

## 6. CUPLOARE OPTICE INTEGRATE

### 6.1. Ghiduri de undă cuplate

În cazul când o structură ghidată este perturbată, de exemplu datorită prezenței unei rețele sau a unui alt ghid apropiat, soluțiile ecuațiilor Maxwell devin adesea foarte dificil de obținut.

Două *ghiduri optice de undă* sunt *cuplate* dacă între acestea se asigură un transfer maxim de energie. În cazul perturbațiilor slabe, câmpurile în structura perturbată pot fi descrise printr-o superpoziție a soluțiilor câmpurilor corespunzătoare structurii originale neperturbate, care pot fi determinate relativ simplu. Această aproximație stă la baza formalismului modurilor cuplate. Pe baza acestui formalism amplitudinile câmpurilor sunt descrise de un set de ecuații diferențiale cuplate. Dacă materialul din care este confecționat ghidul este liniar și ecuațiile diferențiale sunt liniare. Deși există cazuri în care setul de ecuații diferențiale cuplate poate prezenta o soluție analitică, în general, pentru rezolvarea acestora trebuie utilizate tehnici numerice [6.1].

#### 6.1.1. Cuploare direcționale

Un *cuplor optic* se numește *directional* dacă transmite lumina în mod preferențial într-o anumită direcție. Pentru a pune în evidență cuplajul direcțional se consideră două ghiduri optice de undă *a* și *b* (fig. 6. 1).

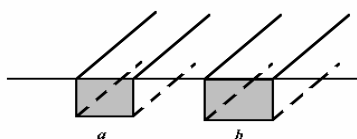


Fig. 6. 1. Cuplarea a două ghiduri *a* și *b* pentru a forma un ghid compus *c*.

Dacă cele două ghiduri sunt suficient de apropiate câmpul din fiecare ghid este influențat de prezența celui din ghidul vecin. Sistemul celor două ghiduri poate fi considerat ca un ghid compus *c* care suportă un set de moduri  $e_{ci}$ . Câmpul  $E_c$  al structurii compuse *c* poate fi scris ca o suprapunere a acestor moduri. Această descompunere modală dă o descriere exactă a câmpului  $E_c$  dacă toate modurile, inclusiv cele radiante, sunt luate în considerare (*teoria modurilor cuplate*).

#### 6.1.2. Teoria modurilor cuplate

Pe de altă parte, sistemul *c* poate fi considerat de asemenea ca fiind format din două ghiduri cuplate. În acest caz, ghidul *a* este perturbat de ghidul vecin *b* și invers. Aceste perturbații determină un schimb de energie între ghidurile *a* și *b*. Câmpul  $E_c$  corespunzător structurii compuse *c* poate fi aproximat printr-o suprapunere a modurilor  $e_{am}$  și  $e_{bm}$  care caracterizează ghidurile originale *a* și *b*:

$$E_c = \sum_m A_m(z) e_{am} \exp[i(\omega t - \beta_{am} z)] + \sum_n B_n(z) e_{bn} \exp[i(\omega t - \beta_{bn} z)]. \quad (6.1)$$

Această aproximație permite calculul modurilor sistemului compus  $e_{ci}$ . Din cauza schimbului de energie dintre modurile ghidurilor  $a$  și  $b$  coeficienții dezvoltării variază cu distanța  $z$  de-a lungul structurii compuse.

Dacă ghidurile  $a$  și  $b$  sunt monomodale ecuația (6.1) devine:

$$E_c = A(z)e_a \exp[i(\omega t - \beta_a z)] + B(z)e_b \exp[i(\omega t - \beta_b z)]. \quad (6.2)$$

Înlocuind relația (6.2) în ecuațiile lui Maxwell

$$\left( \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \right), \text{ se obține un sistem de două ecuații cuplate pentru}$$

amplitudinile undelor de forma:

$$dA/dz = -i\Delta\beta_a A - ik_{ab}B \exp[-i(\beta_a - \beta_b)z] \quad (6.3)$$

$$dB/dz = -i\Delta\beta_b B - ik_{ba}A \exp[i(\beta_a - \beta_b)z] \quad (6.4)$$

în care:

$$k_{ab,ba} = \frac{\omega\epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x,y) - n_{b,a}^2(x,y)] e_{a,b} \cdot e_{b,a}^* dx dy \quad (6.5)$$

$$\beta_{a,b} = \frac{\omega\epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [n_c^2(x,y) - n_{a,b}^2(x,y)] e_{a,b} \cdot e_{b,a}^* dx dy. \quad (6.6)$$

Pentru deducerea ecuațiilor (6.3), (6.4) s-a considerat că amplitudinile undelor variază puțin cu distanța de propagare (*cuplaj slab*) și s-au neglijat derivatele de ordinul doi.

