

LUCRARE DE LABORATOR

PROPAGAREA LUMINII PE FIBRELE OPTICE

1. Teoria lucrării

O fibră optică reprezintă ghidul de propagare al luminii de secțiune circulară, format din materiale derivate din plastic sau din sticlă, care ghidează lumina prin fenomenul fizic numit reflexie internă totală. Principiile transmisiei informației pe fibră optică au fost dezvoltate în anii 1970 în Statele Unite, câștigând treptat de atunci o mare popularitate în domeniul transmisiei informației, fie că este vorba de televiziune, telefon sau internet. Aplicații conexe ale fibrei optice au fost descoperite și în domeniul senzorilor, captorilor și iluminatului.

Fibra optică constă dintr-un *miez* de secțiune circulară înconjurat de un înveliș cunoscut drept *înveliș* sau *cladding* (în engleză). Conducția luminii are loc exclusiv în această regiune centrală printr-un fenomen fizic numit *reflexie internă totală*. Pentru a înțelege acest fenomen trebuie plecat de la legile generale ale refracției. Atunci când lumina întâlnește suprafața de separare dintre două medii diferite, aceasta își schimbă întotdeauna direcția. Pentru a intui corect direcția pe care lumina o urmează, ne putem folosi de analogia lui L.C. Epstein dintre optică și mecanică. În ciuda faptului că ne permitem o asemenea analogie pentru a ajuta intuiția fenomenului de refracție, legile matematice care conduc fenomenul optic sunt total diferite de legile fenomenului analog din mecanică. Să luăm așadar cazul unei mașini care poate circula în două medii diferite. În mediul de sus, neted, fără denivelări, poate circula cu o viteză v_{max}/n_2 iar în mediul de jos, plin de denivelări și noroi, poate circula doar cu viteza (mai mică) de v_{max}/n_1 . După cum se observă, indicele n_k este proporțional cu rezistența la înaintare pe care mașina o întâmpină din partea mediului „ k ”. În Figura 1 este reprezentată trecerea mașinii dintr-un mediu în altul, în funcție de unghiul pe care aceasta îl face cu normala la suprafața de separație. În Figura 1D mașina se apropie de suprafața de separație dintre mediul n_2 și n_1 la un unghi de incidență i_2 față de normală. Partea ei dreaptă va intra în mediul n_1 înaintea părții din stânga a mașinii și va suferi o încetinire a vitezei de la v_{max}/n_2 la v_{max}/n_1 . Partea stângă a mașinii, continuând să ruleze cu v_{max}/n_2 , va pivota în jurul roții drepte, schimbând direcția mașinii. Noua direcție de deplasare a mașinii va face în mediul n_1 un unghi i_1 cu normala mai mic decât unghiul i_2 inițial.

În cazul reprezentat în Figura 1C mașina trece din mediul n_1 în mediul n_2 venind din direcția opusă. De data aceasta, partea dreaptă, intrând prima în mediul n_2 , va putea circula cu o viteză superioară, pivotând în jurul părții stângi și mărinde unghiul de deplasare al mașinii de la i_1 la i_2 .

În Figura 1B, atunci când mașina trece dintr-un mediu în altul perpendicular pe suprafața de separație dintre cele două medii, cele două roți din față vor schimba mediul de deplasare simultan, iar direcția mașinii va rămâne neschimbată.

În sfârșit, în Figura 1A mașina se îndreaptă din mediul n_1 spre mediul n_2 dintr-o direcție aproape tangențială la suprafața de separație dintre medii. Din această cauză roțile din dreapta vor intra în mediul n_2 mult înaintea roților din stânga și vor putea pivota mai mult timp decât

au putut-o face în cazul din Figura 1C. În această situație, va fi chiar posibil ca mașina să nu poată face trecerea în mediul n_2 , întorcându-se înapoi în mediul n_1 (precum în Figura 1D). În această ultimă situație se află și lumina care suferă fenomenul de reflexie internă totală. Odată ce unghiul i_1 depășește o valoare critică, nicio fracțiune din lumina incidentă pe suprafață nu va putea trece în al doilea mediu (de indice de refracție scăzut) reflectându-se înapoi în mediul n_1 după un unghi $i_2=i_1$.

