

COMUNICACIONES OPTICAS

DISPERSION EN FIBRAS OPTICAS

Universidad Autónoma de Baja California UABC
Facultad de Ingeniería Arquitectura y Diseño
Ensenada
Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

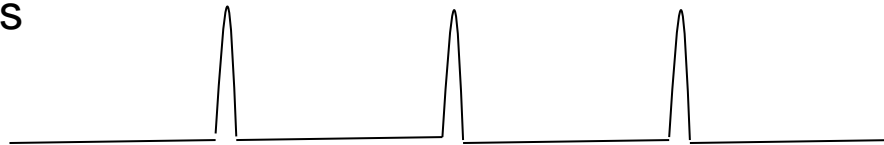
En los sistemas de comunicaciones digitales la información es codificada y transmitida en forma de pulsos.

Al viajar los pulsos a través de la fibra óptica estos sufren un ensanchamiento conocido como DISPERSION.

La dispersión y la atenuación son los factores mas importantes a considerar en la transmisión de pulsos en fibras ópticas y son acumulables con la distancia.

La dispersión limita la capacidad de transmisión de información (ancho de banda).

Pulsos iniciales



Ensanchamiento de pulsos



Traslape de pulsos
(no reconocibles)



Propagación de pulsos en medios dispersivos

Una onda plana monocromática propagándose en la dirección z de un medio homogéneo se puede caracterizar por:

$$E(z, t) = E_0 e^{j(\omega t - \beta z)}$$

Donde β es la constante de propagación.

Esta onda viaja con una velocidad de fase dada por:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n}$$

Para que la onda sea monocromática debe extenderse entre tiempos $-\infty$ y $+\infty$, lo que es físicamente imposible. Por lo que, se considera un pulso de campo definido por la función en $z = 0$ como una superposición de ondas armónicas:

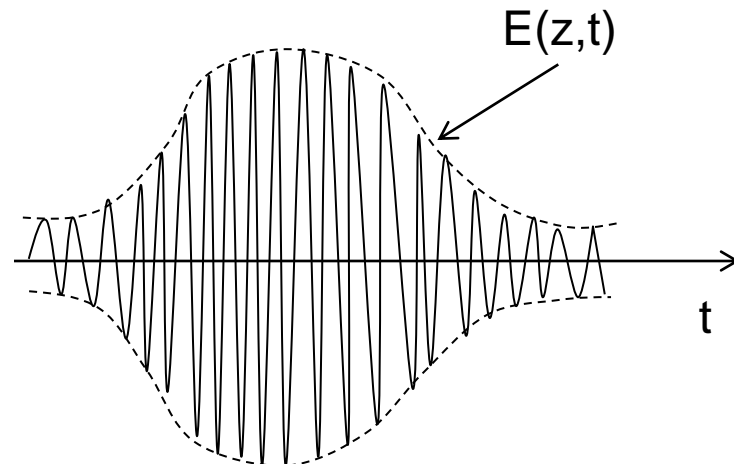
$$E(z = 0, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Con amplitudes $A(\omega)$ que pueden obtenerse a partir de la TF inversa:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(z = 0, t) e^{-j\omega t} dt$$

Por lo tanto, se puede considerar que el campo en cualquier z es:

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{j\omega t - \beta z} d\omega$$



Los pulsos de luz que se propagan por fibras ópticas se pueden aproximar por una distribución temporal Gaussiana, cuya forma en $z = 0$ puede darse por:

$$E(z = 0, t) = C e^{-t^2 / \tau_0^2} e^{j\omega_0 t}$$

Que representa un pulso de anchura temporal $2\tau_0$. Sustituyendo en una ecuación anterior:

$$A(\omega) = \frac{C}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2 / \tau_0^2} e^{j(\omega - \omega_0)t} dt = \frac{C\tau_0}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\tau_0^2}{4}(\omega - \omega_0)^2}$$

Por lo que, el pulso tiene una anchura espectral: $\Delta\omega \approx \frac{2}{\tau_0}$

Para un pulso de anchura de 2 ns, la anchura espectral es de 10^9 Hz. Puede parecer grande, pero con respecto a la frecuencia de portadora ω_0 (del orden de 10^{14} Hz) es pequeña.

