

Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 25 de Març de 2009

Temps : 1h 30'

Nom:

TEST (6 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

- Dels conceptes de freqüència i longitud d'ona es pot dir que:
 - La freqüència depèn del medi on es propaga la llum mentre que la longitud d'ona no
 - La longitud d'ona depèn del medi on es propaga la llum mentre que la freqüència no
 - Tant la freqüència com la longitud d'ona depenen del medi on es propaga la llum
 - Ni la freqüència ni la longitud d'ona depenen del medi on es propaga la llum
- Quan un raig de llum incideix des del medi 1 (n_1) al medi 2 (n_2), tota l'energia romandrà al medi 1 (reflexió interna total) si es compleix que:
 - $\sin \phi_i > n_2/n_1$ i $n_1 > n_2$
 - $\sin \phi_i < n_2/n_1$ i $n_1 > n_2$
 - $\sin \phi_i > n_2/n_1$ i $n_1 < n_2$
 - $\sin \phi_i < n_2/n_1$ i $n_1 < n_2$on ϕ_i és l'angle que forma el raig incident i la normal a la superfície de separació entre els dos medis.
- Quan un raig de llum incideix des del medi 1 (n_1) al medi 2 (n_2), la transferència energètica serà màxima quan:
 - La incidència sigui paral·lela a la superfície de separació entre els dos medis
 - La incidència sigui perpendicular a la superfície de separació entre els dos medis
 - La incidència es produeixi seguint l'angle crític
 - La incidència es produeixi seguint l'angle d'acceptació
- Les dimensions (diàmetre nucli/revestiment) de les fibres monomode (SM) – multimode (MM) de salt d'índex estàndard són:
 - 9/18 μm (SM) – 62.5/125 μm (MM)
 - 9/18 μm (MM) – 62.5/125 μm (SM)
 - 9/125 μm (SM) – 62.5/125 μm (MM)
 - 9/125 μm (MM) – 62.5/125 μm (SM)
- En una fibra òptica multimode de salt d'índex 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?:
 - Es duplica
 - Es redueix a la meitat
 - Es multiplica per 4
 - Es divideix per 4
- Una fibra òptica que té un diàmetre del nucli de 9 micres i una obertura numèrica del 12%, podem dir que:
 - És monomode a segona finestra però no a tercera finestra
 - És monomode a tercera finestra i a segona finestra
 - És monomode a tercera finestra però no a segona finestra
 - No és monomode ni a tercera finestra ni a segona finestra
- La corba d'atenuació a la tercera finestra d'una fibra òptica monomode estàndard ve dominada per:
 - L'absorció ultraviolada i l'scattering de Mie
 - L'absorció infraroja i l'scattering de Mie
 - L'absorció ultraviolada i l'scattering de Rayleigh
 - L'absorció infraroja i l'scattering de Rayleigh

8. Un receptor de comunicacions òptiques requereix una energia de bit $E_b=10^{-17}\text{J}$ per a garantir la qualitat de la transmissió. Si la fibra que forma l'enllaç presenta un paràmetre d'atenuació $\alpha=0.2\text{ dB/Km}$ i la potència mitjana transmesa és de 10 dBm , determineu la màxima distància de transmissió limitada per atenuació d'un senyal NRZ de 10 Gb/s .

- a. 250 Km b. 200 Km c. 100 Km d. 50 Km

9. Es pretén transmetre un senyal NRZ de $R_b=10\text{ Gb/s}$ per una fibra monomode amb un paràmetre de dispersió $D=16\text{ ps/nm/Km}$. Considerant una portadora ideal de 3ª finestra i que l'amplada espectral del senyal a transmetre és $\Delta f=5\text{ GHz}$, quina serà la màxima distància de transmissió aproximada ?:

- a. 160 Km b. 120 Km c. 80 Km d. 40 Km

10. El que limita la màxima distància de transmissió d'un sistema de transmissió per fibra òptica podem dir que:

- a. És sempre l'atenuació
b. És la dispersió quan la velocitat de transmissió és baixa
c. És l'atenuació quan la velocitat de transmissió és elevada
d. És la dispersió quan la velocitat de transmissió és elevada

11. Una fibra de salt d'índex presenta les següents característiques: diàmetre del nucli $2a=50\text{ micres}$, índex de refracció del nucli $n_1=1.47$, diferència relativa d'índexs $\Delta=0.001$ i coeficient de dispersió del material $D_M=25\text{ ps/nm/Km}$. Si injectem llum procedent d'un LED amb una longitud d'ona central $\lambda=1550\text{ nm}$ i una amplada espectral $\Delta\lambda=80\text{ nm}$, deduiu la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10 Mb/s en format RZ.

