



BLOQUE	TÍTULO
<i>Tema 0</i>	Introducción a las Comunicaciones Ópticas
<i>BLOQUE I</i>	La transmisión de información por enlaces básicos de comunicación por fibra óptica
<i>I.1.-</i>	Generación de la portadora: fuentes de luz
<i>I.2.-</i>	Modulación de la portadora óptica con la información
<i>I.3.-</i>	Multiplexación de varias fuentes de información
<i>I.4.-</i>	Transmisión de información por la fibra óptica
<i>I.5.-</i>	La detección de la información: receptores ópticos
<i>I.6.-</i>	Componentes activos y pasivos




# Ing. Telecom., CC.OO., bloque 1: tx. por fibra óptica

## Tema que se va a presentar

BLOQUE	I.4 Transmisión de información por fibra óptica
Objetivos	<p>Se pretende que el alumno:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Sepa cuáles son los parámetros que caracterizan a una fibra óptica.</li><li>• Entienda las ventajas y limitaciones de este tipo de guía.</li><li>• Conozca las ventanas de transmisión y sepa por qué se utiliza cada una.</li><li>• Identifique los factores que influyen en la dispersión y cómo afecta la fuente empleada.</li><li>• Comprenda la no-linealidad del sistema y explique la diferencia en este sentido entre sistemas eléctricos y ópticos.</li><li>• Sepa cuáles son los efectos no-lineales más perjudiciales.</li><li>• Sea capaz de enumerar los distintos tipos de fibras ópticas y elegir la idónea para cada tipo de aplicación.</li><li>• Pueda describir los procesos en la industria de manufactura y cableado de f.o.</li><li>• Diferencie los conectores empleados para la conexión de f.o. y sepa cómo se hace y cómo se caracteriza una unión de fibras.</li></ul>
Duración	10 horas
Programa	<p><b>Tema I.4.1: Características y atenuación en fibras ópticas</b></p> <p><b>Tema I.4.2: Propagación lineal de señales por la fibra óptica</b> Atenuación, dispersión</p> <p><b>Tema I.4.3: Propagación no lineal de señales por fibra óptica</b> SPM, XPM, FWM, SBS, SRS</p> <p><b>Tema I.4.4: Amplificación y compensación de dispersión</b></p> <p><b>Tema I.4.5: Aspectos comerciales y tecnológicos</b> Fabricación, cableado, conexiones, oferta comercial</p> <p><b>Resumen y conclusiones</b></p>

- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión
- 

- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión



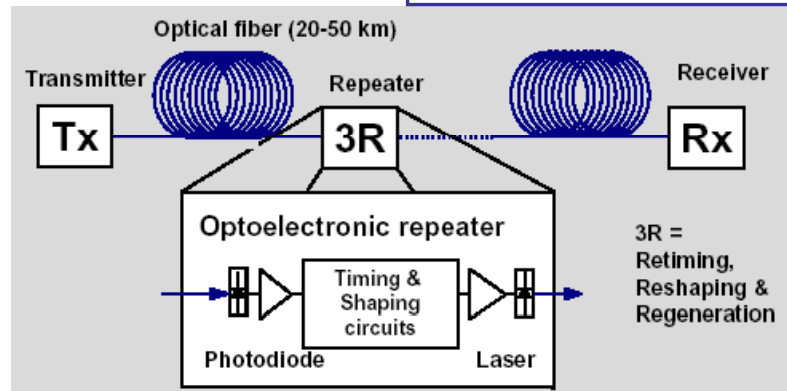
# Ing. Telecom., CC.OO., bloque 1: tx. por fibra óptica

## Amplificadores ópticos, conceptos generales

Un amplificador óptico suministra ganancia a las señales ópticas presentes en su entrada, sin necesidad de conversión al dominio eléctrico. Desde su extensión comercial (años 90) han cambiado la forma de diseño de los sistemas

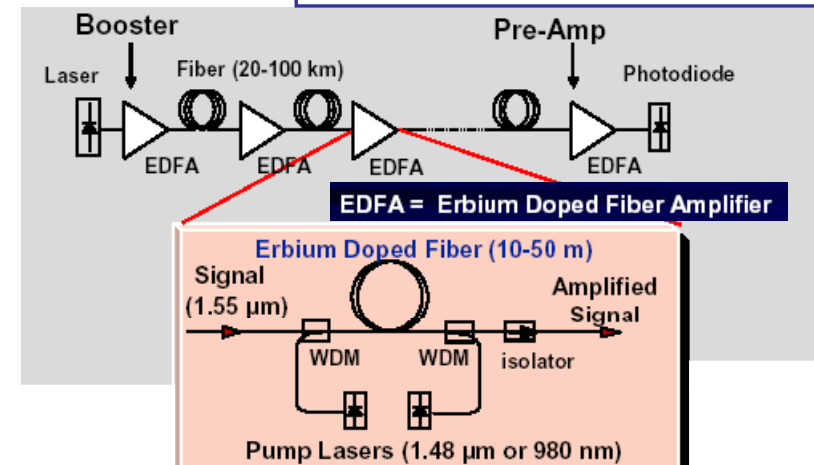
Antes

Repetidor O/E/O



Después

Amplificador óptico

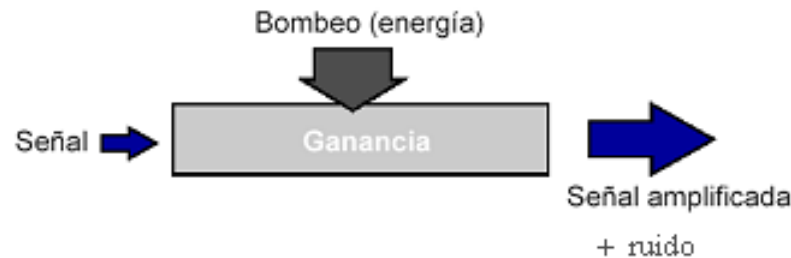


VENTAJAS de los amplificadores ópticos frente a los repetidores O/E/O:

- 😊 no están tan limitados en veloc. por no emplear circuitos electrónicos
- 😊 independientes de la velocidad de transmisión o el formato de modulación de la señal
- 😊 se puede usar 1 solo amplificador para todos los canales de un sistema WDM

SIN EMBARGO

- 😞 la ganancia de los amplificadores no es plana en  $\lambda$
- 😞 la ganancia depende también de la potencia de la señal de entrada ➡ transitorios en sistemas que hacen uso de OADM
- 😞 introducen ruido (ASE)
- 😞 sólo amplifican (frente a regeneración 3R)



### TIPOS DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS

#### Basados en efectos no lineales en la fibra:

- Amplificadores Raman de fibra
- Amplificadores Brillouin de fibra

#### Basados en la emisión estimulada:

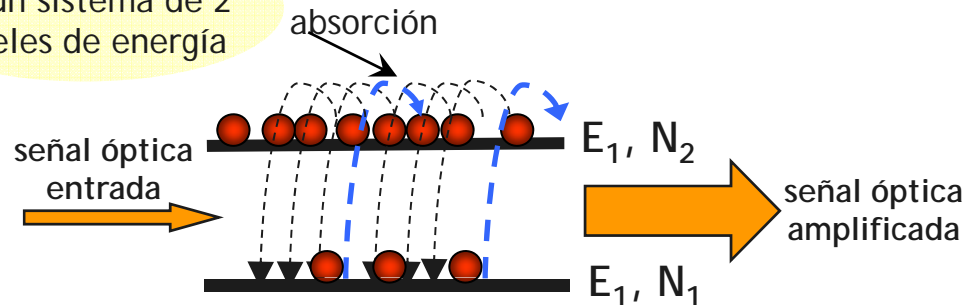
- Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA)
- Amplificadores ópticos de semiconductor (SOA)

### CARACTERÍSTICAS DE UN AMPLIFICADOR IDEAL

- Alta ganancia, con altas potencias de salida y con alta eficiencia
  - Alto ancho de banda con ganancia constante
    - Bajo nivel de ruido añadido
- Funcionamiento independiente de la señal de entrada
- No introduce diafonía entre varias señales amplificadas a la vez
  - Insensible a la polarización de la luz de entrada
  - Bajas pérdidas de inserción (al conectarlo a la fibra)
- Transparencia (al formato de modulación de la entrada, su veloc.,...)

## Parámetros básicos de un A.O.: ganancia

emisión estimulada  
en un sistema de 2  
niveles de energía



Si se logra la inversión de población ( $N_2 > N_1$ ) (con una señal de bombeo -eléctrica u óptica-)  $\Rightarrow$  la emisión coherente estimulada predomina sobre la absorción  $\Rightarrow$  la señal óptica de entrada se amplifica

El coeficiente de ganancia se puede modelar, lejos de la saturación:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2}$$

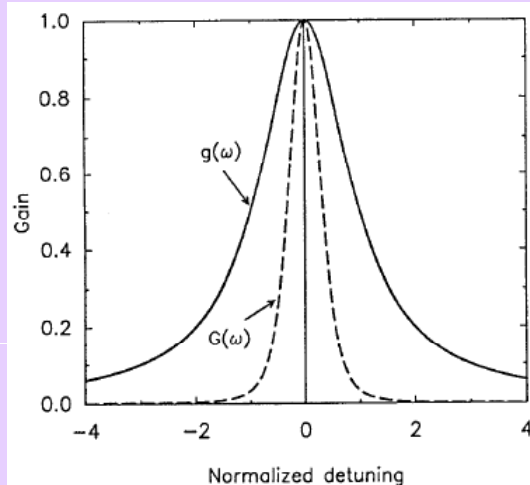
$g_0$ : ganancia de pico

$\omega$ : frecuencia óptica de la señal incidente

$\omega_0$ : frecuencia de transición atómica

$T_2$ : Tiempo de relajación dipolos ( $< 1$  ps)

La ganancia del amplificador relaciona las potencias de entrada y salida. Depende de la frecuencia (longitud de onda) y salvo en los amplificadores de  $\text{Er}^{3+}$ , tiene una forma más o menos lorentziana:



$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow G(\omega) = \exp[g(\omega)L]$$

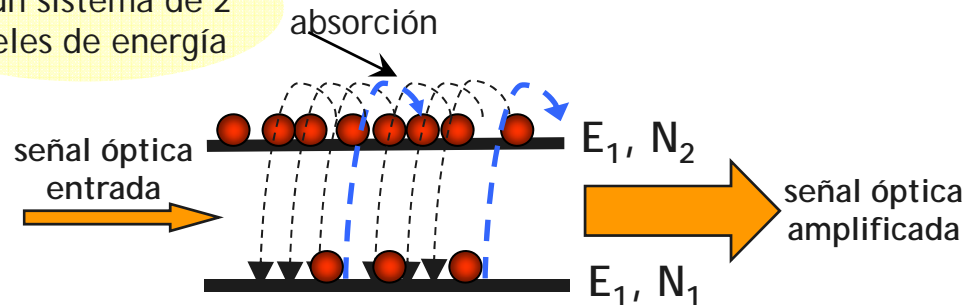
Su anchura en frecuencia viene dada por  $\Delta\nu$