Funcția  $n_c(x,y)$  din relațiile (6.5), (6.6) reprezintă *distribuția indicelui de refracție corespunzătoare ghidului compus  $c$* , iar  $n_a(x,y)$  și  $n_b(x,y)$  cele ale ghidurilor inițiale  $a$  și  $b$ . Coeficienții de cuplaj  $k_{ba}$  și  $k_{ab}$  determină transferul energiei între cele două ghiduri.

Considerând că unitatea de putere la intrarea în ghidul  $a$  este  $|A(0)|^2 = 1$ , iar în ghidul  $b$ ,  $|B(0)|^2 = 0$ , în urma integrării numerice a sistemului de ecuații diferențiale (6.3), (6.4) se poate obține dependența de lungime ( $L$ ) a puterilor la ieșirea din ghid (fig. 6.2).

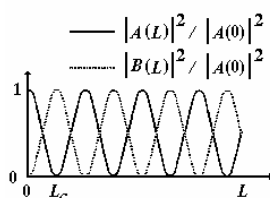
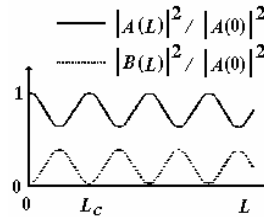


Fig. 6. 2. Puterea transferată între două ghiduri optice de undă cuplate sincron în funcție de lungimea ghidurilor,  $L$ .

Se observă că în cazul *cuplajului sincron* ( $\beta_a = \beta_b$ ) există un transfer total de putere între ghiduri pe o *lungime de cuplaj*,  $L_c = \pi/2k$  (cu  $k_{ba} = k_{ab} = k$ ).

În cazul *cuplajului asincron* ( $\beta_a \neq \beta_b$ ) nu există transfer total de putere între ghiduri, așa cum se poate observa din figura 6. 3.



**Fig. 6. 3.** Puterea transferată între două ghiduri optice de undă cuplate asincron în funcție de lungime ghidurilor,  $L$ .

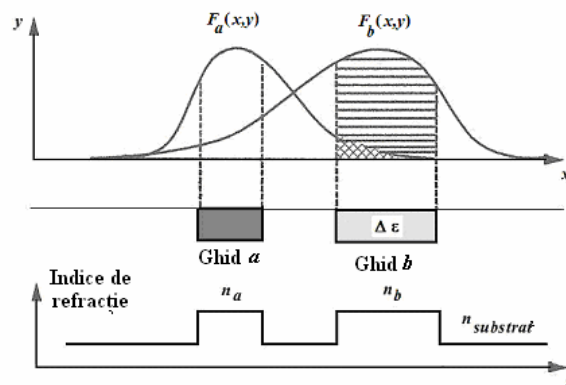
Formalismul cuplării modurilor poate fi folosit pentru analiza cuploarelor direcționale, dar și a *sistemelor multighid*. În cadrul dispozitivelor optoelectronice integrate cuplorii direcționali constituie elemente fundamentale [6.2]-[6.13].

În cazul general câmpurile optice variază și în planul  $xOy$  perpendicular pe direcția de propagare  $z$ . Considerând că  $\Psi_a$  și  $\Psi_b$  descriu câmpurile optice asociate cu modurile ghidate ale sistemului de ghiduri  $a$  și  $b$  (fig. 6. 4) se poate scrie că [6.7]:

$$\Psi_a(x, y, z, t) = A(z) \cdot e^{-i\beta_a z} \cdot F_a(x, y) \cdot e^{-i\omega t} \quad (6.7)$$

$$\Psi_b(x, y, z, t) = A(z) \cdot e^{-i\beta_b z} \cdot F_b(x, y) \cdot e^{-i\omega t} \quad (6.8)$$

unde  $F_{a,b}(x, y)$  reprezintă funcțiile de distribuție ale câmpurilor care au fost normalizate la fluxul de putere pe secțiunea transversală sistemului compus.



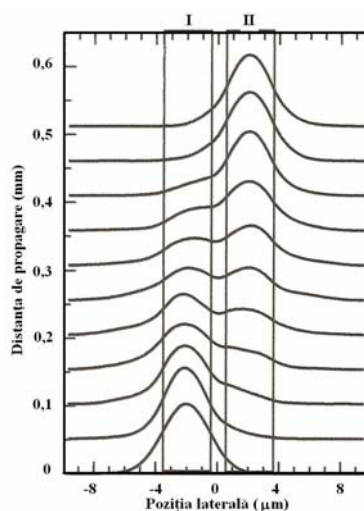
**Fig. 6. 4.** Profilurile modurilor și al indicelui de refracție în cazul a două ghiduri cuplate.

