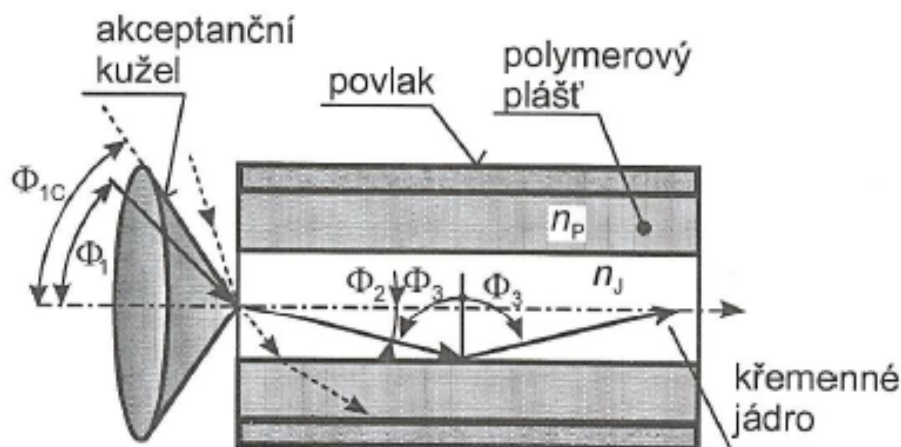
Ze Snellova zákona pro kritický úhel Φ_{3C} platí

$$\sin \Phi_{3C} = \frac{n_p}{n_j}. \quad (8.12)$$

Za předpokladu, že index lomu vzduchu $n_v = 1$, lze odvodit z rovnice (8.12) a obr. 8.5 pro kritický úhel Φ_{1C} vztah

$$NA = \sin \Phi_{1C} = n_j \sin \Phi_{2C} = n_j \sin \Phi_{3C} = \sqrt{n_j^2 - n_p^2}, \quad (8.13)$$

kde NA je číselná (numerická) apertura vlákna, která určuje úhel, pod kterým je vlno-



Obr. 8.5 Dvouvrstvý optický vláknový vlnovod

vod schopen přijímat zářivý tok a na výstupní straně vyzařovat tok. Typická hodnota apertury je $NA = 0,15-0,5$.

OVS teploty lze dle způsobu modulace rozdělit na senzory s modulací:

- amplitudovou, která je založena na změně útlumu optické vlny nebo na proměnné odrazivosti vlivem změny indexu lomu ve vlákne (tzv. refraktometrické OVS), na proměnné emisivitě ukončení vlákna, na proměnné kvantové účinnosti detektorů záření,
- fázovou, která je založena na změně fáze optické vlny postupující snímací částí optického vlákna; pro vyhodnocení se používají interferenční metody s referenčním vláknem,
- polarizační, která je založena na teplotní závislosti stáčení roviny polarizace světla,
- rozložení vlnové délky (spektrální), které jsou založené na změně vlnové délky světla, spektrálního rozdělení vlnových délek (posunu spektrálních složek) světla nebo barvy světla ve vlákne nebo posunem absorpční hrany polovodičů (hraniční energie absorbovaných fotonů); pro vyhodnocování se používají spektrometry.

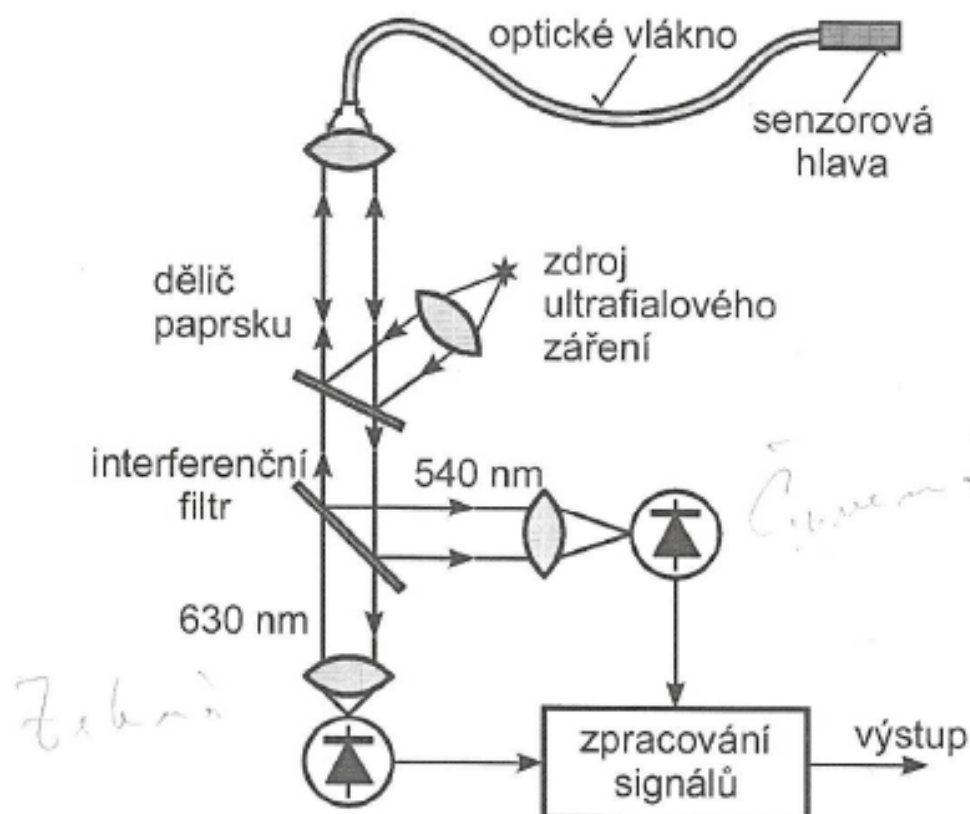
Dle konstrukce lze OVS teploty rozdělit na:

- vlastní, u nichž teplota působí přímo na přenosové vlastnosti vlákna (útlum, polarizace, fáze, index lomu apod.) nebo u nichž transformace teploty na optický signál nastává přímo ve vláknu (např. termoluminiscence),
- nevlastní, u nichž optické vlákno slouží jen k přenosu světla a modulace světla vlivem teploty je provedena mimo vlákno.

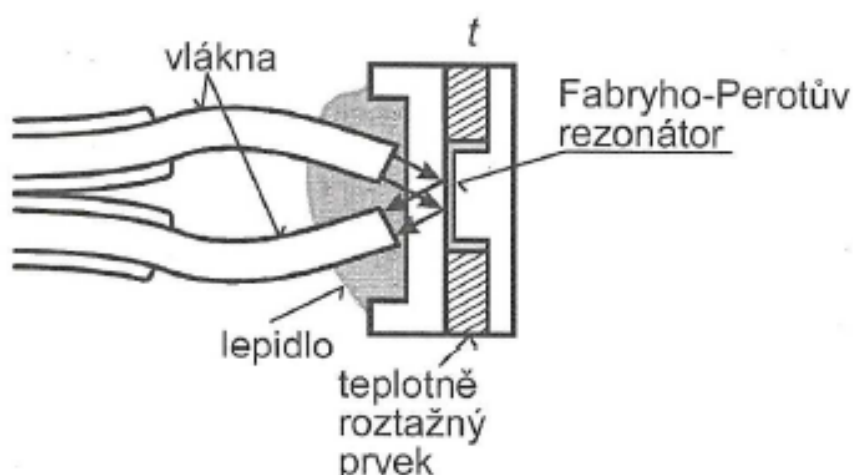
Dále se OVS teploty člení na lokální (snímání teploty v jednom místě) a distribuované (tj. rozprostřené), které vyhodnocují teplotu po celé délce měřicího úseku vlákna. Další dělení OVS je na transmisní (přenosové) s odděleným vstupním a výstupním vláknem a reflexní (odrazové), u nichž se optický signál po modulaci a odrazu šíří stejným optickým vláknem.

Vzhledem k velkému množství publikovaných OVS teploty budou dále uvedeny jen tři principy.

Na obr. 8.6 je zobrazen princip OVS s využitím teplotních změn fluorescence. Jedná se o transmisní, lokální a nevlastní OVS s modulací vlnové délky. Fosforová vrstva v senzorové hlavě je excitována (proces přechodu na vyšší energetickou hladinu) ultrafialovým zářením. Při deexcitaci dochází k fluorescence čidla a zpětný optický paprsek je v interferenčním filtru rozdělen na červenou a zelenou složku. Vyhodnocením pomě-



Obr. 8.6 Optický vláknový fluorescenční teploměr



Obr. 8.7 OVS s Fabryho-Perotovým rezonátorem

ru intenzit světelných paprsků je jednoznačně definována teplota senzorové hlavy. Rozsah měřené teploty je od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s nejistotou měření $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na obr. 8.7 je zobrazen OVS teploty s Fabryho-Perotovým rezonátorem. Jedná se o transmisní, lokální a nevlastní OVS s modulací vlnové délky. Čidlo teploty využívá teplotní deformaci Fabryho-Perotova rezonátoru, který se v této aplikaci chová jako teplotně závislý filtr. Světlo ze širokospektrálního zdroje se vstupním optickým vláknem přivádí do rezonátoru. Vystupující monochromatické světlo se optickým vláknem přivádí do spektrometru tvořeného hranolem a systémem CCD fotodetektorů, z jejichž signálů se teplota vyhodnocuje mikroprocesorem. Rozsah měřené teploty je od 0 do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ s nejistotou měření $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

