

B.3. Propagación de la luz en guías de onda

B.3.1 Introducción

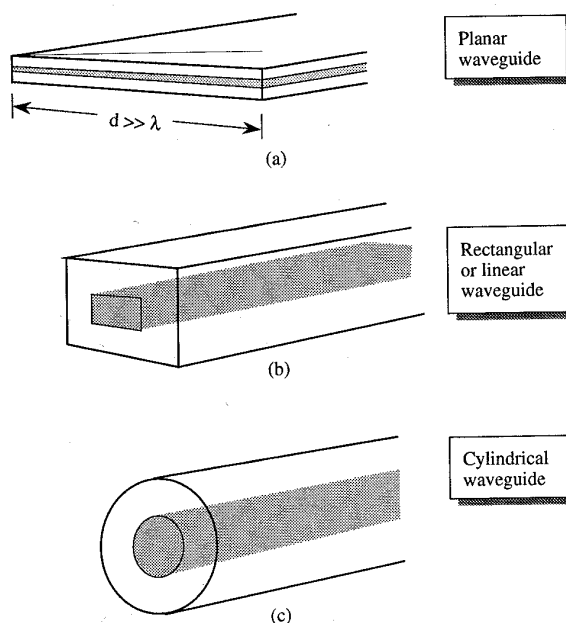
Los haces ópticos son confinados a una región finita del espacio => guías de onda

- guías de onda planas y cilíndricas
- acoplamiento de luz a guías de onda y entre guías

B.3.2 Propiedades físicas de las guías de onda

Características de las guías de onda:

- es una tubería de luz
- se puede modular la onda luminosa
- se utilizan como resonadores para amplificadores



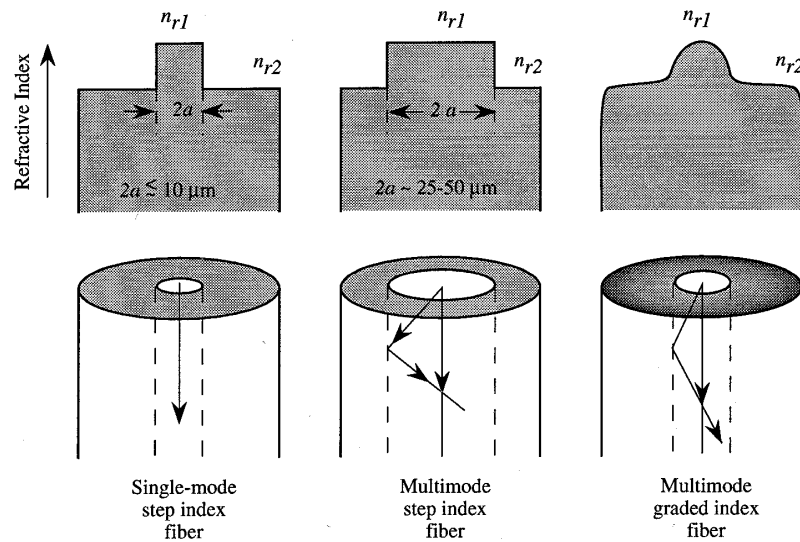
B.3.2.1 Propiedades de la fibras ópticas

Se basan en la variación del índice de refracción

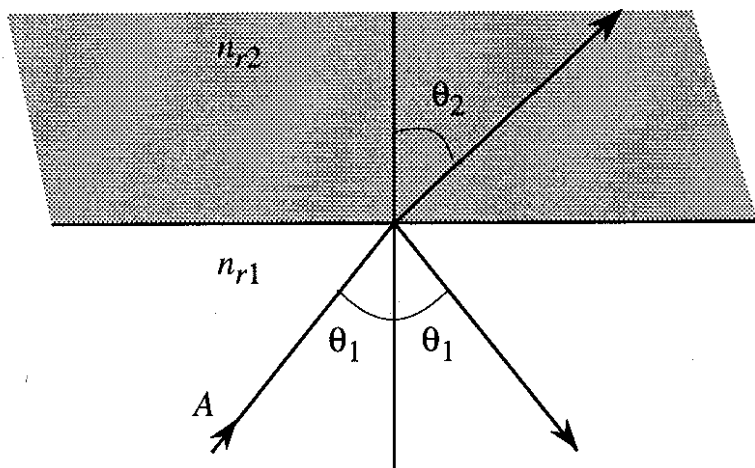
3 categorías: de silicatos, de vidrio, de plástico (mayor atenuación)

fibra óptica: guía cilíndrica

clasificación: perfil del índice, tamaño del núcleo



B.3.3 Guías planas: un estudio de óptica geométrica



θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refracción, respectivamente.

- Modo TE:

$$r_{TE} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_{r1} \cos \theta_1 - \sqrt{n_{r2}^2 - n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1}}{n_{r1} \cos \theta_1 + \sqrt{n_{r2}^2 - n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1}}$$

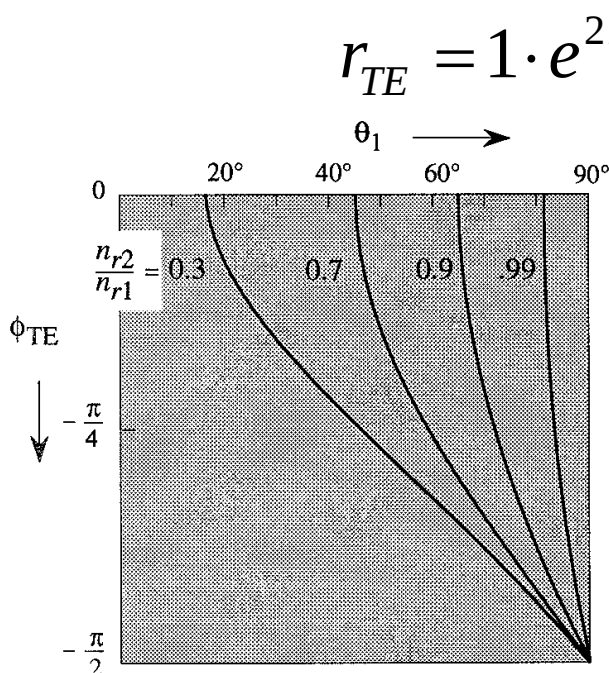
$$t_{TE} = \frac{2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{2 \cdot n_{r1} \cdot \cos \theta_1}{n_{r1} \cdot \cos \theta_1 + n_{r2} \cdot \cos \theta_2}$$

- Modo TM:

$$r_{TM} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{n_{r2}^2 \cos \theta_1 - n_{r1} \sqrt{n_{r2}^2 - n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1}}{n_{r2}^2 \cos \theta_1 + n_{r1} \sqrt{n_{r2}^2 - n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1}}$$

$$t_{TM} = \frac{2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{2 \cdot n_{r1} \cdot \cos \theta_1}{n_{r2} \cdot \cos \theta_1 + n_{r1} \cdot \cos \theta_2}$$

Si $\theta_1 > \theta_c \implies \sin \theta_1 > \sin \theta_c = \frac{n_{r2}}{n_{r1}}$ **Reflexión total**



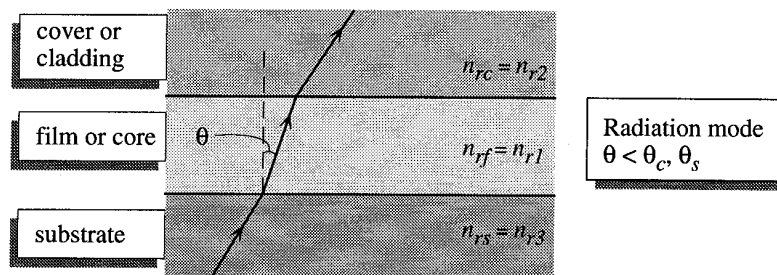
Con:

$$\tan \phi_{TE} = -\frac{\sqrt{n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1 - n_{r2}^2}}{n_{r1} \cos \theta_1}$$

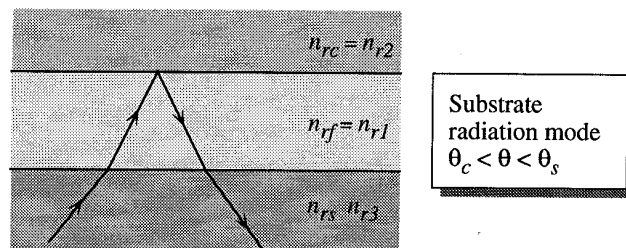
$$\tan \phi_{TM} = -n_{r1} \frac{\sqrt{n_{r1}^2 \sin^2 \theta_1 - n_{r2}^2}}{n_{r2}^2 \cos \theta_1}$$

Guía de onda plana: substrato (n_{r3}), película (n_{r1}) y recubrimiento (n_{r2}) y generalmente

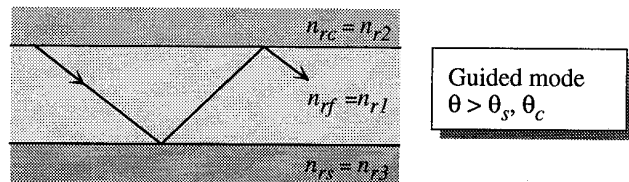
$$n_{r1} > n_{r3} > n_{r2}$$



(a)



(b)



(c)

a) modo radiado ($\theta < \theta_s$, $\theta < \theta_c$)

b) modo radiado por substrato ($\theta_c < \theta < \theta_s$)

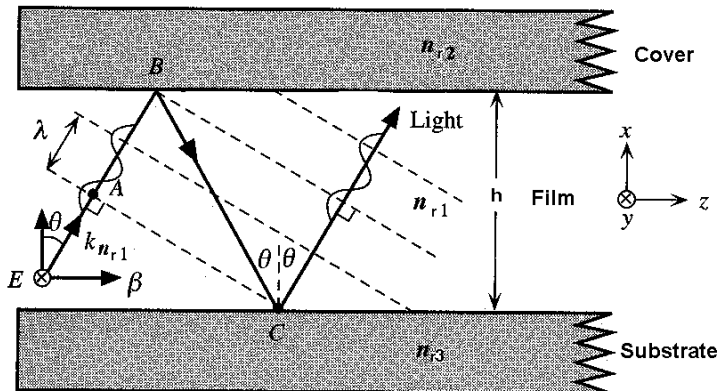
c) modo guiado ($\theta_s < \theta$, $\theta_c < \theta$)

θ_s : ángulo crítico película-substrato;

θ : ángulo de incidencia;

θ_c : ángulo crítico película-recubrimiento

B.3.3.1 Modos guiados en una guía de ondas plana



β = Cte. de propagación efectiva a lo largo del eje de propagación de la guía (z)

$V_{p,\beta}$ = Velocidad de fase relacionada con β

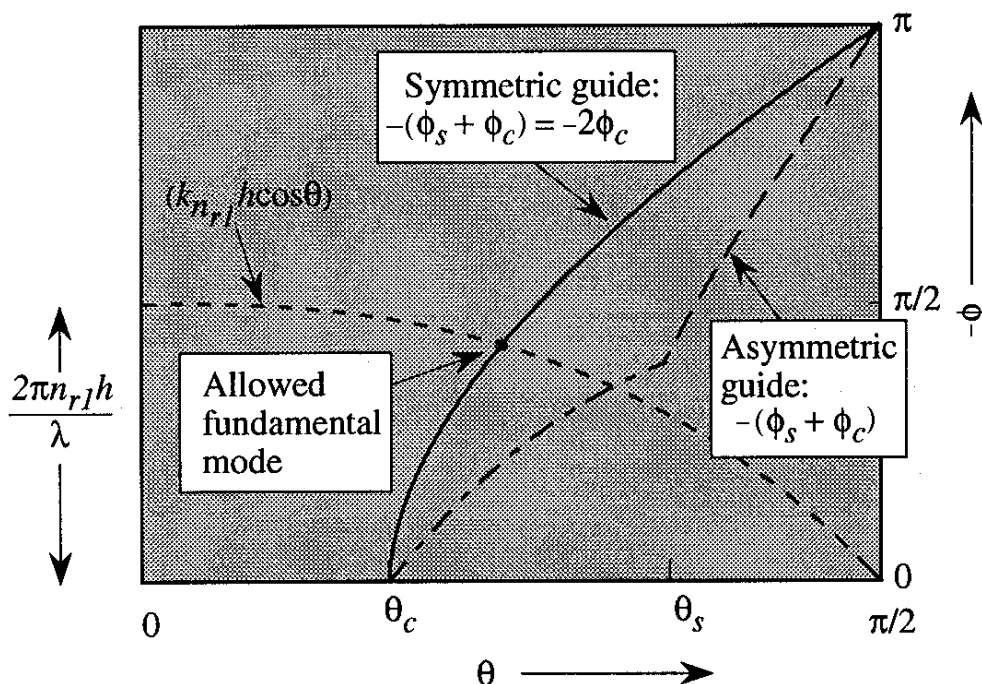
$$\beta = k_{n_{r1}} \sin \theta = \frac{\omega}{V_{p,\beta}}$$