Para  $T_2 = 60$  fs, sería de casi 5 THz

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi T_2} \left( \frac{\ln(2)}{\ln(G_0/2)} \right)^{1/2}$$

## Parámetros básicos de un A.O.: saturación

emisión estimulada  
en un sistema de 2  
niveles de energía



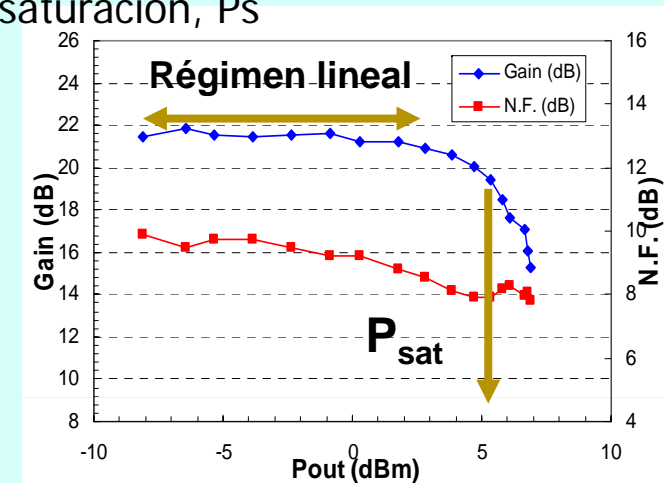
Si se logra la inversión de población ( $N_2 > N_1$ ) (con una señal de bombeo -eléctrica u óptica-)  $\Rightarrow$  la emisión coherente estimulada predomina sobre la absorción  $\Rightarrow$  la señal óptica de entrada se amplifica

El coeficiente de ganancia se reduce (comprime) al aumentar la intensidad de entrada. Ello es debido a la reducción en la inversión de población, porque los portadores "se gastan" por el gran nº de transiciones. Es el fenómeno conocido como **saturación de la ganancia**

Esto puede modelarse expresando la ganancia del A.O. en función de la ganancia sin saturación,  $G_0$ , y de la potencia de salida y la potencia de saturación,  $P_s$

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s}\right)$$

La potencia de saturación,  $P_s$ , es la potencia de salida para la que la ganancia considerando el efecto de saturación se reduce a la mitad (-3 dB) del valor no saturado



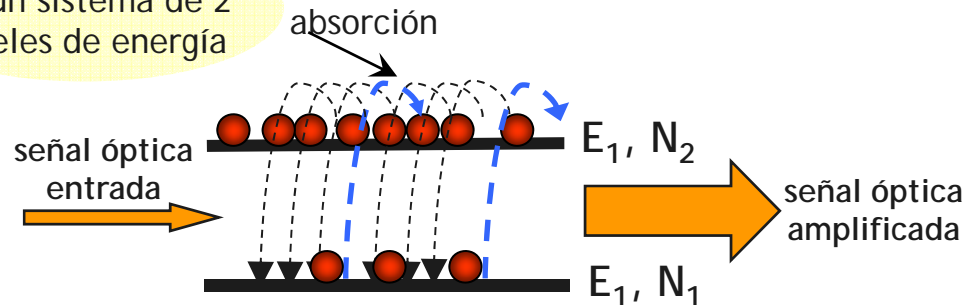
JDSU CQF872 SOA T=25° C.

I = 400mA; G = 21.5dB; Psat= +5.8dBm; N.F. = 8.2dB



## Parámetros básicos de un A.O.: figura de ruido

emisión estimulada  
en un sistema de 2  
niveles de energía



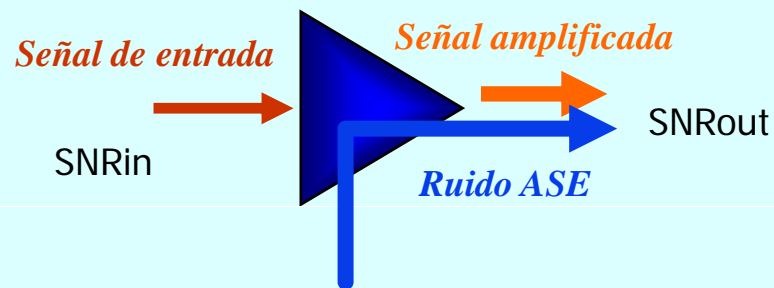
Si se logra la inversión de población ( $N_2 > N_1$ ) (con una señal de bombeo -eléctrica u óptica-)  $\Rightarrow$  la emisión coherente estimulada predomina sobre la absorción  $\Rightarrow$  la señal óptica de entrada se amplifica

Los amplificadores ópticos degradan la SNR debido a que la emisión espontánea agrega ruido a la señal durante su amplificación.