Esta es la **anchura espectral limitada únicamente por el tamaño temporal del pulso**, pero las fuentes de luz utilizadas en comunicaciones ópticas pueden presentar anchuras espectrales mayores, típicamente entre 10^8 y 10^{12} Hz.

Entonces:

$$E(z, t) = \int_{\Delta\omega} A(\omega) e^{j\omega t - \beta(\omega)z} d\omega$$

La región de integración es $\Delta\omega$ (donde $A(\omega)$ es diferente de cero).

La integral es difícil de resolver si no se conoce la relación $\beta(\omega)$

Considerando que $n(\omega)$, y por lo tanto $\beta(\omega)$ no varían mucho en torno a $\Delta\omega$, por lo que se desarrolla $\beta(\omega)$ en serie de Taylor en torno a ω_0 .

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

Así:
$$E(z, t) = f(z, t) \cdot e^{j(\omega_0 t - \beta(\omega_0) z)}$$

Con:
$$f(z, t) = \int_{\Delta\omega} A(\omega) \exp \left[j((\omega - \omega_0) \left(t - \frac{z}{v_g} \right) - \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 z) \right] d\omega$$

Y donde hemos definido a la velocidad de grupo v_g como la velocidad de la envolvente (AM) de la señal óptica:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad \beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

Con $A(\omega)$ para el caso del pulso gaussiano:

$$f(z, t) = \frac{\tau_0}{2\sqrt{\pi}} \int_{\Delta\omega} \exp \left[-\Omega^2 \left(\frac{\tau_0^2}{4} + j \frac{\beta_2 z}{2} \right) + j\Omega \left(t - \frac{z}{v_g} \right) \right] d\Omega \quad \Omega = (\omega - \omega_0)$$

Resolviendo la integral:

$$f(z, t) = \frac{1}{\sqrt{1 + j \frac{2\beta_2 z}{\tau_0^2}}} \exp \left[\frac{-(t - z/v_g)^2}{\tau_0^2 + 2j\beta_2 z} \right]$$

Por lo tanto:

$$E(z, t) = \frac{C}{\sqrt{\tau(z)/\tau_0}} \exp \left[\frac{-(t - z/v_g)^2}{\tau^2(z)} \right] e^{j(\Phi(z, t) - \beta(\omega_0)z)}$$

Donde $\tau(z)$ representa la anchura del pulso:

$$\tau(z) = \tau_0 \left(1 + \frac{4\beta_2^2 z^2}{\tau_0^4} \right)^{1/2} \quad \text{con} \quad \beta_2 = \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$$

La distribución en intensidad de los pulsos es el módulo al cuadrado del campo:

$$P(z, t) = \frac{P_0}{\tau(z)/\tau_0} \exp \left[\frac{-2(t - z/v_g)^2}{\tau^2(z)} \right]$$

1. El máximo del pulso se da en $t = z/v_g$, y por tanto dicho máximo se mueve con una velocidad v_g .

La velocidad que viaja en su interior es de la **envolvente del pulso, y no de la onda**.

2. La anchura del pulso se va a ir incrementando según se propaga el pulso por la fibra (el medio).

Si β_2 es cero (si el medio no es dispersivo) el pulso no se distorsiona. Medio dispersivo: $n = n(\lambda)$.

$$\Phi(z, t) = \omega_0 t + k \left(t - z / v_g \right)^2 - \frac{1}{2} \tan^{-1}(\gamma)$$

Representa la parte temporal de la fase de la onda real que se está propagando

Con:

$$k = \frac{\gamma}{(1 + \gamma^2) \tau_0^2} \quad \gamma = \frac{2\beta_2 z}{\tau_0^2}$$

Se puede observar que las oscilaciones dentro del pulso no son periódicas

Se puede definir la frecuencia instantánea para una señal del tipo $g(t) = e^{jf(t)}$ como:

$$\omega(t) = \frac{df(t)}{dt}$$

Considerando que la onda tiene la típica dependencia en $\omega_0 t$, ω_0 será la frecuencia. Para este caso:

$$\omega(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \omega_0 + 2k \left(t - \frac{z}{v_g} \right)$$

La frecuencia instantánea cambia con el tiempo dentro del pulso.

