

12. APLICAȚII ALE OPTICII INTEGRATE

12.1. Aplicații în telecomunicațiile optice

12.1.1. Sistemul de comunicații optice

Scopul oricărui *canal de comunicații* este de a transmite informații pe o anumită distanță. Performanțele canalului de comunicații sunt determinate atât de distanța la care se pot transmite informațiile fără repeteri intermediari, cât și de cantitatea de informații transmisă și de lipsa erorilor. Aceste caracteristici sunt determinate de natura informației și de modul în care aceasta este cuantificată [12.1]-[12.10]. Schema bloc generală a unui canal de comunicații optice este identică ca formă cu cea din sistemul de comunicații radio și este prezentată în figura 12. 1.

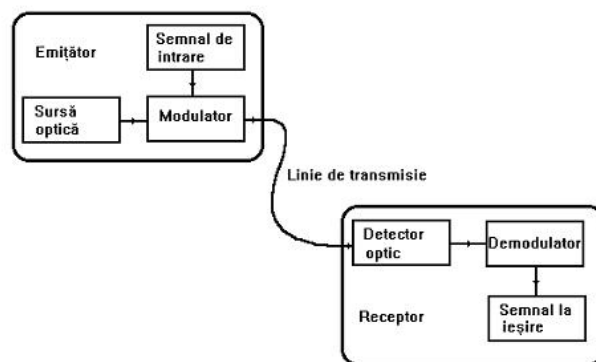


Fig. 12. 1. Schema bloc a unui canal de comunicații optice.

Diferența constă în faptul că frecvența purtătoarei optice este cu câteva ordine de mărime mai mare decât cea utilizată în sistemul de comunicații prin unde radio sau microunde.

În cazul general informația implică existența unor parametri fizici care variază continuu în timp și pot lua orice valoare într-un anumit domeniu (de exemplu, presiunea undelor sonore care caracterizează vorbirea sau intensitatea luminoasă a unei imagini optice). Traductoarele convertesc informația într-un semnal electric care variază continuu, semnalul numindu-se în acest caz *analog* (de exemplu, microfoanele sau camerele TV).

12.1.2. Codificarea semnalelor

Există însă și semnale discrete, ca de exemplu literele unei pagini, care sunt entități individuale și pot fi transmise ca entități discrete la anumite momente discrete de timp.

De asemenea, informația se poate prezenta și sub formă discretă care să varieze continuu în timp sau eșantionată într-un anumit domeniu de valori, dar numai la anumite momente discrete de timp (fig. 12. 2).

În oricare dintre aceste patru cazuri informația poate fi cuantificată într-o secvență de *semnale digitale binare discrete (biți)* care să o caracterizeze în întregime. Numărul de biți necesari pentru a caracteriza informația în forma ei originală este o măsură a cantității de informație care se vehiculează.

Pe baza *teoremei de eșantionare* trebuie ca frecvența ($f_s = 1/T$) să fie de două ori mai mare decât cea corespunzătoare semnalului fundamental, f_m . Pentru a fi îndeplinită această condiție, dedusă pentru prima dată de Nyquist, semnalul fundamental trebuie filtrat cu un filtru trece jos care lasă să treacă numai frecvențele mai mici decât f_m . Domeniul de frecvențe cuprins între 0 și f_m reprezintă banda de frecvență a semnalului, Δf . În acest caz $\Delta f = f_m$, iar $f_s > 2\Delta f = 2f_m$.

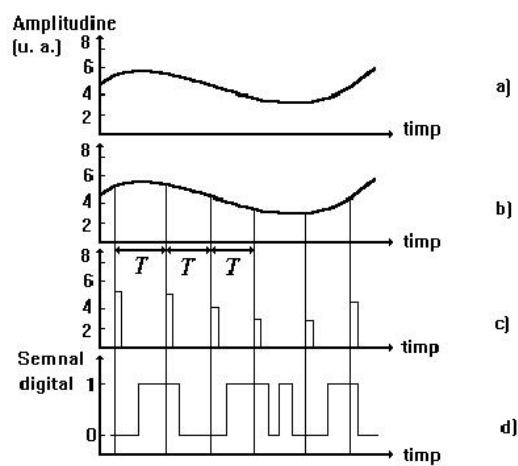


Fig. 12. 2. Etapele convertirii unui semnal analog într-un semnal digital binar:

- a) semnal analog; b) semnal analog eșantionat la intervale de timp, T ;
- c) eșantionare cu alocarea amplitudinii; d) informație eșantionată sub formă digitală binară.

În practică, semnalele prezintă fluctuații aleatorii care constituie zgomotul. Raportul dintre amplitudinea maximă a semnalului (A_S) și rădăcina pătrată a amplitudinii care prezintă zgomot (A_N) determină numărul de niveluri, m , necesare pentru a da o reprezentare precisă a semnalului fundamental (fig. 12. 2 a). Pe baza teoremei de eșantionare, pentru ca un semnal să poată fi codificat în *sistemul digital binar*, trebuie ca fiecare valoare eșantionată (fig. 12. 2 c), d):

$$N = \log_2 m . \quad (12.1)$$

În cazul decodificării unui semnal digital binar pentru a-l reproduce pe cel original, erorile produse de cuantificarea amplitudinilor eșantionate generează un zgomot suplimentar numit zgomot de cuantificare care este comparabil sau mai mic decât zgomotul original. Pentru a reprezenta semnalul original care este caracterizat de o bandă având lărgimea Δf (Hz) și un domeniu dinamic A_S / A_N este necesar un număr minim de biți binari, B pe secundă [b/s]:

$$B = 2\Delta f \log_2 \left[1 + (A_S / A_N)^2 \right]^{1/2} = \Delta f \log_2 \left[1 + (A_S / A_N)^2 \right]. \quad (12.2)$$

Deci, un canal de comunicație care poate transmite un semnal având o bandă de lărgime Δf și un raport dintre maximul semnalului și rădăcina pătrată a zgomotului la receptor A_S / A_N are o capacitate B [b/s], dată de relația (12.2) (formula Shannon).

În practică A_S / A_N este mult mai mare decât unitatea și se măsoară în dB. Considerând că valoarea raportului A_S / A_N exprimată în [dB] este X :

$$X[\text{dB}] = 20 \log_{10} (A_S / A_N) \quad (12.3)$$

atunci

$$B[\text{b/s}] = 0,332 X[\text{dB}] \Delta f[\text{Hz}] \quad (12.4)$$

De exemplu, în cazul sistemului de televiziune PAL caracterizat de 625 linii semnalul video ocupă un domeniu de frecvență de 5,5 MHz. Pentru a avea o calitate bună a imaginii trebuie ca raportul dintre amplitudinea semnalului și rădăcina pătrată a zgomotului să fie de 60 dB. Pe baza relației (12.4) rata informației este de 110 MB/s, iar un film de 120 minute conține 790 Gbit.

12.1.3. Structura sistemului de comunicații optice

Componentele de bază ale unui sistem de comunicații optice (fig. 12. 1) sunt următoarele:

- sursa optică,
- dispozitivul pentru modularea semnalului optic la ieșirea din sursă cu semnalul care trebuie transmis,
- mediul de transmisie,
- fotodetectorul care transformă semnalul optic în semnal electric,
- dispozitivele electronice pentru amplificarea și procesarea semnalelor în vederea obținerii semnalului transmis.

În cazul utilizării ca mediu de transmisie a fibrelor optice numai laserele și diodele semiconductoare luminescente (LED-urile), ca surse optice, sunt compatibile cu acest sistem și fotodiodele semiconductoare ca detectoare.

Există mai multe combinații posibile ale surselor și respectiv ale detectoarelor care sunt compatibile cu sistemul optic de transmisie a informației prin fibre optice.

Lărgimea benzii semnalului transmis este determinată de:

- viteza la care sursa poate fi modulată,
- modulatorul însuși,
- mediul de transmisie,
- detector,
- componentele receptorului.

În practică LED-urile pot fi modulate fără dificultăți până la frecvențe de ordinul 100 MHz, iar laserele până la 1 GHz.

Semiconductoarele p-i-n și diodele în avalanșă prezintă răspuns la semnale modulate în frecvență de aproximativ 10 GHz.

Una dintre aplicațiile practice cele mai răspândite ale fibrelor optice care a revoluționat domeniul telecomunicațiilor este legată de utilizarea acestora la transmisia optică a informației. Această revoluție a fost acompaniată și de dezvoltarea Internetului care în ultimul timp are un număr foarte mare de utilizatori [12.1]-[12.5].

Întrucât fibrele optice acționează ca medii dispersive acestea sunt caracterizate mai bine de produsul dintre lărgimea benzii și distanță cuprins între 10 MHz.km și 100 GHz.km și depinzând de tipul fibrei și de caracteristicile sursei folosite. Coeficientul de absorbție în cazul fibrelor optice cu pierderi scăzute este de aproximativ 0,2 dB/km. Până recent, metoda clasică de compensare pentru pierderile de-a lungul liniei de transmisie a implicat folosirea repetitorilor. *Repetorul* este un dispozitiv bazat pe tehnologia hibridă ce include ambele componente, electronică și optică. Acesta detectează semnalul luminos, egalează unda sau emite un puls electronic și apoi regenerează semnalul optic modulat care este ulterior reinjectat în fibră. Capacitatea rețelei sau lungimea liniei de transmisie care utilizează acest tip de repetor este limitat de caracteristicile componentelor electronice. Începând cu ultimul deceniu, repetorii pierd teren în fața fibrelor optice amplificatoare, mult mai rentabile decât aceștia.

De asemenea, în aceeași perioadă de timp, sistemele clasice de comunicații s-au dovedit a fi învechite pentru transmisia la distanță, continuând totuși, să fie folosite în rețelele locale de telecomunicații.

Aceste sisteme au fost înlocuite cu cele din generația a II-a ce utilizează fibră monomod și surse având lungimile de undă cuprinse între 1300 și 1500 nm, care asigură capacitate mai mare de transmisie și mai puțini repetori. Sistemele cu fibră monomod au început să joace un rol primordial în comunicațiile pe uscat sau submarine, așa cum se poate observa și în figura 12. 3.



Fig. 12. 3. Rețea transoceanică de cabluri optice.

În tabelul 12. 1 sunt prezentate prin comparație câteva dintre avantajele și dezavantajele sistemelor de comunicații optice [12.6]-[12.10].

12.1.4. Amplificatoare pentru transmisii optice terestre

Rețeaua de comunicații terestre este bazată pe tehnologia amplificatoarelor optice din fibrele optice dopate cu ioni de Er^{3+} care a fost utilizată prima dată în

cazul transmisiilor submarine. Deși există mai multe tipuri de operare, cel mai des se utilizează pentru transmisia terestră ultradensă de date multiplexarea prin divizarea lungimii de undă (*Wavelength-Division Multiplexing-WDM*), prezentată în capitolul 6 și în ultimul timp multiplexarea densă prin divizarea lungimii de undă (*Dense-Wavelength-Division Multiplexing-D-WDM*).

Tabelul 12. 1.

Avantaje	Dezavantaje
Atenuare și dispersie scăzute	Dificultăți de îmbinare a fibrelor
Repetori pentru distanțe > 100km și rată mare de transmisie (> 1Gb/s)	Susceptibilitatea fibrei de a reacționa cu H ₂ la imersia în apă a cablului
Flexibilitatea sistemului permite modernizări la prețuri scăzute	Sursele au eficiență relativ scăzută și de asemenea limitări de putere
Diametrul mic al canalului fibrei	Este susceptibilă la ionizări
Nu emite radiații, absența interferențe electromagnetice	Nelinearitățile laserelor și LED-urilor
Greutate scăzută, costuri de construcție scăzute	Fibrele nu pot fi direct cuplate pentru acces multiplu
Flexibilitate de bandă	Zgomot cuantic ridicat
Securitate ridicată pentru comunicațiile militare, comerciale	Nu sunt robuste din punct de vedere mecanic

12.1.5. Rețele de transport bazate pe multiplexarea lungimii de undă

Rețelele de transport bazate pe multiplexarea lungimii de undă sunt utilizate pentru transmisiile telefonice, fax, TV, și de date pe distanțe mari între centre de trafic importante, ca de exemplu: orașe, noduri de rețele etc. (fig. 12. 4).

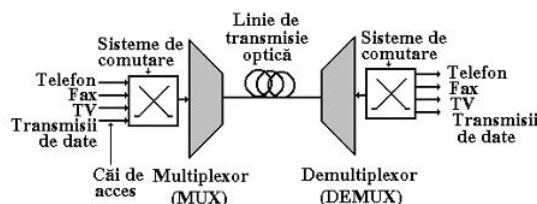


Fig. 12. 4. Schema bloc a unei rețele de transport bazată pe multiplexarea lungimii de undă.

Această rețea este conectată la *rețelele metropolitane* și la rețelele de acces de trafic regional sau local. Rețeaua de transmisie optică determină capacitatea maximă de transport dintre diferite țări. Pentru a obține o capacitate maximă de transport există mai multe soluții.

O *rețea de transport* conține legături importante care acoperă transportul informației între nodurile rețelei sau generatoare electrice între care pot exista distanțe de sute de km (300 km ÷ 500 km corespunzând distanțelor medii, iar 600 km ÷ 800 km corespunzând distanțelor lungi). Diferitele celule de date care

provin de la mai mulți utilizatori sunt conectate împreună pentru a forma un curent principal fluent de date. La început, pentru realizarea acestor rețele au fost utilizate regeneratoarele electrice al căror cost de fabricație era ridicat.

Odată cu creșterea traficului pe Internet a fost necesară transmiterea unui număr din ce în ce mai mare de celule. Întrucât de cele mai multe ori datele sunt transmise dintr-un punct și se recepționează într-un altul situat la sute sau mii de km față de primul este mai puțin costisitor dacă se utilizează rețele optice fără regeneratori electrici.