Coeficientul de cuplaj poate fi calculat cu ajutorul relației:

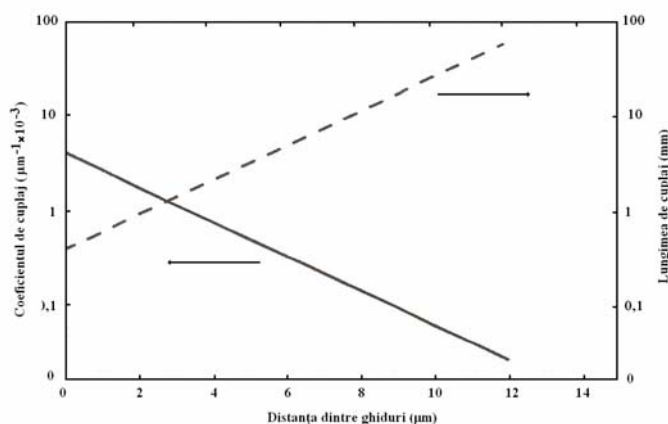
$$\kappa_{ab}(z) = \frac{k_0^2}{2\beta_a} \frac{\iint F_a^*(x, y) \Delta\varepsilon(x, y, z) F_b(x, y) dx dy}{\iint F_a^*(x, y) F_b(x, y) dx dy} \quad (6.9)$$

în care:  $\Delta\varepsilon$  reprezintă variația constantei dielectrice indusă de perturbație în structura originală neperturbată (variația lui  $\varepsilon$  corespunde în acest caz numai ghidului  $b$ ).

În figura 6. 5 este prezentat profilul intensității transversale calculate pe baza teoriei modurilor cuplate în cazul unei structuri compuse din două ghiduri optice de undă planare având indicele de refracție  $n=1,4342$  aflate la distanța de  $1 \mu\text{m}$  pentru o radiație cu lungimea de undă  $\lambda=633 \text{ nm}$  în polarizarea TE, iar în figura 6. 6 sunt prezentate variațiile coeficientului de cuplaj și lungimii de cuplaj în funcție de distanța dintre ghiduri.



**Fig. 6. 5.** Profilul intensității transversale în cazul unei structuri compuse din două ghiduri optice de undă planare în polarizarea TE.



**Fig. 6. 6.** Coeficientul de cuplaj și lungimea de cuplaj în funcție de distanța dintre ghiduri.

În practică, cuploarele direcționale sunt confecționate din două ghiduri optice de lățime  $d$ , curbate în formă de  $S$ ,  $R$  fiind raza de curbură și apropiate până la o anumită distanță  $s$  care să permită schimbul de energie pe o porțiune din lungimea lor numită și *lungime de cuplaj (interacțiune)*,  $l$ , porturile de intrare (1, 2) și respectiv de ieșire (1', 2') fiind separate (fig. 6. 7).

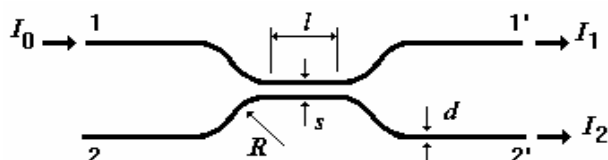


Fig. 6. 7. Schema unui cuplor direcțional.

În cazul unor ghiduri îngropate în substrat de siliciu având lungimea de 20 mm caracterizate printr-o diferență relativă a indicilor de refracție ( $\Delta$ ) mică (aproximativ 7 %) și o rază de curbură de 50 mm pierderile totale sunt de 0,3 dB, cu 0,1 dB mai mult decât cele corespunzătoare ghidurilor perfect liniare. Pierderile datorită curbării ghidurilor cresc foarte mult odată cu micșorarea razei de curbură. Pentru a obține cuploare direcționale cu lungimi mici trebuie mărită diferența relativă a indicilor de refracție.

O mărime ce caracterizează cuploarele direcționale este *raportul puterilor cuplate*,  $\eta$  definit cu ajutorul relației:

$$\eta = \frac{I_2}{I_1 + I_2} = \sin^2\left(\frac{\pi l}{2L}\right) \quad (6.10)$$

unde  $L$  este lungimea corespunzătoare unui cuplaj perfect între ghiduri. Ținând seama de dimensiunea razei de curbură a ghidurilor în formă de  $S$ , relația (6.10) devine:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi l + \Delta l}{2L}\right) \quad (6.11)$$

unde  $\Delta l$  reprezintă mărirea efectivă a lungimii de interacțiune datorită curbării ghidurilor. Mărimile  $L$  și  $\Delta l$  pot fi determinate din dependența raportului puterilor de cuplaj în funcție de lungimea de interacțiune  $l$  cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate. Lungimea corespunzătoare unui cuplaj perfect între ghiduri crește odată cu mărirea distanței dintre ghiduri, ajungând la o valoare de aproximativ 2,5 mm pentru  $s = 4 \mu\text{m}$  în cazul unei radiații având lungimea de undă de  $1,55 \mu\text{m}$ . Ținând seama de caracteristicile experimentale ale cuploarelor direcționale se pot fabrica cuploare de 3 dB de tipul *interferometrelor Mach-Zehnder simetrice*.