Modos propagados, se ha de cumplir que la interferencia sea constructiva:

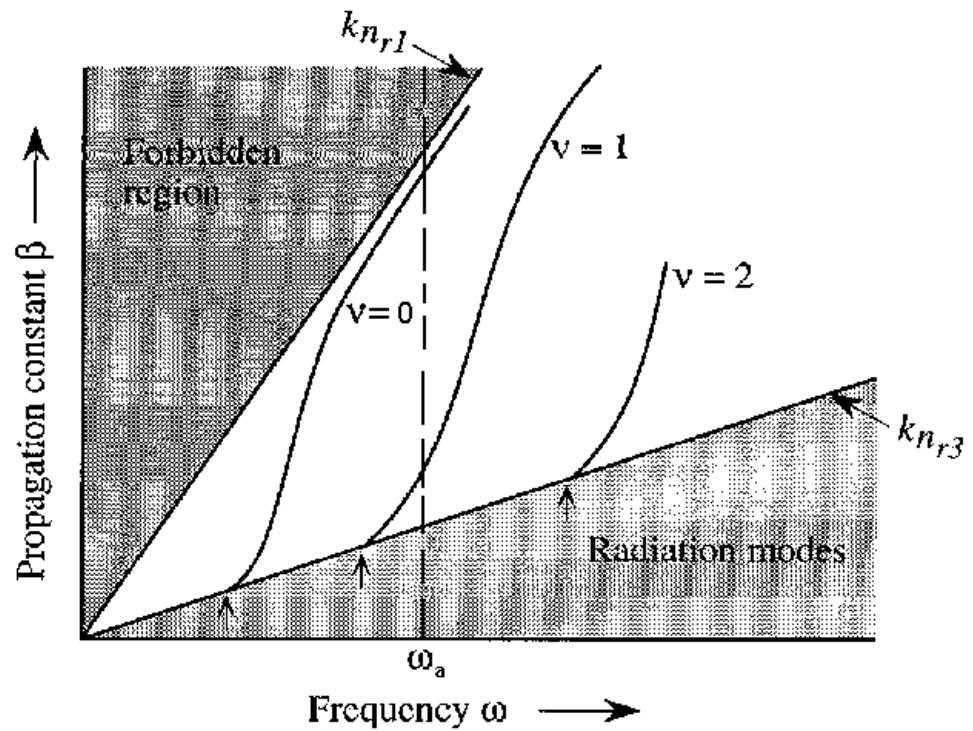
$$\Delta\phi(AC) = 2 k_{n_{r1}} h \cos \theta + 2(\phi_s + \phi_c) = 2v\pi, \text{ donde } v = 0, 1, 2, \dots$$

Guía simétrica: $n_{r2} = n_{r3}$ el modo fundamental no tiene frecuencia de corte.

Guía asimétrica: modo fundamental puede tener frecuencia de corte



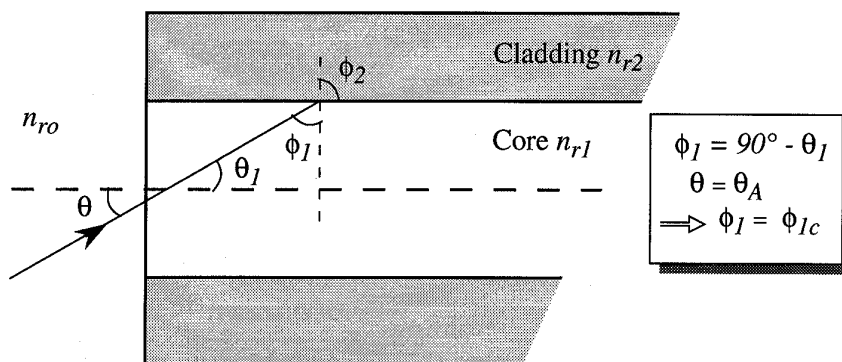
Guía asimétrica



- grosor de confinamiento de la onda: grosor de la guía,
h + penetración de la onda;

importante si $h \approx \lambda$

B.3.4 Fibra óptica: análisis basado en óptica geométrica



Ángulo crítico: $\phi_{1c} = \arcsin \frac{n_{r2}}{n_{r1}}$

Ángulo de entrada: $\theta_A = \arcsin \left[\frac{1}{n_{ro}} \sqrt{n_{r1}^2 - n_{r2}^2} \right]$

Apertura numérica (NA): $\sqrt{n_{r1}^2 - n_{r2}^2}$

B.3.5 Limitaciones de polarización en guías de onda

•Guías planas: $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)}$
 $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)}$

Aplicamos las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} & \text{El índice de refracción varía a lo} \\ & & \text{largo del eje x y no varían los} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} & \text{parámetros del material a lo largo} \\ & & \text{del eje y} \implies \frac{\partial}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

Llegamos a que:

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \vec{i} + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \frac{\partial H_y}{\partial x} \vec{k} = i\varepsilon\omega E_x \vec{i} + i\varepsilon\omega E_y \vec{j} + i\varepsilon\omega E_z \vec{k}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial E_y}{\partial z} \vec{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \frac{\partial E_y}{\partial x} \vec{k} = -i\mu\omega H_x \vec{i} - i\mu\omega H_y \vec{j} - i\mu\omega H_z \vec{k}$$

- Modos TE ($E_z=0$), involucran a E_y , H_x y H_z :

$$\beta E_y = -\mu\omega H_x$$

$$-i\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = i\varepsilon\omega E_y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -i\mu\omega H_z$$

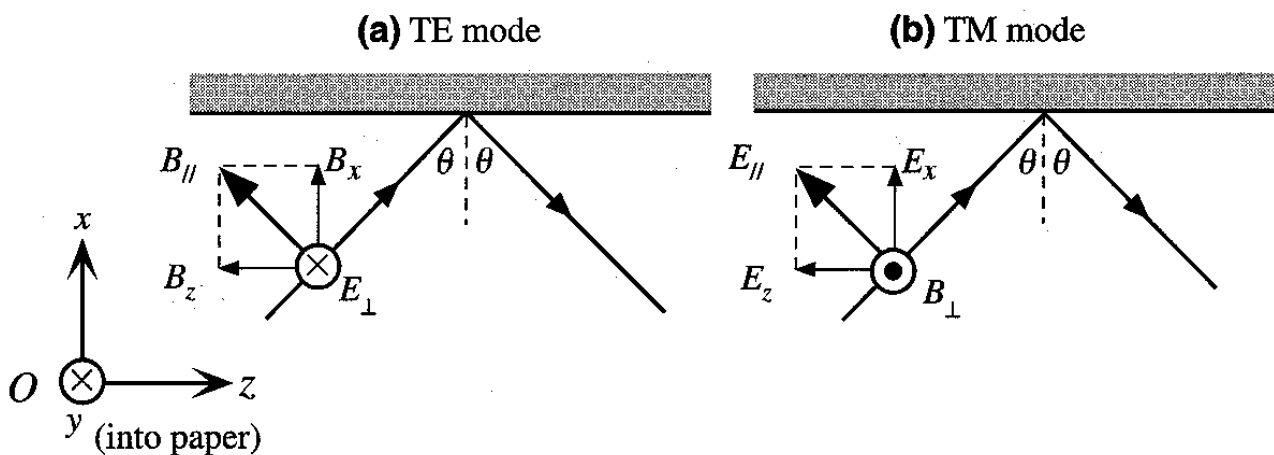
- Modos TM ($H_z=0$), involucran a E_x , E_z y H_y :

$$\beta H_y = \varepsilon\omega E_x$$

$$i\beta E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = i\mu\omega H_y$$

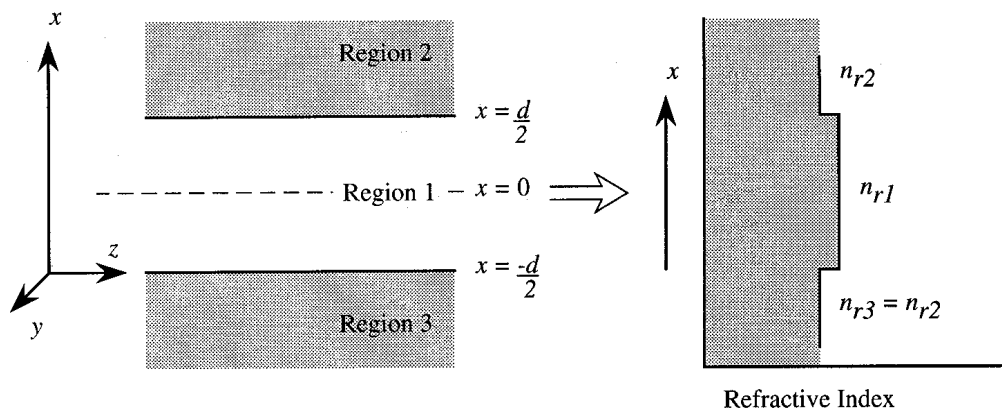
$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = i\varepsilon\omega E_z$$

En una guía plana tenemos por tanto una separación natural de modos TE y TM.



- Guías cilíndricas: aparecen modos híbridos en los que ni el campo eléctrico ni el magnético será puramente transversal.

B.3.6 Modos guiados en guías planas: aplicación de la teoría ondulatoria.



A partir de las ecuaciones obtenidas anteriormente:

$$\text{TE:} \quad \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) E_y = 0$$

$$\text{TM:} \quad \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) H_y = 0$$

Caso de luz polarizada TE, la solución de la ecuación diferencial

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (n_r^2 k_0^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad \text{con} \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

es:

$$E_y = \begin{cases} A e^{\gamma x} & x \leq -d/2 \\ B \cos(k_x x) + C \sin(k_x x) & -d/2 \leq x \leq d/2 \\ D e^{-\gamma x} & x \geq d/2 \end{cases}$$

$$\text{con:} \quad k_x = \sqrt{n_{r1}^2 k_0^2 - \beta^2} \quad \text{y} \quad \gamma = \sqrt{\beta^2 - n_{r2}^2 k_0^2}$$

Por tanto la solución del campo eléctrico es oscilatoria en el núcleo y totalmente amortiguada en el recubrimiento.

Como el campo eléctrico y su primera derivada han de ser continuos:

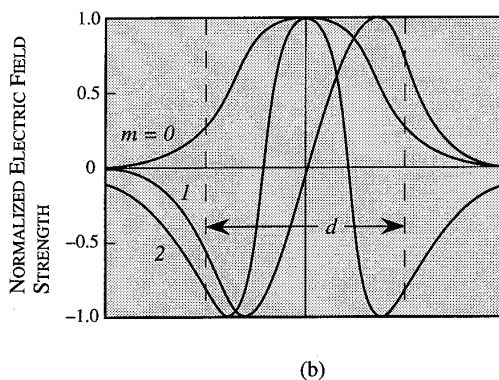
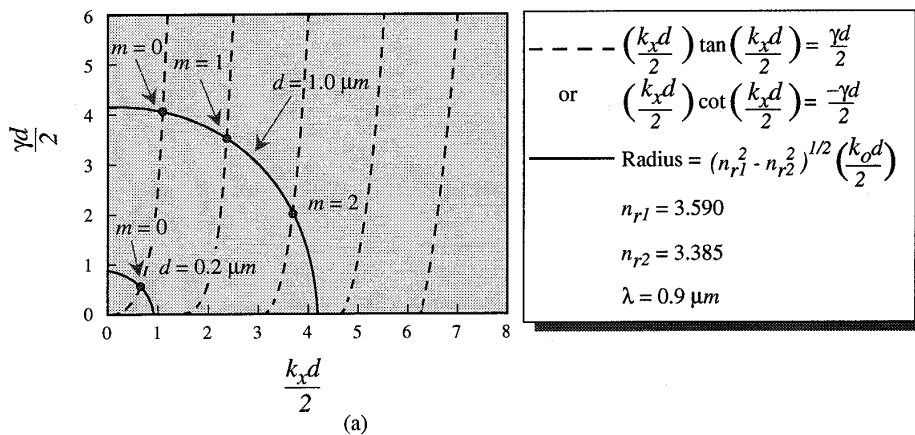
$$\frac{k_x d}{2} \tan \frac{k_x d}{2} = \frac{\gamma d}{2} \quad \text{Modos pares (A = D)}$$

$$\frac{k_x d}{2} \cot \frac{k_x d}{2} = -\frac{\gamma d}{2} \quad \text{Modos impares (A = -D)}$$

Estas dos ecuaciones trascendentales junto con:

$$\left(\frac{k_x d}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma d}{2} \right)^2 = (n_{r1}^2 - n_{r2}^2) \left(\frac{k_0 d}{2} \right)^2 \equiv R(d)^2$$

nos permiten obtener los modos permitidos.