Cel mai des se utilizează pentru transmisia terestră ultradensă de date multiplexarea prin divizarea lungimii de undă (WDM) pentru a exploata din plin lărgimea mare a benzii care caracterizează fibrele optice monomodale fără a crește semnificativ viteza de transmisie. Pentru aceasta se utilizează componente specifice care transferă curentul de date la lungimi de undă potrivite astfel încât pierderile pe distanțe lungi sau dintre un număr mare de noduri să fie minime, care redirectionează curentul de date în funcție de configurația rețelei, care adaugă sau evită canale în interiorul rețelei și care selecționează canalul dorit.

În cazul când între două noduri nu este disponibilă decât o singură legătură prin fibra optică se efectuează o transmisie bidirecțională pe baza căreia se pot efectua transmisiile în două direcții.

O caracteristică importantă a unei rețele de amplificatoare cu fibră optică este *planitatea câștigului* care este determinată de *excursia câștigului* între canalele multiplexorului (WDM) și respectiv de *lărgimea spectrală a câștigului*.

Excursia câștigului între canalele multiplexorului este determinată de variația câștigului cu lungimea de undă într-o anumită bandă dată care în general este situată în jurul câștigului maxim. Prin minimizarea excursiei câștigului amplificatorul funcționează în *regim de câștig plat*. În cazul fibrelor optice amplificatoare dopate cu erbiu și fluor s-a obținut o valoare mică a excursiei câștigului într-un domeniu spectral de aproximativ 27 nm.

Lărgimea spectrală a câștigului corespunde lărgimii spectrale relativ la o anumită excursie spectrală dată. Lărgimea spectrală cea mai mare s-a obținut în cazul fibrelor optice amplificatoare fabricate din siliciu dopate cu erbiu și aluminiu sau telur având concentrație mare. Deși neuniformitățile câștigului și raportului semnal-zgomot sunt acceptabile și relativ simplu de corectat dacă semnalul de la multiplexor trece printr-o singură fibră amplificatoare dopată cu Er în cazul când semnalul trece prin mai multe amplificatoare legate în serie pot rezulta deteriorări dramatice ale acestuia datorită măririi pierderilor.

În cazul când se utilizează N amplificatoare (fig. 12. 5) raportul semnal-zgomot la ieșirea dintr-o rețea, SNR_N are valoarea cea mai mică pentru canalele caracterizate de puterea cea mai mică la intrarea în amplificator și este dat de relația [12.4], [12.5]:

$$SNR_N = \frac{P_s}{B_0 + \frac{P_{ASE}}{k\tilde{G}} \left(1 + \frac{1}{k} + \dots + \frac{1}{k^{N-1}} \right)} = \frac{P_s}{B_0 + \frac{P_{ASE}}{k\tilde{G}} \left(\frac{1 - \frac{1}{k^N}}{1 - \frac{1}{k}} \right)} \quad (12.5)$$

în care \tilde{G} este câștigul mediu al amplificatorului distribuit pe întregul spectru al semnalului având puterea într-un canal P_s , $k\tilde{G}$ este câștigul corespunzător unui canal ($k < 1$ în cazul canalelor cele mai puțin favorizate), P_{ASE} reprezintă puterea emisiei spontane amplificate, iar B_0 este puterea zgomotului semnalului la intrarea în canal în interiorul benzii considerate.

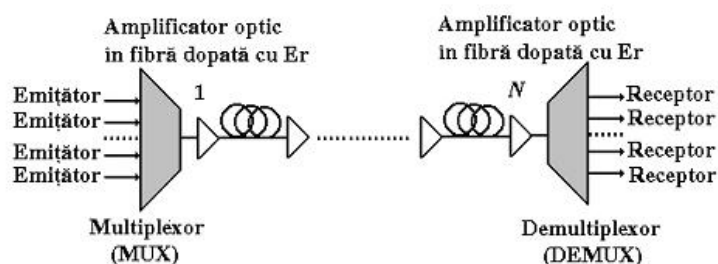


Fig. 12.5. Schema bloc a unui amplificator optic format din N amplificatoare.

În cazul când se utilizează N amplificatoare ideale care funcționează în regim de câștig plat având $k = 1$ pentru toate canalele raportul semnal-zgomot exprimat în dB corespunzător celei mai proaste situații este:

$$SNR_N^{dB} = P_s^{dB} - F_{dB} - 10 \log N - K \quad (12.6)$$

unde F reprezintă figura de zgomot, iar K este o constantă. Din relația (12.6) se observă că raportul semnal-zgomot este determinat de puterea semnalului la intrare și de figura de zgomot, fiind posibilă obținerea unor amplificatoare ideale cu câștig plat.

Dacă se utilizează amplificatoare ideale care nu funcționează în regim de câștig plat excursia câștigului limitează cel mai mult raportul semnal-zgomot, acesta fiind calculat cu ajutorul relației:

$$SNR_N^{\min} = \frac{P_s}{B_0 + Fh\nu B_f \left(\frac{10^{\Delta GN/20} - 1}{10^{\Delta G/20} - 1} \right)} \quad (12.7)$$

În relația (12.7) $P_{ASE} \cong Fh\nu k \bar{G} B_f$, $\Delta G / 2 = 10 \log [\bar{G} / (k\bar{G})] = -10 \log k$, k fiind corespunzător celei mai nefavorabile situații.

Din relația (12.7) se observă că pentru a îmbunătăți raportul semnal-zgomot la ieșirea dintr-o rețea trebuie crescută puterea semnalului la intrarea în amplificator, aceasta fiind limitată de efectele neliniare care se pot manifesta în sistem. Puterea zgomotului semnalului la intrarea în amplificator, B_0 depinde de tipul de multiplexori utilizați. În cazul când se utilizează ca surse laserele cu cavități externe se obține un raport semnal-zgomot de 60 dB, însă din motive economice, dar și pentru stabilizarea lungimii de undă se utilizează lasere cu reacție distribuită obținându-se un raport semnal-zgomot de 40 dB.

Dacă laserele sunt cuplate împreună în rețeaua de fibre utilizând un cuplor pasiv zgomotul cu bandă largă se adună pentru fiecare înrăutățind raportul semnal-zgomot. Deși sunt mai scumpi, se pot utiliza și multiplexori fabricați în ghiduri optice de undă cu distribuție intercalată (de tip pieptene), în acest caz cuplându-se semnalele cu diferite lungimi de undă având lărgimi spectrale înguste corespunzătoare fiecărui canal. În acest caz relația (12.7) devine:

$$SNR_N^{\min} = \frac{P_s}{Fh\nu B_f} \left(\frac{10^{\Delta G N/20} - 1}{10^{\Delta G/20} - 1} \right). \quad (12.8)$$

unde puterea zgomotului la intrare, B_0 a fost neglijată.

Dacă se utilizează un lanț de amplificatoare legate în serie având o excursie a câștigului semnificativă relația (12.8) se scrie sub forma:

$$SNR_{N,\text{dB}}^{\min} = P_s^{\text{dBm}} - F_{\text{dB}} - 10 \log(10^3 h\nu B_f) - N \frac{\Delta G}{2} + 10 \log(10^{\Delta G/20} - 1). \quad (12.9)$$

sau în cazul aproximativ:

$$SNR_{N,\text{dB}}^{\min} \cong SNR_{1,\text{dB}}^{\min} P_s^{\text{dBm}} - N \frac{\Delta G}{2} + 10 \log(10^{\Delta G/20} - 1). \quad (12.10)$$

12.1.6. Caracterizarea amplificatoarelor bazate pe multiplexarea lungimii de undă

Unul dintre cei mai importanți parametri care caracterizează amplificatoarele bazate pe multiplexarea lungimii de undă (WDM) este câștigul. Spectrul câștigului poate fi măsurat exact în cazul unor semnale având putere mare la intrare (≥ 10 dBm) cu ajutorul montajului experimental prezentat în figura 12.6.

Ca sursă de bandă largă (*albă*) se poate utiliza un amplificator optic într-o fibră dopată cu erbiu (EDFA) în care este amplificată emisia spontană (ASE) care prezintă un câștig egalizat. Semnalul la ieșire este înregistrat cu ajutorul unui analizor optic de spectru.

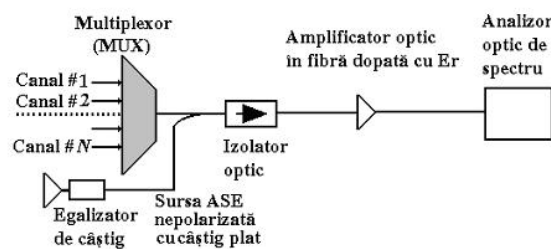


Fig. 12.6. Montajul experimental utilizat pentru măsurarea câștigului unui amplificator optic de tip WDM.

În figura 12.7 sunt prezentate profilurile câștigurilor într-o fibră amplificatoare dopată cu erbiu ținând seama de inversia de populație. Curbele câștigurilor nu se intersectează unele cu altele; deci dacă câștigul crește pentru o anumită lungime de undă (datorită inversiei de populație mare) acesta va crește pentru toate celelalte lungimi de undă.

Nu este posibilă suprimarea unui maxim de câștig scăzând inversia de populație în timp ce se menține același nivel de câștig la lungimile de undă din spectrul rămas. Ca urmare, nu există o inversie de populație corespunzătoare unui câștig plat într-un domeniu cu câștig mare (1530 nm ÷ 1560 nm). De asemenea, în cazul unei inversii de populație constantă câștigul este invariant cu încărcarea canalului, adică este independent de numărul de canale și poziția acestora din punctul de vedere al lungimii de undă.

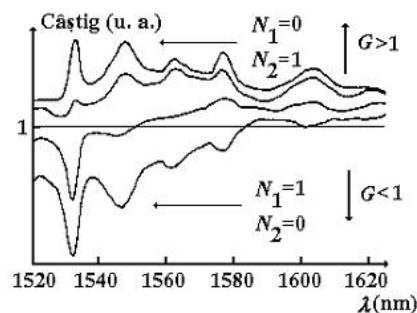


Fig. 12. 7. Profilurile câștigurilor într-o fibră amplificatoare dopată cu erbiu la diferite valori ale inversiei de populație.

Pentru a crește capacitatea de transport în rețelele de tip *WDM* este necesară utilizarea de noi benzi în afara celei (C) din intervalul 1530 nm ÷ 1560 nm. Deci, amplificarea semnalului trebuie să compenseze atenuarea introdusă de fibra optică (fig. 12. 8) și pierderile modulelor amplificatoarelor. Această operație este posibilă utilizând amplificarea distribuită Raman pe distanțe mari.

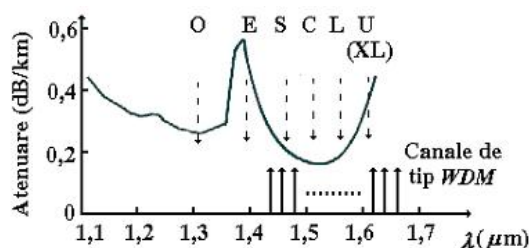


Fig. 12. 8. Spectrul atenuării unei fibre fabricate din siliciu.

Cele mai cunoscute benzi sunt următoarele: banda O, numită și *originală* (1260 nm ÷ 1360 nm), banda E, *extinsă* (1360 nm ÷ 1460 nm), banda S, *a lungimilor de undă scurte* (1460 nm ÷ 1530 nm), banda C, *convențională*, (1530 nm ÷ 1565 nm), banda L, *a lungimilor de undă lungi*, (1565 nm ÷ 1625 nm) și banda U sau XL, *a lungimilor de undă lungi*, (1625 nm ÷ 1675 nm). În ultimii ani amplificarea Raman pe distanțe lungi cu viteze de transmisie mari și foarte mari (mai mult de 160 Gbit/s) pe mai multe canale a fost pusă în evidență experimental, sistemele terestre operând deja în benzile C și L [12.4], [12.6].

Pentru a îmbunătăți eficiența pompajului și a obține puteri mari la ieșire în cazul când se utilizează pentru pompaj radiația cu $\lambda = 1,48 \mu\text{m}$ există mai multe variante, una dintre cele mai cunoscute bazându-se pe dopajul unei fibre optice cu ioni de $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$, ionii de Yb^{3+} având o secțiune de absorbție mare în domeniul IR apropiat al spectrului fiind implantați la exteriorul miezului fibrei. În urma excitării ionilor de Yb^{3+} aceștia transferă eficient energia ionilor de Er^{3+} , rezultând astfel o amplificare puternică a semnalului cu $\lambda = 1,53 \mu\text{m}$ (fig. 12. 9).

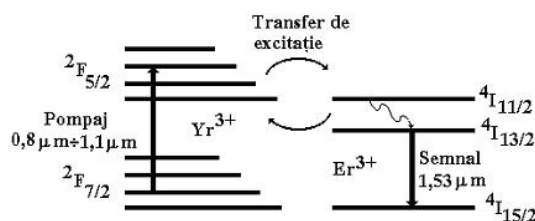


Fig. 12. 9. Diagrama energetică parțială a sistemului $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$.

Utilizând și alți ioni ai pământurilor rare ca elemente active s-au obținut și alte benzi (ferestre) de transmisie. Astfel, în cazul utilizării tului s-au obținut ferestre de comunicații în jurul lungimilor de undă de 800 nm și 1350 nm (în fibre optice de tip ZBLAN).

De asemenea, în ultimii ani s-au fabricat fibre optice amplificatoare dopate cu Pr pentru domeniul 1610 nm ÷ 1650 nm și respectiv cu sistemul Tm-Tb în banda XL, care în general sunt pompate de diode laser.

12.1.7. Rețele metropolitane

Rețele de transmisie metropolitane privesc transmisia de date pe distanțe scurte (100 km ÷ 300 km) care pot să lege: diferite rețele, centre de afaceri importante, mari orașe apropiate etc. (fig. 12. 10).