Se llama ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission)

Igual que para el caso de ampl. electrónicos este proceso se modela con la figura de ruido, NFc

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}$$



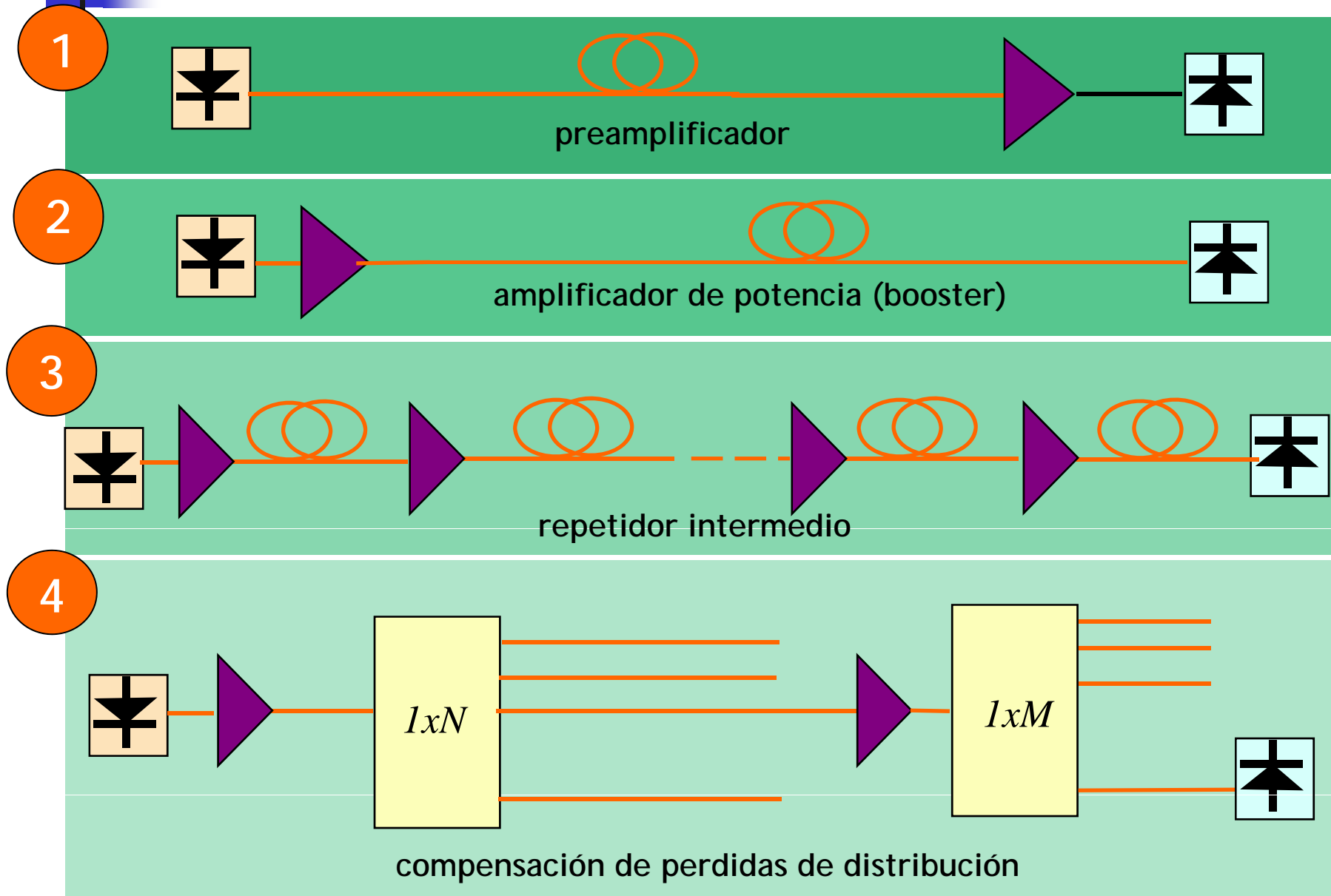
Puede demostrarse que, en el caso ideal con detector cuadrático ideal con sólo ruido cuántico,  $NF \approx 2n_{sp}$


$n_{sp}$  factor de inversión de población

$$n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$$

Esta ecuación muestra que el amplificador degrada en 3 dB incluso en un amplificador ideal en el que  $n_{sp}=1$ . Valores típicos: 6-8 dB

Ing. Telecom., CC.OO., bloque 1: tx. por fibra óptica  
Aplicaciones en sistemas de los amplificadores ópticos

