

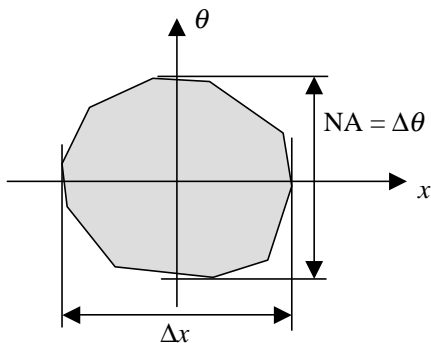
CUPLAREA SURSELOR DE LUMINA LA GHIDURI DE UNDA

- cuplajul poate avea loc între: 1) surse de lumina și ghiduri, 2) ghiduri și detectori, 3) între două ghiduri

- pentru a realiza o bună cuplare trebuie ca unghiul sub care emite sursa să fie mai mic decât unghiul critic în ghiduri și extinderea spațială a câmpului emis de sursă să fie mai mică decât dimensiunea miezului (analog între ghid și detector)

EFICIENȚA DE CUPLAJ

- deoarece am două condiții asupra cuplajului, una referindu-se la unghi, cealaltă la extinderea spațială, o ilustrare a cuplajului poate fi realizată intuitiv folosind spațiul fazelor, adică spațiul cu coordonatele spațiu-unghi pentru semnale continue



- orice distribuție de câmp poate fi reprezentată ca o arie în spațiul fazelor (vezi figura de mai sus), fiecărui punct (x, θ) corespunzându-i o rază în tratarea geometrică sau o densitate a intensității în tratarea ondulatorie. Extensia unghiulară a câmpului este măsurată de $\Delta\theta$ (numită și apertură numerică) iar extensia spațială este dată de Δx

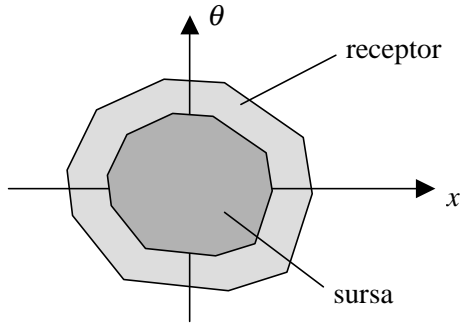
Exemplu: o undă plană (extensie spațială infinită, extensie unghiulară zero) este reprezentată printr-o linie orizontală, paralelă cu axa x , iar un punct luminos (extensie spațială zero, extensie unghiulară foarte mare) este reprezentată de o linie verticală, paralelă cu axa θ

- în reprezentarea în spațiul fazelor eficiența cuplajului este măsurată de gradul de suprapunere între aria în spațiul fazelor ce reprezintă sursa de lumină și receptorul

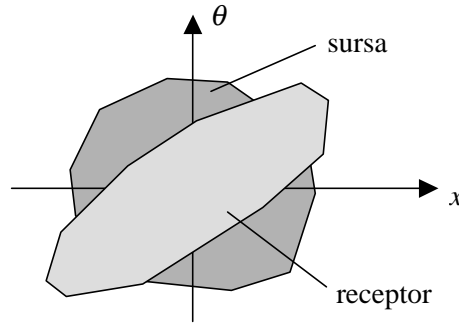
- mai precis, coeficientul de cuplaj în spațiul fazelor se poate defini ca

$$\eta = \frac{A_s \cap A_r}{A_s}$$

unde A_s , A_r reprezintă, respectiv, ariile sursei și receptorului în spațiul fazelor, și \cap indică intersecția ariilor



