

---

Col·lecció de Problemes de Comunicacions Òptiques

# **Fibres Òptiques**

---

**Joan M. Gené Bernaus**

Grup de Comunicacions Òptiques  
Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

## Exercici 1

Una fibra multimode de salt d'índex amb un diàmetre del nucli  $2a=80\mu\text{m}$  i una diferència d'índexs relativa  $\Delta=0.015$ , opera a una  $\lambda=0.85\mu\text{m}$ . Si l'índex de refracció del nucli és de 1.48, calculeu:

- La freqüència normalitzada ( $V$ ) de la fibra.
- El número aproximat de modes guiats ( $M$ ).
- L'obertura numèrica ( $NA$ ) i l'angle sòlid d'acceptació ( $\theta_a$ ) de la separació fibra-aire.
- Calculeu l'ample de banda de la fibra per unitat de longitud ( $f_0$ ).

### Solució:

- $V=75.79$
- $M=2872$
- $NA=0.256$
- $\theta_a=14.85^\circ$
- $f_0=5.06 \text{ MHz}\cdot\text{km}$

## Exercici 2

Una fibra òptica amb nucli i revestiment de vidre presenta els índexs de refracció respectius  $n_1=1.48$  i  $n_2=1.46$ .

- a) Demostreu que si un raig de llum entra a la fibra amb un angle de  $10^\circ$  respecte l'eix, es verificarà el principi de reflexió interna total.
- b) Si la fibra treballa a 2<sup>a</sup> finestra, calculeu el diàmetre màxim del seu nucli per tal de garantir un comportament monomode.

**Solució:**

- a) Angle acceptació  $> 10^\circ$
- b) Diàmetre  $< 4.1$  micres

### Exercici 3

- a) Calculeu l'angle intern de reflexió total d'una fibra de salt d'índex que presenta una diferència d'índexs relativa del 0.5 %.
- b) Demostreu la relació lineal aproximada que existeix entre l'angle anterior i l'obertura numèrica de la fibra.
- c) Si la fibra treballa a segona finestra, quina condició s'ha de complir per a garantir un comportament monomodal?

### Solució:

- a)  $\theta_c = 84.27$
- b)  $NA \approx n_1 \phi_c$
- c)  $2\pi a NA < 2.405\lambda$  ( $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ )

### Exercici 4

Una fibra òptica presenta una dispersió modal de 20ps/km i un coeficient de dispersió intramodal de 10 ps/km·nm. Si la font òptica té una amplada espectral  $\Delta\lambda=1\text{nm}$ , calculeu:

- a) La velocitat de transmissió màxima i l'amplada de banda de la fibra.
- b) La longitud màxima de l'enllaç per a poder transmetre 500 Mb/s.

Considereu codificació NRZ.

### Solució:

- a)  $R_{B\max}=23.7 \text{ (Gb/s)}\cdot\text{Km}$  ,  $B_E=11.85 \text{ GHz}\cdot\text{Km}$
- b)  $L_{\max}=47,6 \text{ Km}$

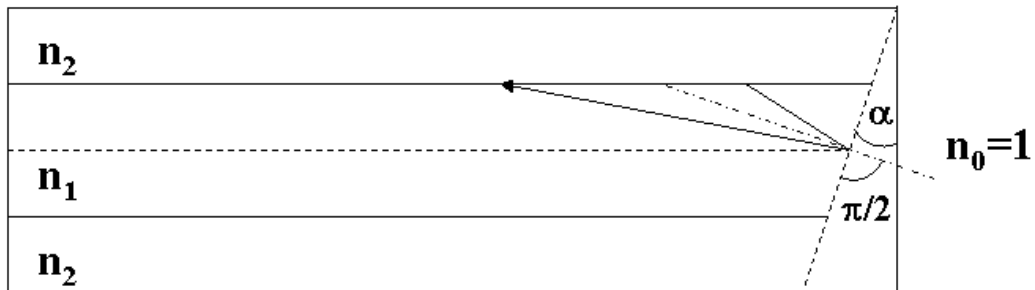
### Exercici 5

En una fibra multimode de salt d'índex amb  $V=20$  es redueix a la meitat la diferència relativa d'índexs de refracció, què succeeix amb el nombre de modes si l'índex de refracció del nucli es manté constant ?.

**Solució:** Es redueix a la meitat

### Exercici 6

Per a evitar el retorn de potència òptica guiada, es talla el final de la fibra òptica en angle (vegeu la figura). Deduïu per a quin angle mínim  $\alpha$  ens assegurem de que no hi haurà potència òptica de retorn pel nucli expressant-ho en funció de l'angle crític.



**Solució:**  $\alpha > \theta_c$

### Exercici 7

Una fibra monomode (a 1.3  $\mu\text{m}$ ) de salt d'índex té un radi del nucli  $a = 3.5 \mu\text{m}$ . Els índexs de refracció del nucli i del revestiment són respectivament  $n_1 = 1.447$ ,  $n_2 = 1.442$ . Els números de grup del nucli i del revestiment són respectivament  $n_{1g}=1.462$  i  $n_{2g}=1.457$ .