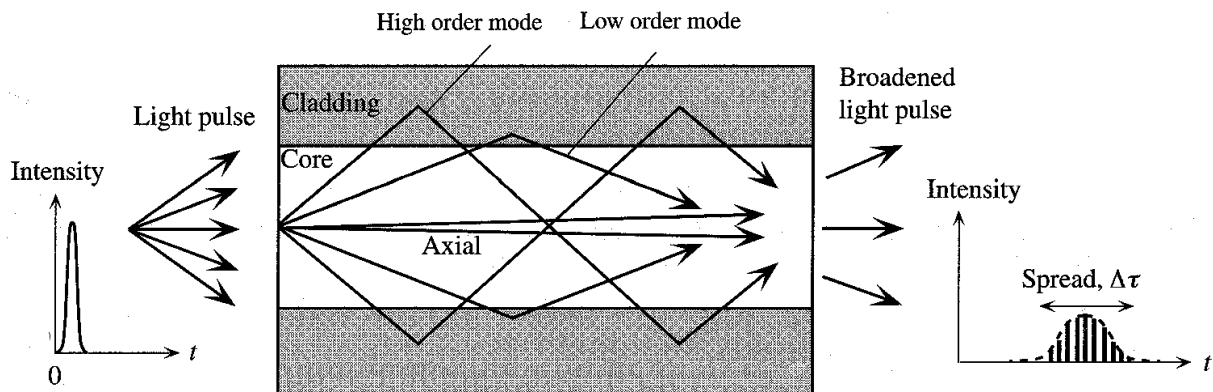
Patrón E_y del campo eléctrico para distintos modos

Modo de corte para un determinado espesor (d_c):

$$R(d_c) = \frac{m\pi}{2}$$

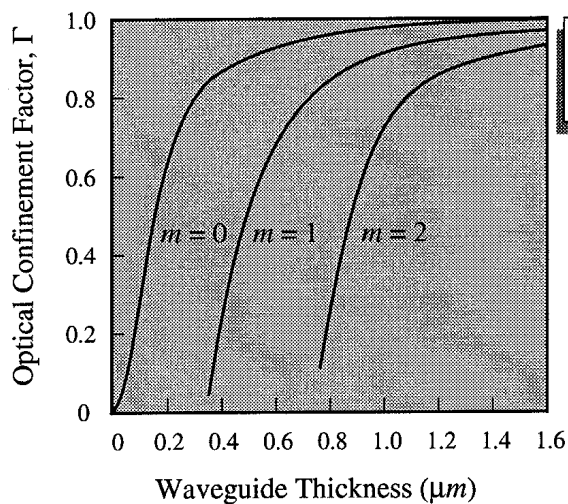
$$d_c = \frac{1}{2} \frac{m\lambda}{\sqrt{n_{r1}^2 - n_{r2}^2}} \quad m: \text{número de modo}$$

La energía luminosa es transportada por la guía a través de uno o más de estos modos:



B.3.6.1 Factor de confinamiento óptico

Fracción de energía en el núcleo de la guía:



$$\Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} E_y^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_y^2 dx}$$

B.3.7. Modos guiados en fibras ópticas. Aplicación de la teoría ondulatoria.

Se debe aplicar para fibras con diámetro comparable a la longitud de onda (las monomodo).

Es apropiado trabajar en coordenadas cilíndricas:

$$\mathbf{E}(r, \theta, z) = \mathbf{E}(r, \theta) e^{i(l\theta + \beta z)}$$

$$H(r, \theta, z) = H(r, \theta) e^{i(l\theta + \beta z)}$$

Para una guía de ondas cilíndrica de índice escalón de radio a , la ecuación de ondas será:

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} + \left(k_o^2 n_{r1}^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) E = 0 \quad r \leq a$$

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} + \left(k_o^2 n_{r2}^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) E = 0 \quad r > a$$

Se definen:

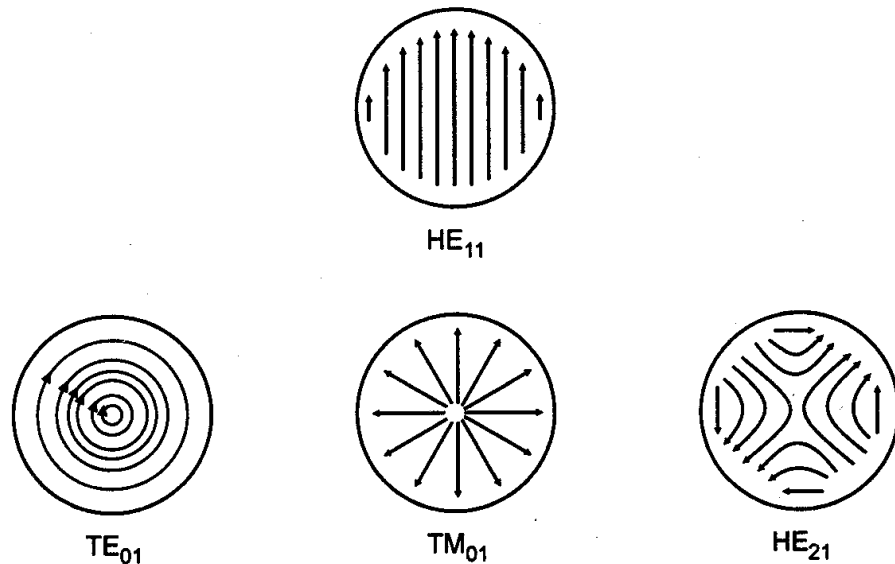
$$u^2 = (k_o^2 n_{r1}^2 - \beta^2) \cdot a^2$$

$$\gamma^2 = (\beta^2 - k_o^2 n_{r2}^2) \cdot a^2$$

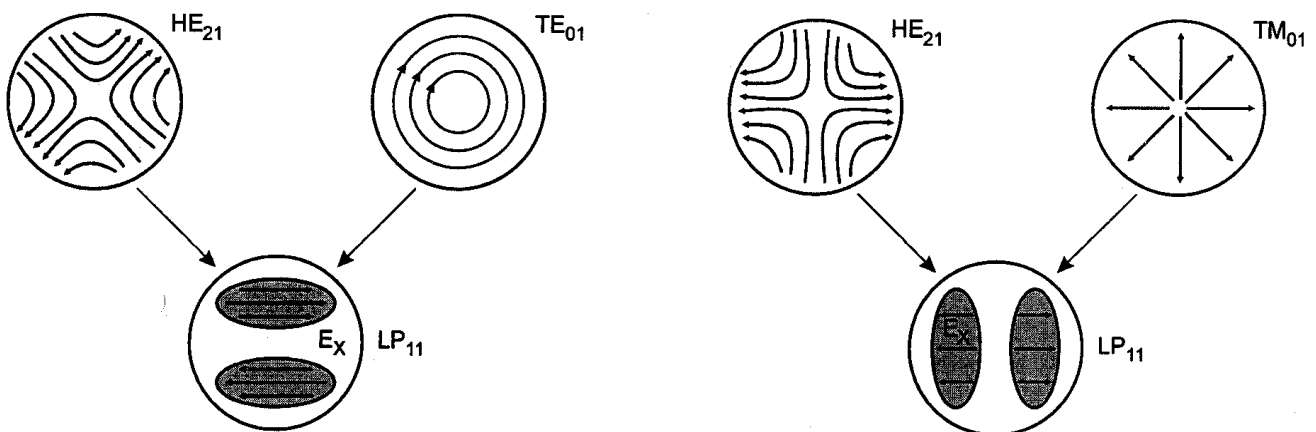
$$V = \sqrt{(u^2 + \gamma^2)} = k_o \cdot a \cdot \sqrt{(n_{r1}^2 - n_{r2}^2)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot (NA)$$

Los modos guiados vendrán dados a partir del conjunto de valores $\{\beta, l\}$ que satisfacen las ecuaciones de ondas cuando se aplican las condiciones de contorno al campo.

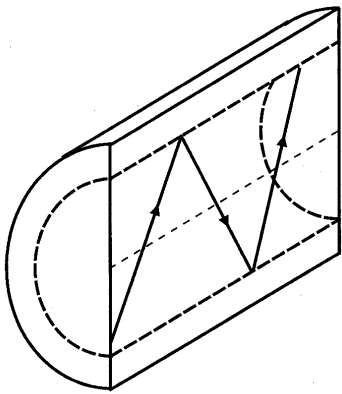
Soluciones: Conjunto de patrones de campo llamados modos naturales que pueden ser totalmente transversales (TE y TM) o tener componentes longitudinales (modos híbridos HE y EH).



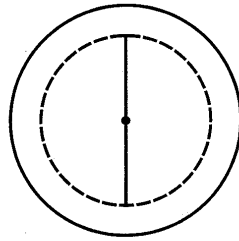
Estos modos naturales no existen en el interior de la fibra sino que se combinan dando lugar a modos linealmente polarizados que son los que realmente existen:



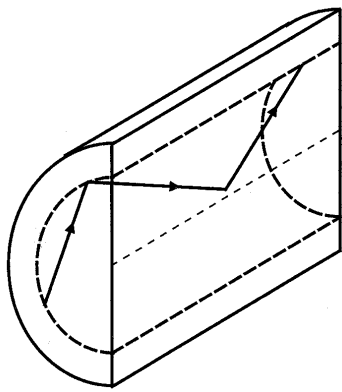
Rayos meridionales y rayos oblicuos:



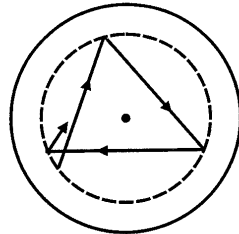
a)



Sin componente azimutal, pueden componerse a partir de únicamente modos naturales TE y TM.



b)



Con componente azimutal, en su composición intervienen siempre modos naturales EH y HE.

$V \equiv$ Parámetro de frecuencia normalizada.

Determina el número de modos que se pueden propagar en una fibra óptica. $V \leq 2.405 \Rightarrow$ fibra monomodo

Luego el máximo radio del núcleo de la fibra óptica para que se propague un solo modo por ella:

$$a = \frac{2.405\lambda}{2\pi(NA)}$$

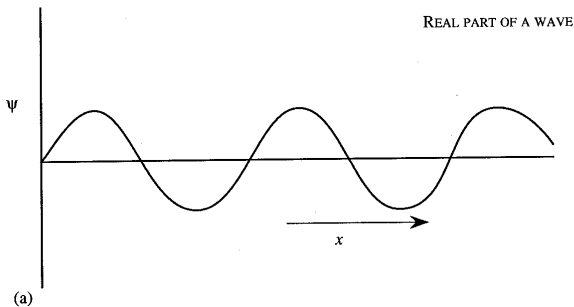
Número de modos en fibra de gran diámetro:

$$N \cong \frac{a^2}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (NA)^2$$

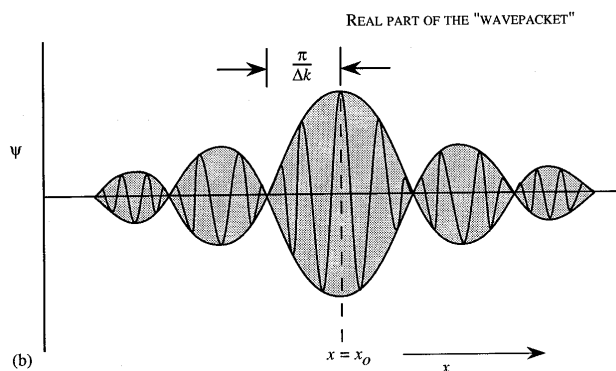
B.3.8. Propagación de paquetes de onda: dispersión y velocidad de grupo

Las formas de onda obtenidas hasta ahora no son reales pues la densidad de energía asociada a ellas ($\psi^*\psi$) es uniforme en el espacio y constante en el tiempo.

En una situación real, se tienen pulsos ópticos localizados en el espacio que se propagan de un punto a otro. => paquetes de onda



$$\psi_{k_0}(x) \propto e^{ik_0x}$$



$$\begin{aligned} \psi(x, x_0) &= \int_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} f(k-k_0) \cdot e^{ik(x-x_0)} dk = \\ &= \int_{k_0-\Delta k}^{k_0+\Delta k} e^{-\frac{(k-k_0)^2}{2(\Delta k)^2}} \cdot e^{ik(x-x_0)} dk = \\ &= \sqrt{2\pi\Delta k} e^{ik_0(x-x_0) - \frac{1}{2}(x-x_0)^2(\Delta k)^2} \end{aligned}$$

$\psi(x, x_0) \equiv$ Paquete de ondas gaussiano en el espacio que se amortigua rápidamente al alejarnos de x_0 .