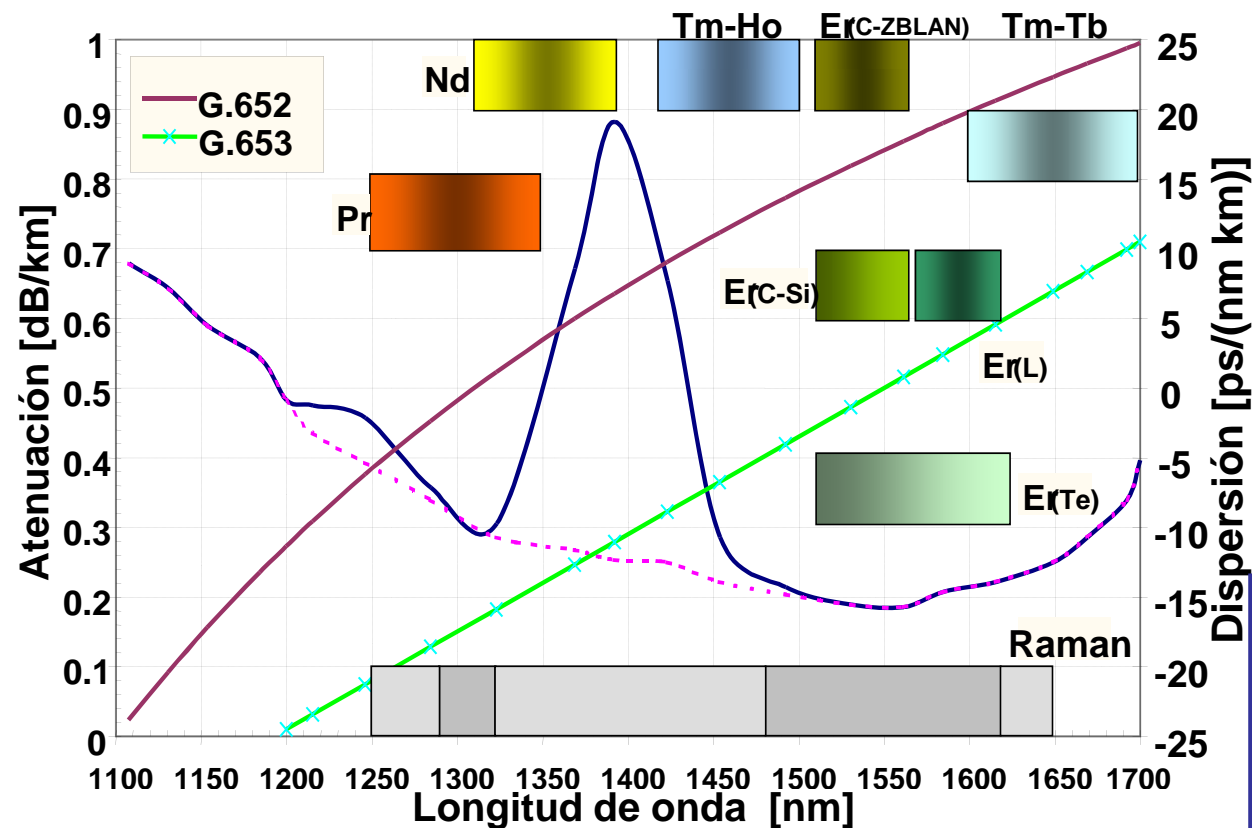


- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión



Una manera de conseguir amplificación en la fibra de sílice es dopándola con tierras raras. Según cuál sea el dopante se consigue amplificación en una banda u otra.

En la banda convencional (3ª ventana) el dopado es con iones de Erblio: EDFA-  
*Erbium Doped Fiber Amplifier*



**Er; Erblio**

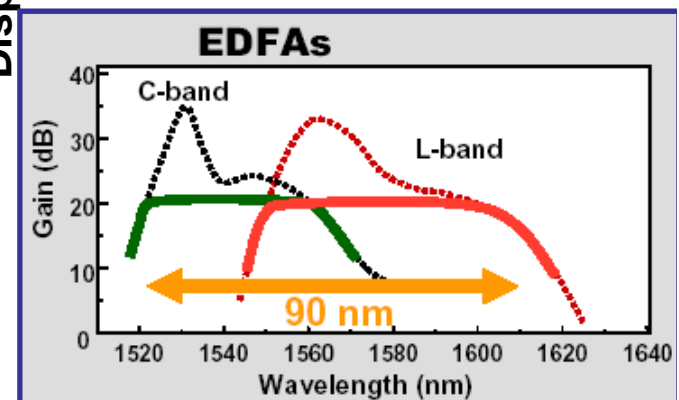
**En bandas C y L (S-EDFA),  
sílice como material base de la  
fibra**