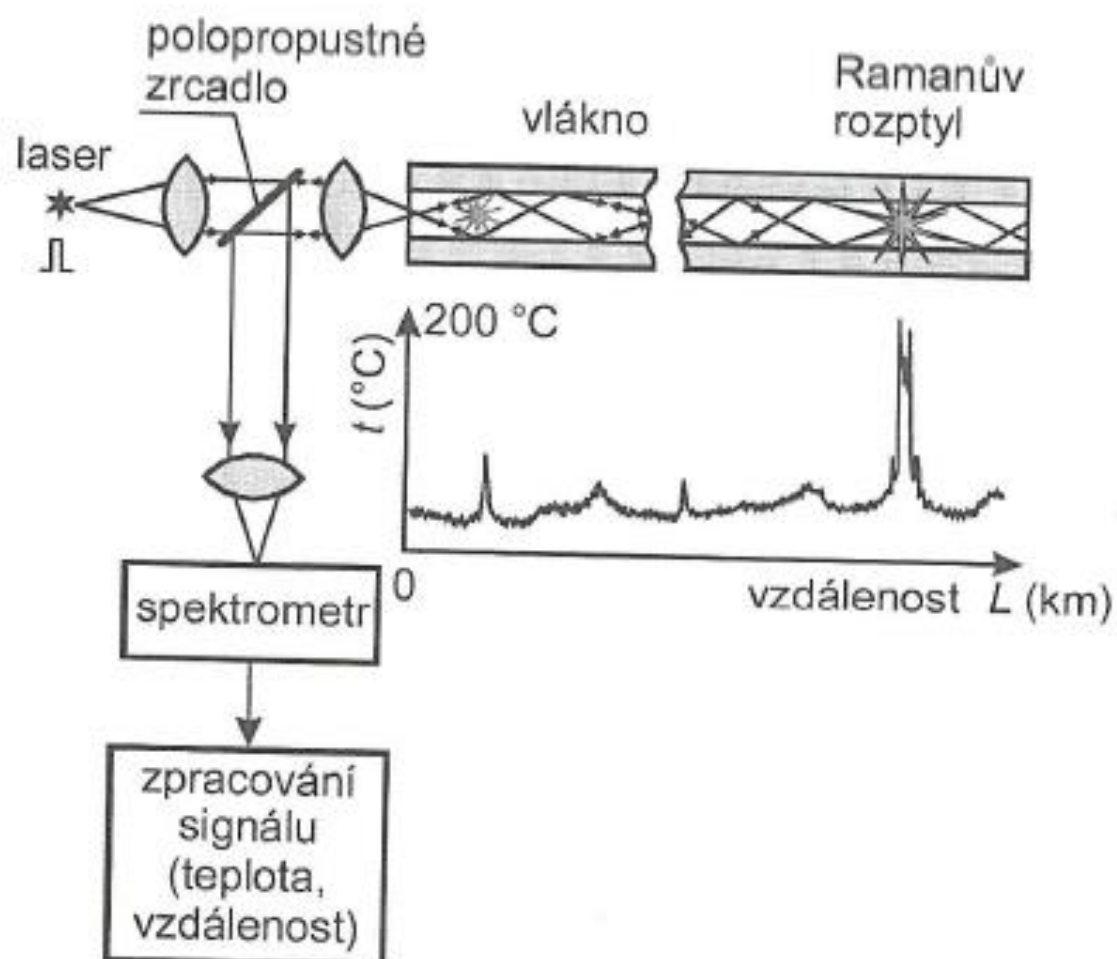
Na obr. 8.8 je princip distribuovaného (rozprostřeného) Ramanova OVS teploty. Jedná se o refraktometrický a vlastní typ OVS teploty. Ramanův OVS teploty je založený na stimulovaném Ramanově rozptylu vznikajícím při šíření optických impulsů vláknem. Ramanův rozptyl je spontánní rozptyl optického záření na atomech nebo molekulách, při kterém je kruhová frekvence rozptýleného záření (šířící se oběma směry ve vlákně) posunutá vůči frekvenci dopadajícího záření ω o hodnotu ω_v , která odpovídá některému z kvantových přechodů částice. Ramanův rozptyl se skládá ze dvou složek a to ze Stokesovy složky $\omega_s = \omega - \omega_v$ a z anti-Stokesovy složky $\omega_a = \omega + \omega_v$. Pro poměr intenzit záření Ramanových složek platí

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)^4 e^{\frac{\hbar\omega c}{kT}}, \quad (8.14)$$

kde

- λ_s, λ_a jsou vlnové délky složek Ramanova rozptylu,
- $\hbar$ je modifikovaná Planckova konstanta,
- c rychlost světla,
- k Boltzmannova konstanta,
- T měřená teplota (K).

Ze vztahu (8.14) vyplývá, že lze stanovit teplotu rozptýleného záření v optickém vlákně nezávisle na intenzitě dopadajícího světla, geometrii a materiálu vlákna a na navázání světelného pulsu do vlákna. V homogenním vlákně klesá intenzita Ramanova rozptýleného záření dle exponenciálního vztahu, takže ze známé rychlosti světla lze číslíkovým zpracováním signálu lokalizovat vzdálenost L od začátku vlákna. Přesnost měření lze zvýšit uspořádáním vlákna do smyčky a vyhodnocováním zářivého toku na obou koncích při přepínání laserového zdroje. Délková rozlišitelnost OVS teploty je od 1 m do 8 m dle délky vlnovodu až do 30 km. Teplotní rozsah je od $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ při teplotním rozlišení od $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dle doby integrace měření signálu až do 10 min.



Obr. 8.8 Distribuovaný Ramanův OVS teploty