Al construir el paquete de ondas se pierde precisión en el vector k (Δk) pero se gana precisión en el espacio real (Δx). Se cumple la relación $\Delta k \Delta x \approx 1$.

Misma operación para $\psi \propto e^{-i\omega t} \Rightarrow$ Paquete localizado en tiempo y frecuencia cumpliéndose que $\Delta\omega \Delta t \approx 1$.

B.3.8.1 Movimiento de un paquete de ondas

Añadiendo la dependencia temporal de la función de onda:

$$\begin{aligned}\psi(x,t) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(k-k_0) e^{i[k(x-x_0)-\omega t]} dk = \\ &= e^{i(k_0(x-x_0)-\omega_0 t)} \int_{-\infty}^{\infty} f(k-k_0) e^{\left[i(k-k_0)(x-x_0-v_g t) - \frac{i\alpha}{2}(k-k_0)^2 t \right]} dk\end{aligned}$$

En donde se ha utilizado que, en un medio diferente del vacío, la relación de dispersión entre ω y k es de la forma:

$$\omega(k) = \omega(k_0) + \left. \frac{\partial \omega}{\partial k} \right|_{k=k_0} (k-k_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \right|_{k=k_0} (k-k_0)^2 + \dots$$

con:

$$\begin{aligned}\omega(k_0) &= \omega_0 \\ \left. \frac{\partial \omega}{\partial k} \right|_{k=k_0} &= v_g \\ \left. \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \right|_{k=k_0} &= \alpha\end{aligned}$$

$V_g \equiv$ Velocidad de grupo. Representa la velocidad a la que se mueve el pico del paquete de ondas si $\alpha = 0$. Siempre es menor que c .

En un medio es diferente de la velocidad de fase, la cual puede ser mayor que c , pero no es la velocidad de propagación de la información.

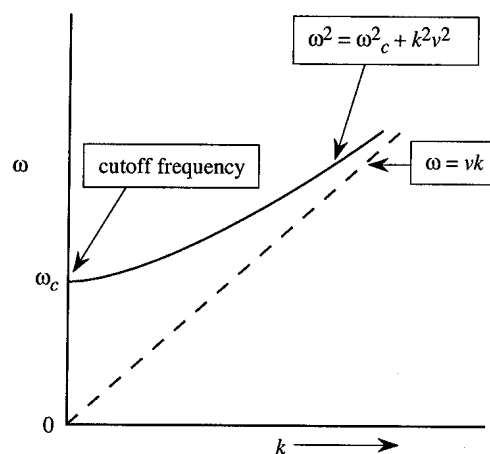
α : Coeficiente de dispersión $\Rightarrow$ si $\alpha \neq 0$ el paquete se dispersará después de un tiempo.

La anchura media en el espacio real transcurrido un tiempo t :

$$\delta x(t) = \delta x(t=0) \sqrt{1 + \frac{\alpha^2 t^2}{[\delta x(t=0)]^4}}$$

B.3.8.2 Dispersión en una guía de ondas

Suponiendo una relación de dispersión (entre ω y k) en un medio de forma "desplazada":



Las velocidades de fase y de grupo:

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{v\omega}{\sqrt{\omega^2 - \omega_c^2}} \quad v_g(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{v\sqrt{\omega^2 - \omega_c^2}}{\omega} < c$$

La dispersión:

$$\alpha = \frac{d^2\omega}{dk^2} = \frac{v^2 - v_g^2}{\omega}$$

Como resultado de la dispersión, un pulso inyectado en una guía se ensancha conforme viaja por la guía.

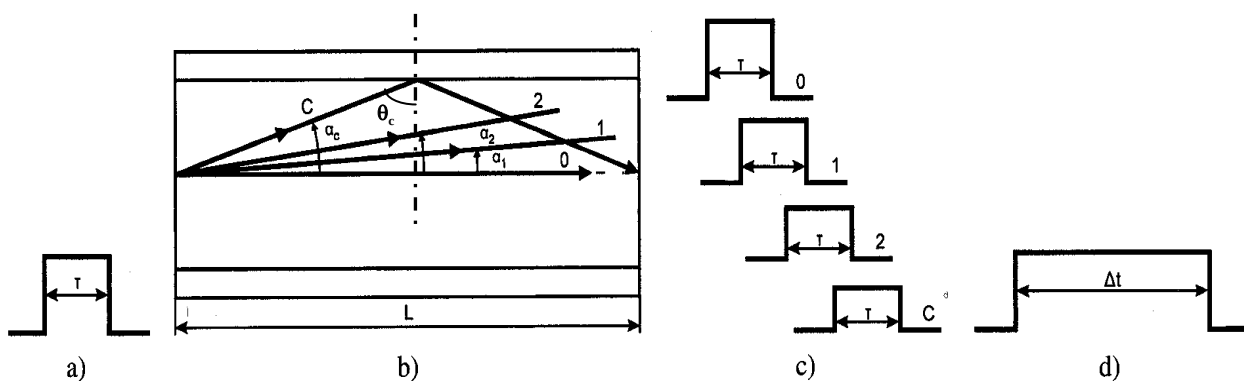
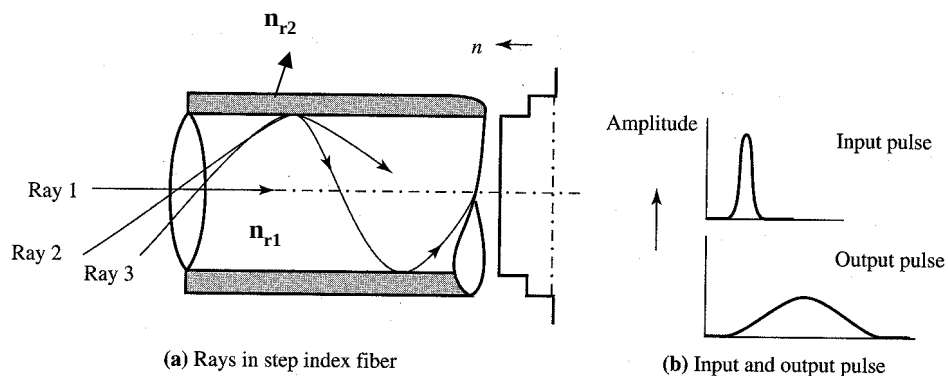
Además, el material puede contribuir a la dispersión total con un valor de dispersión α positivo o negativo, por lo que podremos encontrar guías cuya dispersión se acerque a cero.

B.3.8.2.1 Dispersión en fibras ópticas

Dos causas: dispersión modal y dispersión cromática.

A) Dispersión modal.

Es debida a que rayos luminosos que entran a la fibra con diferentes ángulos (modos diferentes) atravesarán caminos diferentes dentro de la fibra.



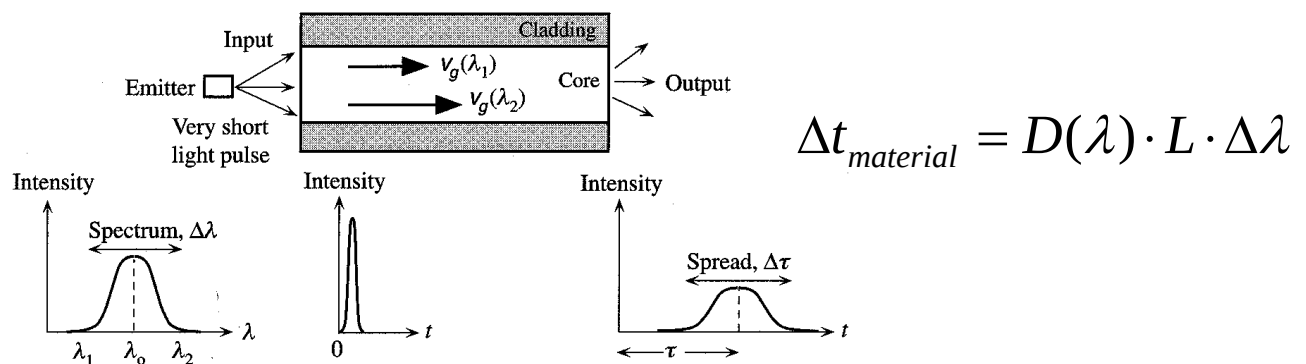
$$\Delta t = t_C - t_o = \frac{n_{r1}(n_{r1} - n_{r2})L}{n_{r2}c}$$

B) Dispersión cromática.

Dos causas: dispersión debida al material y dispersión de la guía de onda.

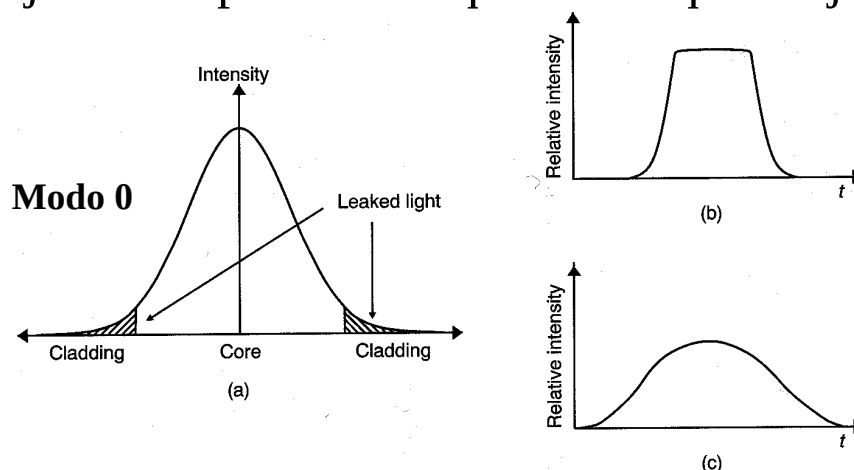
B.1) Dispersión cromática debida al material.

Se debe a que el índice de refracción y la velocidad de propagación dependen de λ por lo que rayos de diferente longitud de onda tendrán diferentes tiempos de propagación.



B.2) Dispersión cromática de la guía de onda.

La luz que viaja por el recubrimiento como parte de un modo, viaja en un material de índice de refracción menor por lo que viaja más rápidamente que la luz que viaja por el núcleo.



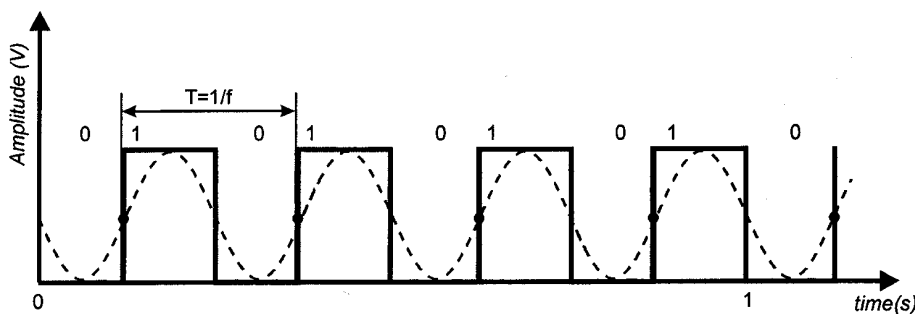
Únicamente importante en fibras monomodo.

El ensanchamiento total de un pulso:

$$\Delta t_{total} = \sqrt{\left(\Delta t_{modal}^2 + \left(\Delta t_{material} + \Delta t_{wg}\right)^2\right)}$$

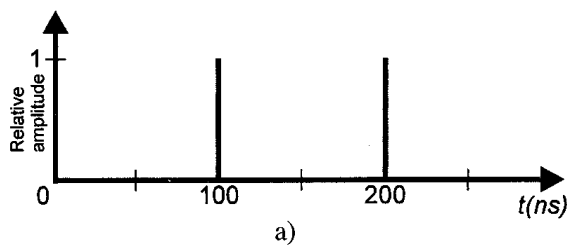
"Bit rate" y ancho de banda

"Bit rate": N° de bits que puede ser transmitido por segundo a través de un canal de información.