Spre deosebire de cazul din mecanică, unde direcția finală a mașinii în funcție de cea inițială este greu de calculat, în optică lucrurile stau mult mai simplu. Refracția luminii dintr-un mediu în altul (analog cazurilor din Figura 1 - B,C,D) este ghidată de legea lui Snell:

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (1)$$

Deoarece ne vom afla în cazul reflexiei totale (analog cazului din Figura 1A) atunci când unghiul i_2 devine egal cu $\pi/2$, deducem din ecuația (1) că pentru apariția fenomenului de reflexie totală, raza incidentă trebuie să formeze cu normala un unghi i_1 care să respecte condiția:

$$i_1 > \arcsin(n_2/n_1) \quad (2)$$

În cazul reflexiei totale, raza de lumină care se întoarce în totalitate în mediul n_1 respectă legea reflexiei ($i_1=i_2$), unde semnificația unghiurilor este notată în Figura 1A.

În Figura 2 este reprezentată schematic o fibră optică sub forma unui cilindru de indice de refracție n_1 și rază a (miezul) înconjurat de un al doilea cilindru de indice de refracție n_2 (îmbrăcămintea). Tot ansamblul se află suspendat în aer (având indicele de refracție n_0). Fenomenul de injecție a unei raze de lumină în fibra optică este reprezentat schematic în Figura 2. În această figură, am considerat suprafața de separație între fibră și aer ca fiind perfect plană. Putem observa cum, odată cu micșorarea unghiului de incidență i_0 în fibră, unghiul i_1 pe care raza de lumină îl face cu normala suprafeței de separație dintre miez și îmbrăcămintă se mărește. La un moment dat, i_1 va fi suficient de mare pentru a se respecta condiția (2), conducând la apariția pe fibră a fenomenului de reflexie internă totală. Unghiul de injecție limită i_0 corespunzător apariției fenomenului de reflexie totală în fibră poartă numele de apertură numerică (NA – numerical aperture). Datorită simetriei cilindrice, suprafața descrisă prin rotația unghiului NA în jurul normalei la suprafața de separație aer-fibră formează un con cu deschiderea la vârf egală cu $2NA$. Toate razele de lumină care cad în interiorul acestui con se vor propaga ghidat pe fibră. Formula lui NA (2) reiese din relații geometrice simple ce leagă în Figura 2 unghiurile i_1 și i_0 .

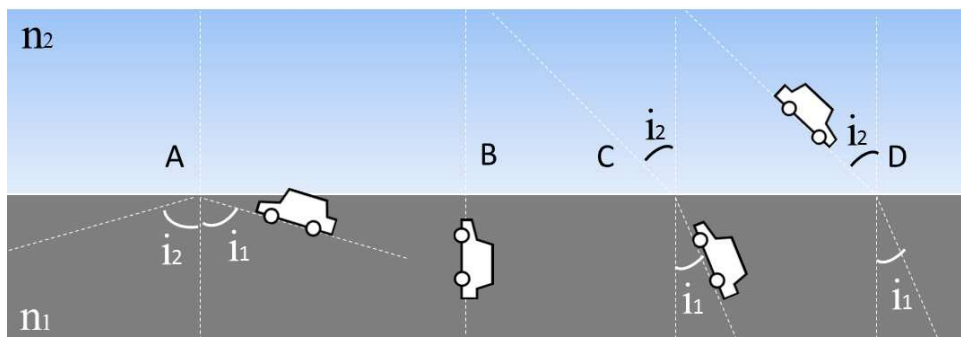


Figura 1 O analogie între optică și mecanică ajută la întuirea fenomenului de refracție și a celui de reflexie totală.

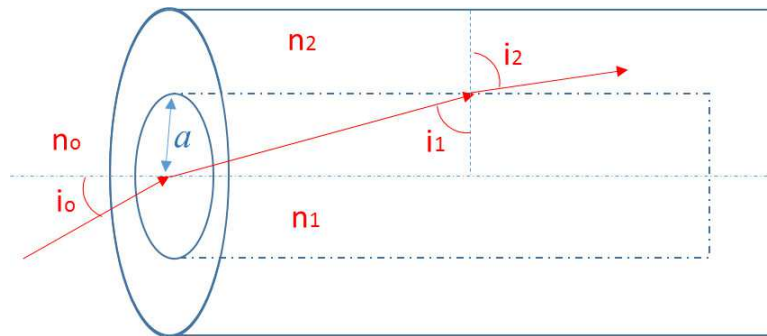


Figura 2 Injecția unei raze de lumină pe fibră sub unghiul de incidență i_0

$$NA = \sin(i_{0_{\max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_0 \quad (2)$$