- a. 0.5 km b. 1 km c. 5 km d. 10 km

12. 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 $n_1=1.48$ i el de l'aire és $n_0=1$, calculeu l'angle sòlid d'acceptació (Ω_a) de la separació fibra-aire:

- a. 0.21 strad b. 21 strad c. 0.42 strad d. 42 strad

13. En quant a l'eficiència d'acoblament d'una font cap a la fibra, quin dels següents diagrames de radiació de la font és el més desitjable (θ és l'angle respecte l'eix de la fibra):

- a. $P(\theta) = \sin \theta$
b. $P(\theta) = \cos \theta$
c. $P(\theta) = \sin^n \theta$, on $n > 1$
d. $P(\theta) = \cos^n \theta$, on $n > 1$

14. Determineu l'expressió de la fracció de potència òptica emesa des d'una font puntual que és acceptada per una fibra de salt d'índex amb obertura numèrica NA i índex de refracció del nucli n_1 . La font radia en un únic sentit de l'espai de la forma $\cos^n(\theta)$ i l'índex de refracció de l'ambient és $n_0=1$. Supposeu que la font està a molt poca distància de la fibra:

- a. $\eta_c = (1-R) \left\{ 1 - (1-NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$ $R = \left[(1-n_1)/(1+n_1) \right]^2$
b. $\eta_c = R \left\{ 1 - (1-NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$
c. $\eta_c = (1-R) \left\{ (1-NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$
d. $\eta_c = R \left\{ (1-NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$

15. Determineu les pèrdues en dB associades a una transició ideal entre dues fibres amb un radi del nucli a_1 / a_2 , un mateix índex de refracció del nucli n_1 , un índex de refracció del revestiment $n_{2,1} / n_{2,2}$ a partir de la definició de freqüència normalitzada V:

- a. $10\log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{2,1} < n_{2,2}$
b. $20\log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{2,1} < n_{2,2}$
c. $10\log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{2,1} > n_{2,2}$
d. $20\log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{2,1} > n_{2,2}$

PROBLEMA (4 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

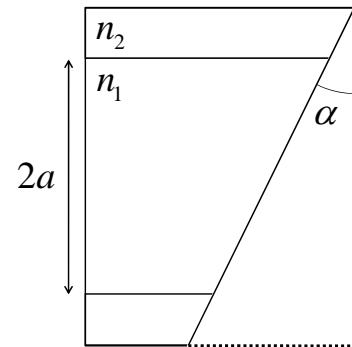
Es defineixen les pèrdues de retorn en una connexió de fibra òptica com la fracció de potència òptica reflectida en sentit contrari al de propagació (P_R) respecte la potència injectada (P_I) (el signe menys és per a tenir un

valor en dB positiu): $L_R \equiv -10 \log \frac{P_R}{P_I}$

- 1) Si es disposa d'una fibra de salt d'índex amb un índex de refracció del nucli $n_1=1.5$, les pèrdues de retorn aproximades en una connexió de dues fibres d'aquest tipus són de (considereu que l'ambient és el buit) :

a) 7 dB **b) 14 dB** c) 21 dB d) 28 dB

- 2) Per tal de reduir les pèrdues de retorn, es proposa fer un tall en angle del final de fibra enlloc de perpendicular. Prenent com a referència un tall longitudinal de la fibra en un pla perpendicular a la superfície del final de fibra i que passa pel centre del nucli (vegeu figura), deduïu quin ha de ser l'angle de tall que garanteixi unes pèrdues de retorn ideals en funció de l'angle crític (ϕ_c) de la fibra i del seu complementari (θ_c):

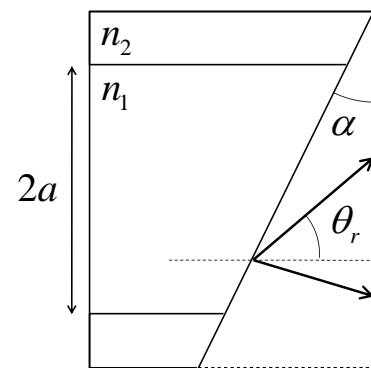


a) $\alpha \geq \phi_c$ b) $\alpha \leq \phi_c$ **c) $\alpha \geq \theta_c$** d) $\alpha \leq \theta_c$