Si $\beta_2 > 0$, las frecuencias menores a ω_0 viajan más rápido que la velocidad de grupo, y se colocan en la parte delantera del pulso. De la misma forma, las mayores a ω_0 viajan más lentas y se ponen al final del pulso. Es decir, el pulso se ensancha porque las diferentes frecuencias viajan a velocidades diferentes y se colocan dentro del pulso en diferentes lugares. Se dice que el pulso *presenta chirp*.

Si $\beta_2 < 0$, el pulso también presenta chirp pero las diferentes frecuencias se colocan al contrario, esto es, las frecuencias mayores que ω_0 se colocan en la parte delantera del pulso. El pulso presentará un espectro **mayor** que si no presentara chirp.

ANCHO DE BANDA EN FIBRAS OPTICAS

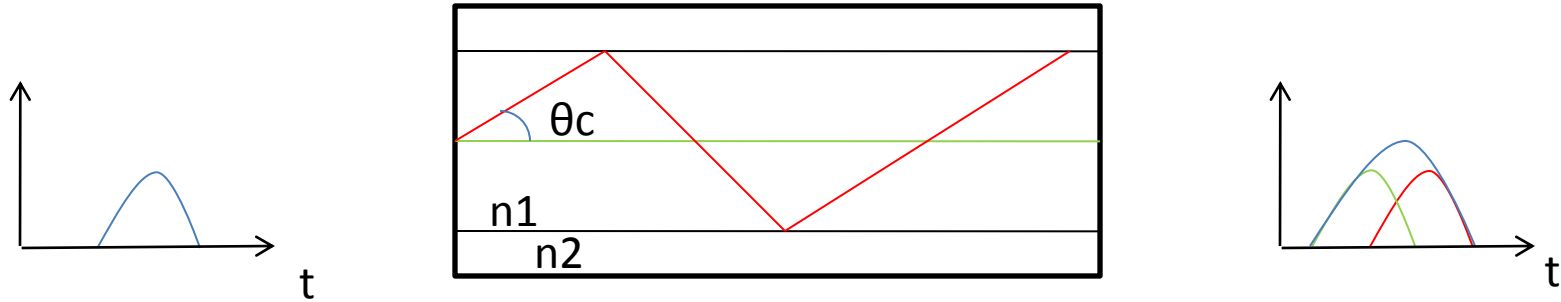
El ancho de banda depende de:

- a) El ensanchamiento de pulso denominado modal, intramodal y del material
- b) La forma del perfil de índice de refracción con respecto a su valor ideal el cual es difícil de controlar en la fabricación
- c) Las micro desviaciones aleatorias sufridas por la fibra en su cableado e instalación
- d) La forma de la distribución espectral de la fuente de luz utilizada
- e) Las condiciones de inyección de la luz en la fibra

Tipos de dispersión en una fibra óptica ideal (sin imperfecciones geométricas):

- * Dispersión intermodal (solo para fibras multimodo)
 - * Dispersión de guía de onda (intramodal)
 - * Dispersión de material
 - * Dispersión del modo de polarización
- } Efectos cromáticos
(dependen del ancho espectral de la fuente)