## 6.2. Interferometrul Mach-Zehnder integrat simetric

Interferometrul Mach-Zehnder simetric prezentat schematic în figura 6. 8 este format din două cuploare direcționale legate prin două ghiduri ale căror lungimi sunt egale [6.2], [6.3].

În cazul interferometrelor Mach-Zehnder simetrice formate din ghiduri îngropate în substrat de siliciu pentru a obține efectele de comutare și modulația luminii se încălzește local filmul subțire cu ajutorul unui încălzitor, rezultând o deplasare a fazei datorită variației indicelui de refracție cu temperatura. Pentru ghiduri optice având ca substrat siliciul, variația indicelui de refracție cu temperatura este  $\frac{\Delta n}{\Delta T} = 1 \times 10^{-5}$ . De exemplu, în cazul unui ghid cu lungimea de 5 mm care este încălzit cu 30°C lungimea drumului optic pentru o radiație cu lungimea de undă 1,5 μm variază cu 1,5 μm, iar faza se deplasează cu  $2\pi$ .

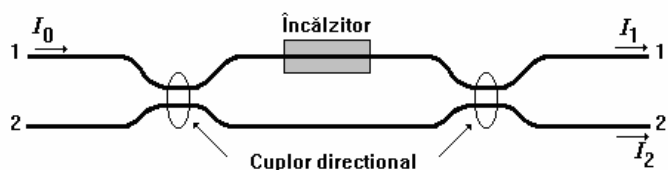


Fig. 6. 8. Interferometrul Mach-Zehnder simetric.

Încălzitorul este de fapt un film subțire din crom (obținut în urma evaporării unui strat de 20 μm sub acțiunea unui fascicul de electroni) având lungimea de 5 mm, grosimea de 300 nm și lățimea 12 μm. Rezistența încălzitorului este de 240 Ω, iar între brațele interferometrului este o distanță de 250 μm.

Dacă raportul puterilor cuplate pentru fiecare cuplor direcțional din figura 6. 5 este  $k$  și deplasarea fazei datorită încălzirii filmului este  $\Phi$ , atunci puterile la ieșire sunt date de relațiile [6.2]:

$$\frac{I_1}{I_0} = (1 - 2k)^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (6.12)$$

$$\frac{I_2}{I_0} = 4k(1 - k) \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right). \quad (6.13)$$

În cazul când  $k=1/2$ , cuploarele se mai numesc și de 3 dB, iar interferometrul acționează ca un comutator optic a cărui extincție este infinită.

În anumite condiții interferometrul Mach-Zehnder simetric poate acționa și în regim de cuplor acordabil. Raportul puterilor cuplate în cazul interferometrului

Mach-Zehnder simetric  $\left(\frac{I_2}{I_1 + I_2}\right)$  corespunde exact valorii de 3 dB dacă același

raport pentru fiecare cuplor direcțional în parte ( $k$ ) satisface următoarea ecuație:

$$\text{tg}^2(\Delta\Phi) = -8k^2 + 8k - 1 \geq 0 \quad (6.14)$$

adică

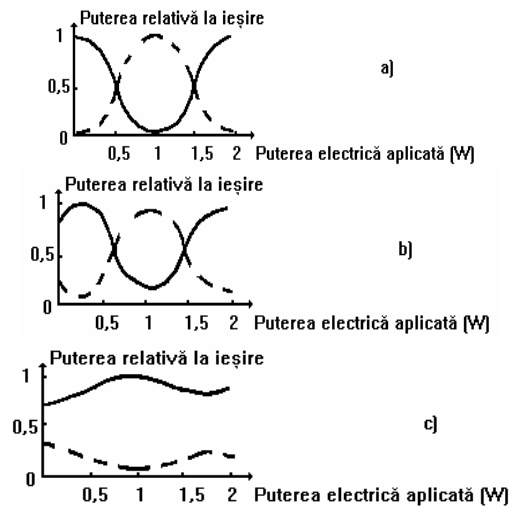
$$\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \leq k \leq \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2}}{4}. \quad (6.15)$$

Perioada transmisiei interferometrului Mach-Zehnder simetric variază proporțional cu puterea aplicată încălzitorului, așa cum se poate vedea și în figura 6. 9. Puterea necesară schimbării transmisiei de la valoarea maximă la cea minimă (sau invers) respectiv deplasării fazei cu  $\pi$  radiani este de 0,78 W [6.2]. Din figura 6. 6 a) se observă că atunci când  $k=0,55$  cuplorul direcțional acționează ca unul de tip 3 dB, extincția fiind de 17 dB. În cazul când  $k=0,67$  (fig. 6. 6 b)) extincția este de 8,2, dar raportul puterilor cuplate poate fi acordat exact la valoarea de 3 dB prin aplicarea unei puteri de 0,88 W încălzitorului. Dacă  $k=0,067$  (fig. 6. 6 c)), valoare care nu satisface relația (6.15), raportul puterilor cuplate nu mai corespunde valorii de 3 dB.