Relațiile de mai sus au fost deduse presupunând propagarea luminii sub formă de raze (aproximația geometrică a luminii). Pentru o înțelegere intuitivă a problemei această abordare este suficientă, dar pentru descrierea exactă a propagării luminii printr-o fibră este necesar un formalism matematic mai complex. Considerând radiația luminoasă formată din unde electromagnetice cu lungimea de undă λ_0 , putem introduce mărimea fizică denumită frecvență normală V :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

Se poate demonstra că numărul soluțiilor obținute din rezolvarea ecuațiilor lui Maxwell este direct proporțional cu frecvența normală. Fiecare soluție a sistemului de ecuații ale lui Maxwell (scrise pentru cazul particular al propagării luminii printr-o fibră optică) reprezintă un mod de propagare. Modurile de propagare ghidate sunt acele soluții ale ecuațiilor lui Maxwell pentru care energia este concentrată în special în miezul fibrei. Aceste moduri pot fi asociate, în aproximația geometrică, cu razele care la interfața dintre miez și îmbrăcămintă vor fi reflectate total. Celalte soluții ale ecuațiilor lui Maxwell reprezintă modurile radiative, cele care vor fi puternic atenuate. Energia acestor moduri este concentrată în special în îmbrăcămintea fibrei, putând fi asociate, în aproximația geometrică, cu razele de lumină care ies din miezul fibrei.

La limita inferioară a valorilor lui V din ecuația (3) lumina se va propaga prin fibră sub forma unui singur mod. Aceasta se întâmplă pentru $V < 2,405$. La polul opus, cel al valorilor mari ale lui V , propagarea se va face sub forma unui număr mare de moduri, proporțional cu V^2 atunci când V crește foarte mult.

2. Simularea propagării luminii prin fibrele optice

Pentru simularea propagării luminii printr-o fibră optică vom folosi programul FP Fiber Calculator de la RP Photonics. Prin intermediul acestui program vom putea proiecta diagrama indicelui de refracție pentru o fibră optică și calcula felul în care se cuplează și propagă radiația laser prin miezul acesteia. Panoul de comandă la pornirea softului arată ca în Figura 3.

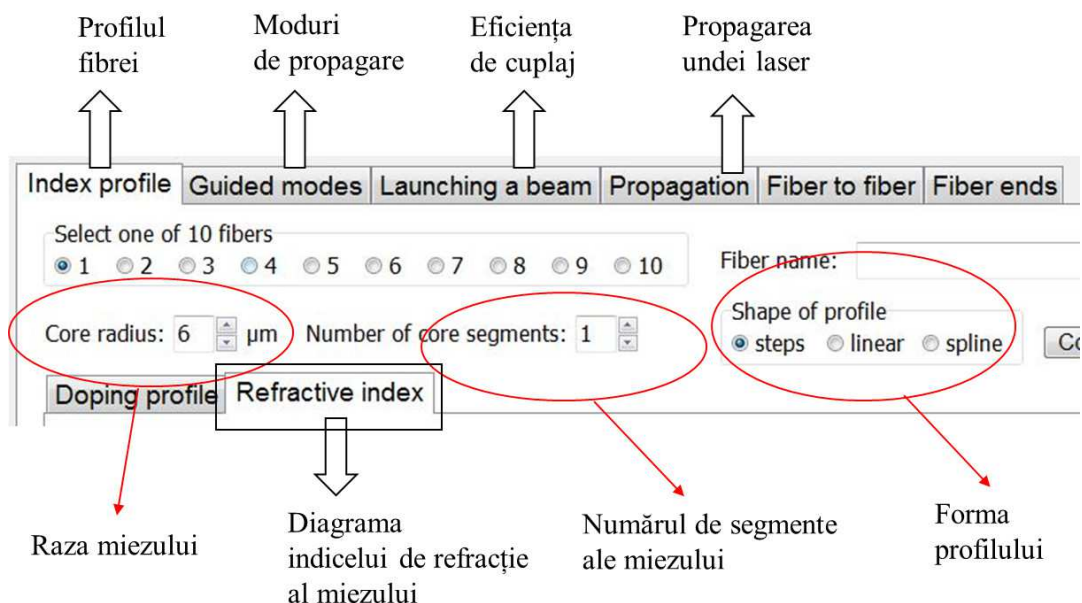


Figura 3 Panoul de comandă la deschiderea softului FP Fiber Calculator

Prin apăsarea tab-urilor aflate în partea superioară a panoului de comandă, putem schimba pagina de lucru. Opțiunile disponibile în versiunea freeware a programului sunt:

- Index profile: pe această pagină putem proiecta fibra optică pe care o vom folosi, modificând diagrama indicelui de refracție al miezului.
- Guided modes: ne oferă un rezumat al proprietăților modurilor ghidate de propagare pe care le putem avea pe fibra proiectată anterior.
- Launching a beam: pe această pagină se realizează cuplajul între un fascicul laser gaussian și fibra proiectată anterior.
- Propagation: pe această pagină putem vizualiza evoluția distribuției intensității luminoase în secțiunea transversală a fibrei.