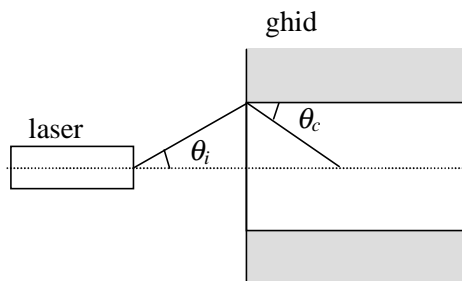
cuplaj perfect



n-am cuplaj bun

- aria in spatiul fazelor este constanta la trecerea fascicului printr-un sistem optic fara pierderi, chiar daca forma sa se schimba. In particular, trecerea printr-o lentila este echivalenta cu un "stretch" al ariei de-a lungul axei θ cu o valoare depinzand de distanta focala a lentilei, iar propagarea prin spatiul liber este echivalenta cu un "stretch" de-a lungul lui x . Pornind de la faptul ca se poate modifica forma ariei in spatiul fazelor, dar nu si valoarea ei, se poate proiecta un sistem optic care sa optimizeze eficienta de cuplaj intre o pereche sursa-receptor data.

- pentru a folosi definitia coeficientului de cuplaj de mai sus, trebuie sa stiu aria in spatiul fazelor a sursei si receptorului. Daca nu am aceasta informatie, pot folosi definitii alternative ale coeficientului de cuplaj. De exemplu, daca folosesc tratarea geometrica pentru caracterizarea ghidului (valabila pentru ghiduri cu V mare), pot defini coeficientul de cuplaj ca



$$\eta = \frac{\int_0^{\theta_i} I(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta}$$

unde $I(\theta)$ este distributia unghiulara a radiatiei, iar θ_i este unghiul de incidenta din mediul inconjurator cu indice de refractie n_a (de obicei aer, cu $n_a = 1$), pentru care unghiul in ghid este unghiul critic: $n_a \sin \theta_i = n_m \sin \theta_c$, cu $\cos \theta_c = n_i / n_m$. Definitia de mai sus este utila cand sursa (laserul) este de dimensiuni reduse in raport cu latimea ghidului si este asezata axial fata de ghid.

Exemplu: pentru o sursa Lambertiana in aer $I(\theta) = I_0 \cos \theta$, $n_a = 1$ si definitia de mai sus da o eficienta de cuplaj $\eta = \sin^2 \theta_i = n_m^2 \sin^2 \theta_c$

- daca ghidul si sursa de lumina sunt tratate ondulatoriu, eficienta de cuplaj se defineste ca

$$\eta = \frac{\int \mathbf{E}_s(x, y, z_c) \mathbf{E}_g^*(x, y, z_c) dx dy}{\int |\mathbf{E}_s(x, y, z_c)|^2 dx dy}$$

unde \mathbf{E}_s , \mathbf{E}_g sunt campurile electrice ale sursei si respectiv ghidului, iar integrala se face pe suprafata de contact intre ghid si sursa, de obicei un plan $z_c = \text{const}$.

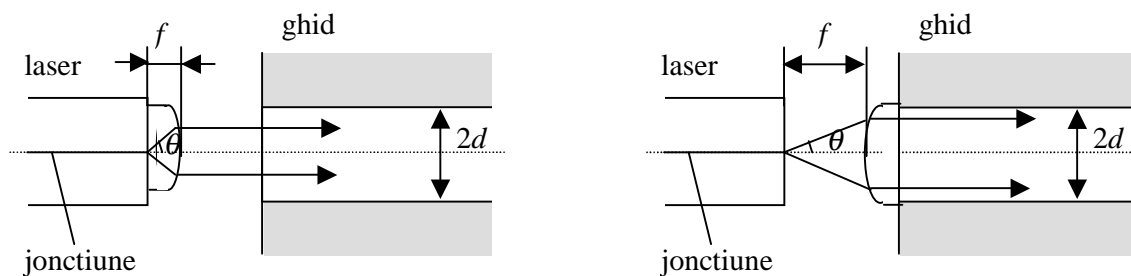
METODE DE CUPLARE

- metodele de cuplare pot fi
 - directe, dar necesita precizie mare de aliniere
 - indirecte – prin campuri evanescente
- pe langa necesitatea unei cuplari eficiente, este necesara si realizarea unei cuplari stabile si fiabile