DISPERSION INTERMODAL



$$T_{\min} = \frac{L}{c} n_1$$

$$T_{\max} = \frac{L}{c} n_1 \cos \Theta_c$$

$$\cos \Theta_c = \frac{n_1}{n_2}$$

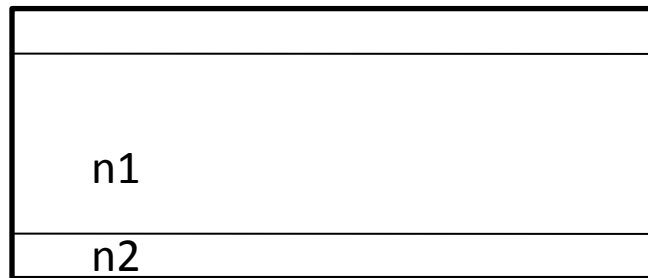
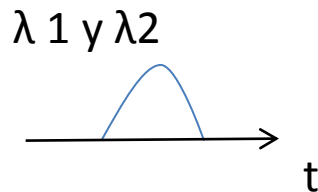
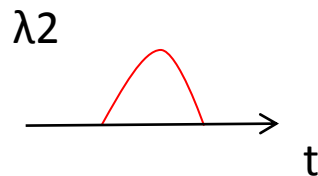
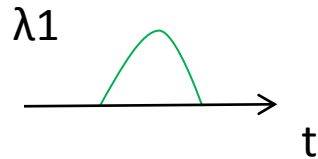
$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} = \frac{L}{c} n_1 (\cos \Theta_c - 1) = \frac{L}{c} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{L}{c} n_1 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right)$$

$$\Delta T = \frac{L}{c} \frac{n_1}{n_2} \Delta n \approx L \frac{\Delta n}{c} \approx \frac{NA^2}{2nc} L$$

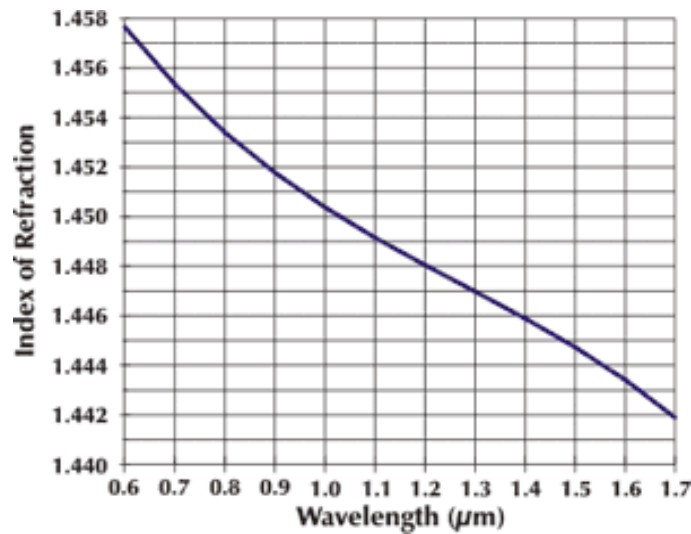
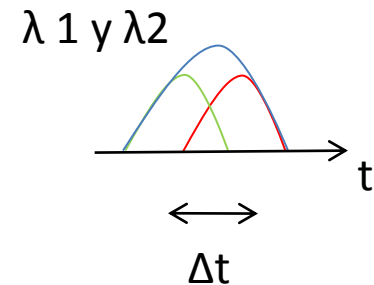
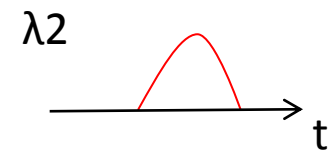
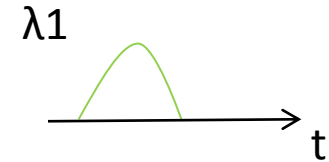
$$\frac{\Delta T}{L} = \frac{NA^2}{2nc} [ns / km]$$

DISPERSION CROMATICA

Entrada



Salida



Es causada por la velocidad de la luz (índice de refracción) que es una función de la longitud de onda.

Todas las fuentes tienen una anchura espectral y presentan dispersión cromática

EFFECTOS CROMATICOS

1. **DISPERSION DE MATERIAL**. Es causada por la dependencia de la longitud de onda del índice refractivo de la fibra, creando por lo tanto, una dependencia con la longitud de onda, la velocidad de fase, y la velocidad de grupo.

Las fuentes tienen una amplitud espectral de al menos un nanómetro. Las componentes con este espectro viajan a diferentes velocidades. Así, la fibra crea un pulso mas ancho proporcional a la amplitud espectral del pulso.

Este efecto se debe considerar en fibras unimodales o multimodo.