2.1. Proiectarea fibrei. Proiectarea fibrei se realizează în pagina de lucru denumită „Index profile” (Figura 3). Aici putem regla raza miezului fibrei (core radius) precum și numărul de straturi diferite în care să fie segmentat miezul (number of core segments). Fiecare modificare pe care o operăm asupra proprietăților generale ale miezului se va reflecta asupra diagramei indicelui de refracție (Figura 4), care este o reprezentare a indicelui de refracție în funcție de poziția față de centrul fibrei. Datorită simetriei cilindrice a fibrei, această diagramă este invariabilă cu direcția. Forma profilului indicelui de refracție este reglată din dialogul „Shape of profile”, ale cărui opțiuni sunt:

- *steps*: Indicele de refracție rămâne constant în fiecare strat, iar tranziția între indicele unui strat și indicele următorului se face abrupt. Acest profil descrie așa-zisele fibre cu variație dreptunghiulară a indicelui de refracție.
- *linear*: Indicele de refracție variază liniar de-a lungul fiecărui strat; nu apar tranziții abrupte în variația indicelui de refracție, însă panta indicelui suferă discontinuități la interfața dintre straturi.

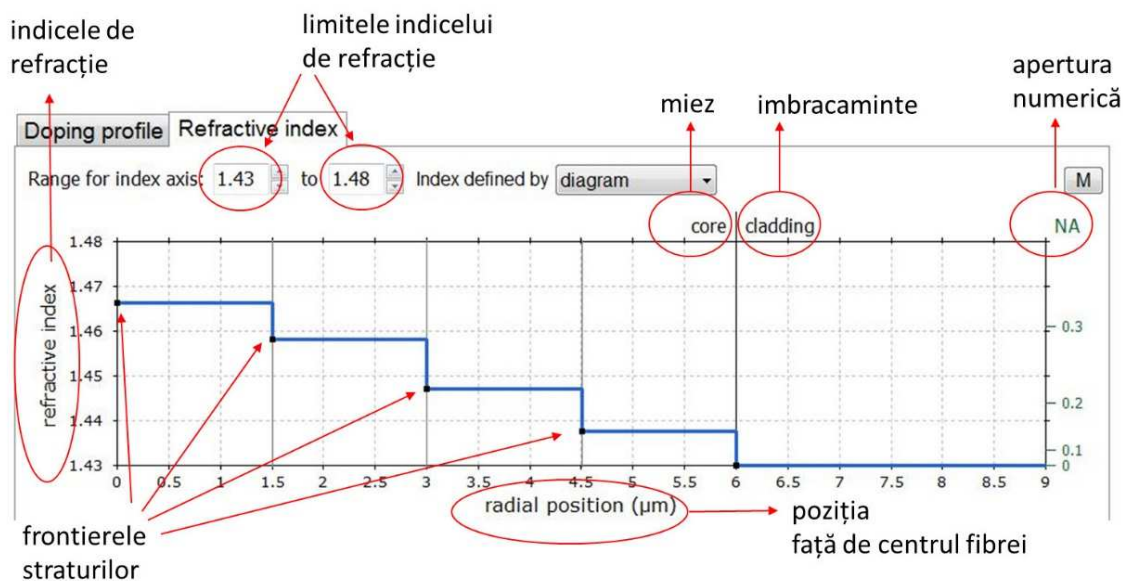


Figura 4 Diagrama indicelui de refracție. (FP Fiber Calculator)

- *spline*: Curba indicelui de refracție în fiecare strat este realizată automat prin interpolare cubică, astfel încât să nu existe discontinuități în variația indicelui de refracție sau a derivatei sale. Acest profil poate fi folosit pentru a descrie așa-zisele fibre cu indice de refracție gradat.

Impărțirea miezului în numărul ales de segmente se face în straturi de lungime egală. Indicele de refracție al fiecărui strat (segment) se poate modifica printr-un click pe mouse în dreptul granițelor dintre straturi (marcate pe diagramă cu linii verticale).

Puteți lucra în paralel cu până la 10 fibre diferite, ale căror caracteristici sunt memorate automat de program până la următoarea deschidere a softului. Ca să alegeți una dintre cele 10 fibre de lucru, este suficient să apăsați cu mouse-ul pe numărul corespunzător din caseta de dialog „Select one of 10 fibers”.