Rețeaua metropolitană conține un număr mult mai mare de componente în comparație cu cea națională (de distanță lungă). Pentru a fi eficientă din punct de vedere economic rețeaua metropolitană trebuie astfel proiectată încât să aibă un cost cât mai mic. De asemenea, componentele acesteia trebuie să fie cât mai compacte și integrate.

Dispozitivele de răcire care evacuează energia disipată trebuie să nu perturbe temperatura mediului înconjurător sau funcționarea altor dispozitive. Ținând seama de cele prezentate rezultă că utilizarea amplificatorilor optici fabricați în fibre optice dopate cu Er devine o necesitate.

Întrucât de obicei pentru transmisiile de date se utilizează semnale digitale raportul semnal-zgomot este îmbunătățit. De asemenea, pierderile pe canalele optice sunt mici pentru că atenuarea în rețelele optice pe distanțe mici care conțin fibre este mică. Totuși, există pierderi care se datorează divizării semnalului în nodurile de rețea sau unor dispozitive optice.

În ultimul timp s-au făcut progrese în compactarea fibrelor optice amplificatoare obținându-se circuite hibride care conțin atât elemente pasive (cuplor+multiplexor+izolator) cât și active (amplificator) în același dispozitiv. Un astfel de dispozitiv pompat cu o diodă laser cu $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$ și având puterea de 190 mW generează la ieșire un semnal cu puterea de 15 dBm [12.6].

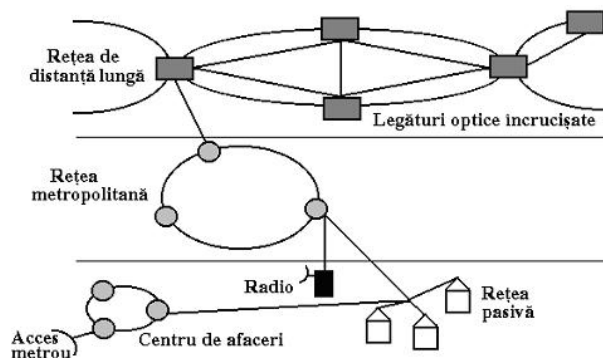


Fig. 12. 10. Rețea de transmisie metropolitană.

Prin utilizarea amplificatoarelor în ghidurile optice de undă fabricate în semiconductoare, siliciu sau niobat de litiu dopate cu Er^{3+} sau sistemul $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ în locul celor pe fibră se pot reduce și mai mult dimensiunile circuitelor optice.

12.1.8. Rețele transoceanice

Fibrele optice amplificatoare au fost utilizate în ultimii ani și în cazul transmisiilor optice transoceanice în locul repetitorilor electronici. Astfel, au fost realizate sisteme submarine cu ajutorul cărora s-au transmis pe un singur canal optic semnale având $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ cu viteza de 5 Gbit/s pe distanțe lungi de 6000 km ÷ 9000 km, iar dacă a fost utilizată tehnica WDM viteza de transmisie a crescut de câteva zeci de ori.

Principalele trasee transoceanice care leagă continentele sunt prezentate în figura 12. 3. Exploatarea rețelelor transoceanice trebuie garantată cel puțin 25 de ani, perioadă care este mai mare decât în cazul rețelelor terestre. Deși operațiile de întindere a cablurilor optice sau de reparare a acestora au devenit în ultimul timp de rutină, costurile sunt foarte mari.

În ultimii ani au fost făcute eforturi atât pentru a mări capacitatea și viteza de transport, ajungându-se până la valori de 1 Tbit/s, cât și pentru a optimiza alți parametri care caracterizează transmisia, ca de exemplu: nivelul câștigului și puterea semnalului la ieșire (utilizând amplificarea Raman distribuită), configurația optimă a pompajului pentru ca figura de zgomot să fie minimă, alegerea potrivită a lungimii de undă (utilizând tehnica pompajului hibrid cu $\lambda = 980 \text{ nm}/1480 \text{ nm}$), inversia de populație, compoziția matricei gazdă pentru ionii elementelor active etc.

12.1.9. Montaje experimentale utilizate pentru transmisia informației prin fibre optice

În anul 1996 a fost realizată prima rețea telefonică transatlantică cu lungimea totală de 12 239 km care conține 140 de repetori optici ce leagă două orașe din Statele Unite ale Americii (Green Hill-Rhode Island, Shirley-New York) și alte două din Europa (Lands End din Anglia, Penmarc'h din Franța) în care amplificarea semnalului având lungimea de undă $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ se face cu ajutorul unor amplificatoare fabricate în fibre optice dopate cu Er^{3+} (fig. 12. 11).

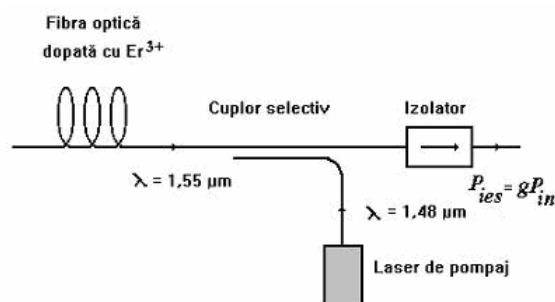


Fig. 12. 11. Amplificatorul cu fibră optică dopată cu Er^{3+} .

Semnalul având puterea de intrare P_{in} mică este cuplat cu ajutorul unui cuplor direcțional selectiv în domeniul lungimilor de undă (în sens contrar undeii incidente) cu radiația unui laser de pompaj cu $\lambda = 1,48 \mu\text{m}$ [12.2].

Fibra folosită pentru transmisia propriu-zisă este sudată cu o alta dopată cu Er^{3+} (având lungimea de 10 m) care realizează amplificarea semnalului $P_{ies} = gP_{in}$, unde g este câștigul optic).

Izolatorul optic împiedică propagarea undeii reflectate (care a fost amplificată) în sens contrar celei incidente. Această rețea este capabilă să asigure un trafic de 10 Gbit/s.

În zilele noastre, deși costul pentru producerea fibrelor amplificatoare dopate cu Er^{3+} este relativ ridicat, potențialul de transmisie este foarte mare.

De asemenea, costul fibrelor amplificatoare dopate cu Er^{3+} este scăzut în raport cu repetori clasice și în plus au un zgomot redus de 3,1 dB÷5,3 dB în comparație cu 7 dB÷10 dB al dispozitivelor clasice.

Amplificatoare și modulatori optice utilizate în telecomunicații. O undă optică purtătoare perfect sinusoidală poate fi reprezentată de componenta câmpului electric

$$E(t) = \hat{E} \cos(\omega t + \varphi). \quad (12.11)$$

Dacă unda este modulată de un semnal $f(t)$ unda modulată în amplitudine poate fi reprezentată sub forma:

$$\hat{E} = E_0 \{1 + f(t)\}, \quad (12.12)$$

E_0 fiind amplitudinea purtătoarei, intensitatea modulată poate fi reprezentată prin

$$\hat{E}^2 = E_0^2 \{1 + f(t)\}^2, \quad (12.13)$$

iar faza modulată prin

$$\varphi = \varphi_0 \{1 + f(t)\}. \quad (12.14)$$

Frecvența modulată poate fi exprimată în funcție de faza purtătoarei optice sub forma [12.1]:

$$\varphi = \varphi_0 \left\{ 1 + \int_0^t f(t) dt \right\}, \quad (12.15)$$

iar frecvența unghiulară *instantanee* devine:

$$\omega = \frac{d}{dt}(\omega_0 t + \varphi) = \omega_0 + \varphi_0 f(t). \quad (12.16)$$

Modularea curentului de conducție a laserelor cu semiconductoare produce modularea frecvenței precum și modularea intensității. Pentru obținerea modulării fazei este nevoie de un modulator extern, ceea ce conduce inevitabil la o pierdere de putere semnificativă în anumite cazuri. De aceea, schema arătată în figura 12.12, în care modulatorul extern este urmat de un amplificator optic, este foarte folosită și poate ajunge să domine sistemele de fibre optice din generația a III-a.

Modulația fazei se poate obține prin trecerea luminii de-a lungul unui ghid de undă de tip panglică dintr-un material electrooptic, cum ar fi niobatul de litiu LiNbO_3 . Aplicarea unei tensiuni modulatorilor electrozilor generează o variație a domeniului fazei din ghid. Pierderile survin în cuplajul dintre radiația internă și externă modulatorului și datorită atenuării din modulator.

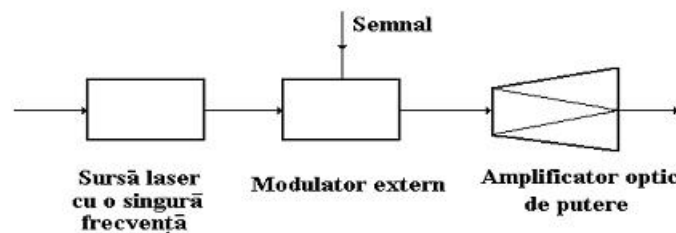


Fig. 12.12. Schema unui amplificator optic de putere pentru compensarea pierderilor cauzate de un modulator extern.

Un modulator extern de amplitudine (sau intensitate) poate fi un interferometru Mach-Zehnder integrat (fig. 12.13). Tensiunea de modulare produce în acest caz o variație a diferenței de fază relative dintre cele două drumuri. La ieșirea din ghid cele două unde se recombina ca suma a două moduri:

cel fundamental, care este ghidat, și cel de un ordin superior, care este neghidat și radiat în exterior. Cum diferența de drum variază proporția puterii în fiecare mod se schimbă și puterea de la ieșirea ghidului este modulată.

Cu ajutorul interferometrului Mach-Zehnder pasiv se poate transforma modulația frecvenței în modulație de intensitate. Metoda este prezentată în figura 12. 14 folosindu-se modulația frecvenței radiației generate de un laser cu semiconductoare cu reacție distribuită (DFB).

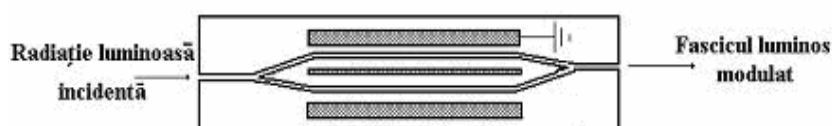


Fig. 12. 13. Schema unui modulator de tip interferometru Mach-Zehnder din niobat de litiu. Tensiunea de modulație este aplicată electrodului central și induce o diferență de fază între cele două brațe ale interferometrului.

Avantajul este că modularea totală a intensității se poate obține cu o amplitudine mult redusă a curentului de modulare.

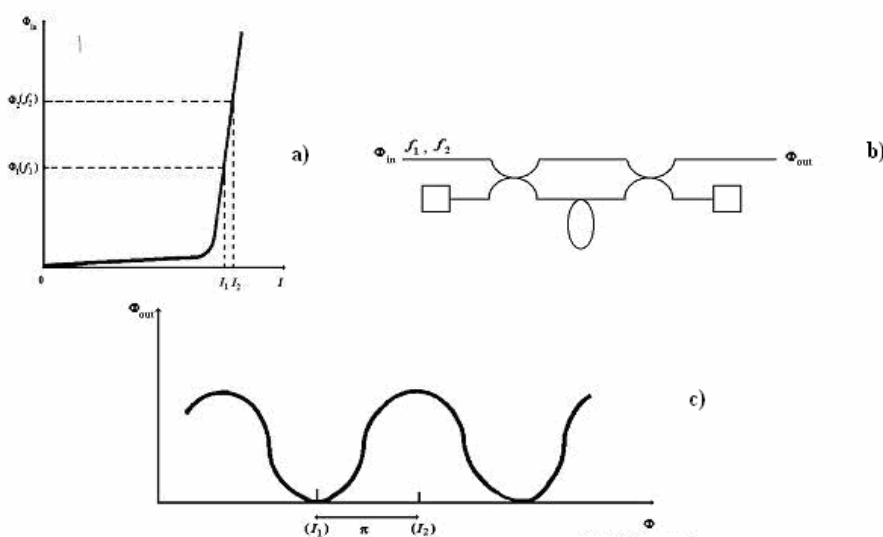


Fig. 12. 14. Schema funcționării interferometrului Mach-Zehnder integrat pentru conversia modulației de frecvență în modulația de intensitate: a) puterea în funcție de curent, b) interferometrul cu diferența de drum ΔL (diferența de fază dintre cele două brațe este $\Phi = 2\pi f \Delta L / c$) și este proporțională cu frecvența optică); c) lungimile brațelor l_1 și l_2 sunt alese astfel încât să rezulte maxim sau minim de putere la ieșire, deci: $2\pi(f_2 - f_1)\Delta L = \pi$.

Mai important este faptul că lărgimea liniei spectrale este mult redusă ca și limitarea cauzată de dispersia cromatică a fibrei. Un sistem de acest tip a fost utilizat în cazul unei legături subacvatice fără repetori folosind 132 km de fibră standard monomod. Folosind un astfel de interferometru a intensității modulate cerută (OOK la 1,12 GHz) a fost obținută cu o deviație a frecvenței de intrare de 5 GHz (0,04 nm) și legătura nu a fost limitată de dispersie. Modulația de frecvență ce ar fi apărut direct din modularea intensității laserului la această frecvență a fost aproximativ 60 GHz (0.5 nm). Utilizând o fibră optică având un coeficient de dispersie de 15 ps/(km-nm) aceasta ar fi crescut la o lărgime de dispersie cu valoarea eficace de aproximativ 1 ns la 132 km și în acest fel viteza de transmisie s-ar fi limitat la aproximativ 250 Mb/s. Acest exemplu demonstrează că pot exista avantaje operaționale în folosirea tehnicii de modulare coerente împreună cu detecția directă la receptor. Totuși, un câștig mult mai mare poate fi obținut atunci când semnalului receptat îi este adăugată ieșirea unui oscilator laser într-un receptor heterodină sau omodină.