CUPLAREA DIRECTA A SURSELOR DE LUMINA LA GHIDURI

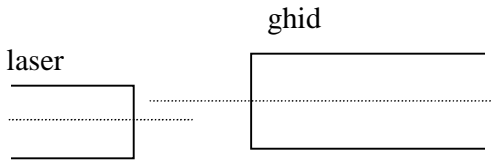
- un ghid real are $d \cong \Delta x$ mic ($5 \mu\text{m}$) si $\Delta\theta \cong \Delta = (n_m^2 - n_f^2) / 2n_m^2$ mic. Un laser cu semiconductori are latimea grosimii active $d \cong \Delta x$ mic, dar $\Delta\theta$ destul de mare, deci se poate realiza un cuplaj bun daca fasciculus laser este initial colimat (scade $\Delta\theta$, creste Δx)

- pentru a imbunatati eficienta de cuplaj se foloseste o lentila pentru focalizarea radiatiei emise de laser. Lentila poate fi crescuta cu tehnici de litografie sau epitaxial direct pe unul din capetele sursei de lumina sau fibrei (vezi figura de mai jos)

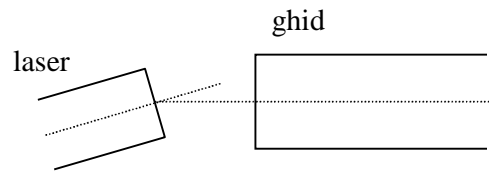


In primul caz, cand lentila (plan convexa) este crescuta la un capat al sursei, $\text{tg}\theta = d / f \leq \text{tg}\theta_c$ unde θ este divergenta unghiulara a diodei laser, iar distanta focala a lentilei este determinata de dimensiunile ghidului: $f \geq d / \text{tg}\theta_c$. Lentila este in acest caz groasa, grosimea ei fiind f . In al doilea caz, cand lentila (plan convexa, groasa) este crescuta pe ghid distanta focala se determina din aceeasi relatie; in acest caz f trebuie sa fie egala si cu distanta intre ghid si sursa

- dupa cum se vede, nu numai ca este dificil de crescut o lentila la capatul unui laser sau al unui ghid, dar si distanta ei focala trebuie sa fie precis determinata, ceea ce este cu atat mai greu cu cat dimensiunile transversale sunt de ordinul μm . Orice dezaliniere, spatiala sau unghiulara, duce la scaderea exponentiala a eficientei de cuplaj intre sursa si ghid

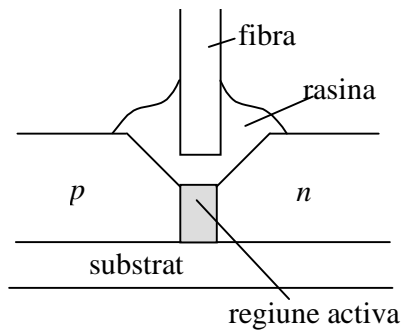


dezaliniere spatiala

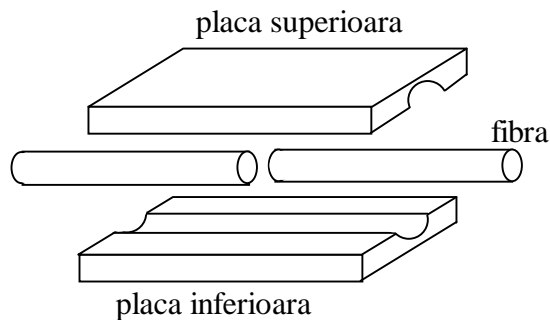


dezaliniere unghiulara

- pentru a se realiza o aliniere cat mai buna si stabila in timp intre sursa si ghid, o solutie este atasarea directa a fibrei la sursa, spatiul intre sursa si fibra fiind umplut cu o rasina cu un indice de refractie intermediar (vezi figura de mai jos). Laserii astfel obtinuti se numesc “pigtail lasers”.