2.2. Proprietățile modurile ghidate. Proprietățile modurilor ghidate de propagare sunt descrise în pagina „Guided modes”. Calculul modurilor de propagare posibile se face pe modelul de fibră implementat în fereastra „Index profile”. Imediat după fixarea lungimii de undă de lucru („Guided modes of the fiber at:”) și apăsarea butonului „Calculate”, programul va rezolva ecuațiile Maxwell pentru fibra optică proiectată și va afișa lista modurilor de propagare sub formă de tabel (Figura 5). Fiecare mod de propagare este indexat cu un număr de ordine P și un indice L, care împreună pot descrie forma distribuției intensității luminoase a modului respectiv în planul transversal al fibrei.

În dreptul fiecărui mod mai putem citi și constanta sa de propagare β , precum și indicele său de refracție efectiv (Figura 5). Folosindu-ne de indicele de refracție efectiv n_{eff} putem afla viteza de propagare c a modului respectiv pe fibră:

$$c = \frac{c_0}{n_{eff}} \quad (4)$$

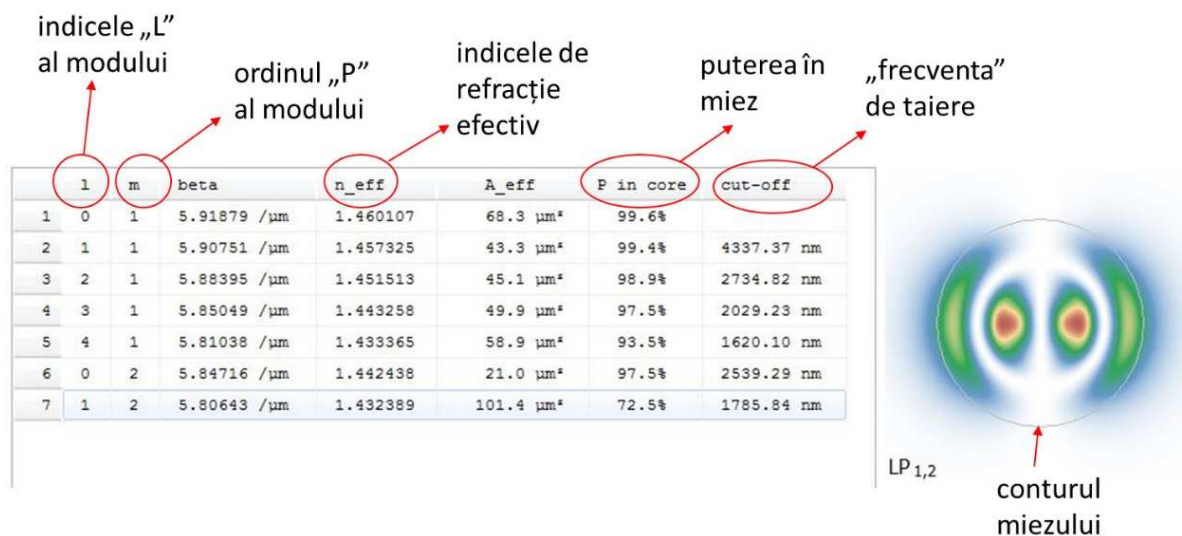


Figura 5 Fereastra proprietăților modurilor ghidate (FP Fiber Calculator)

O altă mărime fizică importantă oferită în tabelul modurilor este procentajul de putere care se propagă în miez („P in core”). Acest număr ne poate oferi o primă idee despre care moduri sunt cel mai puternic atenuate cu distanța. Modurile care au o fracțiune mai mare din puterea lor concentrată în miezul fibrei sunt atenuate mai puțin.

În final, ultima coloană din tabel este dedicată lungimii de undă limită până la care modul respectiv se va propaga ghidat în fibră. La creșterea lungimii de undă a radiației incidente peste valoarea scrisă în coloana „cut-off” din tabel, modul respectiv se va transforma într-un mod radiativ, devenind rapid atenuat de îmbrăcămintea fibrei optice.

În dreapta tabelului (Figura 5) vom putea observa distribuția intensității modului selectat în planul transversal al fibrei. Conturul miezului fibrei este marcat printr-un cerc fin. Putem observa în Figura 5 cum modul selectat (modul LP_{1,2}) are o mare parte din energia sa concentrată în afara miezului fibrei (regiunea albastră depășește conturul miezului). Mai precis, putem citi din tabel că doar 72,5% din energia modului respectiv este concentrată în miez. Reprezentarea grafică a distribuției intensității modului selectat în secțiune transversală poate fi înlocuită cu graficul variației radiale a intensității (din dialogul „Type of plot”).