În cazul utilizării unui amplificator optic încapsulat (*packaged*) fabricat într-un ghid optic de undă dopat cu Er^{3+} având dimensiunile 13x2,7x1,3 cm în rețeaua metropolitană s-a obținut un câștig de 10 dB în toată banda C. Amplificatorul prezentat include un laser pentru pompaj (având răcirea de tip TEC), un multiplexor pentru radiațiile de pompaj și semnal, un cuplor prevăzut cu o fotodiodă pentru monitorizare, iar la ieșire un filtru și un izolator [12.10]

Receptorul coerent. Principiul heterodinării a fost folosit mai întâi în cazul undelor radio și microundelor. Undele emise de un oscilator local se compun cu undele modulate recepționate de la emițător. Ambele surse fiind coerente și menținându-și coerența mutuală în zona luminată a detectorului, curentul generat de fotodiodă are o componentă ce variază cu diferența frecvențelor. În radiotehnică este extrasă frecvența intermediară (intermediare). Aceasta are aceeași modulare, a amplitudinii (MA), a frecvenței (MF) sau a fazei (Mf), care e prezentă în unda recepționată. Într-un receptor omodină frecvența oscilatorului local e aceeași cu cea a purtătoarei modulate și cuplată în fază cu ea. Semnalul este demodulat direct în banda de jos. Modulația în frecvență nu poate fi folosită la recepție, dar modulațiile amplitudinii pot. Diagrama bloc a unui sistem coerent este prezentată în figura 12. 15.

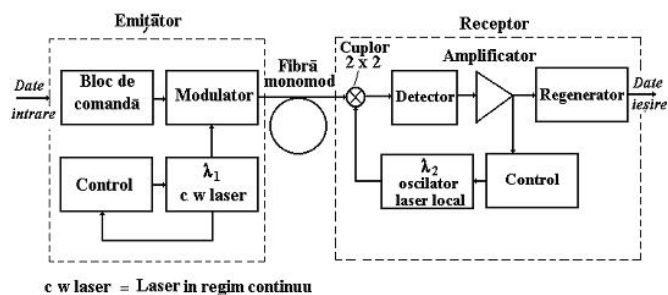


Fig. 12. 15. Schema bloc a unui sistem de transmisie coerent.

În receptorul omodină $\lambda_1 = \lambda_2$. Altfel sensibilitatea detecției este serios afectată dacă alinierea fronturilor de undă ale celor două unde variază cu mai mult de câteva procente ale unei lungimi de undă pe întreaga suprafață și, de asemenea, dacă distribuțiile intensității și polarizarea nu sunt acordate.

Un sistem optic de transmisie a informației cu amplificatoare optice des utilizat în practică este reprezentat schematic în figura 12. 16.

Deși fibrele amplificatoare dopate cu Er^{3+} elimină componentele electronice discrete (ca în cazul repetitorilor hibridi), acestea prezintă dezavantajul legat de folosirea mai multor amplificatoare conectate în cascadă pentru utilizatorii aflați la distanță. Flexibilitatea sistemelor care utilizează pentru transmisia informației fibre optice permite îmbunătățirea acestuia în timp, prin diferite metode ca urmare a perfecționării surselor, detectorilor și a fibrelor optice.

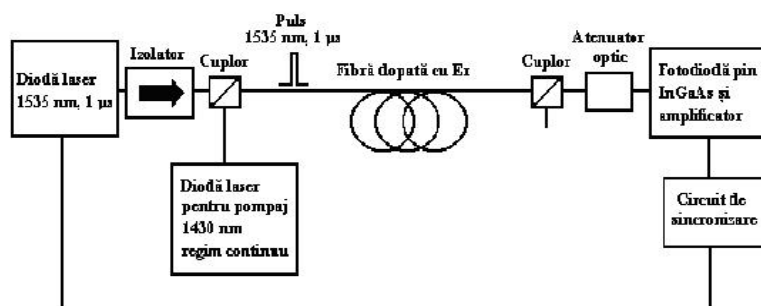


Fig. 12. 16. Configurația unui sistem de comunicații cu fibră optică dopată cu Er^{3+} . ridicat, dar au o eficiență cuantică scăzută.

12.2. Senzori cu fibre și ghiduri optice de undă

Senzorii cu fibre și ghiduri optice de undă sunt dispozitive ghidate, pe baza unor principii și legi din optică permit monitorizarea unor fenomene fizice, chimice, biomedicale etc. [12.11]-[12.14] (fig. 12. 17). Astfel, variația unor parametri fizici, chimici, biologici, medicali etc. este transformată cu ajutorul modulatorului optic în mărimi electrice (tensiuni, curenți) care apoi sunt detectate și măsurate.

Lumina incidentă provenită de la o sursă optică (care este în general un laser) este transmisă utilizând o fibră optică într-un dispozitiv (modulator) în care are loc modularea acesteia printr-un fenomen fizic, chimic sau biologic. Lumina modulată (emergentă) este transmisă înapoi tot printr-o fibră optică la un receptor, detectată și demodulată. Receptorul poate fi astfel construit încât să existe o corelație *unu-la-unu* (*one-to-one*) între fenomenul studiat și semnalul demodulat.

12.2.1. Principii funcționale și constructive ale senzorilor cu fibră optică

Un *senzor* este un dispozitiv care preia valorile unei mărimi fizice (temperatură, presiune etc.) și le transformă în mărimi electrice (curenți sau

tensiuni) direct utilizabile printr-un sistem de control sau achiziție de date. Un traductor este un dispozitiv care preia valoarea unei mărimi fizice și o transformă în mărime electrică. Diferența dintre un senzor și un traductor constă în prezența acelei părți a sistemului care furnizează la ieșire un semnal electric normalizat, direct proporțional cu mărimea măsurată și cu cât mai puține erori posibil.

Senzorii bazați pe fibră optică (*Fibre Optic Sensor-FOS*) au fost subiectul unor mari eforturi de cercetare în ultimii ani. Senzorii de acest tip oferă multe avantaje față de tehnicile de detecție convenționale, incluzând o sensibilitate mare la măsurarea unor parametri fizici (ca de exemplu temperatura, presiunea, vibrațiile etc.). Senzorii cu fibră optică sunt construiți din materiale dielectrice, deci pot fi utilizați la tensiune mare, câmpuri electric și magnetic mari, temperatură mare etc. În ultimii ani au fost dezvoltate mai multe tipuri de senzori cu fibră optică [12.11]-[12.23].

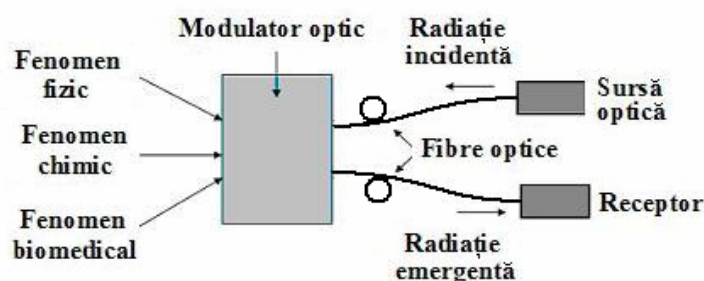


Fig. 12. 17. Schema bloc a senzorului cu fibră optică.

Componentele de bază ale senzorilor cu fibre și ghiduri optice de undă având o construcție în general simplă permit reducerea prețului de cost al fabricării acestora.

Clasificarea senzorilor cu fibră optică. Senzorii cu fibră optică pot fi clasificați în mai multe categorii în funcție de diverse criterii. Pe baza tehnologiei actuale senzorii cu fibră optică pot fi configurați să opereze în modul *distribuit* în care parametrul de interes care urmează a fi măsurat este monitorizat în mai multe puncte de-a lungul fibrei optice. Există două tipuri de sisteme de *senzori distribuiți*:

- *senzori distribuiți intrinseci*, în care parametrul de măsurat poate fi evaluat în orice punct al fibrei optice, rezoluția spațială fiind determinată în general de constrângerile optoelectronice (fig. 12. 18). În acest caz, fibra acționează ca senzor de-a lungul întregii sale lungimi. Funcționarea acestui tip de senzori se bazează pe împrăștierea Rayleigh, Raman și Brillouin,

- *senzori cvasidistribuiți*, în care parametrul (câmpul) de măsurat este determinat, într-un anumit număr de regiuni (senzor) predefinite (fig. 12. 19). În acest caz fibra acționează ca senzor numai pe anumite porțiuni, iar funcționarea acestora se bazează în general pe fenomenele de retroîmprăștiere.

De asemenea, dacă fibra acționează ca senzor pe o porțiune mare se obține un dispozitiv (senzor) cu pas de integrare extins de tip transmis (fig. 12. 20). Fibra

senzor mai poate fi plasată la unul din capete, obținându-se senzori de tip reflectant (fig. 12. 21) și respectiv cu pas de integrare extins (fig. 12. 22).

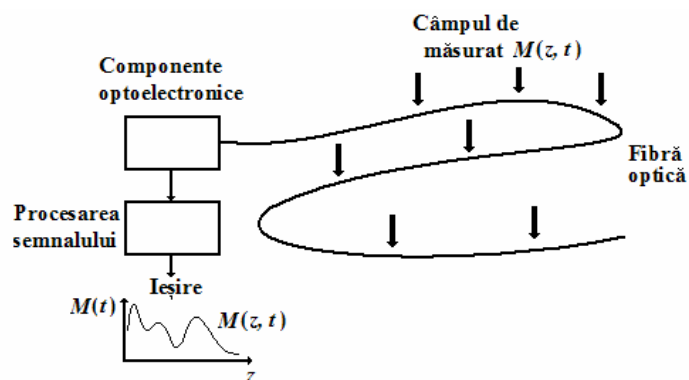


Fig. 12. 18. Senzor distribuit intrinsec.

O mare parte din dispozitivele utilizate pentru măsurarea diferiților parametri: temperatura, presiunea, deplasarea, câmpul magnetic și agenții chimici fac parte din categoria *senzorilor de intensitate*. Funcționarea acestora se bazează pe: absorbția diferențială/atenuarea (colorimetrici), emisia (corpului negru), fluorescență/luminiscență, cavități etalon.

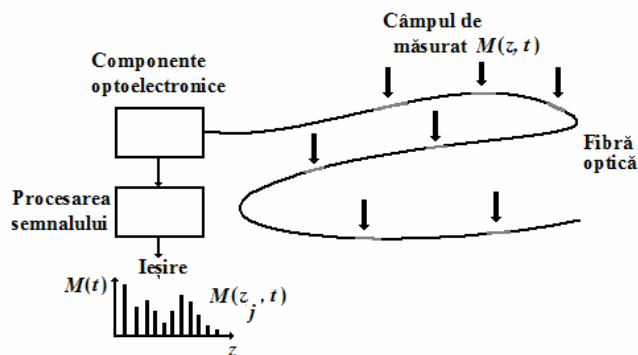


Fig. 12. 19. Senzor cvasidistribuit.

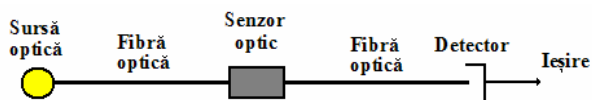


Fig. 12. 20. Senzor cu pas de integrare extins de tip transmis.

Senzorii cu fibră optică mai pot fi clasificați și după schema următoare:

1. pe baza procesului de modulare și demodulare un senzor poate fi numit ca fiind un senzor de intensitate, un senzor de fază, un senzor de frecvență sau un senzor de polarizare. Deoarece detecția fazei sau frecvenței în optică necesită tehnici interferometrice, acest tip de senzor poate fi numit senzor interferometric;

2. din punctul de vedere al detecției, există tehnica interferometrică care implică detecția heterodină/detecția coerentă și respectiv incoerentă. Senzorii de intensitate sunt caracterizați de o detecție incoerentă. Avantajul senzorilor modulați în intensitate este construcția simplă și compatibilă cu tehnologia fibrelor multimod, în timp ce senzorii interferometrici cu detecție coerentă sunt mai complecși, dar oferă o mai bună sensibilitate și rezoluție. Din categoria senzorilor modulați în intensitate fac parte senzorii optici cu reflexie (*Optical Reflection Sensors*).

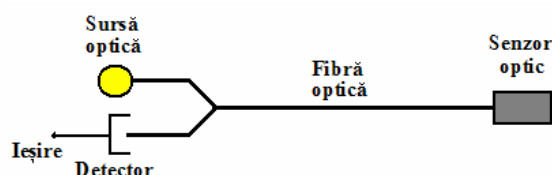


Fig. 12. 21. Senzor de tip reflectant.

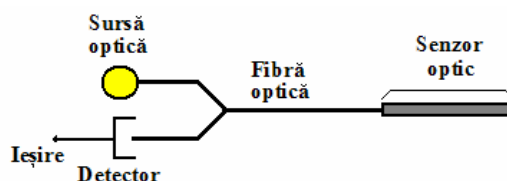


Fig. 12. 22. Senzor cu pas de integrare extins.

Senzorii interferometrici au avantajul că măsurătoarea este legată de o proprietate intrinsecă ca de exemplu viteza, lungimea de undă sau frecvența. Acești senzori sunt caracterizați în general, de o construcție mai complexă decât senzorii de intensitate. Pentru a face măsurători cu acest tip de senzor este nevoie de o aliniere de mare precizie a componentelor optice ce constituie interferometrul. Într-o fibră monomod proprietățile coerente ale fascicului propagat sunt menținute, deci este posibil să se construiască un interferometru dintr-o singură fibră optică monomodală. Aceasta permite interconexiuni flexibile în sistemul de detecție al senzorului și elimină problemele legate de instabilitatea geometrică a interferometrelor convenționale. Lumina emisă de sursa optică (laser) este cuplată într-o fibră, apoi fascicul luminos este injectat în senzorul interferometric, iar în final acesta ajunge printr-o altă fibră optică la un detector optic, de obicei o fotodiodă, pentru procesarea semnalului (fig. 12. 23).