Interferometrul Mach-Zehnder simetric fabricat din ghiduri îngropate în substrat de siliciu în anumite condiții experimentale poate acționa și ca un comutator optic cu pierderi mici, prezentând avantajul că poate opera independent de polarizarea luminii. De asemenea, acesta mai poate fi folosit ca un cuplor direcțional acordabil, raportul puterilor cuplate putând fi ajustat exact la valoarea de 3 dB. Aceste funcțiuni ale interferometrului Mach-Zehnder simetric fac posibilă aplicarea lui în comunicațiile optice.

### 6.3. Interferometrul Mach-Zehnder integrat asimetric

*Interferometrul Mach-Zehnder asimetric* prezentat schematic în figura 6. 9 este format din două cuploare direcționale legate prin două ghiduri ale căror lungimi diferă cu mărimea  $\Delta L$ . Un astfel de interferometru poate acționa ca multiplexor sau demultiplexor pentru sistemele de transmisie optică bazate pe multiplexarea prin divizarea frecvenței, având un ecart de frecvență pentru un canal de ordinul GHz.



**Fig. 6. 9.** Dependența puterii relative la ieșire de puterea aplicată încălzitorului în cazul interferometrului Mach-Zehnder simetric pentru diferite valori ale raportului puterilor cuplate  $k$  : a)  $k=0,55$ , b)  $k=0,67$ , c)  $k=0,067$ . Curba continuă corespunde puterii la ieșirea din portul 1', iar cea discontinuă celei la ieșirea din portul 2' (fig. 6. 8).

Pentru interferometrul Mach-Zehnder asimetric prezentat în figura 6. 10 transmisiile  $T_t$ ,  $T_c$  de la portul 1 la portul 1', respectiv de la 2 la 2' se exprimă cu ajutorul relațiilor [6.3]:

$$T_t = \sin^2(Kv) \quad (6.16)$$

$$T_c = \cos^2(Kv) \quad (6.17)$$

în care:  $K = \frac{\pi n \Delta L}{c}$ ,  $\Delta L$  reprezintă diferența dintre lungimile brațelor celor două ghiduri optice (I și II),  $n$  este indicele de refracție al ghidului,  $v$  este frecvența luminii cuplate în ghid, iar  $c$  este viteza luminii în vid.

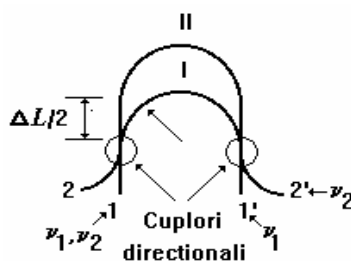


Fig. 6. 10. Interferometrul Mach-Zehnder asimetric.

Dacă două unde luminoase având frecvențele  $\nu_1$  și respectiv  $\nu_2$  care verifică relațiile  $K\nu_1 = (m+1)\pi$ ,  $K\nu_2 = m\pi$ ,  $m$  fiind întreg, sunt cuplate (*multiplexate*) în portul 1 atunci  $T_t = 1$  pentru semnalul cu frecvența  $\nu_1$  și  $T_c = 1$  pentru semnalul cu frecvența  $\nu_2$ . Ecartul de frecvență  $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$  dintre maximul și minimul curbei de transmisie este  $\frac{\pi}{2K} = \frac{c}{2n\Delta L}$ . Astfel,  $\Delta\nu = 5$  GHz

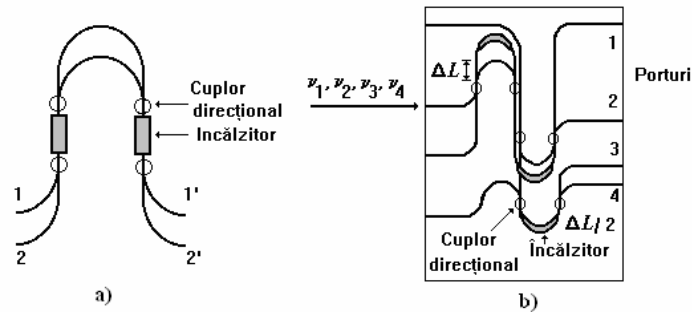
pentru  $n=1,47$  și  $\Delta L = 2,04$  cm. Deci, două unde luminoase ale căror frecvențe diferă cu o cantitate de ordinul GHz pot fi demultiplexate. Dacă două unde luminoase sunt cuplate în porturile 1' și respectiv 2' atunci acestea pot fi multiplexate, semnalul rezultat obținându-se în sens invers în portul 1.