- 3) Si la tècnica del tall angular aconsegueix mitigar en un 96% la llum que es vol propagar en sentit contrari al de transmissió, quan valdran les noves pèrdues de retorn ?:

a) 7 dB b) 14 dB c) 21 dB **d) 28 dB**

- 4) A part de reduir les pèrdues de retorn, és important que l'impacte sobre el senyal transmès sigui el més petit possible. Determineu la casuística d'angles projectats fora de la fibra emissora a partir de la casuística de rajos propagats internament per la mateixa. Considereu únicament un tall longitudinal de la fibra en un pla perpendicular a la superfície del final de fibra (vegeu figura):



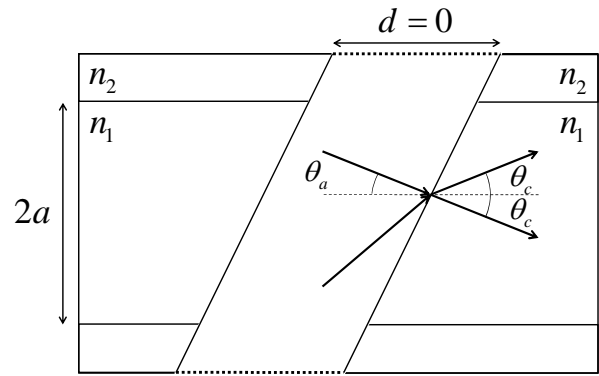
a) $-\theta_c \leq \theta_r \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} - \theta_c$

b) $\theta_c \leq \theta_r \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} + \theta_c$

c) $-\theta_c \leq \theta_r \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_c \right\} - \theta_c$

d) $\theta_c \leq \theta_r \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_c \right\} + \theta_c$

- 5) Considereu una fibra receptora amb un tall complementari al de la fibra emissora. Determineu el marge angular d'acceptació d'aquesta (vegeu figura) per tal de garantir la reflexió interna total en la fibra receptora en funció de l'angle crític complementari (θ_c):



a) $-\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_c \right\} \leq \theta_a \leq -\theta_c$

c) $-\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} \leq \theta_a \leq -\theta_c$

b) $\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_c \right\} \leq \theta_a \leq \theta_c$

d) $\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} \leq \theta_a \leq \theta_c$

- 6) Quan valdran aproximadament les pèrdues de la connexió entre aquestes dues fibres assumint una distància de separació menyspreable ?:

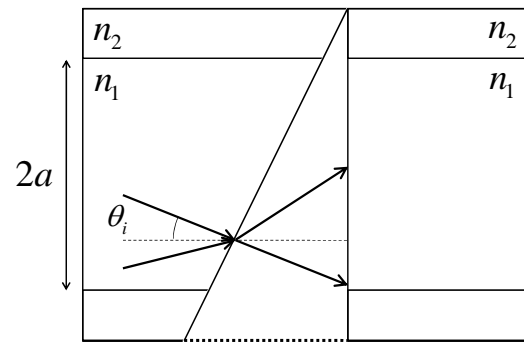
a) 0.18 dB

b) 0.35 dB

c) 14 dB

d) 28 dB

- 7) Un error habitual en la connexió de fibres es dona quan es pretén connectar una fibra de tall angular amb una de tall perpendicular. Determineu el marge angular (θ_i) de propagació interna en la fibra transmissora que serà admès per la fibra receptora (vegeu figura) per tal de garantir reflexió interna total, en funció de l'angle crític complementari (θ_c) i de l'angle d'acceptació (θ_a) definits en la fibra receptora:



a) $\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin (\theta_a - \theta_c) \right\} \leq \theta_i \leq \theta_c$

c) $\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin (\theta_a + \theta_c) \right\} \leq \theta_i \leq \theta_c$

b) $-\theta_c \leq \theta_i \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin (\theta_a - \theta_c) \right\} + \theta_c$

d) $-\theta_c \leq \theta_i \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin (\theta_a + \theta_c) \right\} + \theta_c$

- 8) Per tal d'estimar les pèrdues degudes a aquest efecte (desadaptació angular), es pot definir un cert factor d'acoblament (vegeu fórmula). Determineu el factor d'acoblament en funció de α :

$$\eta_c \equiv \frac{2 \int_0^{\theta_c} \int_0^{\theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha\right)} \sin \theta \partial \theta \partial \phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_c} \sin \theta \partial \theta \partial \phi}, \quad \alpha < 1$$