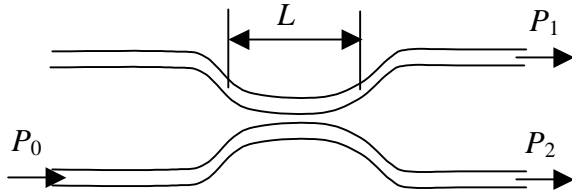
- odata realizata aceasta atasare, problema cuplarii se pune in continuare in ceea ce priveste cuplarea fibra-fibra. Cuplarea directa fibra-fibra se realizeaza cu conectori optici speciali (cuplare mecanica) sau cu un dispozitiv ca cel de mai jos



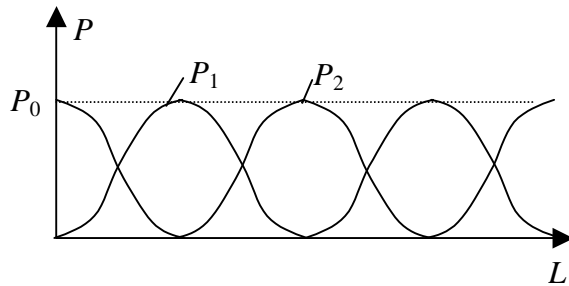
Fibrele se introduc in santurile placii superioare/inferioare, spatiul liber umplandu-se cu un lichid care are si rolul de adaptare a indicilor. Pierderile unui astfel de dispozitiv de cuplare sunt totusi mari, de aproximativ 0.6 dB (coeficientul de pierderi in dB = $4.34 \times$ coeficientul de pierderi in m^{-1})

CUPLAREA PRIN CAMPURI EVANESCENTE

- printr-o metoda oarecare (de exemplu polizare cu ajutorul unui polizor special construit) se aduc miezurile a doua ghiduri in imediata vecinatate, astfel incat campul unuia sa patrunda evanescent in celalalt

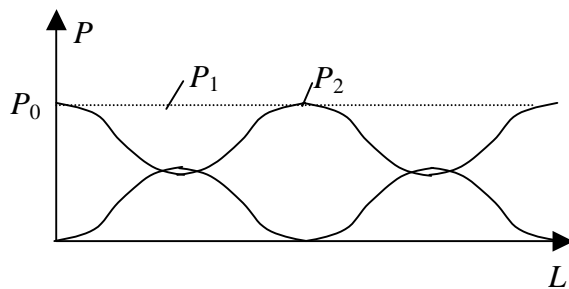


- transferul de putere între cele două fibre, care pot sau nu să fie identice, depinde atât de lungimea de interacție L cât și de gradul de similaritate al fibrelor. De exemplu, dacă cele două fibre sunt identice, puterile la ieșire, P_1 și P_2 , presupunând că la intrare doar fibra 2 este iluminată cu puterea P_0 , variază cu L ca în figura de mai jos:



Puterea totală se conservă: $P_1 + P_2 = P_0$. Perioada de transfer a puterii este $L_p = 2\pi / C$, unde C este coeficientul de cuplaj, care depinde de lungimea de undă a radiației λ , și de câmpurile în cele două fibre, când sunt izolate. Calitativ, transferul de putere între cele două fibre este similar cu transferul de putere între două pendule (oscilatori cuplați): din considerente de simetrie, transferul este complet dacă oscilatorii sunt identici, și incomplet (ca în figura de mai jos) dacă oscilatorii sunt diferiți.

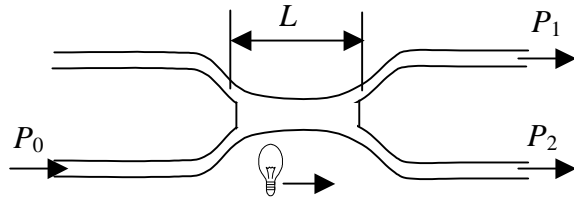
- dacă fibrele nu sunt identice transferul de putere între ele nu este complet, ci arată ca în figura de mai jos:



Puterea totală se conservă și în acest caz: $P_1 + P_2 = P_0$.