Pentru a reduce efectul cuplajului parazit dintre circuitele de comunicații se poate utiliza un interferometru Mach-Zehnder modificat ca și cel din figura 6. 11 a) în care cele două cuploare direcționale din figura 6. 10 sunt înlocuite de două interferometre Mach-Zehnder simetrice care acționează ca niște cuploare acordabile, deci raportul puterilor cuplate poate fi acordat exact pe valoarea de 3 dB (v. 6.2). În acest caz, degradarea efectului de cuplaj parazit dintre circuitele de comunicații poate fi datorată deviației mici a raportului puterilor cuplate în cuploare de la valoarea de 3 dB.

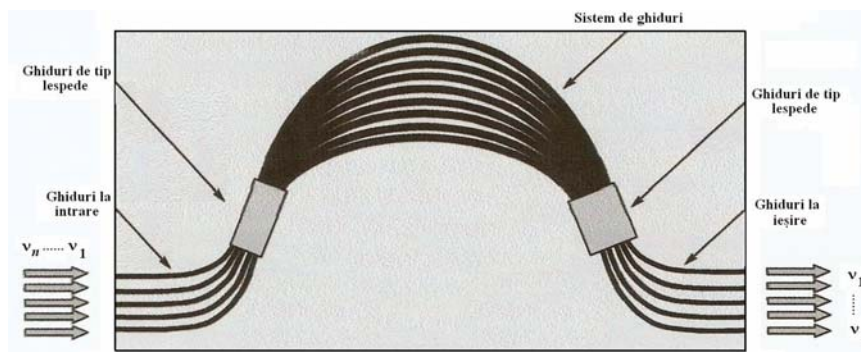
Pentru a *demultiplexa* patru radiații luminoase se poate utiliza un *multiplexor/demultiplexor* cu patru canale obținut prin legarea în serie a unui interferometru Mach-Zehnder asimetric având diferența dintre lungimile brațelor



ghidurilor de  $2\Delta L$  cu alt interferometru Mach-Zehnder asimetric având diferența dintre lungimile brațelor ghidurilor de  $\Delta L$ , așa cum este prezentat de exemplu în figura 6. 11 b) [6.3].



**Fig. 6. 11.** Schema multiplexorului/demultiplexorului pentru sistemele de transmisie optică: a) bazate pe multiplexarea prin divizarea frecvenței folosit pentru a reduce efectul cuplajului parazit dintre circuitele de comunicații; b) cu patru canale.



**Fig. 6. 12.** Schema unui multiplexor/demultiplexor cu mai multe canale.

Multiplicând acest procedeu au fost obținuți de exemplu multiplexori/demultiplexori cu 16 canale caracterizate printr-un ecart al frecvenței pentru un canal de 10 GHz, pierderi totale de 5 dB și un cuplaj parazit total mai mic decât 10 dB și în ultimii ani chiar cu mai multe canale (fig. 6. 12) [6.7].

#### 6.4. Dispozitive bazate pe fenomenul de interferență dependent de intensitatea radiației

Fenomenul de dependență a fazei unei unde de intensitatea radiației poate fi folosit pentru a modifica condițiile de interferență dintre două moduri sau două fascicule diferite [6.4].

##### 6.4.1. Cuplorul neliniar distribuit

Prismele și rețelele optice sunt dispozitivele cel mai des utilizate pentru excitarea modurilor ghidate într-un ghid planar. Cuplajul eficient se produce dacă este îndeplinită condiția (*de acordare a fazelor*):

$$k_0 n_s \sin \theta + K - \beta_0^{(m)} = \Delta \beta_0 = 0 \quad (6.18)$$

unde  $\theta$  este unghiul urmat de fasciculul incident cu normala la ghidul optic,  $n_s$  este indicele de refracție al superstratului, iar  $K = (n_p - n_s) \sin \theta$  în cazul prisme optice având indicele  $n_p$  sau  $K = \pm \frac{2\pi}{\Lambda}$  în cazul unei rețele cu perioada  $\Lambda$ . În cazul unui ghid planar cele mai potrivite dispozitive pentru realizarea cuplajului optic sunt rețelele optice.

Ținând seama de condiția de acordare a fazelor (6.18) care corespunde unui dezacord liniar zero  $\Delta \beta_0 \approx \Delta \theta k_0 n_s \cos \theta_0$  se poate observa că aparent o neliniaritate poate modifica această condiție reducând eficacitatea cuplajului sincron. Întrucât aceste efecte neliniare sunt induse de câmpurile intense ghidate, variațiile vectorilor de undă devin tot mai pronunțate odată cu creșterea amplitudinii câmpurilor care se măresc în regiunea de cuplaj datorită naturii distribuite a transferului de energie. În cazul unui fascicul incident gaussian cu amplitudinea  $a_{in}(z)$  de-a lungul suprafeței și un coeficient de cuplaj  $\Gamma$  determinat de geometria structurii ghid-cuplor, variația amplitudinii câmpului este determinată de ecuația:

$$\left[ \frac{d}{dz} + i(\Delta \beta_0 - \Delta \beta^{nl}) + \frac{1}{2}(\alpha_0 + \alpha_{imp} + \alpha_{2ef}|a(z)|^2) + \frac{1}{l_r} \right] a(z) = \Gamma a_{in}(z) \quad (6.19)$$

în care:  $\alpha_{imp}$  reprezintă pierderile prin împrăștiere,  $l_r$  este distanța caracteristică corespunzătoare pierderilor prin radieră, iar  $\Delta \beta^{nl}$  este variația vectorului de undă neliniar. În ecuația (6.19) a fost inclusă și absorbția bifonică prin termenul  $\alpha_{2ef}|a(z)|^2$ .