2.3. Cuplajul unui laser în fibră

În următoarea pagină („Launching a beam”) putem testa eficiența de injecție a unui fascicul laser gaussian în fibra creată în pagina „Index profile”. Lungimea de undă a radiației laser folosite pentru injecție corespunde lungimii fixate în pagina „Guided modes”. Primul parametru care se poate regla (Figura 6) este raza fasciculului laser incident pe fibră – parametrul w („Waist radius of incident Gaussian laser beam”). Această rază este egală cu distanța față de centrul fasciculului pentru care intensitatea radiației scade de $1/e^2$ ori raportat la centru.

Considerând fasciculul laser poziționat în originea sistemului de coordonate, următorii parametri care se pot regla arată decalajul centrului fibrei față de această origine („Position of fiber end”). Putem seta decalajul pe orizontală (x), pe verticală (y), de-a lungul axei de propagare (z), precum și decalajul unghiular între direcția de propagare a laserului și axa longitudinală a fibrei („Angular orientation”).

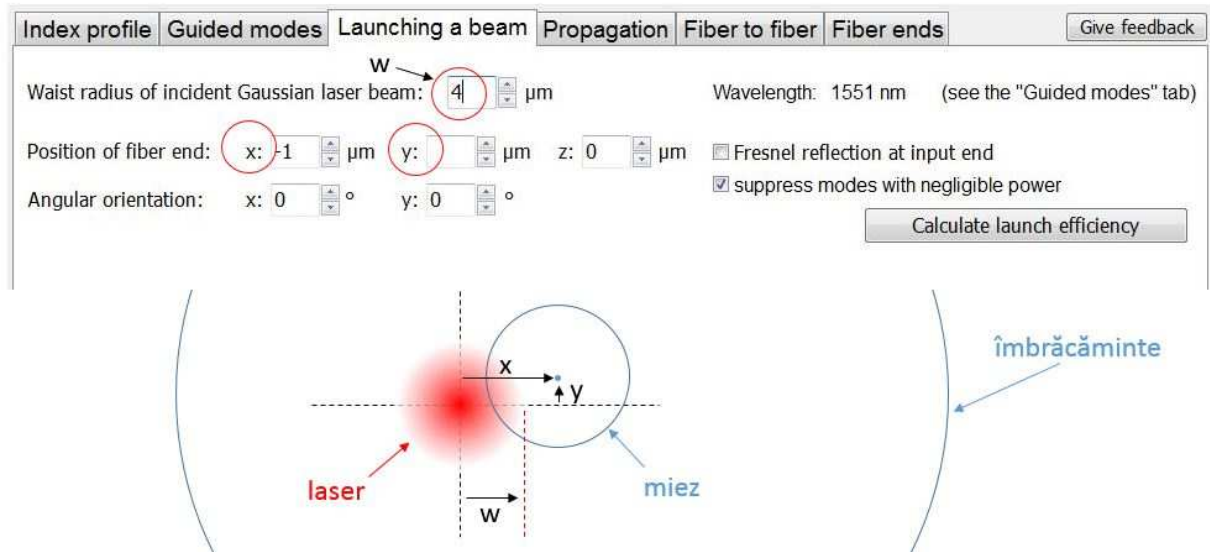


Figura 6 Parametrii cuplajului unui laser în fibră (FP Fiber Calculator)

Prin apăsarea butonului „Calculate launch efficiency” vom obține o estimare numerică a ratei de conversie a energiei laser în diferite moduri de propagare pe fibră. O sumă a tuturor ratelor de conversie ne oferă randamentul total de injecție al radiației pe fibră („Total launched power”).

2.4. Propagarea radiației luminoase prin fibră

Ultima pagină disponibilă în versiunea gratuită a simulatorului „FP Fiber Calculator” arată distribuția radiației injectate la punctul precedent de-a lungul fibrei. Pentru a realiza această simulare, programul se va folosi de toate informațiile introduse în paginile precedente („Index profile”, „Guided modes” și „Launching a beam”). Până în acest moment (în pagina „Guided modes”) am putut vedea cum arată în secțiune transversală toate modurile posibile de propagare pe fibră (luate separat). Distribuția intensității pentru fiecare mod de propagare rămâne neschimbată de-a lungul fibrei. Însă fiecare mod de propagare (Figura 5) are o constantă de propagare β diferită (deci și o lungime de undă diferită). Pe măsură ce ne deplasăm de-a lungul fibrei, diferența de fază dintre modurile de propagare se schimbă, rezultând mereu o figură de interferență diferită. Rezultă așadar o schimbare continuă a distribuției energiei de-a lungul axei de propagare a luminii, ca urmare a interacțiunii dintre moduri, chiar dacă fiecare mod luat separat rămâne neschimbat. Influența fiecărui mod în figura de interferență finală este proporțională cu procentul din energia totală care îi revine, calculat în fereastra anterioară în momentul cuplajului laserului pe fibră.