- un cuplor între două fibre identice poate acționa și ca demultiplexor: dacă lumina incidentă are două componente de lungimi de undă diferite, λ_1 și λ_2 , și dacă perioada de transfer a puterii (dependentă de λ) este astfel încât $L = (2m_1 + 1)L_p(\lambda_1) = 2m_2L_p(\lambda_2)$, cu m_1, m_2 numere întregi, componenta de lungime de undă λ_1 iese din cuplor prin fibra 1, iar λ_2 iese prin fibra 2

- analog, un astfel de cuplor poate actiona si ca polarizor al luminii incidente, deoarece constantele de propagare ale modurilor sunt diferite
- fibrele care se cupleaza pot chiar sa vina in contact fizic, sau, pot fi sudate in regiunea de contact, astfel incat pe distanta L am o fibra de sectiune mai mare decat fibrele constituinte



Sudarea se face incalzind regiunea in care fibrele vin in contact, concomitent cu tragerea lor spre exterior. Transferul de putere intre fibre are loc ca si in cazul de mai sus, cu singura diferenta ca expresia coeficientului de cuplaj C difera. Cuplorul obtinut prin sudarea fibrelor nu este, de fapt, un cuplor in care cuplarea sa se faca prin campuri evanescente. El poate fi considerat ca un cuplor direct intre fibra iluminata si regiunea centrala, sudata, de dimensiune mai mare; cuplarea directa se face in acest caz intre ghiduri care nu sunt aliniate, dar totusi nu am pierderi, pentru ca la iesire am un nou cuplaj intre regiunea centrala si cele doua fibre. Aceasta situatie nu corespunde de fapt nici uneia dintre cele doua metode de cuplaj: directa sau prin campuri evanescente. Am inclus-o aici pentru ca transferul de putere este identic cu cuplorul prin campuri evanescente. Aceasta se explica prin faptul ca cele doua tipuri de cuploare: prin campuri evanescente si cu fibre sudate pot fi tratate matematic identic folosind metoda modurilor cuplate.

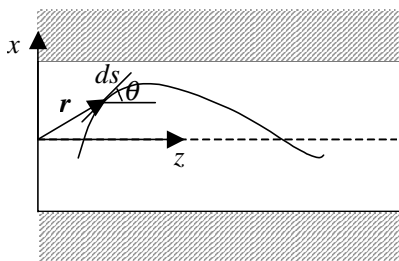
DISPOZITIVE MICRO-OPTICE DE CUPLARE

- isi bazeaza functionarea pe traiectoria unui fascicul optic care se propaga intr-o bara cilindrica cu profil gradat al indicelui de refractie

$$n(x) = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} g^2 x^2 \right)$$

(sau, in coordonate cilindrice $n(r) = n_0 (1 - g^2 r^2 / 2)$)

unde n_0 este indicele de refractie pe axa fibrei, iar g este parametrul de focalizare



- ecuatia de propagare a razelor

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n$$

unde s este distanta de-a lungul razei, se separa in

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dx}{ds} \right) = \frac{dn}{dx} = -n_0 g^2 x, \quad \frac{d}{ds} \left(n \frac{dz}{ds} \right) = \frac{dn}{dz} = 0$$

Din cea de-a doua relatie rezulta

$$n \frac{dz}{ds} = n \cos \theta = \beta = \text{const.}$$

de unde obtinem

$$\frac{d}{ds} = \frac{d}{dz} \frac{dz}{ds} = \frac{\beta}{n} \frac{d}{dz}$$

care, introdusa in prima ecuatie, duce la

$$\frac{\beta}{n} \frac{d}{dz} \left(\beta \frac{dx}{dz} \right) = \frac{dn}{dx}$$

sau

$$\frac{\beta^2}{n} \frac{d^2 x}{dz^2} + n_0 g^2 x = 0$$

- presupunand ca $\beta^2 / n = n \cos^2 \theta \cong n_0$ (pentru unghiuri θ mici), ecuatie satisfacuta de raza este

$$\frac{d^2 x}{dz^2} + g^2 x = 0$$

care are ca solutii functiile $\sin gz$, $\cos gz$

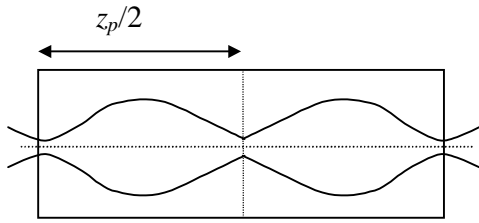
- deci traiectoria unei raze de lumina care la planul $z = z_0$ are pozitia transversala x_0 si unghiul θ_0 este descrisa de o matrice

$$\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos gz & (1/g) \sin gz \\ -g \sin gz & \cos gz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix}$$