Dacă cuplorul este optimizat la puteri scăzute (cu  $\Delta \beta_0$ ) atunci o intensitate care induce efecte neliniare ( $\Delta \beta^{nl}$ ) produce o reducere a eficienței de cuplaj, iar dispozitivul acționează ca un limitator optic (chiar fără absorbție bifonică). În anumite condiții, dacă  $\Delta \beta_0$  are un semn potrivit, creșterea intensității îmbunătățește eficiența cuplajului, iar dacă se îndeplinește condiția de rezonanță dispozitivul funcționează ca un cuplor.

În figura 6. 13 este prezentată dependența eficienței de cuplaj în cazul unui *cuplor neliniar distribuit cu rețea* în funcție de energia pulsurilor incidente considerate gaussiene (v. Anexa 3) în spațiu (pentru a asigura cuplajul liniar optim) și timp și având o durată de 100 ps pentru diferite valori ale dezacordurilor unghiulare și  $n_2 > 0$ .

Din figura 6. 13 se observă că transferul maxim al energiei se obține pentru dezacorduri pozitive în timp ce pentru dezacorduri negative procesul de cuplaj este deteriorat.

Cuplorul neliniar distribuit poate fi utilizat în cazul configurațiilor experimentale cu două fascicule pentru rezolvarea problemelor dinamice în

domeniul temporal, pentru a controla forma fasciculului și pentru a caracteriza proprietățile ghidurilor planare, cu ajutorul acestuia putându-se obține informații despre mărimea și semnul indicelui de refracție neliniară  $n_2$ . De asemenea, utilizând cuplorul neliniară distribuit se poate face distincția dintre efectele de tip Kerr și cele de tip absorbant și respectiv termic.

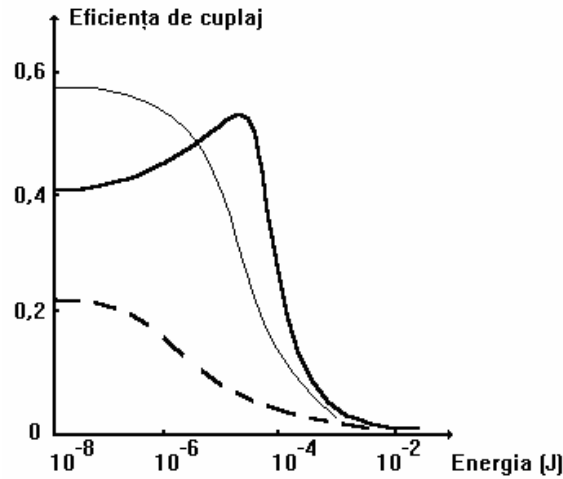


Fig. 6.13. Eficiența de cuplaj în funcție de diferite valori ale dezacordurilor unghiulare  $0^\circ$  (curba continuă subțire),  $0,025^\circ$  (curba continuă groasă) și  $-0,05^\circ$  (curba discontinuă).

#### 6.4.2. Interferometrul Mach-Zehnder integrat neliniar

Diferența de fază rezultată la capetele unui interferometru Mach-Zehnder integrat poate fi obținută și prin variația nivelului excitației utilizând fie interferometre cu brațe care nu au lungimi egale, fie diferite valori ale coeficientului neliniar  $n_2$ , fie arii efective diferite ale celor două ghiduri care compun interferometrul.

Ținând seama de expresia deplasării fazei neliniare care se poate acumula pe distanța de propagare  $L$  a ghidului

$$\Phi^{nl} = \int_L \Delta\beta^{nl} dz, \quad (6.20)$$

de valoarea coeficientului neliniar

$$\beta_2^{(m,n)} = k_0 \frac{n_2}{A_{ef}^{(m,n)}} \quad (6.21)$$

și considerând că puterea radiației incidente  $P_{in}$  se distribuie în mod egal între cele două brațe ale interferometrului, defazajul la ieșire este dat de relația:

$$\Delta\Phi^{nl} = (\Delta\beta_a^{nl} - \Delta\beta_b^{nl})L = \frac{1}{2}P_{in}k_0Ln_2 \left( \frac{1}{A_{ef,a}} - \frac{1}{A_{ef,b}} \right). \quad (6.22)$$

În cazul când diferența de fază este un multiplu impar de  $\pi$  câmpul rezultat la ieșire prezintă minime de interferență, iar răspunsul dispozitivului (*Kerr*) variază cosinusoidal cu excitarea

$$P_{ies} = P_{in} \cos^2\left(\Delta\Phi^{nl}/2\right). \quad (6.23)$$

Răspunsuri neliniare au fost obținute cu ajutorul unor interferometre Mach-Zehnder integrate având ca substrat  $\text{LiNbO}_3$  și o tensiune aplicată pe unul dintre brațele dispozitivului [6.4].