2. **DISPERSION DE GUIA DE ONDA**. Es causada por la dependencia de las características modales de una fibra con la longitud de onda.

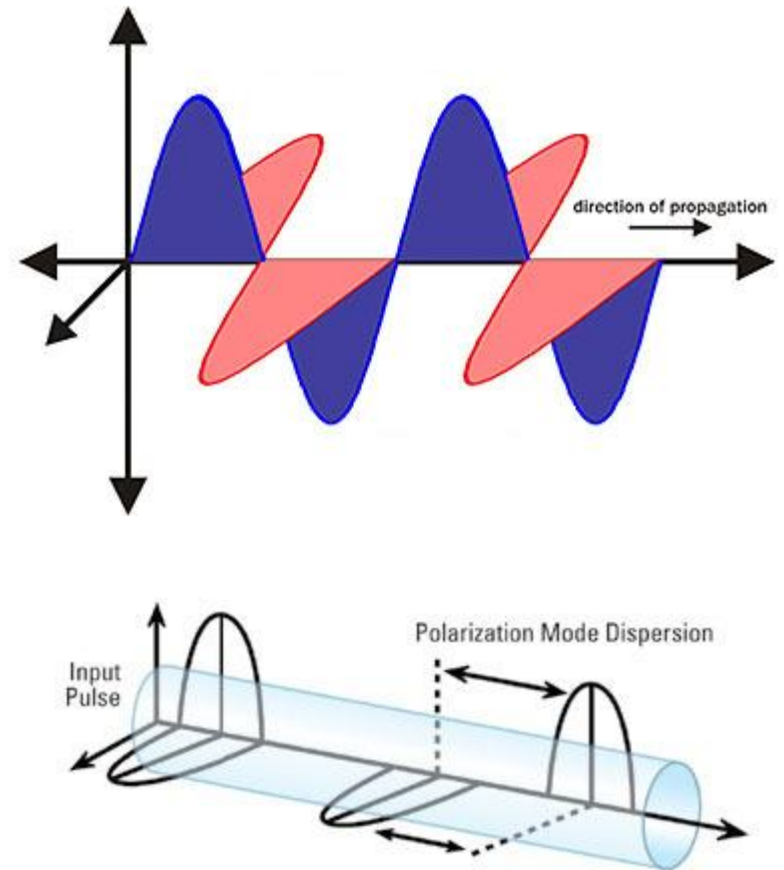
En fibras multimodo, este efecto se puede despreciar porque se limpia por la presencia de muchos modos. En una fibra unimodal en condición de operación típica, el haz de luz se extiende en el revestimiento. Dando un índice refractivo efectivo entre el índice del núcleo y el del revestimiento. Una longitud de onda mayor causa un diámetro de haz incrementado (aunque los índices refractivos fueran constantes), lo cual, cambia el índice refractivo efectivo.

3. **DISPERSION DE PERFIL**. Se debe a las diferentes dependencias con la longitud de onda de los índices refractivos del núcleo y del revestimiento. En fibras multimodo de índice gradual es un parámetro importante de diseño. En fibras ópticas unimodales se considera como parte de la dispersión de guía de onda.

Dispersión del modo de polarización (PMD)

PMD es importante en fibras ópticas monomodo porque solamente se puede propagar un modo. Este modo se compone de dos modos de polarización como se muestra en la figura.

En una fibra perfectamente simétrica estos modos de polarización son idénticos. Sin embargo, al aplicarse esfuerzos del exterior el índice de refracción de la fibra (velocidad) varía ligeramente los dos modos de polarización de la luz, llegando a tiempos diferentes al final de la fibra (PMD).



PMD es menor que la dispersión de material y solamente se considera en sistemas de fibra monomodo de gran distancia y alta velocidad (arriba de 2.5 Gb/s).