Poziția pe fibră unde dorim să vedem distribuția intensității luminoase este reglată prin parametrul „z position”. Pasul minim de trecere de la o poziție pe fibră la următoarea este reglat automat de program prin parametrul „Step size”. Distribuția intensității poate fi urmărită direct în secțiunea transversală a fibrei („near field”) sau poate fi proiectată pe un ecran cu ajutorul unui sistem optic („far field”).

2.5. Funcționalități avansate

Programul FP Fiber Calculator mai are și alte câteva funcționalități, pe care nu le găsim în versiunea gratuită a programului, precum:

- posibilitatea de a calcula automat profilul indicelui de refracție în funcție de concentrația de dopanți folosiți în miezul fibrei
- posibilitatea de a estima dispersia cromatică a modurilor de propagare
- posibilitatea de a calcula eficiența de cuplaj între două fibre diferite
- posibilitatea de a simula fenomenul de reflexie a modurilor la capătul fibrei
- posibilitatea de a trasa automat variația parametrilor ce descriu modurile de propagare în funcție de lungimea de undă

3. Desfășurarea lucrării

3.1. Proiectați o fibră cu profil dreptunghiular al indicelui de refracție, cu un miez de diametru $d_{\text{miez}}=12\mu\text{m}$ și cu un indice de refracție al învelișului de $n_2=1,5$. Variind indicele de refracție al miezului fibrei ($n_1=n_2+\Delta n$) să se completeze tabelul de mai jos și să se traseze graficul variației numărului de moduri N în funcție de Δn , la lungimea de undă de $\lambda=1550\text{nm}$. Cum variază procentul din energia totală a modului $LP_{0,1}$ care se propagă prin miezul fibrei, în funcție de Δn ?

Δn	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$32 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-3}$	$128 \cdot 10^{-3}$
N								
$P_{\text{miez}} (\%)$ $LP_{0,1}$								

3.2. Proiectați o fibră cu profil dreptunghiular, având $n_2=1,5$ și $n_1=1,51$. Variind diametrul miezului fibrei (d_{miez}) precum în tabelul de mai jos, să se traseze graficul variației numărului de moduri N în funcție de diametrul miezului, pentru o lungime de undă de $\lambda=1550\text{nm}$. Cât la sută din energia totală a primului mod se propagă în fiecare caz în parte prin miezul fibrei? Trasați graficul variației acestui procentaj.

d_{miez} (μm)	2	4	8	16	32	64	128
N							
$P_{\text{miez}} (\%)$ $LP_{0,1}$							

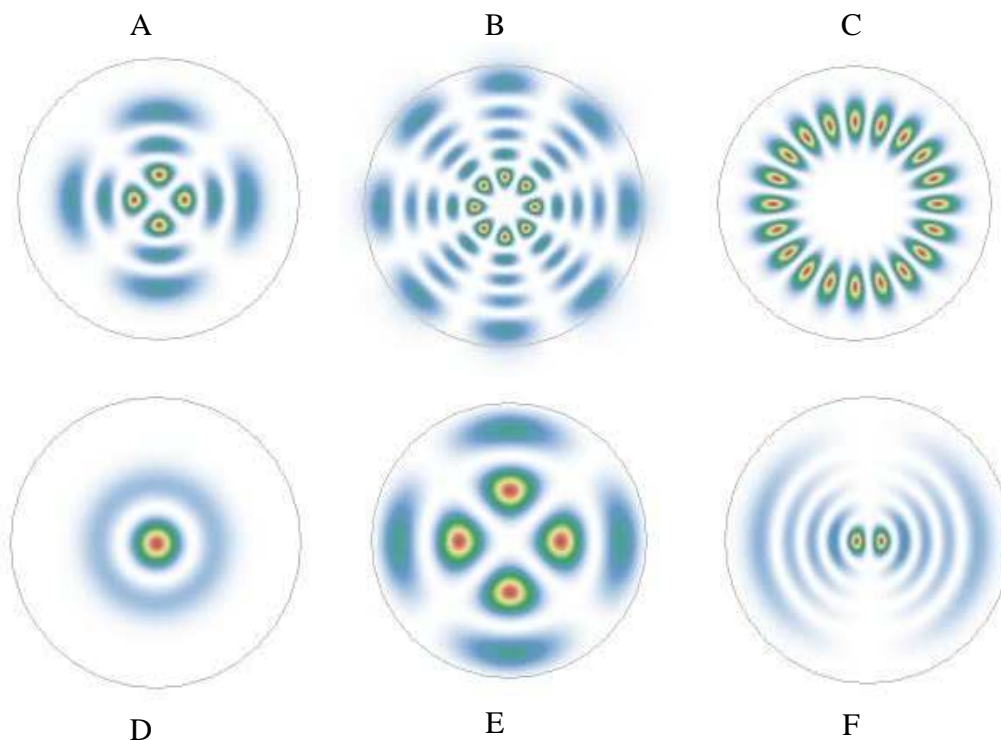
3.3. Proiectați o fibră cu profil dreptunghiular, având $n_2=1,55$ și $n_1=1,56$. Fixați diametrul miezului fibrei la valoarea de $9\mu\text{m}$. Studiați dependența numărului de moduri N în