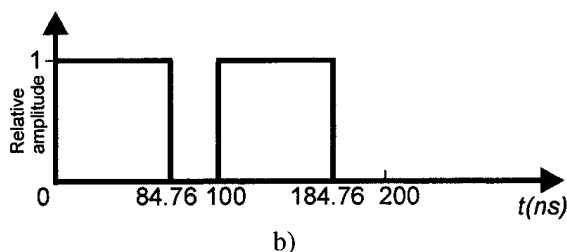


$$BR = 2 \cdot BW$$

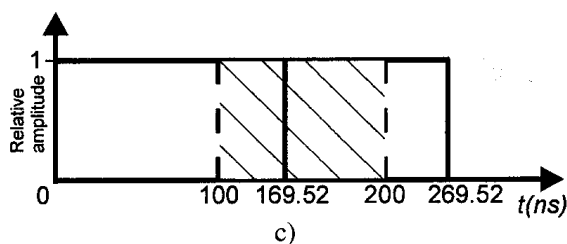
Relación dispersión - "bit rate":



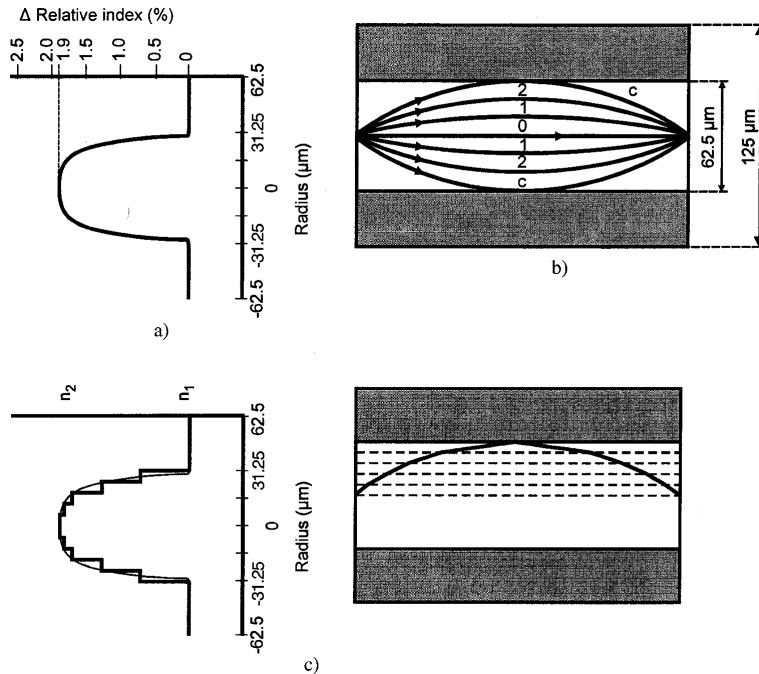
La dispersión limita el "bit rate" a un máximo del orden de 12Mbit/s.



$$BR_{total} = \frac{1}{4 \cdot \Delta t_{total}} = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\left(\Delta t_{modal}^2 + \Delta t_{cromatica}^2\right)}}$$



Disminución de la dispersión modal: Fibra óptica con índice de refracción que varía gradualmente y fibra monomodo.

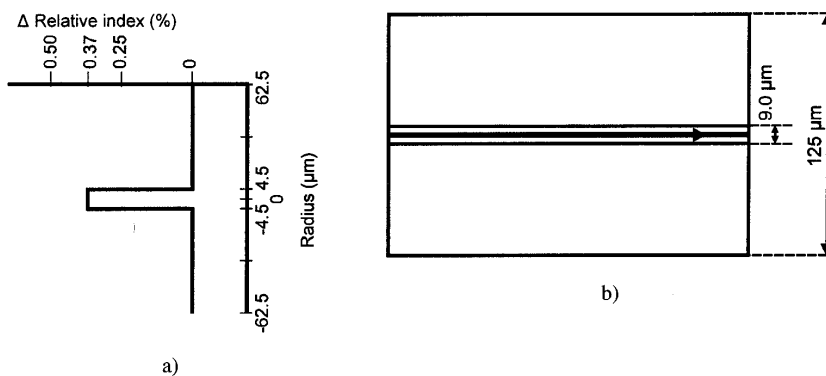


$$\Delta t_{GI} = \frac{(n_{r1} - n_{r2})^2 l}{8n_{r1}c}$$

Cambio de índice brusco (escalón) => mucha dispersión => ancho de banda reducido (5MHz)

Cambio de índice gradual => menor dispersión => ancho de banda mayor (0,77GHz)

Fibra monomodo:

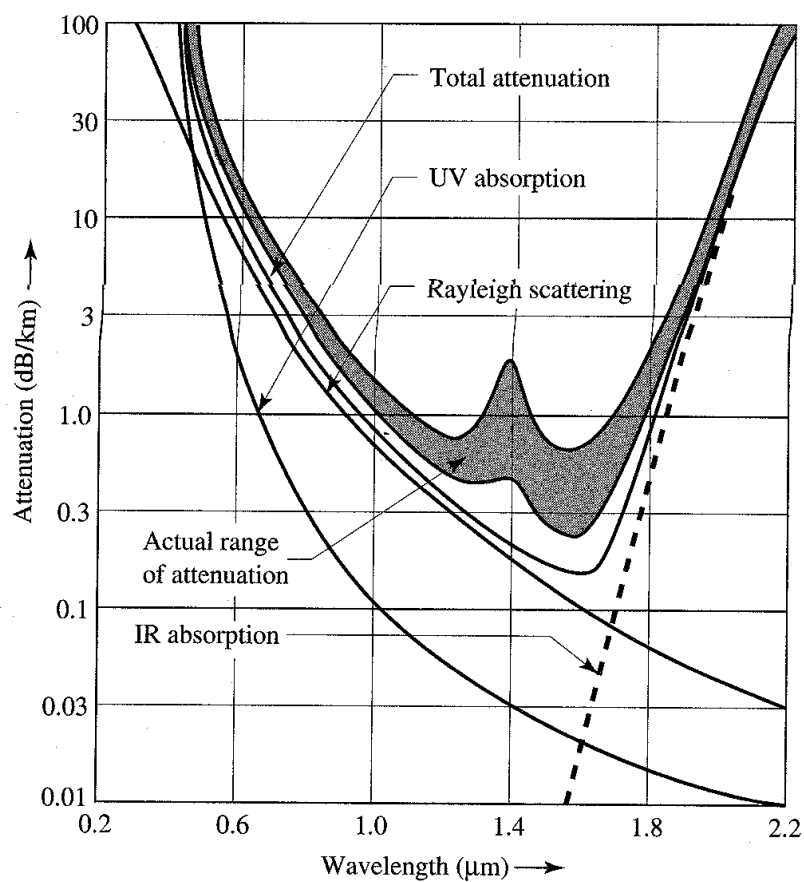


Transmisión de bits de hasta 200Gbits/s km.

B.3.8.3 Atenuación en fibras ópticas

Tres tipos de absorciones:

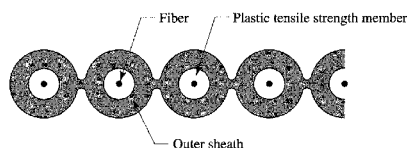
1. Interacción electrón-radiación (UV)
2. Interacción con vibración molecular (IR)
- 3: Scattering de Rayleigh (luz escapa de la fibra)



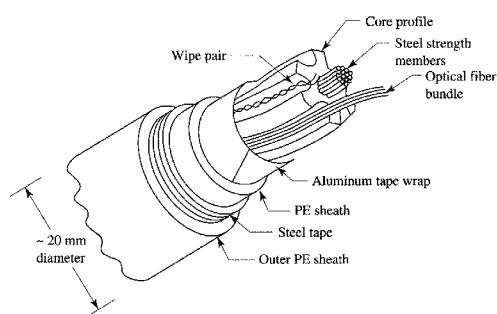
Además pérdidas debido a impurezas (OH^-)

B.3.8.4 Clasificación de fibras ópticas

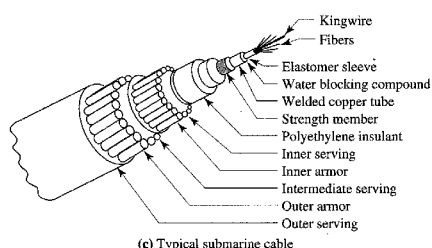
Material	Tipo	Recubrimiento / núcleo Diámetro [μm]	NA	Atenuación [dB/km]	Ancho de banda [MB/s km]	Aplicación
Todo plástico	Multimodo con Índice escalón	200-600	0,5-0,6	330-1000	bajo	Bajo coste, conexiones cortas (100m)
		450-1.000				
Recubrimiento de plástico	Multimodo con Índice escalón	50-100	0,2-0,3	4-15	4-15	Bajo coste, corto recorrido, bajo ancho de banda
		125-300				
Silicio	Multimodo con índice escalón	50-400	0,16-0,50	4-50	6-25	Bajo coste, corto recorrido, bajo ancho de banda
		125-300				
Silicio	Multimodo con índice gradual	30-60	0,2-0,3	2-10	150-2.000	Recorrido medio, ancho de banda medio, fuente láser
		100-150				
Silicio	monomodo con índice escalón	3-10 μm	0,08-0,15	0,5-5	500-40.000	Largo recorrido, gran ancho de banda, sistemas láser
		50-125 μm				
Silicio	monomodo				Hasta 100.000.000	Sistemas intercontinentales de gran ancho de banda



(a) Typical unprotected cables



(b) Typical protected communication cable



(c) Typical submarine cable

Hay que proteger las fibras de:

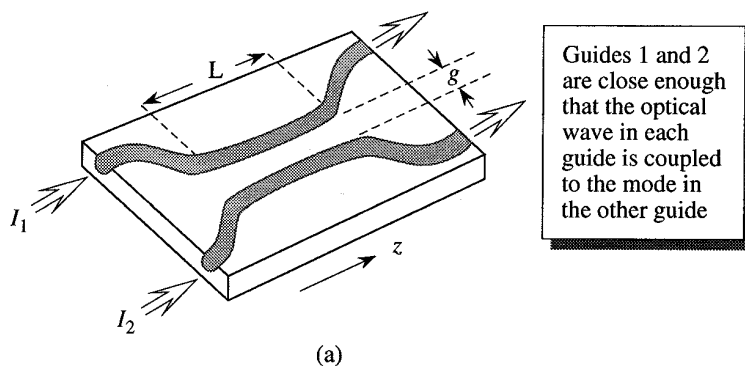
- ralladuras
- tensión longitudinal (alma de acero)
- torsiones fuertes
- infiltraciones de agua (aislantes)
- roedores (recubrimientos de acero)
- temperatura

B.3.9 Dispositivos acopladores de luz: acopladores de guía a guía

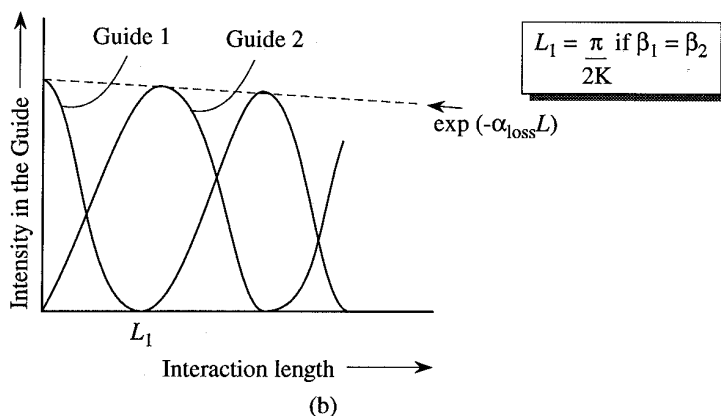
Necesitamos conocer como transferir energía de una guía a otra => acoplador

B.3.9.1 Teoría de los modos acoplados y acoplador direccional

Acoplador direccional: dispositivo que permite acoplar la energía de una guía a otra aprovechando que la onda penetra en la zona de recubrimiento del núcleo de la guía (campos evanescentes).



Dos guías planas monomodo paralelas
Cuando están próximas (longitud L) hay un acoplamiento entre los modos ópticos de las dos guías.