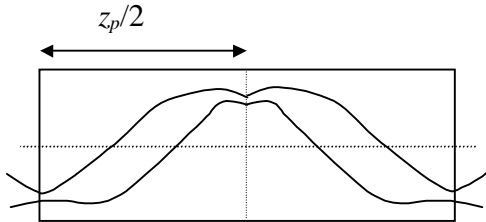
unde $dx / dz = \tan \theta \cong \theta$ pentru propagare la unghiuri mici

- traiectoria razei este periodica cu perioada $z_p = 2\pi / g$, astfel incat parametrii fasciculului (nu ai razei individuale) sunt aceeasi dupa $z_p / 2$ pentru un fascicul simetric in raport cu x (vezi figura de mai jos). Evident, daca fasciculul nu este simetric in raport cu x , parametrii fasciculului se repeta dupa z_p

- traiectoria unui fascicul optic aliniat in raport cu elementul cu profil gradat arata ca in figura de mai jos

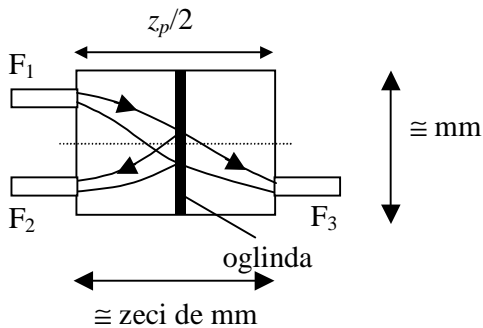


- traiectoria unui fascicul optic dezaliniat arata ca in figura de mai jos

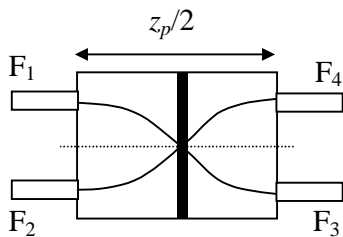


- pe aceasta comportare a fasciculului optic intr-o bara cu indice de refractie parabolic se realizeaza cuplarea, divizarea, multiplexarea si demultiplexarea optica

Exemple:



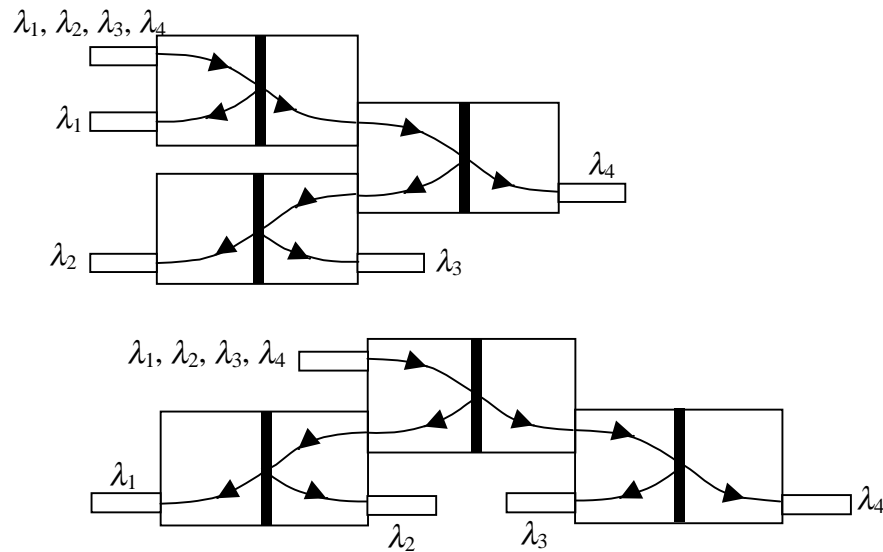
- in general, as putea avea un dispozitiv multifunctional cu patru porti