funcție de lungimea de undă λ a radiației injectate pe fibră, conform tabelului de mai jos. Analog tabelelor precedente, se va urmări simultan și procentul P_{miez} din energia primului mod concentrată în miezul fibrei. Se vor trasa dependențele $N(\lambda)$ și $P_{\text{miez}}(\lambda)$.

λ (nm)	450	550	650	850	1300	1550	2500
N							
P_{miez} (%) LP _{0,1}							

3.4. Completați tablele de la punctele **3.2** și **3.3** pentru cazul unei fibre cu profil gradat al indicelui de refracție având $n_2=1,5$ și maximul indicelui de refracție al miezului (corespunzător centrului fibrei) $n_{1,\text{max}}=1,51$. Incercați să dați o formă parabolică variației indicelui de refracție, folosindu-vă de butonul „spline” și de divizarea miezului în două segmente. Pentru a imita o parabolă, indicele de refracție al coordonatei intermediare trebuie setat la $n=1,5075$.

3.5. Deduceți legătura dintre forma modului și numerele L și P (notate cu „l”, respectiv „m” în pagina „Guided modes”) . După ce găsiți legătura, identificați după forma lor următoarele moduri:



3.6. Se consideră o fibră cu profil dreptunghiular, având $n_2=1,55$ și $n_1=1,56$ și diametrul miezului egal cu $62,5\mu\text{m}$. Cu ce fel de fibră avem de-a face: multimode (MM) sau

singlemode (SM)? Cât se lărgeste un puls laser după 100km de propagare pe fibră din cauza dispersiei modale?

3.7. Se consideră o fibră SM cu diametrul miezului de $6\mu\text{m}$, având $n_2=1,55$ și $n_1=1,56$. În această fibră se va cupla un laser gaussian de $6\mu\text{m}$ diametru. Se va urmări eficiența cuplajului radiației laser în fibră (P – „total launched power”) în funcție de unghiul de incidență în fibră (α) și a decalajului orizontal dintre fibră și laser (x), conform tabelelor de mai jos. Se trasează graficul celor două dependențe. Laserul și fibra se consideră perfect aliniate din punctul de vedere al tuturor parametrilor, în afara celui studiat.

α (°)	0	2	4	6	8	10
P (%)						

x (μm)	0	2	4	6	8	10
P (%)						

3.8. Se consideră o fibră cu diametrul miezului de $12\mu\text{m}$ în care se cuplează radiația provenită de la un laser gaussian cu diametrul de $6\mu\text{m}$. Considerăm indicele de refracție al îmbrăcăminții fibrei de $n_2=1,55$. Vom urmări efectul pe care-l are indicele de refracție al miezului ($n_1=n_2+\Delta n$) asupra eficienței cuplajului în fibră, exprimat în procente (P – „total launched power”).

Δn	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$32 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-3}$	$128 \cdot 10^{-3}$
P (%)								

4. Intrebări teoretice

- 4.1.** Cum se schimbă frecvența la trecerea radiației dintr-un mediu cu indice de refracție n_1 într-un mediu cu indice de refracție n_2 ? Dar lungimea de undă?
- 4.2.** Demonstrați formula pentru apertura numerică (3) folosindu-vă de notațiile prezentate în Figura 2 pentru cazul aproximației geometrice.