Cu ajutorul relației (6.22) se poate defini și o putere necesară comutării optice sub forma:

$$P_c = \frac{\pi}{L}(\beta_{2,a} - \beta_{2,b}). \quad (6.24)$$

Considerând  $A_{ef,b} = 2A_{ef,a}$ , pentru a obține efectul de comutare optică este necesar ca  $\Phi^{nl} = 2\pi$ . Utilizând pentru descrierea interferometrului Mach-Zehnder integrat modelul unui absorbant saturabil cu două niveluri se obține că variația indicelui de refracție saturat necesar comutării optice este definită de un factor  $\approx 2$ , care este mai mic decât în cazul altor dispozitive optoelectronice.

#### 6.4.3. Mixer neliniar de moduri

Operația de mixare optică neliniară a modurilor se poate face și cu ajutorul unui ghid optic care suportă două moduri, pe baza fenomenelor de interferență dintre acestea, la fel ca și în cazul când modurile ar interfera în ghiduri diferite.

În regim de operare variația diferențială a fazei determină secțiuni eficiente diferite din cauza efectului pe care distribuția modală a câmpului o are asupra neliniarităților (de exemplu  $A_{ef,b} \neq 2A_{ef,a}$  sau  $\beta_{2,a} \neq \beta_{2,b}$ , indicii  $a$  și  $b$  definind cele două moduri TE sau TM). Considerând că cele două moduri sunt excitate cu aceeași putere într-un mediu fără pierderi, deplasarea fazei este dată de relația (6.22) și un defazaj  $\Phi^{nl} = \pi$  determină comutarea stării la ieșirea din mixer. Există o compensare liniară de fază între moduri legată de lungimea de bătăi  $l_b$  dintre acestea:

$$\delta\Phi = (\beta_{0,a} - \beta_{0,b})L = \frac{2\pi}{l_b}. \quad (6.25)$$

O operație interesantă este obținută cu ajutorul modurilor pare și impare având ordinele cele mai coborâte și puteri scăzute, de exemplu modurile  $\text{TE}_0$  și  $\text{TE}_1$  într-un ghid de tip lespede, care sunt în fază sau în opoziție de fază la capătul dispozitivului cu

$$\delta\Phi = 2N\pi \text{ sau } (2N-1)\pi \text{ sau } L = \frac{Nl_b}{2} = \frac{N\pi}{(\beta_{0,a} - \beta_{0,b})}, N \geq 1, \quad (6.26)$$

astfel încât câmpul rezultat să aibă un maxim de o parte sau de cealaltă a maximului modului central în urma creșterii puterii, așa cum se poate observa în

figura 6. 14. Valori minime de zero absolut nu pot fi obținute nici de o parte nici de cealaltă a ghidului optic.

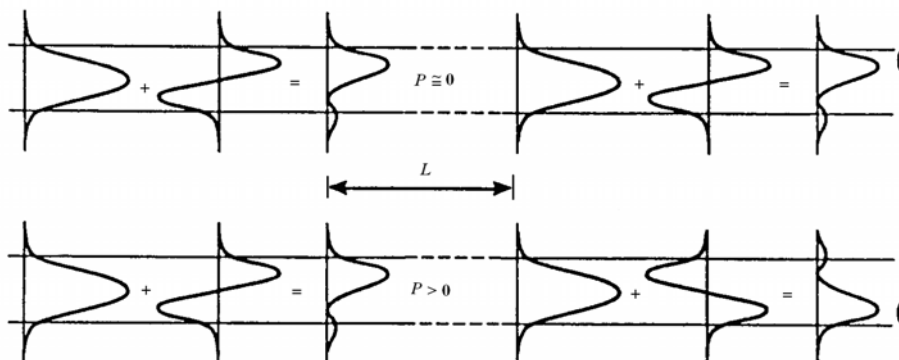


Fig. 6. 14. Mixerul neliniar de moduri.

Figuri spațiale mai complexe pot fi obținute cu ajutorul diferitelor combinații de moduri, dar contrastul franjelor finale se deteriorează cu atât mai mult cu cât distribuțiile câmpurilor sunt mai structurate, reducând eficacitatea dispozitivului din punct de vedere al aplicațiilor practice.