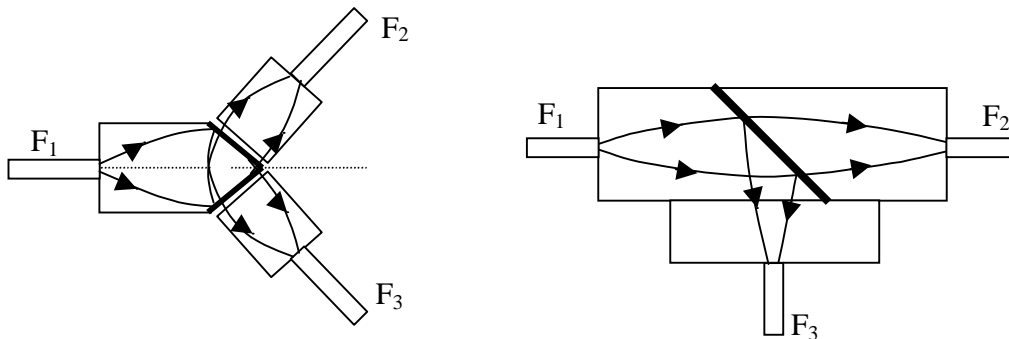
daca oglinda O este semitransparenta, F_1 se poate cupla la F_2, F_3 (sau invers, F_2, F_3 se pot cupla la F_1), F_4 se poate cupla la F_2, F_3 , etc.

- in cazul in care oglinda este dicroica (are un coeficient de reflexie dependent de lungimea de unda), dispozitivul poate functiona ca multiplexor/demultiplexor. De exemplu, lumina incidenta prin F_1 , care are doua componente de lungimi de unda λ_1 , λ_2 poate fi separata in lumina de lungime de unda λ_1 care sa iasa prin F_2 si λ_2 care sa iasa prin F_3 daca O este astfel incat coeficientul sau de reflexie sa fie 1 pentru λ_1 si 0 pentru λ_2

- montaje mai sofisticate de multiplexare/demultiplexare (orice dispozitiv demultiplexor devine multiplexor daca sensul razelor de lumina se inverseaza)



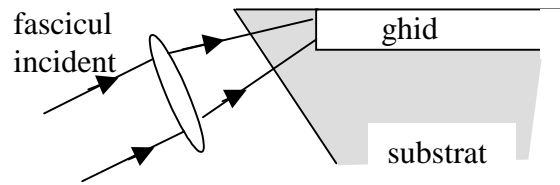
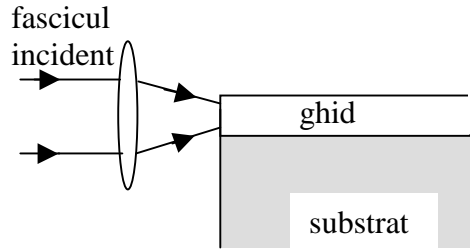
- dispozitive cu oglinzi oblice



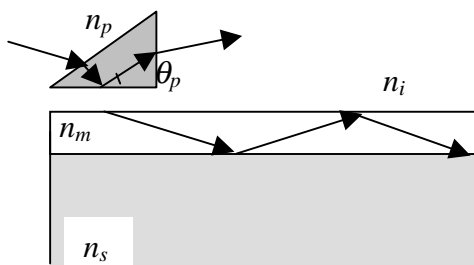
CUPLORI OPTICI INTEGRATI (intre ghiduri planare si surse)

CUPLORI DIRECTI SURSA-GHID (sau invers, datorita reciprocitatii)

- problemele care apar la acest tip de cuplaj (figura de mai jos ilustreaza diverse configuratii) sunt in primul rand legate de dimensiunile diferite ale fasciculului si ghidului si de forma lor diferita - in general este necesara o lentila cu distante focale diferite pe cele doua directii transversale