Ținând seama de aplicațiile lor, senzorii cu fibră optică pot fi clasificați în:

1. senzori fizici (pentru măsurarea temperaturii, presiunii etc.);

2. senzori chimici (de exemplu pentru măsurarea pH-ului, analiza unui gaz, studii spectrometrice);

3. senzori bio-medicali (de exemplu senzori spectroscopici biomedicali, senzori ce măsoară simultan pH-ul, CO_2 , O_2 , senzori ce monitorizează curgerea sângelui).

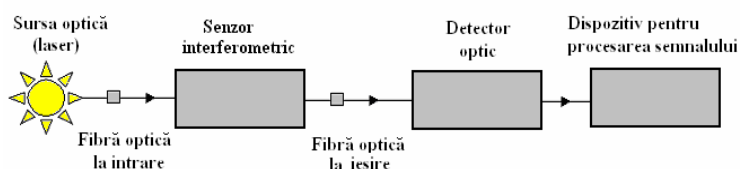


Fig. 12. 23. Schema bloc a unui senzor interferometric.

Ambii senzori, de tip intensitate și de tip interferometric, pot fi considerați ca făcând parte din oricare din aplicațiile anterioare. Senzorii mai pot fi clasificați în senzori intrinseci și respectiv extrinseci (fig. 12. 24 a), b)).

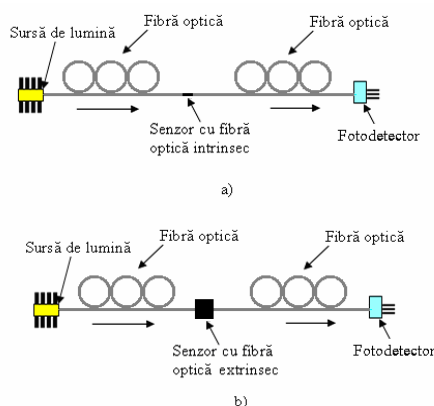


Fig. 12. 24. Schemele bloc ale senzorilor cu fibră optică de tip: a) intrinsec și b) extrinsec.

Această clasificare este considerată ca fiind cea mai generală. Un senzor este considerat intrinsec dacă se utilizează un mecanism traductor (*senzor*) care face parte din fibra optică (fig. 12. 24 a)), partea relevantă ce servește ca senzor, de obicei neputând fi distinsă de restul fibrei optice. Spre deosebire de acesta, un senzor extrinsec (fig. 12. 24 b)) utilizează o fibră optică pentru a conduce lumina la elementul de detectare sau dispozitiv, și o altă fibră, identică sau nu cu prima, este utilizată pentru a conduce lumina procesată la un sistem fotodetector. Pe scurt, în cazul senzorilor intrinseci interacțiunea are loc în fibră, iar în cazul senzorilor extrinseci interacțiunea are loc în afara fibrei optice. Totuși există o categorie de senzori cu fibre optice intrinseci la care mărimea de măsurat nu interacționează direct cu radiația optică. În acest caz are loc o transformare intermediară a mărimii de intrare într-o mărime mecanică (presiune, deplasare etc.). Definim în acest caz

două tipuri de senzori intrinseci: senzori intrinseci direcți în care mărimea de măsurat interacționează direct cu radiația optică și senzori intrinseci indirecți în care mărimea de măsurat suferă o transformare intermediară. Senzorii intrinseci sunt realizați în general cu fibre optice monomod, acestea oferind avantajul realizării de configurații cu sensibilități și precizii ridicate.

În tabelul 12. 2 este prezentată o comparație între senzorul cu fibră optică intrinsec și cel extrinsec.

Tabelul 12. 2.

Senzorul cu fibră optică extrinsec	Senzorul cu fibră optică intrinsec
Aplicații la măsurarea: temperaturii, presiunii, curgerea și nivelul unui lichid.	Aplicații la măsurarea: rotațiilor, accelerației, tensiunii, presiunii acustice, vibrațiilor.
Mai puțin sensibil.	Mult mai sensibil.
Ușor de multiplexat.	Foarte dificil de multiplexat.
Probleme la conectarea intrare/ieșire.	Probleme de conectare reduse.
Ușor de utilizat.	Mai dificil de procesat semnalul demodulat.
Mai puțin scump.	Mult mai scump.

Senzorii cu fibră optică se pot clasifica și ținând cont de proprietățile luminii afectate de traductor. Astfel, există:

1. senzori interferometrici;
2. senzori cu modulația intensității;
3. senzori spectrometrici;
4. senzori polarimetrici.

12.2.2. Senzori interferometrici cu fibră optică

Senzorii interferometrici cu fibră optică sunt senzori cu faza modulată (*Phase-Modulated Sensors*). În general, un senzor cu faza modulată utilizează un laser ca sursă de lumină și două fibre optice monomodale. Fasciculul luminos este divizat și introdus în fiecare fibră optică. Dacă o fibră este perturbată în urma acțiunii unui factor extern (temperatură, presiune etc.) față de cealaltă, atunci deplasarea fazei la acel moment poate fi detectată foarte precis. Deplasarea fazei este detectată cu un interferometru. Interferometrele sunt instrumente utilizate pentru măsurători de înaltă precizie bazate pe fenomenul de interferență. Un fascicul de lumină este divizat în două sau mai multe fascicule prin reflexii și transmisii parțiale, iar aceste fascicule sunt suprapuse după ce parcurg drumuri distincte.

Un senzor interferometric se bazează pe detecția variației fazei luminii ce iese dintr-o fibră optică monomodală. În cazul unei fibre variația fazei este dată de relația:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_L + \Delta\Phi_n + \Delta\Phi_g \quad (12.17)$$

în care: cei trei termeni de fază sunt datorati variațiilor lungimii, indicelui de refracție și ghidului. Variația fazei este convertită într-o variație a intensității luminii utilizând montaje interferometrice (Mach-Zehnder, Fabry-Pérot, Michelson sau Sagnac). Folosirea unei fibre optice sau a componentelor integrate optice poate furniza o mai bună stabilitate. Senzorii interferometrici cu fibră optică sunt cel mai des utilizați, deoarece prezintă cele mai bune performanțe, aceștia fiind de mai multe tipuri: senzori acustici (hidrofoane), senzori de rotație, senzori de tensiune, de temperatură, chimici, biologici și o mulțime de alte tipuri de senzori.

Interferometrul Mach-Zehnder. Schema bloc a interferometrului Mach-Zehnder fabricat cu fibre optice este prezentată în figura 12. 25.

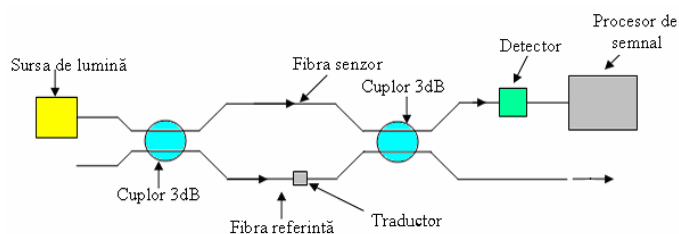


Fig. 12. 25. Schema bloc a interferometrului Mach-Zehnder fabricat cu fibre optice.

Acesta este un senzor intrinsec bazat pe interferența dintre o undă modulată (*senzor*) și una de *referință*. Fibra senzora este utilizată pentru a monitoriza perturbația. Fasciculul laser de ieșire este divizat utilizând un cuplor de 3 dB astfel încât 50% din lumină este injectată în interiorul fibrei senzora monomodală și 50% în fibra optică de referință. Fasciculul de lumină este recombinat utilizând un al doilea cuplor de 3 dB. Fasciculul combinat este detectat, iar apoi se măsoară deplasarea fazei, care rezultă ca urmare a variației lungimii și indicelui de refracție al fibrei senzora. Dacă lungimea fibrei optice de referință este aceeași cu lungimea fibrei senzora sau diferă printr-un număr întreg de lungimi de undă, fasciculele recombinate sunt în fază și intensitatea fasciculului astfel obținut este maximă. Mai mult, dacă cele două fascicule diferă cu $1/2$ din lungimea de undă în afara fazei, intensitatea fasciculului recombinat este minimă. O modulare de 100% corespunde la peste jumătate din lungimea de undă a luminii. Această sensibilitate permite detecția unor mișcări cu amplitudini mai mici de 10^{-13} m.

Interferometrul Michelson. Configurația experimentală a interferometrului Michelson este prezentată în figura 12. 26. Construcția acestui interferometru este asemănătoare cu cea a interferometrului Mach-Zehnder, diferența constând în faptul că se utilizează reflexia înapoi cauzată de fibrele optice care au la capete

oglinzi. Fasciculul laser inițial este injectat în cele două fibre (senzor și de referință) printr-un cuplor de 3 dB (fig. 12. 26). Capetele prevăzute cu oglinzi ale fibrelor optice ale interferometrului Michelson reflectă înapoi lumina la cuplor, unde este din nou divizată, iar o parte din acest semnal optic este trimis la un fotodetector.

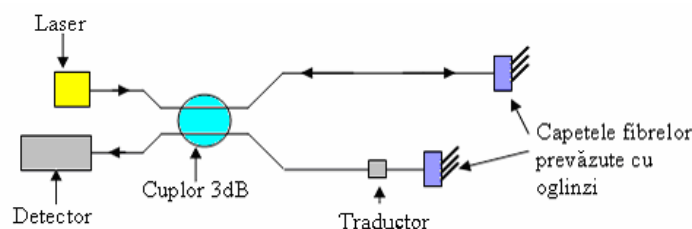


Fig. 12. 26. Schema bloc a interferometrului Michelson fabricat cu fibre optice.

Deși cele două unde luminoase care constituie semnalul au o origine comună și aceeași fază la ieșirea din cuplor, după parcurgerea dus-întors a fibrelor optice de referință și respectiv senzor, între acestea există o diferență de fază $\Delta\Phi$, care este direct proporțională cu diferența dintre drumurile optice corespunzătoare:

$$\Delta\Phi = 2k(n_s l_s - n_r l_r), \quad (12.18)$$

unde k este constanta de propagare în spațiul liber, n_s este indicele de refracție al miezului fibrei optice senzor, n_r este indicele de refracție al fibrei optice de referință, iar l_s și l_r sunt lungimile fizice ale fibrei optice senzor, respectiv de referință (măsurate de la cuplor la fiecare capăt prevăzut cu oglinzi). Introducerea factorului 2 din relația (6.18) este determinată de faptul că fiecare cale optică este parcursă de două ori.

Acest tip de senzor este utilizat în special la măsurarea vibrațiilor. În comparație cu interferometrul Mach-Zehnder, interferometrul Michelson are avantajul că elimină unul dintre cuploarele de 3 dB, însă prezintă dezavantajul (major) că cuplorul injectează lumina atât în detector cât și în laser, reflexia fasciculului în laser constituind o sursă importantă de zgomot, în special pentru sistemele de înaltă performanță.

Interferometrul Fabry-Pérot. Pentru fabricarea interferometrului Fabry-Pérot se utilizează o singură fibră de referință (fig. 12. 27). Interferența luminii rezultă în urma reflexiilor succesive ale fasciculului inițial. Fasciculul coerent injectat este parțial reflectat înapoi în laser (de obicei 95% reflectat, 5% transmis). Fasciculul transmis care este injectat în cavitatea interferometrică este parțial reflectat (95%) și parțial transmis (5%). Din cele două fascicule 5% din lumina transmisă de prima oglindă 95% este reflectată de cea de-a doua oglindă și numai restul de 5% ajunge la detector. Reflexiile succesive reduc intensitatea fasciculului detectat cu aproximativ 10% (5% pierdut la fiecare din cele două reflexii pe ciclu). Trecherile multiple de-a lungul fibrei măresc diferența de fază, rezultând o

sensibilitate înaltă. În general, un senzor Fabry-Pérot prezintă o sensibilitate de două ori mai mare în comparație cu alți senzori.

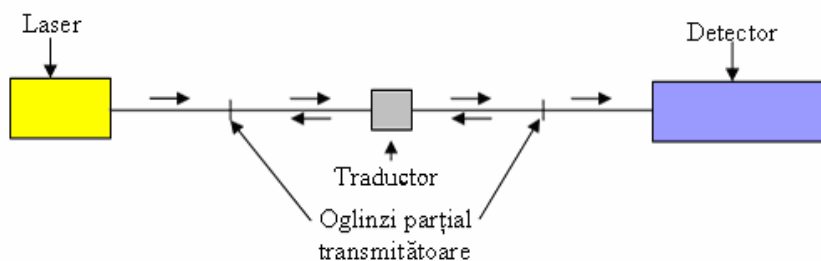


Fig. 12. 27. Schema bloc a interferometrului Fabry-Pérot fabricat cu fibre optice.

12.2.2. Principii funcționale și constructive ale senzorilor fabricați în ghiduri optice de undă

Dispozitivele optice integrate sunt din ce în ce mai mult utilizate în fabricarea senzorilor pentru aplicații în domenii diverse, în special în domeniile biologiei, chimiei și medicinei. Avantajele utilizării acestor dispozitive sunt multiple: oferă un control mai bun al drumului luminii prin utilizarea ghidurilor optice de undă, stabilitate mecanică, înaltă sensibilitate, miniaturizare, posibilitatea producerii în masă etc. În general, senzorii optici integrați se bazează pe principiul detecției câmpului evanescent. Într-un ghid optic de undă lumina transmisă este confinată în interiorul miezului. Astfel, modul ghidat (câmpul evanescent) călătorește printr-o regiune care se extinde în exterior, până la 100 nm, în mediul înconjurător ghidului optic. Atunci când sunt schimbate caracteristicile optice ale mediului exterior (indicele de refracție variază), este indusă, prin câmpul evanescent, o modificare a proprietăților optice ale modului ghidat. Detecția acestei variații se poate face utilizând diferite scheme de traductoare, putând fi folosite ca oglinzi rezonante, cuploare cu rețele, interferometre etc. Pentru implementarea într-un interferometru Mach-Zehnder se folosesc ghiduri de undă monomod. Metoda bazată pe acest tip de interferometru oferă o sensibilitate mult mai înaltă comparativ cu alte scheme interferometrice. În configurația acestui senzor variația indicelui de refracție este evaluată prin modulația intensității produse prin interferența luminii ce parcurge cele două ramuri ale interferometrului. Ghidurile optice bazate pe reflexie internă totală au fost încercate experimental datorită sensibilității înalte a suprafeței.