Si K es la constante de acoplamiento:

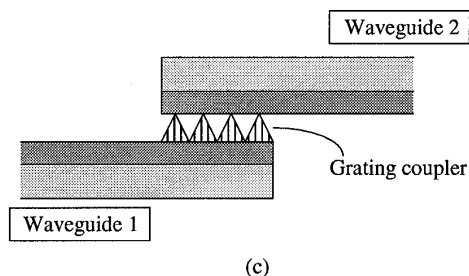
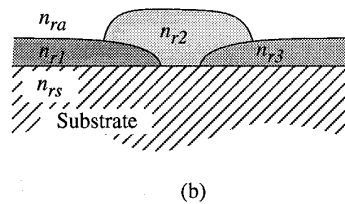
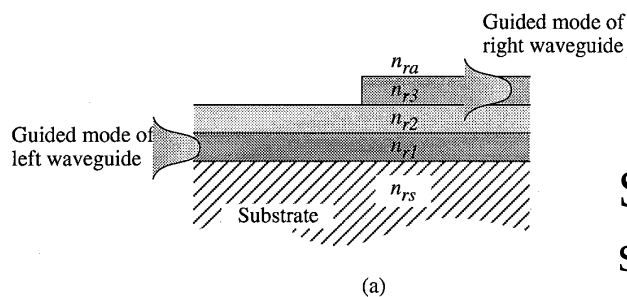
Distancia mínima para una transferencia de energía máxima:

$$L=L_1 = \frac{\pi}{2K}$$

Las guías deben estar en fase ($\beta_1 = \beta_2$)

si $\Delta^2 \gg K^2$ no existe acoplamiento de luz,
donde $2\Delta = |\beta_1 - \beta_2| \neq 0$

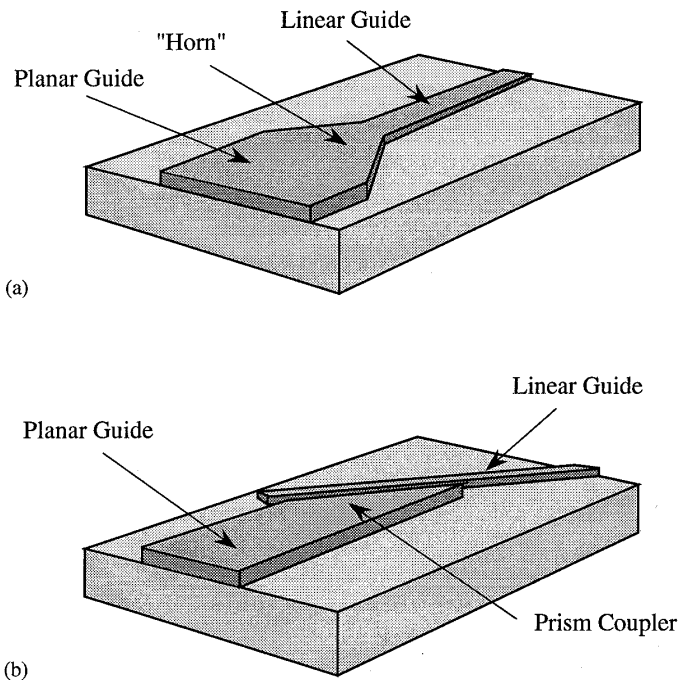
B.3.9.2 Acoplador de guía plana a guía plana



Si comparten el mismo substrato y están enfasadas $\Rightarrow$ mismo procedimiento que el acoplador direccional.

Si no están enfasadas se utilizará un medio intermedio

B.3.9.3 Acopladores de guías planas a guías lineales



Acoplamiento por medio de un embudo o bocina o acoplamiento mediante un prisma (terminación de una guía plana)

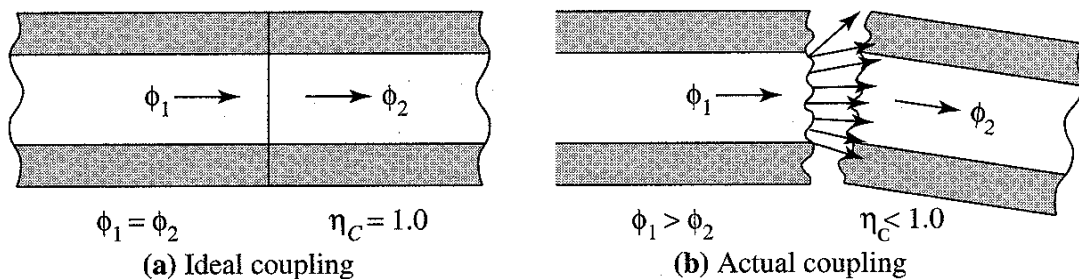
B.3.9.4 Acopladores de guías de onda a fibras ópticas

Las guías pueden ser fuentes de luz (láser semiconductor) o elemento de transporte de energía.

Acoplamiento "butt": simplemente alinear guía y fibra.

Acoplamiento con lente: se introduce lente entre la guía y la fibra.

B.3.9.5 Empalmes, conectores y acopladores de fibras ópticas



Eficiencia de acoplamiento: $\eta_c = \frac{P_2}{P_1}$

En las pérdidas influye:

- cuantos modos se propagan
- las conexiones y
- el alineamiento

Dentro de las conexiones:

-empalmes (conexión permanente): Los extremos de las fibras se sueldan sin tercer medio entre ellos.

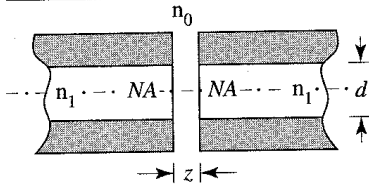
- conectores: Los extremos de las fibras se alinean mecánicamente con un tercer medio, normalmente aire, entre ellas.

En los conectores hay pérdidas de Fresnel debido a la interfase aire-fibra:

$$\eta_F = \left(\frac{4n_1n_0}{[n_1 + n_0]^2} \right)^2$$

Se utilizan gráficas para determinar las pérdidas.

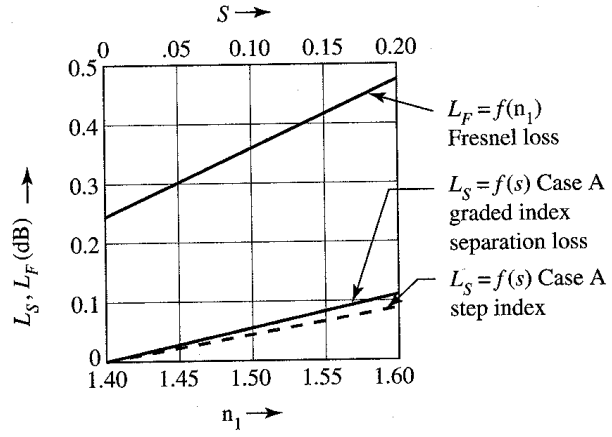
Separation loss (L_S) and Fresnel loss (L_F)



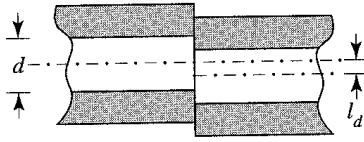
For air $n_0 = 1$

$$S = \frac{z}{d} \times NA$$

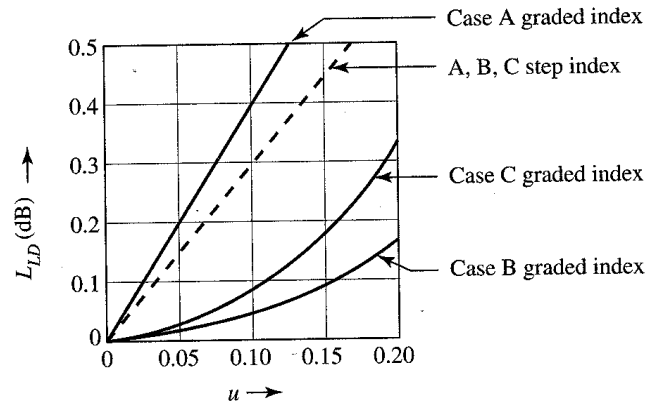
Separation loss in case B and C is very small.



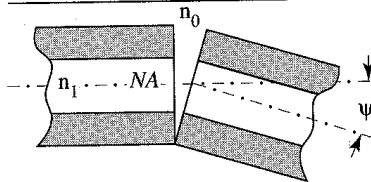
Lateral displacement loss (L_{LD})



$$u = \frac{l_d}{d}$$

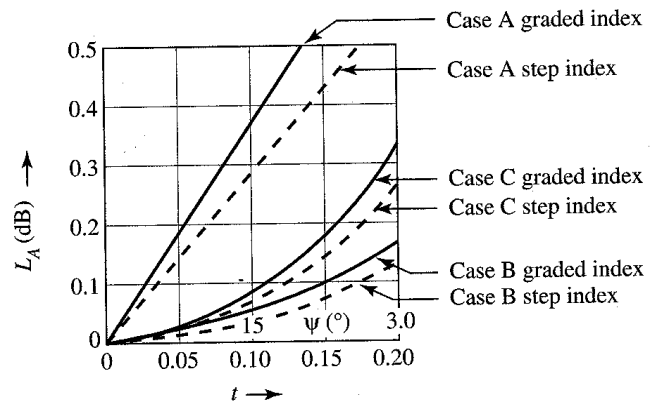


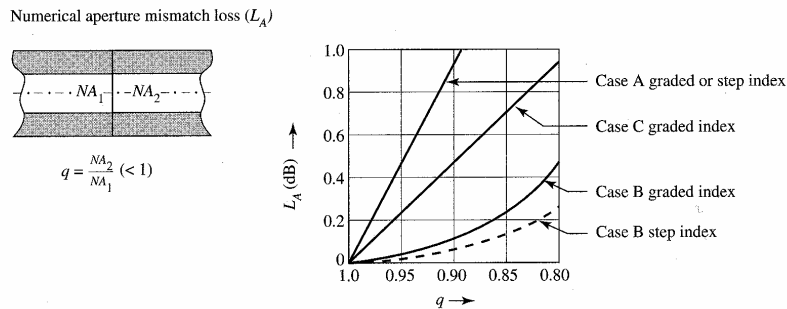
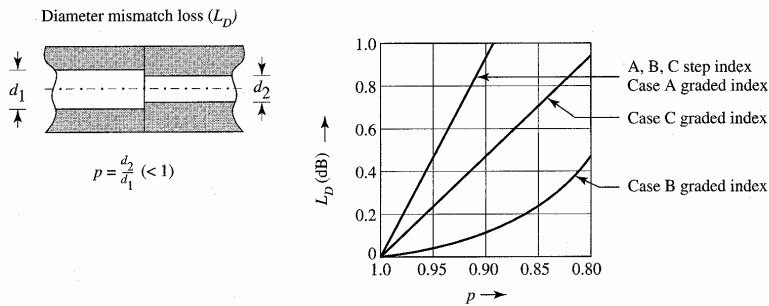
Angular misalignment loss (L_A)



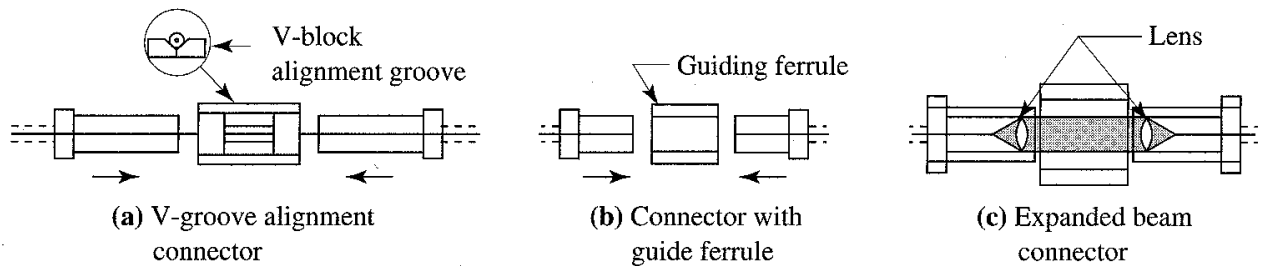
$$t = n_0 \times \frac{\sin \psi}{NA}$$

ψ° is calculated for $NA = .025$ and $n_0 = 1.00$

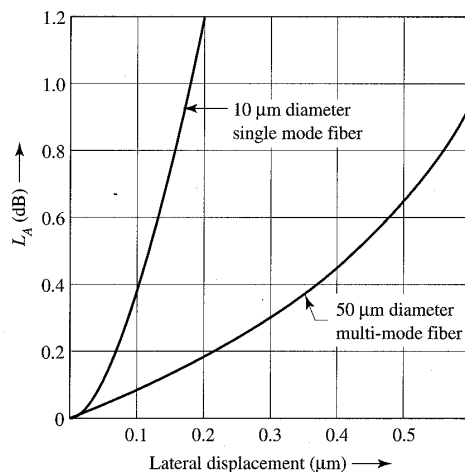




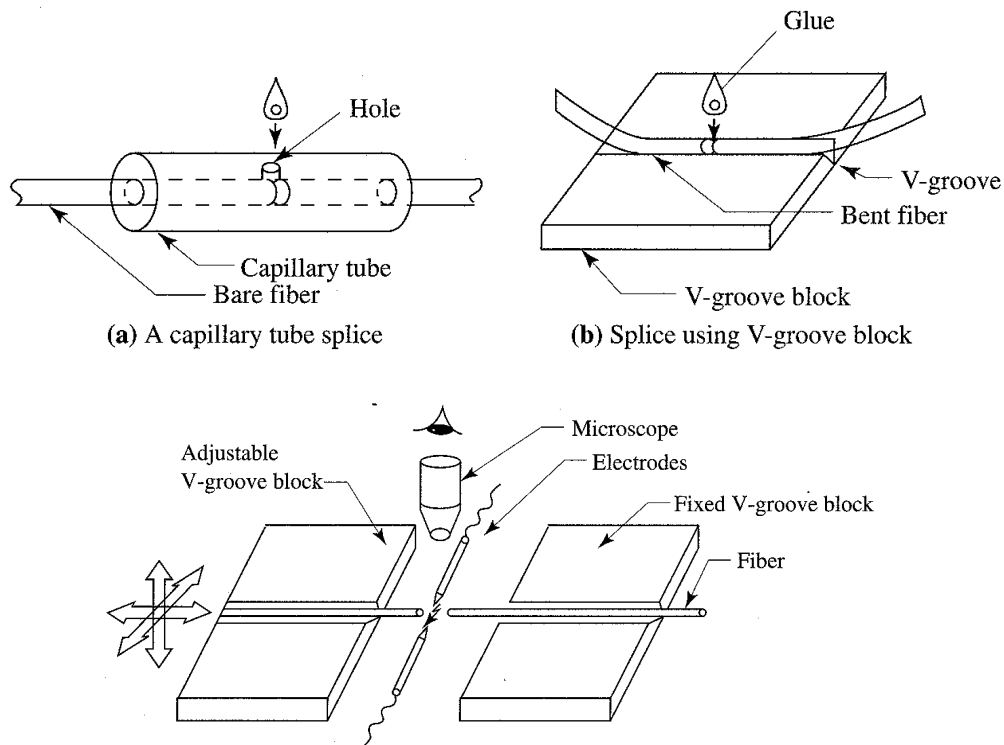
La conexión produce muchas pérdidas, sobre todo por alineamiento. Soluciones:



El empalme (conexión permanente) tiene menos pérdidas (no hay pérdidas de Fresnel), hay que alinear bien y tener cortes paralelos. Soluciones:



Pérdidas en un empalme debidas al desplazamiento lateral de la fibra



Este último empalme es el mejor y más complejo

Pérdidas en **acopladores** (dispositivos que acoplan la señal de una fibra a otra): debido a acoplamiento entre entradas y pérdidas propias de la transmisión.

Direccionalidad: aislamiento entre puertos de entrada (en un acoplador ideal toda la potencia es transferida desde los puertos de entrada a los de salida; es decir, no hay potencia transferida entre los distintos puertos de entrada).

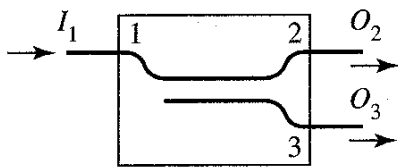
$$D_{ij} = -10 \log \frac{P_j}{P_i} [\text{dB}]$$

P_i = Potencia aplicada al puerto de entrada i

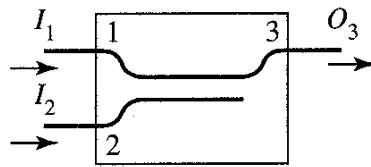
P_j = Potencia medida en el puerto de entrada j

Las pérdidas de la transmisión:

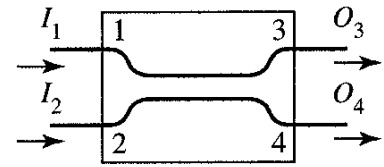
$$\eta_T = \frac{\sum P_o}{\sum P_i}$$



(a) Y-coupler or splitter



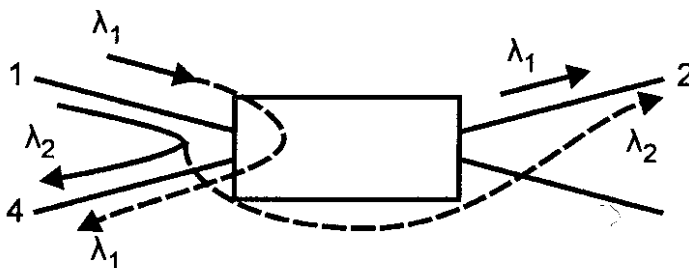
(b) Combiner



(c) X-coupler or 2×2 directional coupler

Acopladores especiales: **multiplexores por división de longitud de onda (WDM)**.

Permiten insertar (o extraer) señales de una determinada banda de frecuencias en un nodo de la red haciendo uso de la direccionalidad o aislamiento a una λ dada.



$$D_{14} = -10 \log \frac{P_4(\lambda_1)}{P_1(\lambda_1)}$$

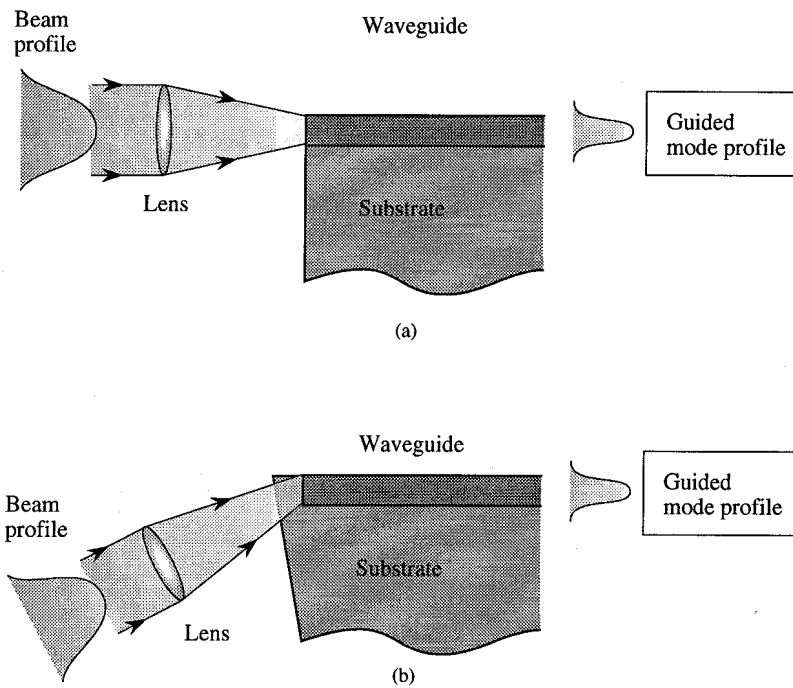
$$D_{21} = -10 \log \frac{P_2(\lambda_2)}{P_1(\lambda_2)}$$

B.3.10 Acoplamiento rayo-guía de ondas

Este acoplamiento también debe ser muy bueno para un máximo rendimiento.

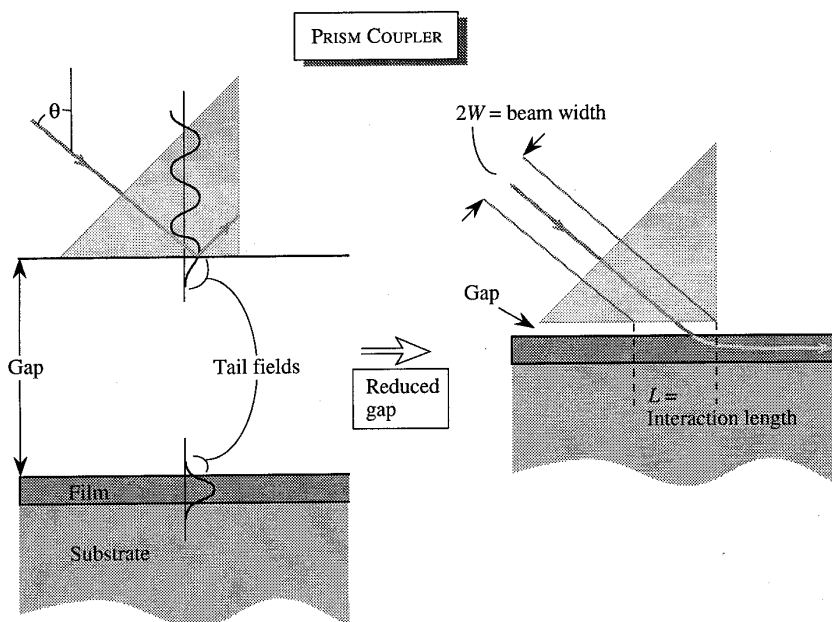
Si se encaran bien se puede acoplar el rayo pero con bajo rendimiento => mejor prismas, “gratings”, etc.

B.3.10.1 Acopladores transversales



Teóricamente alto rendimiento => realidad bajo rendimiento

B.3.10.2 El acoplador prisma



Reflexión interna total:

$$\theta > \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_{ra}}{n_{rp}}\right)$$

La transferencia optima de energía es para:

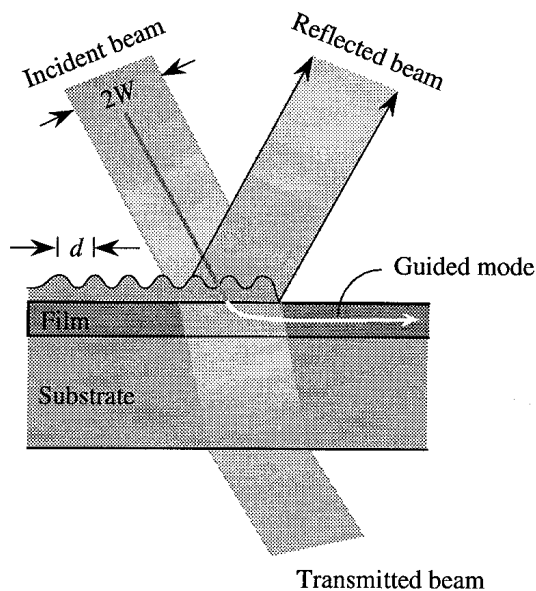
$$KL = \pi/2$$

con $L = 2W \sec\theta$

Es muy eficiente y se consigue hasta $\eta=80\%$

B.3.10.3. El acoplador de enrejado

GRATING COUPLER



Se somete material fotosensible a un patrón de interferencia con la periodicidad deseada.

Se alcanza $\eta=70\%$.

Ventaja: estructura planar

También existen acopladores de corte y holográficos.

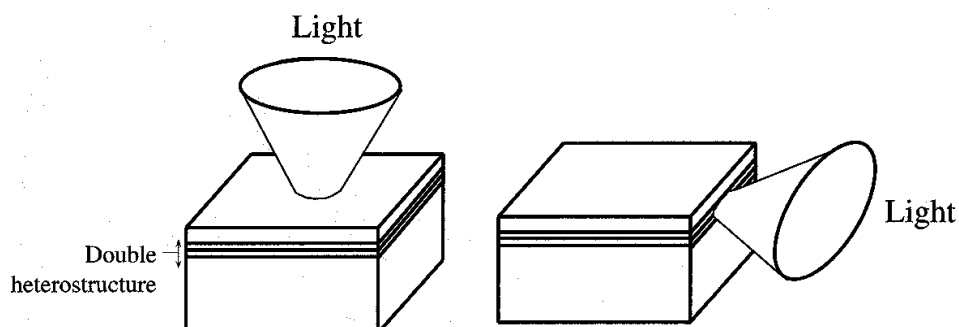
B.3.3.10.4 Fuentes luminosas para fibras ópticas

LED: barata y sirve para cortas distancias

LD: cara y es para largas distancias

es común acoplar sólo el 5% de energía

Tipos de LED: SLED (emite por superficie) y ELED (emite lateralmente)

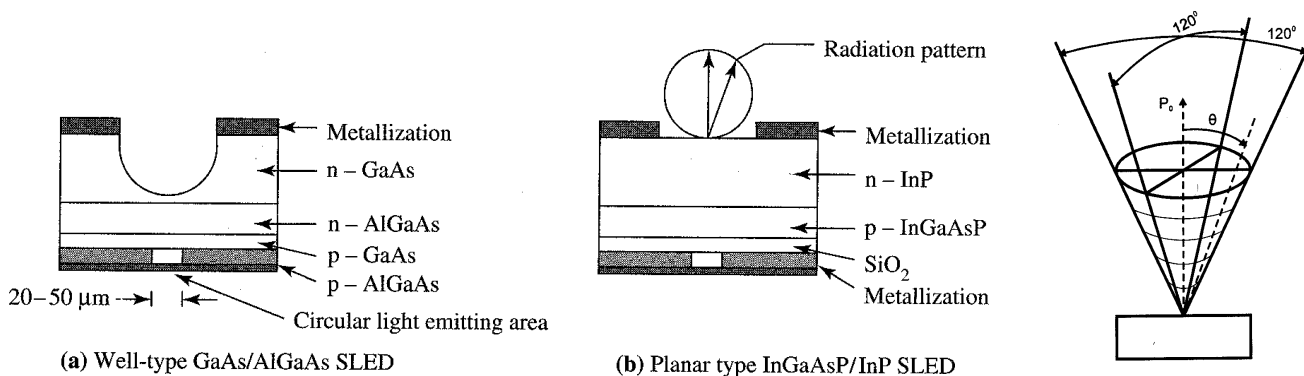


Parámetro	LED	Diodo láser	unidad
Potencia de salida	1 a 10	1 a 100	mW
Potencia acoplada a la fibra	0,0005 a 0,5	0,5 a 5	mW
Ancho de banda en 800nm	35 a 50	2 a 3	nm
Ancho de banda en 1300nm	70 a 100	3 a 5	nm
Tiempo de subida	2 a 50	<1	ns
Respuesta en frecuencia	<500	>500	MHz
Coste	bajo	alto	