La dispersión cromática esta dada en unidades de ps/km*nm

$$D_{chr} = -\frac{dt_{gr}}{Ld\lambda} \left[\frac{ps}{km \cdot nm} \right]$$

$$D_{chr} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2} + \frac{\lambda}{c} (n_1 - n_2) \frac{d^2 b}{d\lambda^2}$$

Dispersion Dispersión de
de material guía de onda

$b(\lambda)$ describe el efecto del diámetro de haz dependiente de la λ en la propagación

Dispersión total (t_t):

$$\Delta t_t = [(\Delta t_m)^2 + (\Delta t_c)^2]^{1/2}$$

$$\Delta t_c = D_{chr} \cdot \Delta \lambda \cdot L$$

L es la longitud total de la fibra

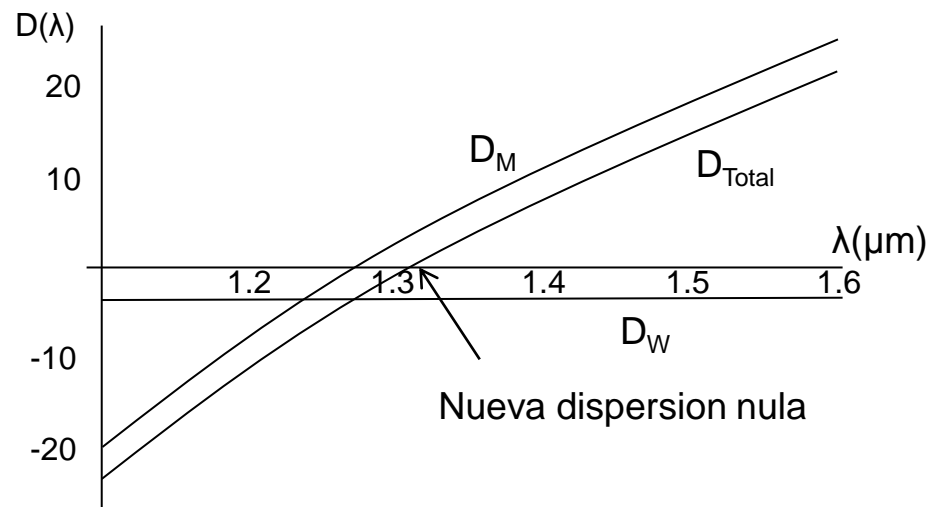
$\Delta \lambda$ =FWHM, anchura espectral de la fuente

Ancho de banda para pulsos de formas gaussianas

$$\Delta f = \frac{0.35}{\Delta t_t}$$

Dispersión cromática total

La dispersión cromática total es la suma de las dos componentes, por lo que los puntos de dispersión cero y pendiente en el punto de dispersión cero dependen de las características de la fibra óptica particular

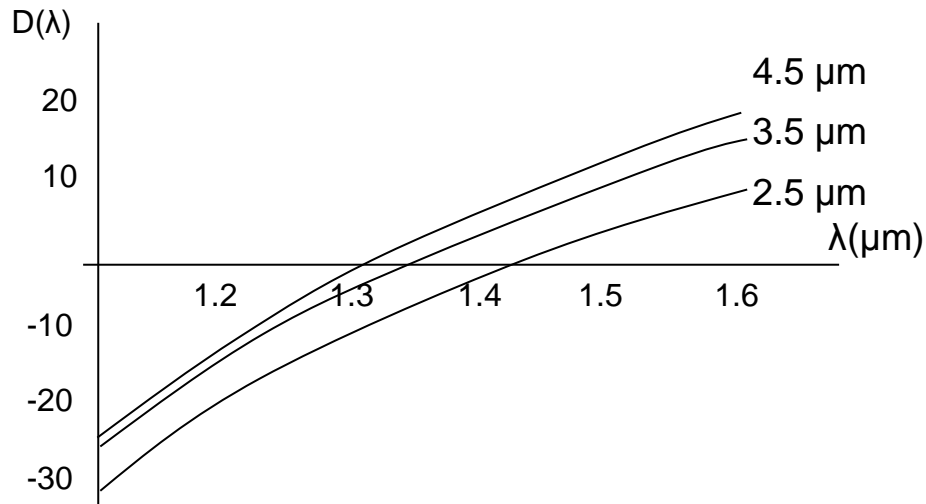


Las fibras monomodo comerciales poseen valores de longitud de onda de dispersión cero alrededor de 1310 nm y pendiente en el punto de dispersión cero del orden de 0.08 ps/km nm². El valor de la dispersión en la tercera ventana es de alrededor de 18 ps/nm km.