Principiul de bază al senzorului fabricat într-un ghid de undă dielectric planar este de a măsura variațiile indicelui de refracție efectiv dat de $n_g \sin \theta$ datorită variațiilor indicelui de refracție al superstratului. Acest principiu este ilustrat în figura 12. 54. Lumina poate fi cuplată într-un ghid de undă la un capăt al ghidului într-un interval de unghiuri α , și poate fi transmisă în ghid prin reflexie internă totală la interfața ghid/superstrat, și respectiv ghid/substrat la un interval de unghiuri θ (fig. 12. 54 a)). Lumina este cuplată în exteriorul ghidului la celălalt capăt al ghidului unde intensitatea este măsurată cu ajutorul unui detector. Spectrul

măsurat al intensității în funcție de unghiul de propagare este prezentat în figura 12. 28 b). Pornind de la acest spectru putem reprezenta și intensitatea în funcție de indicele de refracție efectiv N știind că $N = n_g \sin \theta$.

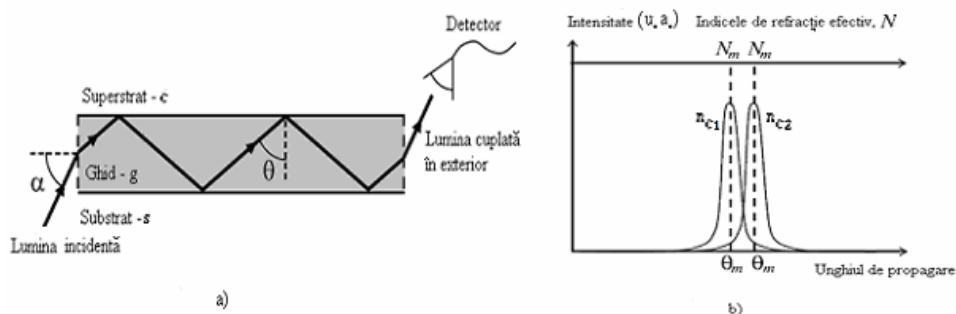


Fig. 12. 28. Principiul de bază al unui senzor fabricat într-un ghid de undă; a) lumina incidentă ce cade pe capătul unui ghid de undă sub un unghi α este transmisă în interiorul ghidului prin reflexie internă totală; intensitatea luminii transmise este măsurată cu un detector; b) graficul intensității în funcție de unghiul de propagare pentru indicii de refracție ai superstratului n_{c1} și n_{c2} .

O variație a indicelui de refracție al superstratului determină o variație a indicelui de refracție efectiv, și deci a unghiului modului. În concluzie, principiul acestui senzor constă în a măsura variația poziției maximului intensității, ilustrat în figura 12. 28 b) pentru o variație a indicelui de refracție al superstratului (*cover*) de la n_{c1} și n_{c2} .

Sensibilitatea senzorului prezentat este definită ca fiind rata de variație a indicelui de refracție efectiv în raport cu variația indicelui de refracție al superstratului.

Sensibilitatea la variații a indicelui de refracție al superstratului $\frac{\partial N_m}{\partial n_c}$

poate fi scrisă sub forma:

$$S = \frac{\partial N_m}{\partial n_c} = \left[\frac{n_c}{N_m} \cdot \frac{n_g^2 - N_m^2}{n_g^2 - n_c^2} \cdot \frac{d_c}{d_c + d_g + d_s} \left(2 \frac{N_m^2}{n_c^2} - 1 \right) \right], \quad (12.19)$$

în care: d_c și d_s reprezintă lățimile efective ale superstratului și respectiv substratului. Acestea sunt date de relațiile următoare:

$$d_s = \frac{1 - \rho}{k(N_m^2 - n_s^2)^{1/2}} + \frac{\rho}{\left[\left(\frac{N_m}{n_g} \right)^2 + \left(\frac{N_m}{n_s} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[k(N_m^2 - n_s^2)^{1/2} \right]} \quad (12.20)$$

$$d_c = \frac{1-\rho}{k(N_m^2 - n_c^2)^{1/2}} + \frac{\rho}{\left[\left(\frac{N_m}{n_g} \right)^2 + \left(\frac{N_m}{n_c} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[k(N_m^2 - n_c^2)^{1/2} \right]} \quad (12.21)$$

Termenii d_c și d_s exprimă lungimea drumului optic în superstrat și respectiv în substrat. Alternativ, ecuația modului poate fi descrisă prin deplasarea de fază a lungimii drumului optic:

$$2m\pi = \phi_{\Delta s} + \phi_{d_s} + \phi_{d_c}, \quad (12.22)$$

unde ϕ_{d_s} și ϕ_{d_c} sunt deplasările de fază datorate lungimii drumurilor optice d_c și d_s . Sensibilitatea indicelui de refracție al superstratului este calculată în funcție de lățimea ghidului în figura 12. 29 pentru m de la 0 la 3, în cazul luminii polarizate transversal electric (TE), respectiv transversal magnetic (TM). Valorile folosite ale indicilor de refracție sunt: $n_s = 1,517$, $n_g = 1,59$, $n_c = 1,33$.

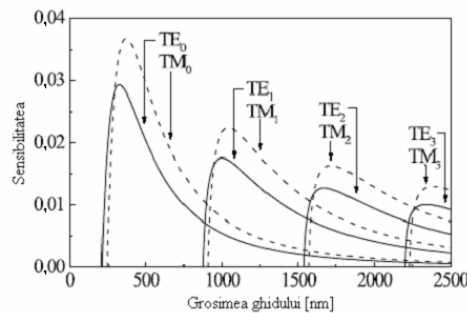


Fig. 12. 29. Sensibilitatea calculată în funcție de lățimea ghidului de undă pentru $m = 0 \div 3$, în cazul luminii polarizate TE și TM.

Din figura 12. 29 se observă că, creșterea grosimii ghidului determină un profil al modului mai mult simetric al câmpului electromagnetic, rezultând o influență crescută a lui n_c (indicele de refracție corespunzător superstratului) asupra lui N_m și deci o creștere a sensibilității indicelui de refracție al superstratului. Cu toate acestea, se poate vedea că pentru o lățime mai mare a ghidului, câmpul devine mai confinat în ghid, iar câmpurile evanescente atât în superstrat cât și în substrat scad odată cu scăderea influenței lui n_c , și respectiv a lui n_s , asupra lui N_m , rezultând o scădere a indicelui de refracție al superstratului. Astfel, sensibilitatea optimă a indicelui de refracție al superstratului este găsită la o lățime a ghidului unde profilul modului câmpului devine mai simetric. În concluzie, din grafic se poate observa că sensibilitatea indicelui de refracție al superstratului crește cu creșterea grosimii stratului de ghid.

După anumite calcule algebrice și exprimând sensibilitatea ca funcție de raportul dintre puterea totală a modului ghidat și a mediului superstrat, obținem:

$$\frac{\partial N_m}{\partial n_c} = \frac{n_c}{N_m} \cdot \left[2 \left(\frac{N_m}{n_c} \right)^2 - 1 \right]^{\rho} \cdot \frac{P_c}{P_T}, \quad (12.23)$$

unde $\rho = \begin{cases} 0, & \text{pentru modul TE} \\ 1, & \text{pentru modul TM} \end{cases}$, n_c este indicele de refracție al superstratului, N_m

este indicele de refracție efectiv al modului ghidat, P_c reprezintă puterea modului ghidat în mediul superstrat, iar P_T este puterea totală a modului ghidat.

Un alt aspect foarte important în realizarea senzorilor este de a produce un senzor cu sensibilitate maximă. Maximul sensibilității este obținut atunci când derivăm sensibilitatea definită în relația (12.23) în raport cu lățimea ghidului optic (d_g):

$$S_{\max} = \frac{\partial S}{\partial d_g} = 0 \quad (12.24)$$

Un senzor fabricat în ghiduri de undă este un senzor de câmp evanescent pentru care modul ghidului de undă este caracteristica senzor. Câmpul electromagnetic ghidat al modului ghidului de undă se extinde ca un câmp evanescent în mediul superstratului, și respectiv al substratului, și detectează un indice de refracție efectiv N_m al ghidului de undă. Datorită părții câmpului electromagnetic care se extinde în mediul superstratului, variația indicelui de refracție al superstratului determină o variație a lui N_m .

Modurile ghidului de undă sunt excitate în ghid doar atunci când lățimea ghidului d_g este mai mare decât lățimea de tăiere a ghidului și numărul de moduri excitate în ghid crește odată cu lățimea ghidului, unde ordinul modului ghidului de undă, m descrie profilul câmpului electromagnetic în ghidul de undă.

Adâncimea de pătrundere a câmpului evanescent în superstrat este un parametru important pentru detecția obiectelor de ordinul micronilor. Din acest motiv, acest tip de senzori sunt folosiți în special în domeniile chimiei, biologiei, medicinei. Pentru un ghid de undă planar dielectric adâncimea de pătrundere este limitată la câteva sute de nanometri, ceea ce face ca acest senzor să fie potrivit pentru detecția prezenței unui strat (*adlayer*) sau pentru măsurarea schimbărilor în straturi subțiri pe suprafața senzorului. Senzorul are de altfel o sensibilitate înaltă la măsurarea indicilor de refracție ai soluțiilor apoase.

Senzori fabricați în ghiduri de undă cu simetrie inversă. Un ghid de undă cu simetrie inversă este un ghid dielectric planar cu o configurație similară celei prezentate în figura 12.56 cuprins între un substrat și un superstrat. Astfel, pentru ghidurile de undă cu simetrie inversă indicele de refracție al substratului este mai mic decât cel al superstratului n_c ($n_c > n_s$). Prin scanarea unghiului de incidență al unui fascicul incident și monitorizarea simultană a intensității luminii la ieșirea din ghid cu ajutorul unei fotodiode poate fi găsit indicele de refracție al superstratului. Atunci când senzorul este utilizat pentru detecții biologice, mediul

superstrat este cel mai adesea o soluție apoasă cu indicele de refracție $n_c = 1,33$. Deoarece acesta este mai mic decât indicele de refracție al substratului, care de obicei este sticlă cu indicele aproximativ 1,5 câmpul evanescent, care este prezent în substrat și în superstrat, va avea o coadă mai lungă (*long tail*) în substrat și mai scurtă (*short tail*) în superstrat. Dacă, indicele de refracție al superstratului este mai mare decât al substratului se obține o simetrie inversă, după cum se vede și în figura 12. 30, deci se obține un ghid de undă cu simetrie inversă.

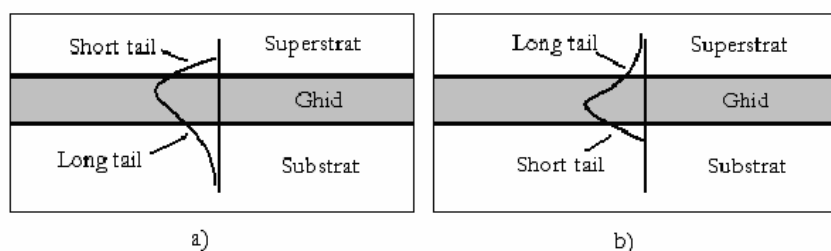


Fig. 12. 30. a) Sensor normal fabricat în ghid de undă cu indicele de refracție al superstratului mai mic decât indicele de refracție al substratului; b) sensor fabricat în ghid de undă cu simetrie inversă, cu indicele de refracție al superstratului mai mare decât al substratului.

Ca și pentru ghiduri dielectrice $n_g > \{n_s, n_c\}$, deci lumina în ghidurile de undă cu simetrie inversă este ghidată prin reflexie internă totală determinând excitarea modurilor ghidului atunci când avem interferență constructivă între fasciculele de lumină în ghidul optic (în miez).

Ghidurile de undă cu simetrie inversă sunt interesante deoarece cu acestea poate fi obținută o adâncime de pătrundere mare a câmpului evanescent în mediul superstrat, și în plus se obține o adâncime de pătrundere în superstrat care este mai mare decât adâncimea de pătrundere în substrat, astfel rezultând o influență mai mare a lui n_c asupra indicelui de refracție efectiv N_m pentru ghidurile de undă cu simetrie inversă, decât pentru cele dielectrice. Adâncimea de pătrundere a superstratului pentru ghidurile de undă cu simetrie inversă pleacă de la infinit la lățimea de tăiere a miezului pentru moduri de diferite ordine, și descrește până la câteva sute de nanometri pentru o creștere în lățime a miezului de circa 100 nm, de la lățimea de tăiere a miezului. O creștere ulterioară în lățime a miezului (ghidului) produce descreșterea adâncimii de pătrundere, dar cu o rată mult mai mică.

Adâncimea de pătrundere a substratului scade cu creșterea grosimii miezului, dar cu o rată mult mai precisă și mai mică. La lățimea de tăiere a ghidului, adâncimea de pătrundere ajunge la adâncimea limită de 115 nm, care este egală pentru toate modurile. Adâncimea de pătrundere infinită a superstratului la lățimea de tăiere a ghidului optic se obține deoarece N_m se apropie de indicele de refracție al superstratului (fig. 12. 31). La $N_m = n_c$, unghiul de propagare θ_m este dat de unghiul critic θ_{critic} . Din figura 12. 57 se observă că N_m pentru ghidurile

cu simetrie inversă are o valoare în intervalul de la n_c la n_s pentru o lățime dată a ghidului optic.