**Te: Tellurite-EDFA, teluratos  
como material base**

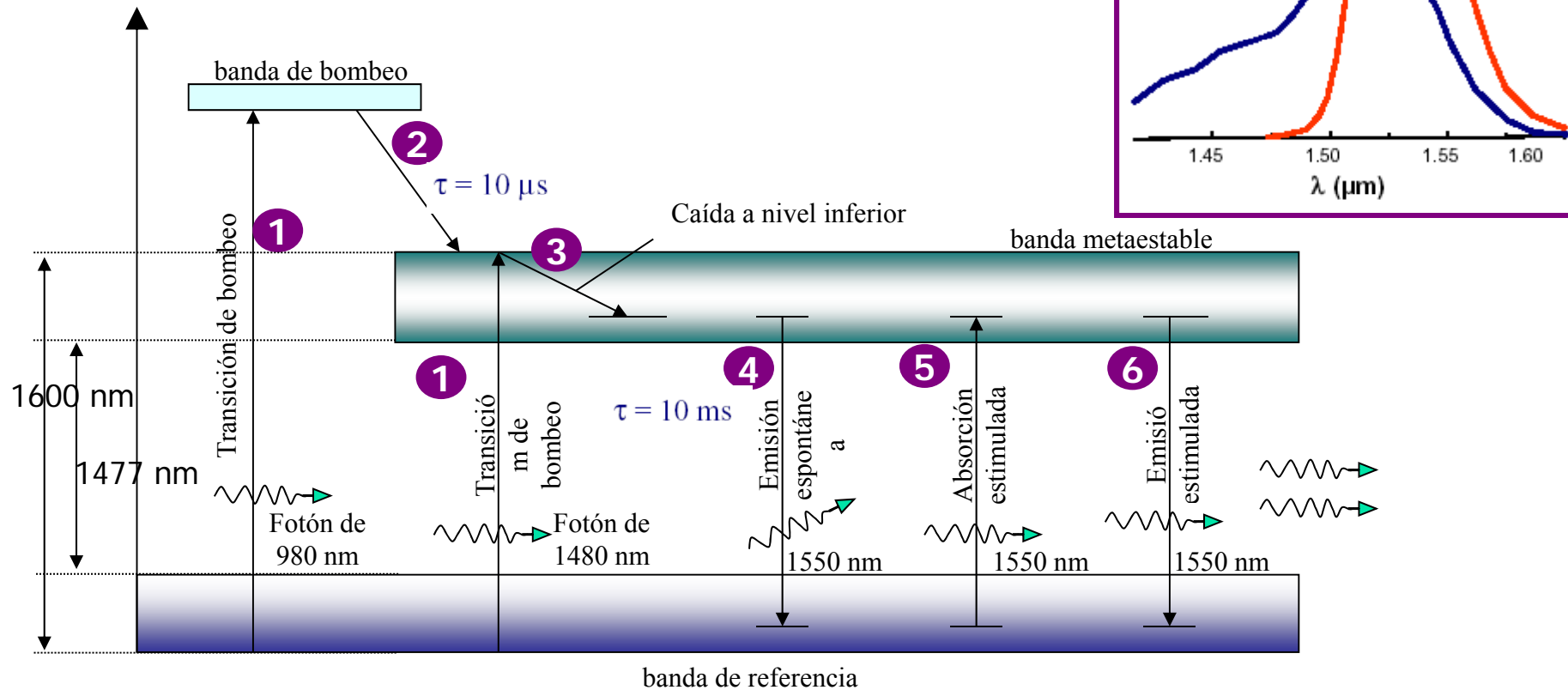
**Pr: Praseodimium**

**Tm-Ho: Thulium**

**Tm-Tb con Iones de Terbio en  
la cubierta de la fibra.**



### Diagrama de bandas EDFA

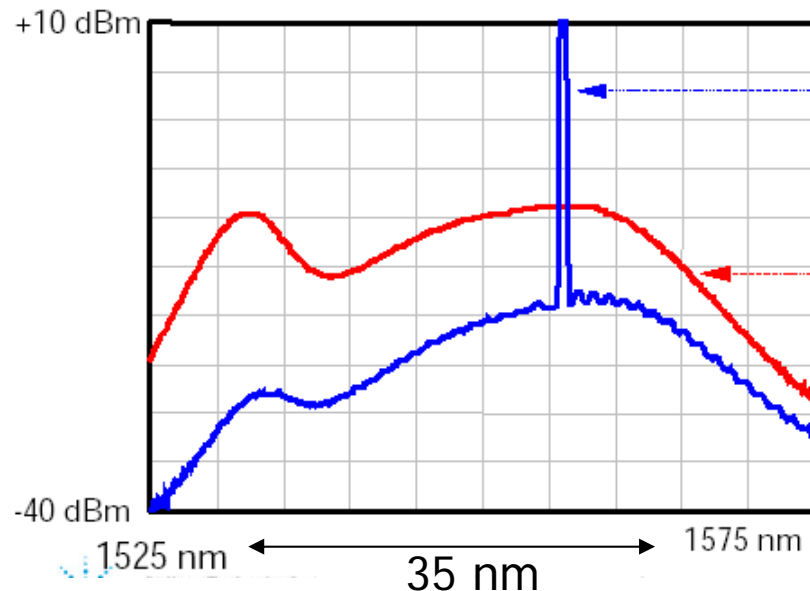
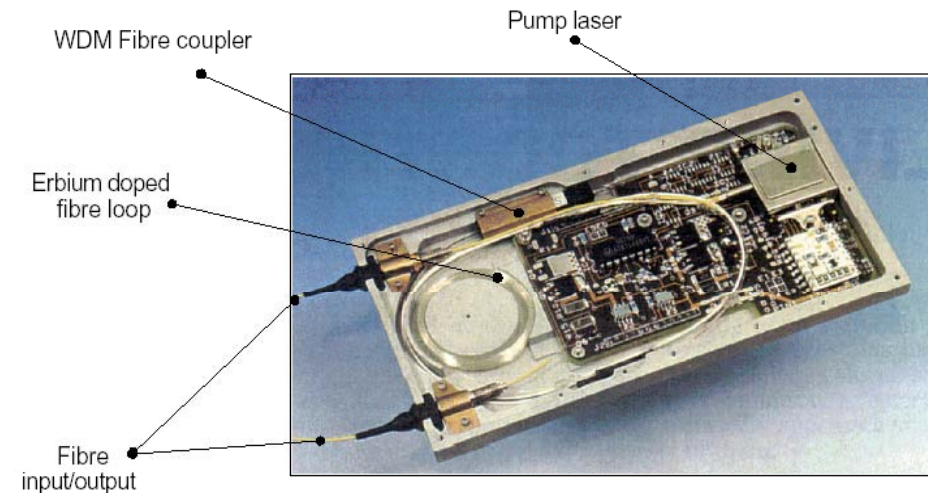
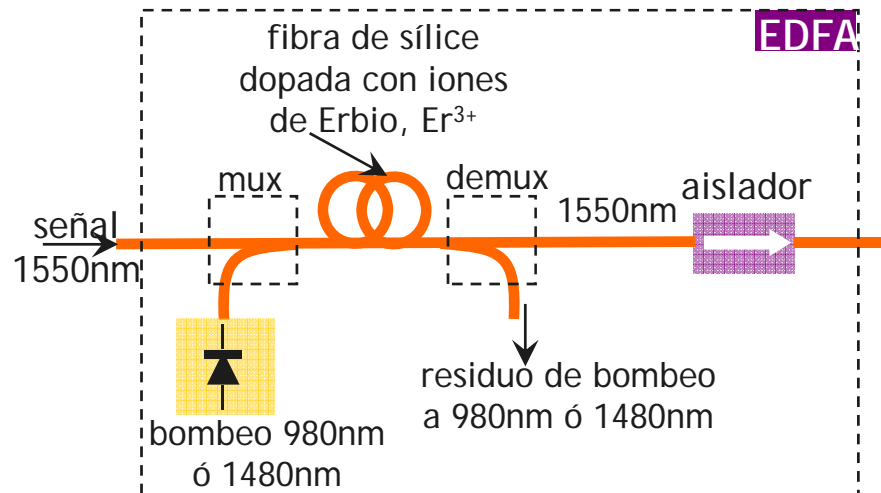


Se puede bombear para conseguir inversión de población a 980nm y 1480 nm.