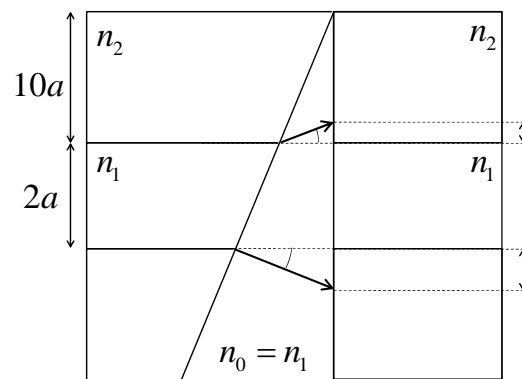
a) $\eta_c = \frac{1 - \frac{1}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{\theta_c (1 - \alpha)\})}{1 - \cos \theta_c}$

b) $\eta_c = \frac{1 - \alpha \theta_c (\sin \theta_c - \sin \{\theta_c (1 - \alpha)\})}{1 - \cos \theta_c}$

c) $\eta_c = \frac{1 - \frac{1}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{\theta_c (1 - \alpha)\})}{1 - \sin \theta_c}$

d) $\eta_c = \frac{1 - \alpha \theta_c (\sin \theta_c - \sin \{\theta_c (1 - \alpha)\})}{1 - \sin \theta_c}$

- 9) Degut al tall angular també es produiran pèrdues per projecció de llum fora del nucli de la fibra receptora (vegeu figura). Per tal de simplificar els càlculs, considereu que l'espai que queda entre les dues fibres s'omple amb un líquid adaptador ($n_0=n_1$). Considereu també que la llum està uniformement distribuïda a tota la superfície il·luminada i que aquesta és circular:



a) $20\log\left(\frac{1}{1+6\operatorname{tg}^2\theta_a+5\operatorname{tg}\theta_c\operatorname{tg}\theta_a}\right)$

b) $20\log\left(\frac{1}{1+6\operatorname{tg}^2\theta_c+5\operatorname{tg}\theta_c\operatorname{tg}\theta_a}\right)$

c) $20\log\left(\frac{1}{1+5\operatorname{tg}^2\theta_a+6\operatorname{tg}\theta_c\operatorname{tg}\theta_a}\right)$

d) $20\log\left(\frac{1}{1+5\operatorname{tg}^2\theta_c+6\operatorname{tg}\theta_c\operatorname{tg}\theta_a}\right)$

- 10) Determineu les pèrdues aproximades degudes a aquesta connexió tenint en compte que hi haurà 3 contribucions: pèrdues per reflexions, pèrdues per desadaptació angular i pèrdues per projecció de llum fora del nucli de la fibra receptora. Preneu $\theta_c=15^\circ$, $\theta_a=23^\circ$ i $\alpha=0.6$.

a) 3 dB

b) 6 dB

c) 9dB

d) 12 dB

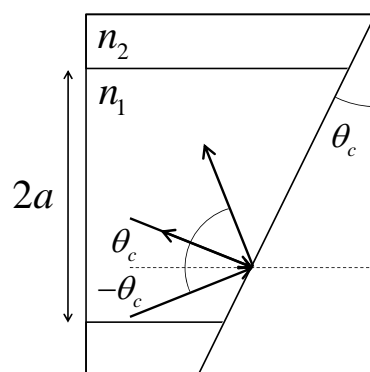
Resolució

- 1) Tenim un canvi de medi fibra-buit. No considerem el segon canvi de medi per simplicitat:

$$L_R \equiv -10\log\frac{P_R}{P_I} \approx -10\log R \approx 14\text{ dB}$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}\right)^2 \xrightarrow{n_0=1} \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1}\right)^2$$

- 2) Per tal de garantir que la llum de retorn no complirà reflexió interna total, només cal que l'angle de tall sigui igual (o superior) a l'angle crític complementari:



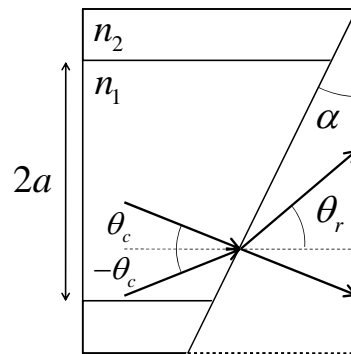
3) Si la tècnica de tall mitiga en un 96% la llum de retorn tenim:

$$L_R \equiv -10 \log \frac{P_R}{P_I} \approx -10 \log (R \cdot R') = -20 \log R \approx 28 \text{ dB}$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \xrightarrow{n_0=1} \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2$$

$$R' = 1 - 0.96 = 0.04 = R$$

4) Els rajos que arriben al final de fibra ho fan seguint el marge angular establert per l'angle crític complementari i refracten cap a l'exterior segons la figura:

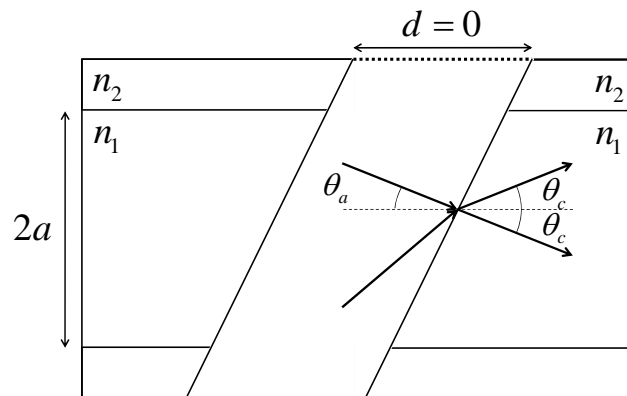


Així doncs, l'angle de refracció ha de complir (Llei de Snell):

$$n_1 \sin 2\theta_c = n_0 \sin (\theta_r + \theta_c) \rightarrow \theta_r = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} - \theta_c \rightarrow$$

$$\rightarrow -\theta_c \leq \theta_r \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{n_1}{n_0} \sin 2\theta_c \right\} - \theta_c$$

5) Tenim la situació següent:



Com es pot veure a la figura, la situació és anàloga a la de la fibra emissora, per tant el marge angular d'acceptació és complementària al marge angular d'emissió. Si respectem els signes de definició dels angles, tenim:

$$\theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{2}{n_0} \frac{n_2}{n_1} NA \right\} \leq \theta_a \leq \theta_c$$

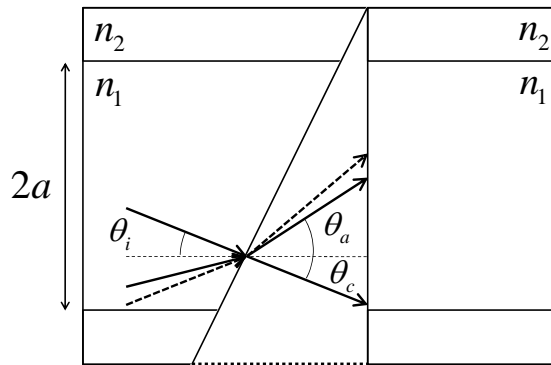
Per tant, tota la llum emesa per la fibra emissora és acceptada per la fibra receptora des del punt de vista angular.

6) Les pèrdues d'aquesta connexió entre fibres són únicament les pèrdues per reflexió, sempre i quan la distància de separació sigui menyspreable. Si es considera que els angles continuen essent petits, es pot prendre el coeficient de reflexió per a una incidència normal a la superfície de separació i la situació és anàloga a la de fibres amb tall perpendicular. Com que es tenen 2 canvis de medi les pèrdues seran:

$$L_R \equiv -10 \log \frac{P_T}{P_I} \approx -10 \log (1-R)^2 \approx 0.35 \text{ dB}$$

$$R = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \xrightarrow{n_0=1} \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2$$

7) La situació és la següent:



Com es pot veure en la figura anterior, la llum acceptada per la fibra receptora ve determinada per l'angle d'acceptació de la mateixa. Donat el tall angular de la fibra transmissora, l'angle d'incidència en la fibra receptora només donarà problemes en la banda superior que, per construcció superarà l'angle d'acceptació. Ara només cal transportar aquest angle a l'interior de la fibra transmissora:

$$n_1 \sin(\theta_c - \theta_i) = n_0 \sin(\theta_a + \theta_c) \rightarrow \theta_i = \theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin(\theta_a + \theta_c) \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin(\theta_a + \theta_c) \right\} \leq \theta_i \leq \theta_c$$