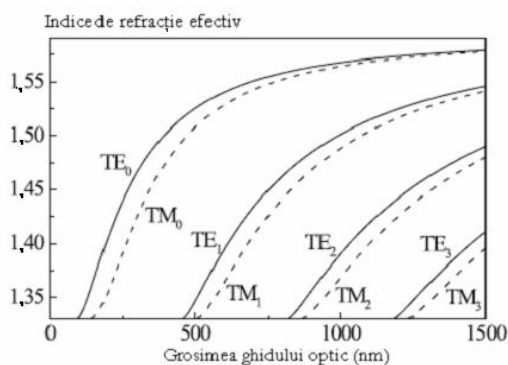


Fig. 12. 31. Indicele de refracție efectiv în funcție de lățimea ghidului optic pentru modurile de ordinele $m = 0 \div 3$, în cazul luminii polarizate TE, și respectiv TM.

Indicii de refracție ai configurației sunt: $n_s = 1, n_g = 1,59, n_c = 1,33$.

Sensibilitatea indicelui de refracție al superstratului unui senzor fabricat în ghid de undă cu simetrie inversă este calculată cu ajutorul relației (12.24). Aceasta este ilustrată în figura 12. 58 în funcție de lățimea ghidului optic pentru modurile de ordinul $m = 0 \div 3$, în cazul luminii polarizate transversal electric, și respectiv transversal magnetic. Sensibilitatea calculată a indicelui de refracție al superstratului este egală cu 1 la lățimea de tăiere a ghidului și în ambele polarizări TE și TM. Aceasta scade atunci când lățimea ghidului optic scade.

Atât senzorii fabricați în ghid de undă cu simetrie normală, cât și cei cu simetrie inversă pot fi utilizați în operarea multimodală unde mai multe moduri pot fi excitate în ghidul optic. Avantajul senzorilor fabricați în ghid de undă cu simetrie inversă față de cei cu simetrie normală constă în faptul că numărul maxim de moduri care poate fi excitat în ghidul optic (miez) este foarte sensibil la indicele de refracție al mediului superstrat.

Pentru un ghid de undă multimod fiind excitate mai multe moduri avem pentru fiecare un unghi de rezonanță diferit, θ_m , al luminii incidente la interfețele ghid/superstrat și respectiv ghid/substrat. Unghiurile de rezonanță sunt mai mari decât unghiul critic (fig. 12. 32). Indicii de refracție utilizați sunt: $n_s = 1, n_g = 1,59, n_c = 1,33$.

Principiul detecției într-un ghid de undă cu simetrie inversă multimod este asemănător cu cel în cazul monomod. Lumina este cuplată în interiorul ghidului într-un domeniu de unghiuri și lumina cuplată în exterior la celălalt capăt al ghidului este măsurată cu ajutorul unui fotodetector. Măsurând intensitatea la ieșirea din ghidul optic putem obține graficul intensității măsurate în funcție de unghiul θ . Graficul intensității va fi asemănător cu cel de la ghiduri monomod

doar că vom avea mai multe maxime ale intensității corespunzătoare fiecărui mod al ghidului optic.

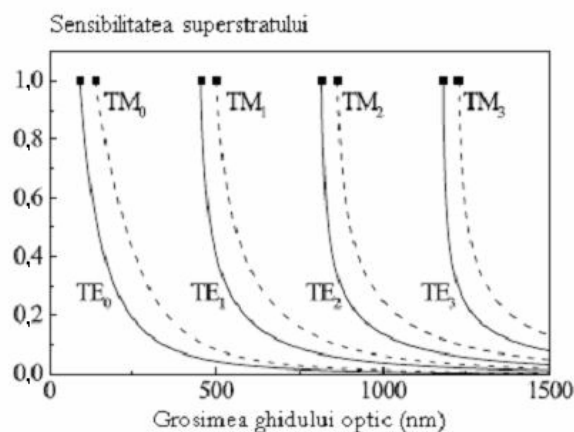


Fig. 12. 32. Sensibilitatea calculată a indicelui de refracție al superstratului $\frac{\partial N_m}{\partial n_c}$ în funcție de lățimea ghidului optic (miezului) pentru lumina polarizată TE și TM.

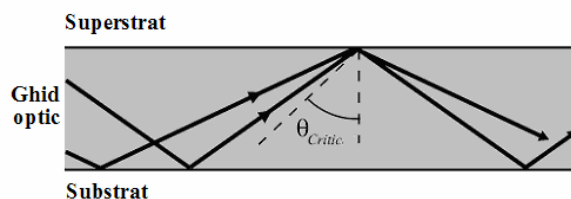


Fig. 12. 33. Propagarea luminii într-un ghid de undă planar multimod.

O variație a indicelui de refracție al superstratului va da o variație a diferenței de fază a luminii reflectate la interfața ghid/superstrat și deci un unghi incident θ_m pentru care fronturile de undă sunt în fază. Principiul detecției în ghidurile optice de undă multimod cu simetrie inversă este asemănător cu cel în ghiduri monomod, și anume constă în detectarea variației poziției unui mod datorită variației indicelui de refracție al superstratului n_c . Astfel, pentru ghidurile multimod mai multe moduri pot fi excitate și pentru toate vom avea o variație a poziției unghiulare datorită variației indicelui de refracție al superstratului.

Senzori fabricați în ghiduri de undă cu substrat de metal. Un ghid de undă acoperit cu un substrat de metal este o structură de ghid dielectric format din patru straturi, și anume: un substrat (s), un strat subțire de metal (m), un ghid optic dielectric (miezul), (g) și un superstrat (c). Structura unui astfel de ghid este similară celei a unui ghid dielectric convențional, doar că mai există un strat de metal introdus între substrat și ghidul optic (fig. 12. 34).

Principiul de bază al detecției este similar celui de la ghidurile dielectrice, numai că în acest caz nu mai avem reflexie internă totală la ambele interfețe ghid/superstrat și respectiv ghid/substrat, ci doar la interfața ghid/superstrat. La interfața ghid/metal, după cum se vede și în figura 12. 59, avem reflexie normală, o parte din lumină fiind transmisă în stratul de metal și substrat. Aceasta este parțial reflectată înapoi în ghidul optic la interfața ghid/metal.

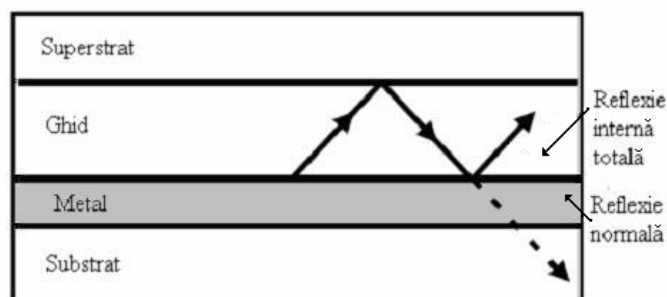


Fig. 12. 34. Configurația de bază a unui ghid de undă acoperit cu metal. În acest caz există reflexie internă totală la interfața ghid/superstrat și reflexie normală la interfața ghid/metal.

Un mod se obține atunci când fasciculele reflectate în ghid produc o interferență constructivă. Datorită reflexiei luminii transmise la ambele interfețe este posibilă excitarea unui mod în ghidul de undă acoperit cu metal. Ca și în cazurile precedente, un mod se obține atunci când fronturile de undă ale luminii ce se propagă în ghid sunt în fază. Ecuația pentru deplasarea de fază totală pentru ghidurile de undă acoperite cu metal este de forma:

$$2\pi m = \Phi_{\Delta s} + \Phi_{g,c} + \Phi_{g,m,s} \quad (12.25)$$

unde $\Phi_{\Delta s}$ este variația de fază datorată diferenței de drum optic dintre două puncte a și b, $\Phi_{g,c}$ reprezintă deplasarea de fază a luminii reflectate la interfața ghid/superstrat, iar $\Phi_{g,m,s}$ este deplasarea de fază a luminii reflectate la interfața ghid/metal/superstrat, iar $\Phi_{g,m,s}$ este dat de relația:

$$\Phi_{g,m,s} = 2\text{tg}^{-1} \left\{ i \left[\frac{1 - r_{gM}}{1 + r_{gM}} \right] \left[\frac{1 - r_{ms} \exp(i2k_{z,m}d_m)}{1 + r_{ms} \exp(i2k_{z,m}d_m)} \right] \right\}, \quad (12.26)$$

în care: r_{gm} reprezintă coeficientul de reflexie dintre straturile ghid și metal, r_{ms} este coeficientul de reflexie dintre metal și substrat, iar d_m reprezintă lățimea stratului de metal.

Principiul de funcționare a senzorului fabricat în ghiduri de undă acoperite cu metal este asemănător ca în cazurile precedente. O variație a indicelui de refracție al superstratului n_c determină o variație a deplasării de fază $\Phi_{g,c}$ la interfața ghid/superstrat, care induce în final o variație a lui $\Phi_{\Delta s}$ pentru care

modul este excitat. Operarea senzorilor fabricați în ghiduri de undă acoperite cu metal este oarecum diferită de cea a senzorilor fabricați în ghiduri dielectrice datorită acestui strat de metal. În cazul senzorilor fabricați în ghiduri de undă acoperite cu metal structura ghidului este iluminată din partea de jos și intensitatea reflectată este măsurată. În figura 12. 35 este prezentat modul de operare al acestui tip de sensor atunci când operează în modul reflexie. În acest caz este utilizată o prismă optică pentru cuplarea luminii.

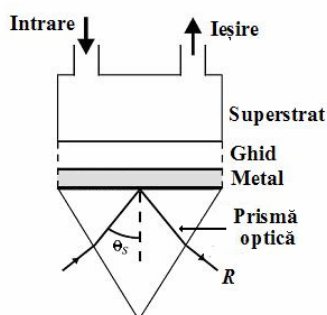


Fig. 12. 35. Configurația unui senzor fabricat în ghid optic de undă acoperit cu metal și cu o prismă optică.

Ghidul de undă acoperit cu metal și prismă optică sunt încorporate, după cum se poate vedea și în figura 12. 35, într-o singură unitate prin depunerea substratului de metal și a ghidului optic direct pe prismă, caz în care prismă devine substratul. O cuvă este plasată deasupra structurii ghidului, pe suprafața liberă a superstratului. Aceasta are două tuburi de intrare și respectiv ieșire, care fac posibilă variația mediului superstrat. Ghidul de undă acoperit cu metal este iluminat prin prismă la un unghi θ_s . Întregul dispozitiv este plasat pe un suport rotativ pentru a varia unghiul de incidență.

Ecuția modului ghidului de undă pentru structura cu metal se scrie asemănător cazului ghidurilor dielectrice, plecând de la ecuațiile Maxwell și condițiile la limită descrise în capitolele precedente. Pentru ghidurile de undă acoperite cu metal cu prismă cuplată, reflectanța totală poate fi calculată folosind legile Fresnel de reflexie.

12.2.3. Tipuri de senzori fabricați în ghiduri optice de undă

Senzor pentru măsurarea temperaturilor înalte. Shema bloc a unui senzor de temperatură fabricat în ghiduri de undă bazat pe rețele Bragg este prezentată în figura 12. 36 [12.13].

Acest senzor este capabil să măsoare temperatura în intervalul de la temperatura camerei până în jur de 1200°C. Partea principală a acestui senzor o constituie ghidul de undă cu rețea Bragg (fig. 12. 37).

Acesta poate fi numit pe scurt rețea Bragg integrată. Sursa de lumină o constituie o diodă laser ce emite în infraroșu la lungimea de undă de 1550 nm și lărgimea de bandă de 30 nm. S-au folosit fibre optice de safir datorită pierderilor

mici de putere. Temperatura poate fi măsurată în două etape. Prima etapă constă în măsurarea deplasării lungimii de undă cu ajutorul unui analizor de spectru optic (OSA). Deplasarea lungimii de undă poate fi convertită într-o variație a temperaturii mediului. Această metodă este valabilă în cazul unor temperaturi în intervalul $20^{\circ}\text{C} \div 600^{\circ}\text{C}$. Cea de-a doua etapă constă în măsurarea puterii radiației probei pentru intervalul de temperatură de la 600°C până la punctul de topire al probei. Acest tip de senzor poate fi utilizat în industria aerospațială.

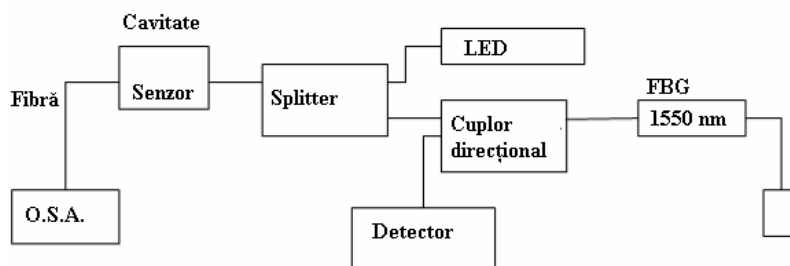


Fig. 12. 36. Schema bloc a senzorului pentru măsurarea temperaturilor înalte.

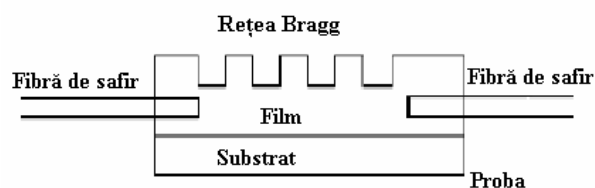


Fig. 12. 37. Rețeaua Bragg a senzorului de temperatură.

Principiul acestui senzor este simplu. O variație a temperaturii determină o modificare a perioadei rețelei, precum și o variație a indicelui de refracție al materialului. Aceste variații determină la rândul lor o deplasare a lungimii de undă, care poate fi observată cu ajutorul analizatorului de spectru optic. Prin măsurarea acestei deplasări poate fi determinată temperatura aplicată. În general, astfel de senzori lucrează numai în intervale mici de temperatură. În cazul de față s-a folosit un ghid de undă dielectric cu rețea Bragg care permite măsurarea temperaturii de la temperatura camerei până în jurul a 1200°C , combinând detecția intensității radiației cu rețelele Bragg.