Con 980 nm se produce menos ruido y más ganancia.

Con 1480 nm pueden lograrse mayores potencias de salida (a costa de alta pot. bombeo) y el bombeo puede viajar con la información (bombeo desde cabecera)

## Estructura de un EDFA, ganancia y ruido ASE



Con señal a la entrada (ASE menor)

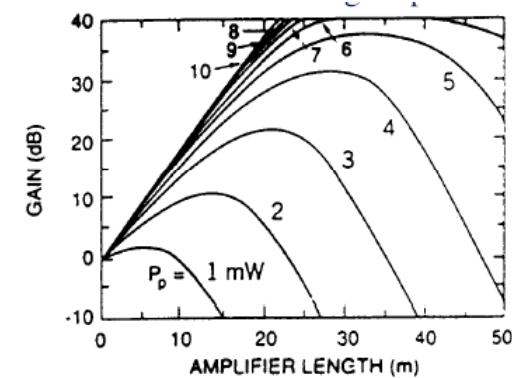
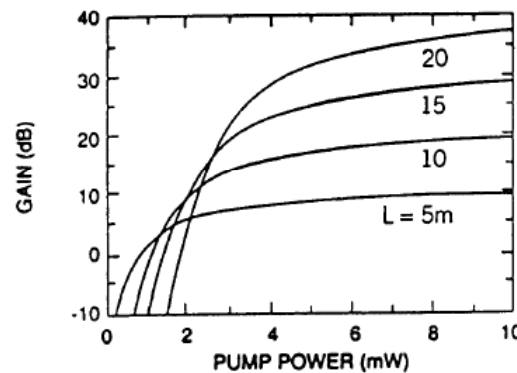
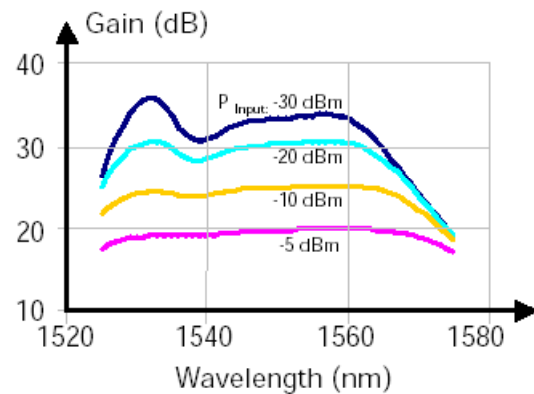
ASE sin señal a la entrada

El EDFA es el amplificador preferido en sistemas de comunicaciones ópticas:

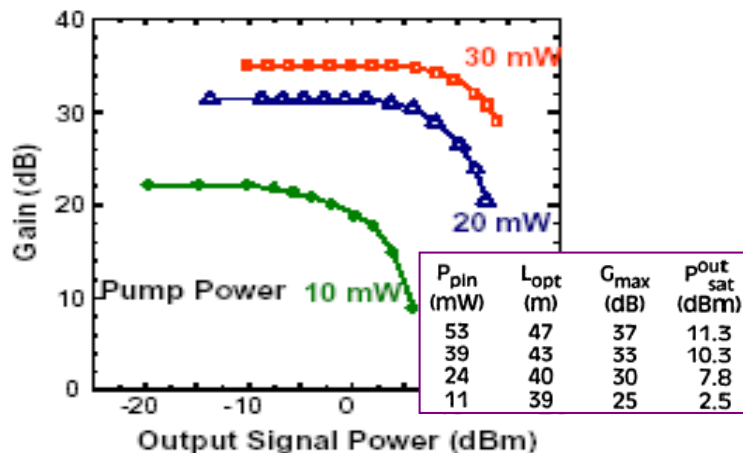
- Porque existen fuentes de bombeo compactas y de alta potencia
- Porque es un dispositivo todo-fibra ➡ PDL ↓ y fácil acoplo de luz
- Porque no introduce diafonía en WDM

## Estructura de un EDFA, diseño de ganancia y ruido

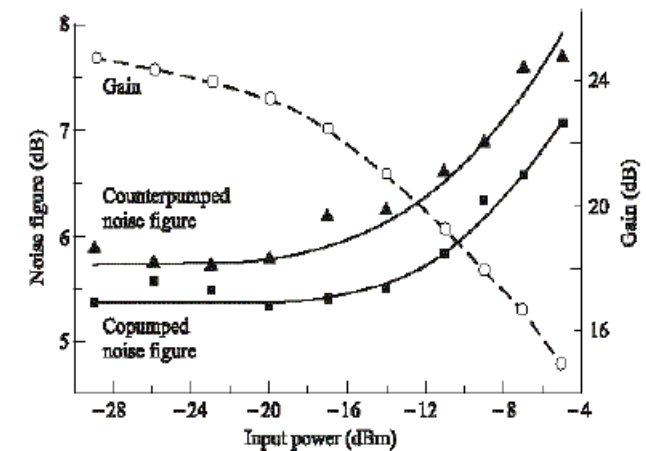
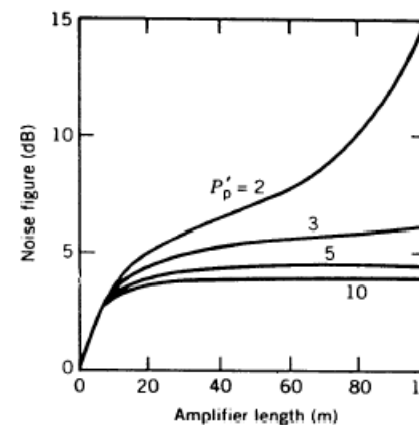
La ganancia depende de la potencia de bombeo, de la longitud de la fibra dopada y de la concentración de dopantes