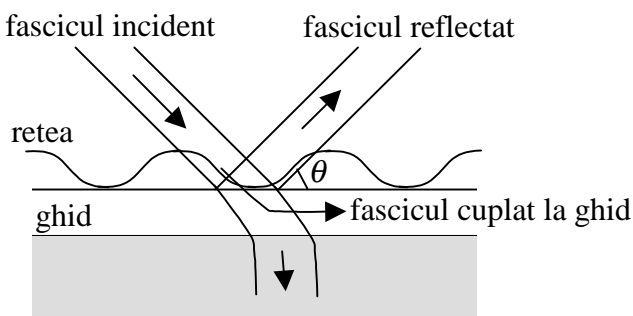


CUPLORI CU PRISMA



- este o metoda de cuplare prin campuri evanescente
- in acest scop indicele de refractie al prisme $n_p > n_m$ si fasciculul laser incident se reflecta total la baza prisme cuplandu-se la ghid prin campurile evanescente ale prisme si ghidului, care se suprapun in interstitiul dintre prisma si ghid. Un cuplaj complet se realizeaza dupa o lungime de interactie $L = 2\pi / C$, si in acelasi timp trebuie ca faza undelor sa se conserve, adica $k_p \cos \theta_p = k_z = \beta$ in ghid ($n_m > \beta / k > \max(n_i, n_s)$)
- dezavantajele sunt:
 - 1) dificil de gasit materiale pentru prisma cu $n_p > n_m$,
 - 2) reglarea dimensiunii (critica) a interstitiului intre ghid si prisma la o valoare mai mica decat $\lambda / 2$,
 - 3) prismele nu pot fi integrate planar

CUPLORI CU RETEA



- structura periodica a rețelei perturba ghidul de unda plan, astfel încât constanta de propagare a acestuia este modificată la $\beta_n = \beta + 2\pi n / \Lambda$, unde n este un întreg, Λ este perioada rețelei și β este constanta de propagare în absența rețelei

- dacă fasciculul incident are fază (pe direcția z) adaptată cu una din aceste armonici (valori β_n), energia este cedată ghidului. Adaptarea se face variind unghiul de incidență al fasciculului, astfel încât $k \cos \theta = \beta_n$

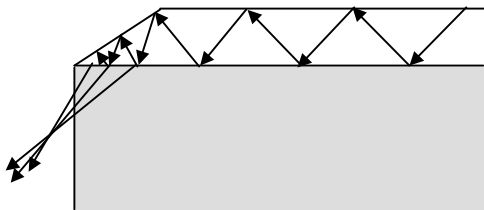
- reciproc, o parte din energia modurilor ghidate este împrăștiată radiativ la suprafață, propagându-se după direcții $\cos \theta = \beta_n / k_{aer}$

- dezavantaje:

- 1) o parte din energia care ajunge în ghid prin intermediul rețelei poate ajunge în substrat și se pierde,
- 2) pot apărea pierderi suplimentare în ordinele de difracție superioare produse de rețea

- avantaj: rețelele se pot integra prin utilizarea metodelor interferometrice pentru impresionarea și dezvoltarea straturilor fotorezistive. Mai precis, stratul de rezist este iluminat cu două fascicule coerente de aceeași lungime de undă, care formează o undă staționară în fotorezist. La dezvoltare, se obține deci o structură periodică, identică cu forma figurii de interferență. Perioada Λ depinde de lungimea de undă a celor două fascicule și de unghiul dintre ele. În plus, pe lângă rețelele fixe, fabricate prin metode interferometrice, mai pot exista și rețele temporare. Acestea sunt datorate efectului electro-optic: tensiunea aplicată pe un electrod digital poate modifica indicele de refracție în regiunea de sub electrod, realizându-se o rețea a cărei periodicitate este dată de perioada electrozilor și a cărei coeficient de cuplaj pentru lumina depinde de tensiunea aplicată

CUPLORI CU GHID DE UNDA PROFILAT



- la intrarea în zona profilată a ghidului, fasciculul optic nu mai este total reflectat la interfață (crește unghiul de incidență) astfel încât este refractat în substrat după anumite direcții și extras din ghid

- dezavantaj: divergența relativ mare a fasciculului la ieșire