- a) Confirmeu que es tracta d'una fibra monomode.
- b) Calculeu la dispersió guia-ona si la font emprada és un LED amb  $\Delta\lambda=50\text{nm}$ .

### Solució:

- a) La fibra és monomode
- b)  $D_w=308\text{ps/Km}$

## Exercici 8

Una fibra de salt d'índex presenta les següents característiques:

- Diàmetre del nucli  $2a=50$  micres
- Índex de refracció del nucli  $n_1=1.47$
- Diferència relativa d'índexs  $\Delta=0.01$
- Coeficient de dispersió del material  $D_M=25$  ps/nm·Km

Si injectem llum procedent d'un LED amb una longitud d'ona central  $\lambda=1550$ nm i una amplada espectral  $\Delta\lambda=80$ nm, dedueix la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10Mb/s en format NRZ.

**Solució:** 1.086 Km

## Exercici 9

Una fibra de salt d'índex presenta les següents característiques:

Diàmetre del nucli  $2a=50$  micres

Índex de refracció del nucli  $n_1=1.47$

Diferència relativa d'índexs  $\Delta=0.01$

Coefficient de dispersió del material  $D_M=25$  ps/nm·Km

Es demana:

- Si injectem llum procedent d'un LED amb una longitud d'ona central  $\lambda=1550$ nm i una amplada espectral  $\Delta\lambda=80$ nm, deduiu la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10 Mb/s en format RZ.
- Quin hauria de ser com a màxim el temps de vida del portador del LED per a permetre la transmissió de l'apartat anterior ?.

**Solució:**

- 0.541 Km
- 16 ns / 16.7 ns

**Exercici 10**

Es disposa d'una font òptica sintonitzable que emet una portadora òptica en el rang  $\lambda = 1.25 \pm 0.25 \mu\text{m}$  amb una amplada espectral  $\Delta\lambda = 0.3\text{nm}$ . Es tracta de calcular en quin marge espectral podrà treballar aquesta font per a que la fibra òptica associada ( $2a = 10\mu\text{m}$  i  $NA = 0.11$ ) tingui un comportament monomode i una dispersió relativa inferior al 10%, és a dir:

$$\left| \tau|_{\lambda} - \tau|_{1.55\mu\text{m}} \right| \leq \frac{\tau|_{1.55\mu\text{m}}}{10}$$

Nota: Suposeu menyspreable la dispersió guia-ona i preneu  $n''(\lambda) = -\frac{0.01}{\lambda^2}$ .

**Solució:**  $1.437\mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722\mu\text{m}$

**Exercici 11**

Considereu una fibra de salt d'índex de SiO<sub>2</sub> amb les següents dades:

- $n_1=1.48, n_2=1.46$
- $a=2.03\mu\text{m}$
- $\lambda_p=1550\text{nm}$
- $n''(\lambda) = -\frac{0.01}{\lambda^2}$

- a) Deduïu l'expressió del coeficient de dispersió del material.
- b) Si s'utilitza un làser multimode amb  $\lambda_p=1550\text{nm}$  i  $\Delta\lambda=5\text{nm}$ , trobeu el valor de la dispersió del material.
- c) Considereu que la dispersió guia-ona pot calcular-se a partir de la següent expressió:

$$\tau_w = D_w (n_1 - n_2) \frac{V}{c\lambda} \Delta\lambda$$

On  $D_w$  depèn de  $V$  i que la relació es pot linealitzar a trams per valors de  $V$  compresos entre 1 i 3:

- $V=1 \rightarrow D_w=-2$
- $V=2 \rightarrow D_w=-0.5$
- $V=2.5 \rightarrow D_w=-0.2$
- $V=3 \rightarrow D_w=0$

Quin valor hauria de tenir el radi de la fibra per a aconseguir un mínim de dispersió intramodal a la  $\lambda_p$  anterior ?.

- d) Quin comentari es podria fer respecte la dispersió total sota les noves condicions geomètriques deduïdes a l'apartat anterior ?.

**Exercici 12**

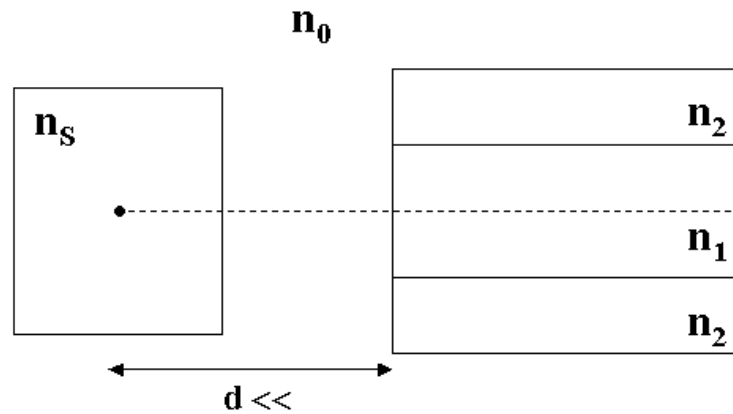
- a) Calculeu la fracció de potència òptica emesa des d'un LED que és acceptada per una fibra de salt d'índex en aire amb obertura numèrica  $NA=0.1$  i índex de refracció del nucli  $n_1=1.46$ . Suposeu que el LED té una superfície plana, un índex de refracció  $n_L=3.6$  i un diagrama de radiació proporcional a  $\cos^4\theta$ . Suposeu que el LED està enganxat al nucli de la fibra i que l'àrea d'emissió és menor que la del nucli.
- b) Respecte les pèrdues d'acoblament LED-fibra, si el diagrama de radiació fos proporcional a  $\cos\theta$  (Diagrama de Lambert), augmentarien o disminuirien ?.