Crearea unor striații periodice sau modularea indicelui de refracție într-un ghid optic de undă formează o rețea Bragg. Rețelele Bragg au fost construite pe un substrat de siliciu și pot fi considerate ca un corp negru. Un corp negru este definit ca fiind un corp care absoarbe toată energia ce cade pe suprafața sa. Pentru un astfel de corp:

$$\alpha_{\lambda}(T) = 1 \quad (12.27)$$

unde $\alpha_{\lambda}(T)$ reprezintă coeficientul de absorbție. Astfel toate radiațiile incidente pe corp sunt reemise. Se știe că în natură nu există corpuri perfect negre. Legea

radiației corpului negru (Planck) permite calculul densității spectrale de energie a unui corp în funcție de temperatura acestuia:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (12.28)$$

unde λ este lungimea de undă, T este temperatura absolută, h este constanta Planck, c reprezintă viteza luminii în vid, iar k este constanta Boltzmann. Prin constituirea unei minicavități de corp negru la un capăt al fibrei optice, dependența de temperatură a radiației cavității poate fi considerată ca radiație a corpului negru. Atunci, procesul de determinare a temperaturii se reduce la detecția distribuției spectrale a radiației. Dacă detectorul înregistrează o singură lungime de undă, atunci intensitatea radiației corpului negru va depinde numai de temperatura aplicată. În acest caz, legea lui Planck poate fi rescrisă sub forma:

$$I(T) = \frac{2hc^2}{\lambda_0^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda_0 kT}\right) - 1} \quad (12.29)$$

în care: λ_0 reprezintă o singură lungime de undă. Ținând cont de această relație se poate reprezenta grafic intensitatea radiației corpului negru în funcție de temperatură pentru diferite lungimi de undă. Aceste lungimi de undă sunt tipice pentru fibrele optice de sticlă.

Condiția Bragg de difracție este dată de relația:

$$\lambda_0 = 2n_{ef}\Lambda \quad (12.30)$$

unde λ_0 este lungimea de undă în spațiul liber, Λ reprezintă perioada Bragg, iar n_{ef} este indicele de refracție efectiv al structurii, care depinde de materialele din care este compus ghidul de undă. O variație a temperaturii va conduce la o variație a perioadei spațiale a rețelei și a indicilor de refracție ai materialelor. Deplasarea lungimii de undă în funcție de variația de temperatură pentru o lungime de undă dată a modului este dată de relația:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{ef}} \cdot \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha_{n_{ef}} + \alpha_\Lambda) \Delta T \quad (12.31)$$

Valorile practice ale acestor constante pentru dioxidul de siliciu sunt:

$$\alpha_\Lambda = 12.3 \times 10^{-6} / \text{K} \quad \text{și} \quad \alpha_{n_{ef}} = 6.67 \times 10^{-6} / \text{K}.$$

Senzor pentru măsurarea concentrației de ioni. În ultimii ani au fost dezvoltate mai multe tipuri de senzori pentru măsurarea concentrațiilor ionilor de Na^+ , Ca^{++} , K^+ și Cl^- . Aceste tipuri de senzori pot selecta un ion specific și măsura concentrația acestuia ce depinde de materialele adăugate în membrana ghidului de undă. Un exemplu de astfel de senzor este cel în care ghidul de undă este fabricat cu trei straturi, și anume: substratul din sticlă pirex, ghidul de undă împrăștiat cu sticlă de tip Corning 7059 și stratul probă format dintr-o membrană

senzor de PVC și/sau camera probei (fig. 12. 65). Acest tip de senzor este utilizat pentru a măsura concentrația ionilor de Na^+ și Ca^{++} [12.13]. S-a observat că acest tip de senzor are o sensibilitate înaltă la lungimea de undă de 488 nm a laserului cu argon.

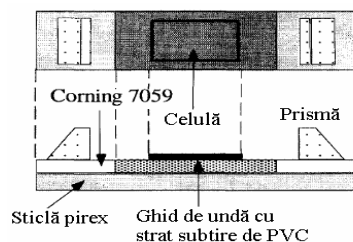


Fig. 12. 38. Structura senzorului fabricat în ghid de undă cu strat subțire de PVC.

Schema bloc a dispozitivului experimental utilizat pentru determinarea concentrației ionilor de Na^+ și Ca^{++} este prezentată în figura 12. 39.

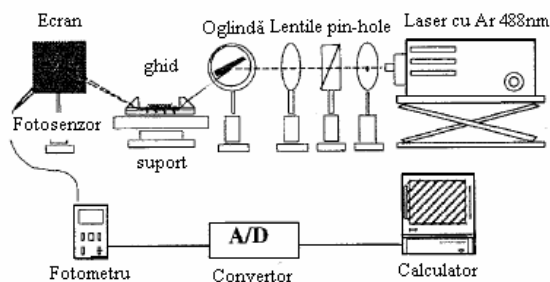


Fig. 12. 39. Schema bloc a senzorului pentru măsurarea concentrației de ioni.

Laserul folosit este un laser cu Ar cu lungimea de undă de 488 nm. Pe membrana ghidului de undă este depusă o soluție de tip K23E1 pentru selecția ionilor de Ca^{++} și de tip C14DD16C5 pentru selecția ionilor de Na^+ . Lumina laser polarizată transversal electric este cuplată în ghidul de undă printr-o prismă localizată la distanța focală a lentilei. Fasciculul laser se propagă în ghidul de undă și este decuplat la ieșirea din prisma optică. Puterea de ieșire decuplată este măsurată cu ajutorul unui powermetru. Pentru a evalua caracteristicile acestui senzor au fost utilizate soluții de NaCl și CaCl_2 ale căror concentrații au fost crescute treptat în timpul experimentului, de la 10^{-5} moli până la 10^{-1} moli.

Semnalul de ieșire decuplat a fost măsurat în cazul fiecărei concentrații. Acest tip de senzor s-a dovedit a fi foarte eficient ca senzor de ioni. Apa distilată sau o soluție tampon a fost utilizată în acest caz ca soluție referință. Soluția referință a fost depozitată în camera probei cu ajutorul unei micropipete, iar puterea transmisă a fost măsurată. După depunerea probei în cameră s-a măsurat puterea transmisă prin probă la lungimea de interacțiune L , acest fapt permițând

obținerea intensității relative. Intensitatea relativă depinde puternic de lungimea de interacțiune și grosimea ghidului de undă. Măsurarea acestor puteri de ieșire permite și determinarea coeficientului de absorbție al substanțelor folosite.

În general, senzorii pentru măsurarea concentrației de ioni au la bază electrozi. Aceștia au o sensibilitate scăzută, ceea ce face dificilă detecția în cazul materialelor cu reactivitate foarte mică.

Biosenzor optic integrat bazat pe interferometrul Mach-Zehnder.

Dispozitivele optice integrate sunt foarte des utilizate în realizarea senzorilor chimici și biochimici. Aceste tipuri de senzori sunt fabricați în general având la bază interferometrul Mach-Zehnder. Dispozitivele Mach-Zehnder au de obicei o sensibilitate înaltă, sunt ușor de fabricat și pot fi foarte tolerante la erori de construcție.

Pentru ca traductorul să răspundă la variații mici de semnal este necesar ca dispozitivul să opereze într-o regiune sensibilă a curbei de răspuns. Acest lucru conduce la cerința, pentru senzorii interferometrici, ca punctul de operare să nu fie aproape de un maxim sau minim al funcției de interferență. Un senzor integrat optic construit pe baza unui interferometru detectează modificarea indicelui de refracție produsă de prezența speciilor moleculare de pe suprafața ghidului de undă. Pentru detectarea probelor biochimice este necesară fixarea unei substanțe specifice (de exemplu anticorpi) pe suprafața miezului ghidului de undă.

În figura 12. 40 sunt ilustrate două exemple de dispozitive optice integrate Mach-Zehnder [12.13]. Ghidurile de undă folosite în aceste interferometre sunt de tip monomod. Un braț al interferometrului este expus la superstrat printr-o fereastră realizată în stratul izolator. Variațiile în această regiune (variațiile indicelui superstratului) determină o variație a indicelui efectiv al modului ghidului de undă (Δn_{eff}), care introduce o diferență de fază $\Delta n_{eff} k_0 L$ în lumina care traversează acest braț (k_0 este vectorul de undă în spațiul liber, iar L este lungimea de interacțiune).

Spre deosebire de dispozitivele optice integrate tipice Mach-Zehnder ilustrate în figura 12. 40 a), în cazul structurii cu trei ieșiri (fig. 12. 40 b)) puterea nu se pierde după recombinarea semnalului de la cele două brațe ale interferometrului. Suma celor trei ieșiri rămâne astfel aproape constantă pentru superstraturi nonabsorbante și poate fi folosită ca referință pentru puterea totală de intrare. Brațul senzor al interferometrului optic integrat constituie locul unde speciile biologice se află în contact direct cu miezul ghidului de undă.

Principiul senzorului este simplu. Biosenzorul optic integrat Mach-Zehnder detectează interacțiunea dintre stratul biologic și câmpul evanescent. Variația indicelui de refracție de pe brațul senzor al interferometrului determină interferența semnalului de ieșire datorită diferenței de fază dintre cele două brațe.

Un exemplu de dispozitiv experimental utilizat pentru detecții biochimice este prezentat în figura 12. 68 [12.13]. S-au folosit în acest experiment ghiduri de undă fabricate în sticlă de tip BGG (cu indicele de refracție 1,6 la lungimea de undă de 786 nm) prin schimb ionic $Ag^+ - Na^+$, utilizând tehnica fotolitografierii. Ca mască a fost folosit un strat de Ti. Materialul izolator folosit a fost teflon FEP.

Lumina provenită de la o diodă laser cu lungimea de undă 786 nm, polarizată TM, este cuplată în senzor. La ieșirea din senzor lumina este colectată utilizând o lentilă obiectiv și apoi este focalizată pe trei fotodetectoare de Si. Semnalele de lumină provenite de la fotodetectoare sunt măsurate utilizând amplificatoare lock-in, iar datele sunt achiziționate simultan cu ajutorul unui calculator.

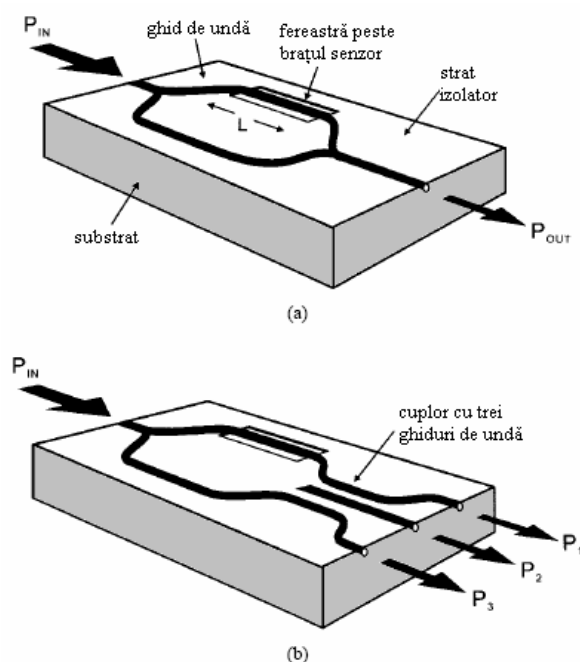


Fig. 12. 40. Dispozitiv Mach-Zehnder: a) tipic și b) cu trei ieșiri.

Sisteme inteligente de senzori. *Senzorii inteligenți cu fibre optice* s-au dezvoltat cu precădere în ultimii zece ani și au fost aplicați mai întâi în domeniul metrologiei optice, iar mai apoi în cadrul unor sisteme speciale cum ar fi de exemplu sistemul de poziționare globală (*Global Positioning System-GPS*) [12.13]. Aceștia sunt strict legați de monitorizarea structurală și reprezintă prima etapă în construirea unui sistem inteligent de senzori, celelalte etape fiind legate de procesare și comandă.

Pentru a defini un *sistem inteligent de senzori* se poate face o paralelă cu capacitățile corpului omenesc care poate fi privit ca un sistem de senzori (nervii), purtătorii de informație (măduva spinării) și unitățile pentru procesare (creierul mic și cortexul). Senzorii inteligenți pot fi priviți ca o combinație de tehnologii (senzori, purtători și procesori de informație și interfețe) care permit realizarea unei *structuri inteligente*.

În cazul unui subsistem de senzori se pot distinge următoarele cinci subsisteme: *senzorii, purtătorii de informație, unitatea de citire, unitatea pentru procesare și interfața externă* (fig. 12. 41).

Combinând capacitățile senzorilor cu dispozitivele de comandă este posibilă crearea unei structuri care să aibă posibilitatea de autoreparație, controlul formei, capacități de vibrație/amortizare, adică un sistem inteligent de senzori.

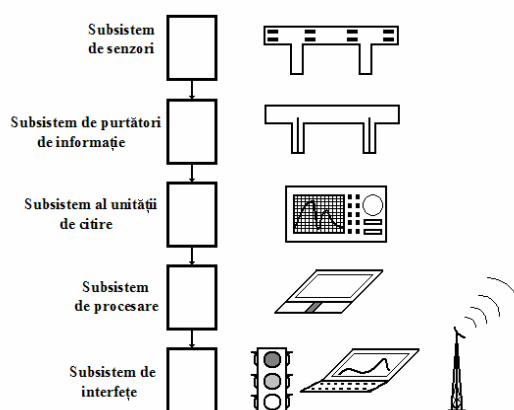


Fig. 12. 41. Schema bloc a unui subsistem de senzori.

Există deja structuri care prezintă cel puțin câteva dintre capacitățile amintite anterior, cum ar fi de exemplu: avioanele și automobilele moderne, fabricile și uzinele în care activitatea este comandată și robotizată etc.