8) Per tal de determinar les pèrdues que suposa aquesta desadaptació angular apliquem l'expressió que ens dona l'enunciat:

$$\eta_c \equiv \frac{2 \int_0^\pi \int_0^{\theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha\right)} \sin \theta \partial \theta \partial \phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_c} \sin \theta \partial \theta \partial \phi} = \frac{2 \int_0^\pi \int_0^{\theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha\right)} \sin \theta \partial \theta \partial \phi}{2\pi(1 - \cos \theta_c)} = \frac{1 - \frac{1}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{\theta_c (1 - \alpha)\})}{1 - \cos \theta_c}$$

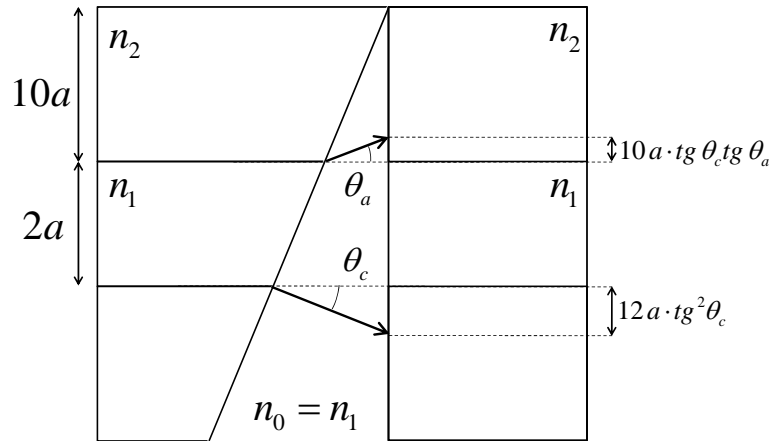
$$2 \int_0^\pi \int_0^{\theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha\right)} \sin \theta \partial \theta \partial \phi = 2 \int_0^\pi \left(1 - \cos \left\{ \theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha \right) \right\} \right) \partial \phi =$$

$$\begin{aligned}
&= \underbrace{2 \int_0^{\pi} \partial \phi}_{2\pi} - 2 \underbrace{\int_0^{\pi} \cos \left\{ \theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha \right) \right\} \partial \phi}_{-\frac{\pi}{\alpha \theta_c} \sin \left\{ \theta_c \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \alpha \right) \right\} \Big|_0^{\pi} = -\frac{\pi}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{ \theta_c (1 - \alpha) \})} \\
&= 2\pi \left(1 - \frac{1}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{ \theta_c (1 - \alpha) \}) \right)
\end{aligned}$$

Lligant amb l'apartat anterior, l'angle α estaria definit de la forma següent:

$$\theta_{i,\min} = \theta_c - \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin(\theta_a + \theta_c) \right\} = \theta_c \left(1 - \frac{\sin^{-1} \left\{ \frac{n_0}{n_1} \sin(\theta_a + \theta_c) \right\}}{\underbrace{\theta_c}_{\equiv \alpha}} \right) = \theta_c (1 - \alpha)$$

9) A partir del resultat de l'apartat 7), tenim la situació següent:



A partir de la figura es pot veure com la separació entre els dos nuclis de la fibra donarà lloc a que la llum projectada per la primera fibra caigui fora del nucli de la segona. Donat el tall angular, la il·luminació és asimètrica i s'ha de tenir en compte l'obertura del feix per la banda superior i la banda inferior. Assumint que la superfície il·luminada continua sent circular, la relació entre àrees ens donarà les pèrdues:

$$L_C \equiv 10 \log \left(\frac{2a}{2a(1 + 6tg^2 \theta_c + 5tg \theta_c tg \theta_a)} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{1}{1 + 6tg^2 \theta_c + 5tg \theta_c tg \theta_a} \right)$$

10) Les pèrdues totals seran la suma de totes les contribucions: reflexió + il·luminació + desadaptació angular.

$$L_T = \underbrace{10 \log (1 - R)^2}_{\sim 0.35dB} + \underbrace{20 \log \left(\frac{1}{1 + 6tg^2 \theta_c + 5tg \theta_c tg \theta_a} \right)}_{\sim 6dB} + \underbrace{10 \log \left(\frac{1 - \frac{1}{\alpha \theta_c} (\sin \theta_c - \sin \{ \theta_c (1 - \alpha) \})}{1 - \cos \theta_c} \right)}_{\sim 2.8dB} \approx 9.15dB$$