**Solució:**

- a) -34.62 dB  
b) Augmentarien (4 dB)

**Exercici 13**

Considereu una font òptica puntual que emet llum des de la zona activa de manera isotròpica (vegeu la figura). Calculeu la relació entre la potència òptica injectada a la fibra i la potència òptica total emesa per la font (eficiència d'acoblament) tenint en compte que la distància font-fibra és menyspreable.



Dades:

Índex de refracció zona activa:  $n_s=3.5$

Índex de refracció de l'entorn:  $n_0=1$

Índex de refracció del nucli de la fibra:  $n_1=1.5$

Diferència relativa d'índexs de la fibra:  $\Delta=1\%$

**Solució:** -32.15 dB

**Exercici 14**

- a) Deduïu les pèrdues que es generen pel fet d'unir dues fibres òptiques que presenten diferents tamanys pel que fa al nucli. La primera fibra té un radi del nucli  $a_1=50$  micres mentre que la segona  $a_2=10$  micres. Què passa si canviem el sentit de propagació ?.
- b) Deduïu les pèrdues que es generen pel fet d'unir dues fibres òptiques idèntiques excepte pel que fa a l'obertura numèrica. La primera fibra té una  $NA_1=0.1$  i la segona  $NA_2=0.08$ . Feu el mateix per al cas  $NA_2=0.12$ .

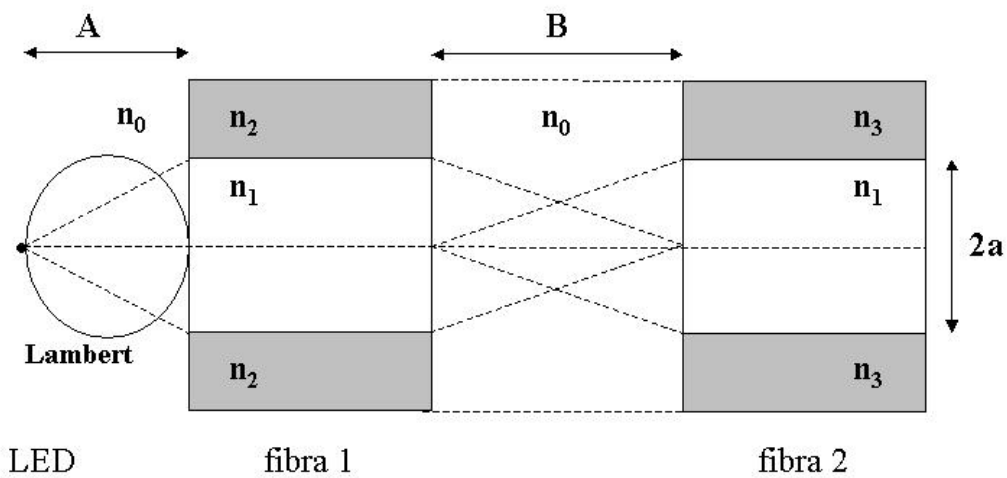
**Solució:**

- a)  $L_{dB} = 7 \text{ dB} / L_{dB} = 0 \text{ dB}$   
b)  $L_{dB} = 1.94 \text{ dB} / L_{dB} = 0 \text{ dB}$

### Exercici 15

Considereu el conjunt: LED + fibra 1 + fibra 2 de la figura. Es demana:

- La fracció de potència òptica injectada a la fibra 1 respecte la potència òptica total radiada per la font (eficiència d'acoblament) en funció de la distància A. Preneu la font com a puntual i amb un diagrama de radiació de Lambert.
- Deduïu les pèrdues existents en la unió entre la fibra 1 y la fibra 2 sabent que estan separades una distància B i que presenten diferents índexs de refracció del revestiment.



Solució:

$$a) \quad A \leq \frac{n_0 a}{NA} \rightarrow \eta = (1-R) \left( \frac{NA}{n_0} \right)^2$$

$$A \geq \frac{n_0 a}{NA} \rightarrow \eta \approx (1-R) \left( \frac{a}{A} \right)^2$$

$$b) \quad n_3 \leq n_2 \rightarrow L_{dB} \equiv 2 \cdot 10 \log \left( 1 - \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right) + 10 \log \left( \frac{a}{a+B} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right)^2 + 10 \log \left( \frac{n_1^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \right)$$

$$n_3 \geq n_2 \rightarrow L_{dB} \equiv 2 \cdot 10 \log \left( 1 - \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right) + 10 \log \left( \frac{a}{a+B} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right)^2$$