Fibras con dispersión desplazada

En la actualidad, la mayoría de los sistemas tienden a operar en la tercera ventana, donde la dispersión de las fibras convencionales es muy elevada, lo que aumenta la anchura de los pulsos.

Por lo tanto, se pueden utilizar láseres con anchura espectral muy pequeña o fabricar fibras ópticas con dispersión desplazada.



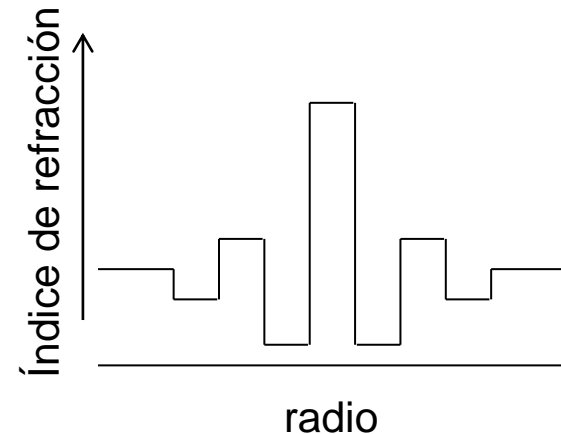
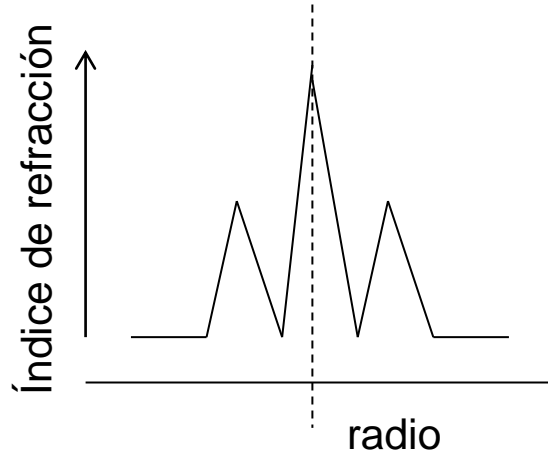
Si se modifica el radio de la fibra se puede modificar la dispersión de guía de ondas y desplazar la longitud de onda de dispersión cero.

Si se reduce mucho el radio de la fibra, se tendrían que hacer fibras muy estrechas. Por lo que, se usan fibras de dispersión desplazada, las cuales son fabricadas con perfiles especiales (graduales).

PERFILES DE FIBRAS OPTICAS CON DISPERSION DESPLAZADA

Se han fabricado fibras con dispersión desplazada cambiando el perfil del índice de refracción de la fibra óptica. Se puede lograr de esta manera una dispersión nula a la longitud de onda de 1550 nm.

De esta forma, se puede tener mínima atenuación y dispersión nula a 1550 nm (tercera ventana).



Corning® SMF-28™ CPC6 Single-Mode Optical Fiber

• Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1301.5 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1321.5 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope (S_0): $\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)	
	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Value	$\leq 0.1^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC SC B6A/WG1, Method 1, September 1997

◀ The PMD link value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as the link quadrature average). This value is used to determine a statistical upper limit for system PMD performance.

Individual PMD values may change when cabled. Corning's fiber specification supports emerging network design requirements for a 0.5 psec/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Dispersion Calculation	
$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}), \quad \text{for } 1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}, \quad \lambda = \text{Operating Wavelength}$	

PERFORMANCE CHARACTERIZATIONS

Characterized parameters are typical values.

Zero Dispersion Wavelength (λ_0):

1312 nm

Zero Dispersion Slope (S_0):

0.090 ps/(nm²•km)

Effective Group Index of Refraction (N_{eff}):

1.4675 at 1310 nm

1.4681 at 1550 nm