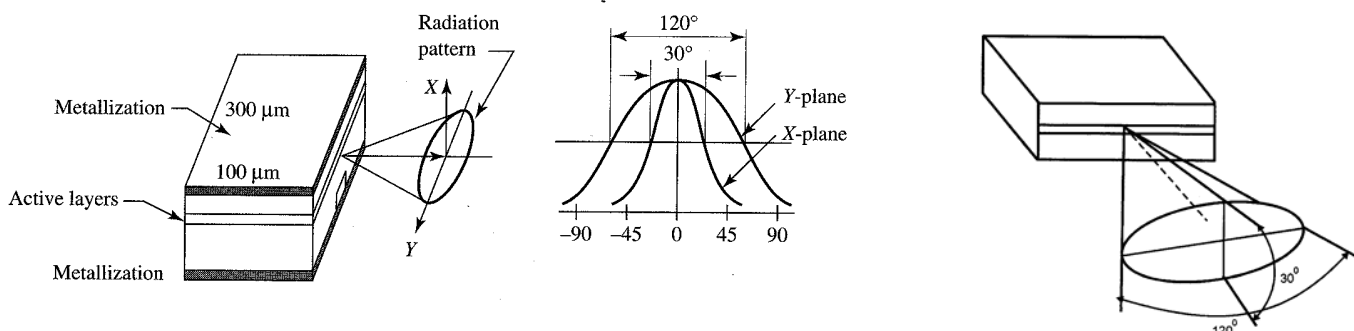
LEDs más utilizados

Material	Longitud de onda [nm]	Energía entre bandas [eV]
GaP	570	2,18
GaP/GaAsP	580-650	2,14-1,91
AlGaAs	650-900	1,91-1,38
GaAs	900	1,38
InGaAs	1000-1300	1,24-0,95
InaASP	900-1700	1,38-0,73

SLED:



ELED:

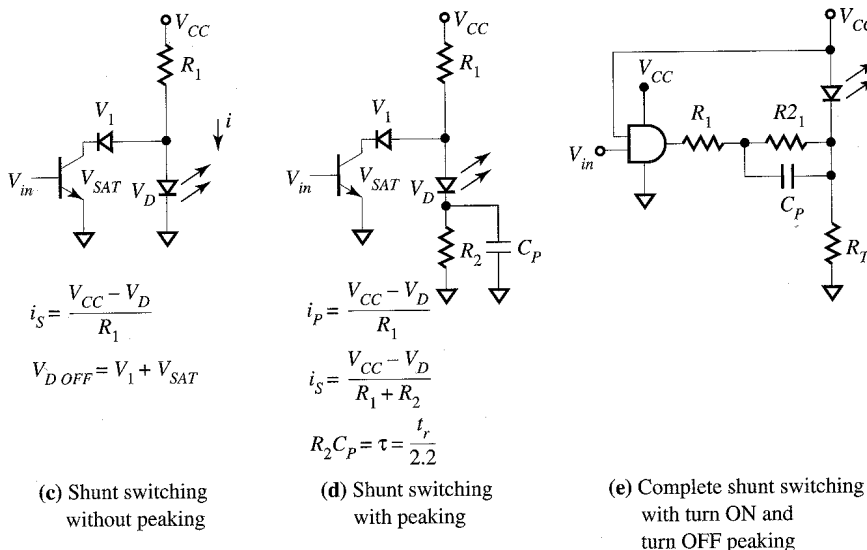
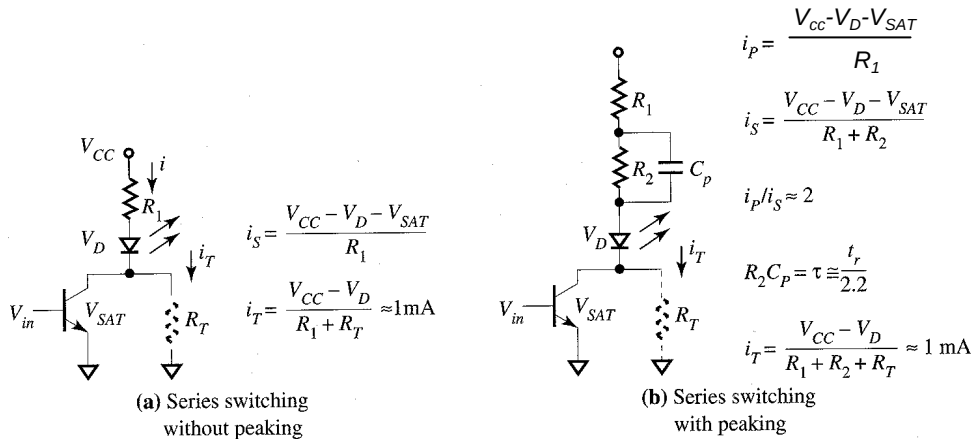
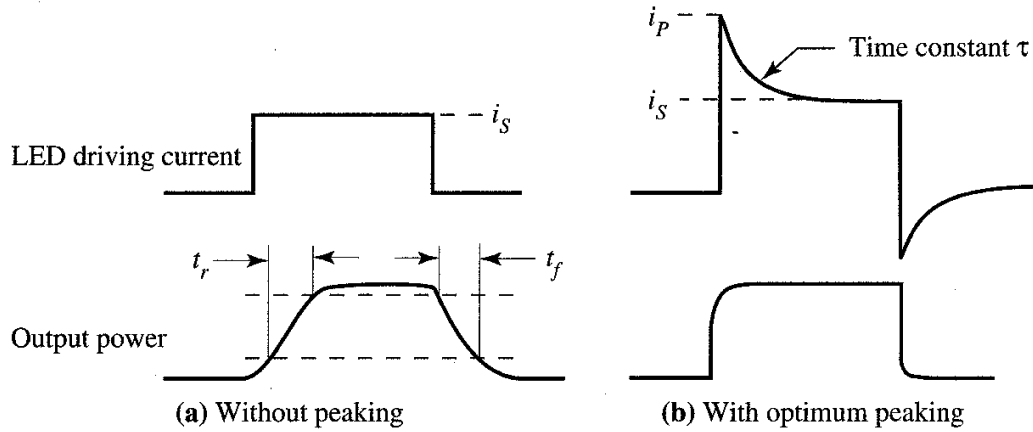


Potencia acoplada a la fibra: $P_F = P_{LED} T NA^2$

con $P_{LED} = \eta_q i_D V_G$

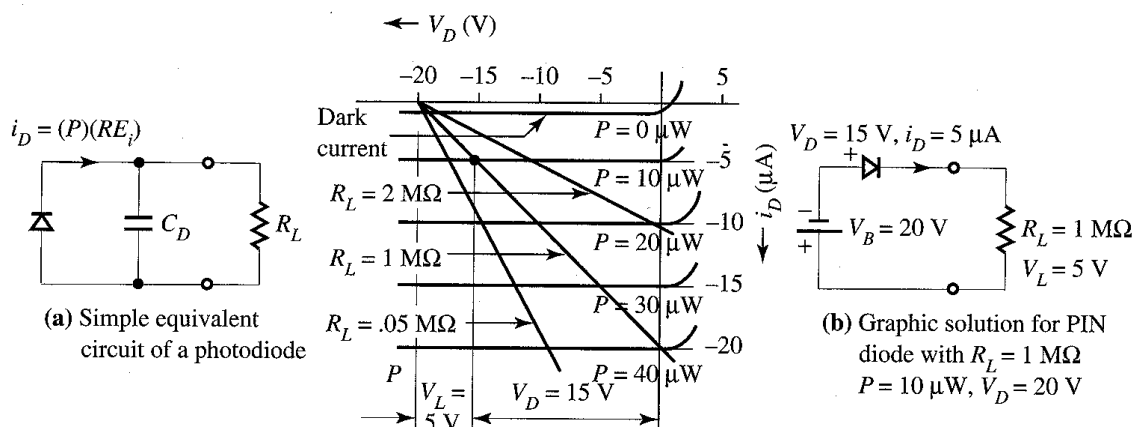
B.3.10.4.1 Circuitos de excitación de LEDs

Se desarrollan circuitos de conmutación mejorados para que la conmutación se mejore => ancho de banda mejorado



B.3.10.4.2 Detectores de fibra óptica

Fotodiodos: menor tensión de polarización inversa, menos rápidos
 Diodos de avalancha: más rápidos, mayor tensión de polarización (100V)



Responsividad en corriente y en tensión del fotodiodo:

$$RE_i = \frac{i_D}{P} = \frac{\eta e (\lambda \times 10^{-9})}{h c} = (0,804 \cdot 10^{-3}) (\eta \lambda)$$

$$RE_v = RE_i R_L$$

Velocidad: depende de las constantes de tiempo

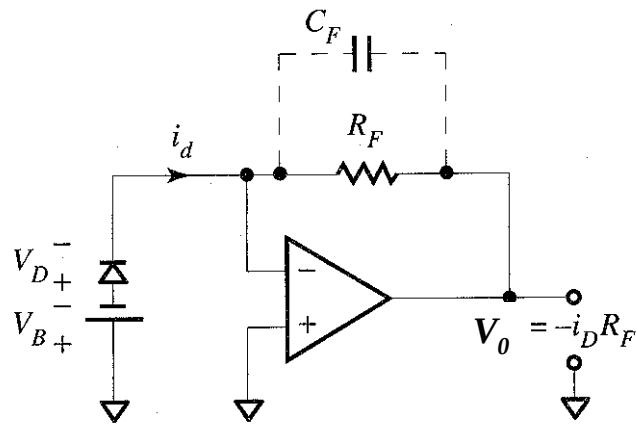
$$t_C = 2.19 R_L C_D \quad t_D = \text{tiempo de respuesta del diodo (depende de su construcción)}$$

$$t_R = \sqrt{t_D^2 + t_C^2} \quad t_C = \text{tiempo de respuesta del circuito.}$$

Ancho de banda (receptor):

$$f_R = \frac{0,35}{t_R}$$

Conversión corriente-tensión para mejorar la respuesta:



Resumen:

Guías de ondas

Guías de ondas son estructuras en las que varía el índice de refracción espacialmente. La estructura puede provocar un confinamiento de la luz en una región finita. La luz se podrá propagar como un modo guiado.

Modos guiados y radiados

Si el perfil del modo es tal que el campo se atenúa en la región de recubrimiento, se generan modos guiados. Si los modos se propagan en la región de recubrimiento serán modos radiados.

Guías planas

- En estas guías el índice de refracción varía en una sola dirección. Sólo se podrán propagar modos especiales, con una distribución de campos especial y una polarización especial.
- Para unas dimensiones dadas del núcleo de la guía sólo están permitidos un número determinado de modos. El modo de corte es el modo superior permitido.

Fibras ópticas

- Fibras ópticas son guías de ondas cilíndricas.
- La apertura numérica (NA) describe la propiedad de admisión de luz de la guía.
- Sólo luz incidiendo con un determinado ángulo podrá penetrar en la fibra óptica.

Fibras ópticas monomodo

Si el núcleo de la fibra es lo suficientemente pequeño, sólo se propagará un modo. Sistemas de altas prestaciones necesitan fibras ópticas unimodales o monomodo.

Propagación de pulsos y dispersión

La propagación de pulsos ópticos se describe por paquetes de onda. Los paquetes de onda viajan con una velocidad de grupo y dependiendo de la relación de ω - k , sufren distorsión durante su propagación

Acopladores de guía-guía

Los campos evanescentes de los modos guiados se aprovechan para acoplar energía óptica de una guía a otra. El acoplamiento se consigue acercando mucho dos guías (acoplador direccional), mediante enrejados o cortes

Acopladores de rayo-guía

Se utilizan dispositivos especiales para acoplar un rayo en el vacío a una guía. Si el perfil del rayo coincide con el perfil del modo guiado, se pueden acoplar directamente. De lo contrario se deberán utilizar acopladores prisma o con enrejados.