El punto de saturación puede controlarse con la potencia de bombeo

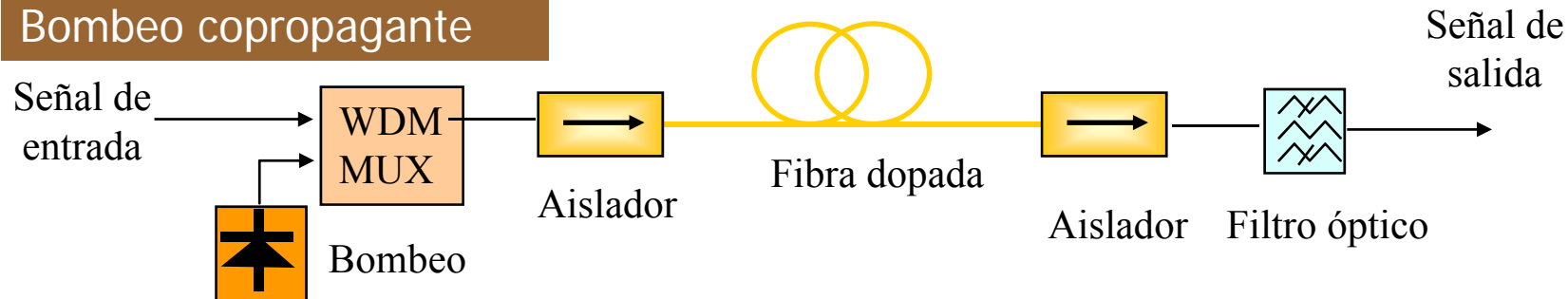


También la figura de ruido depende de la longitud de la fibra dopada y de la potencia de bombeo. También depende de la señal de entrada para altas pot. entrada

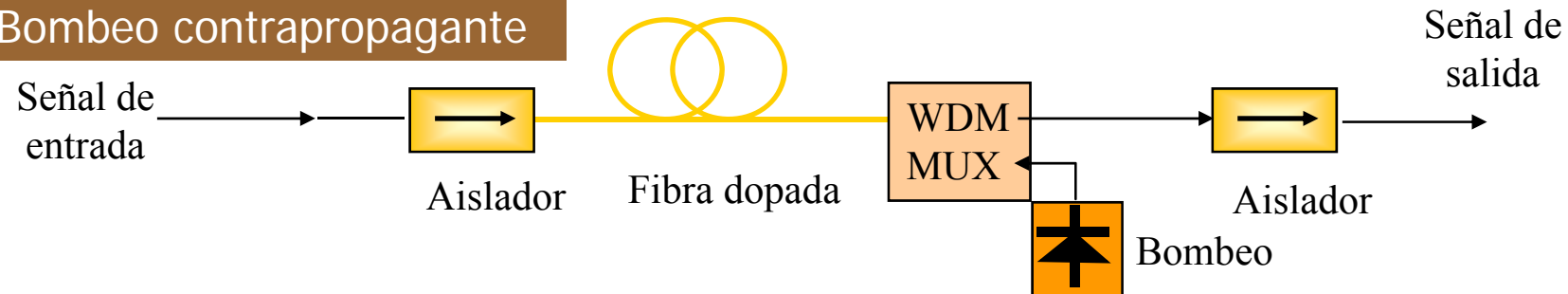


## Estructura de un EDFA, configuraciones

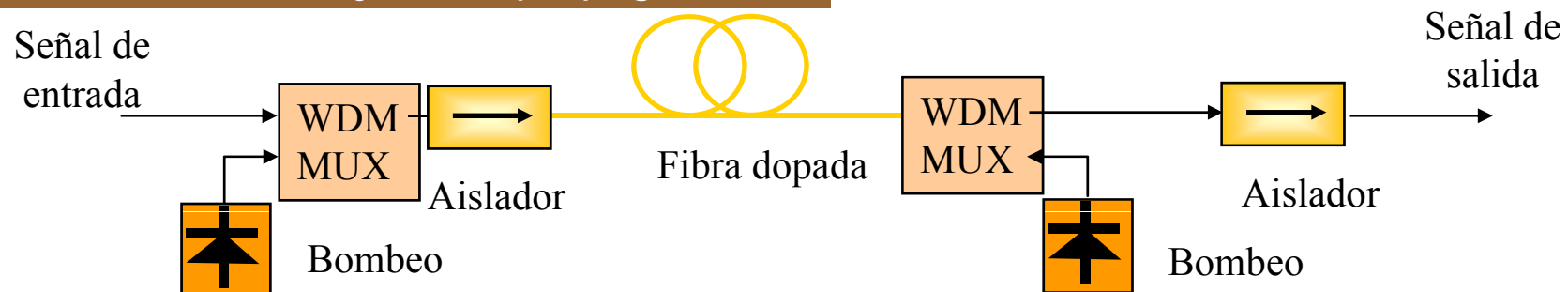
### Bombeo copropagante



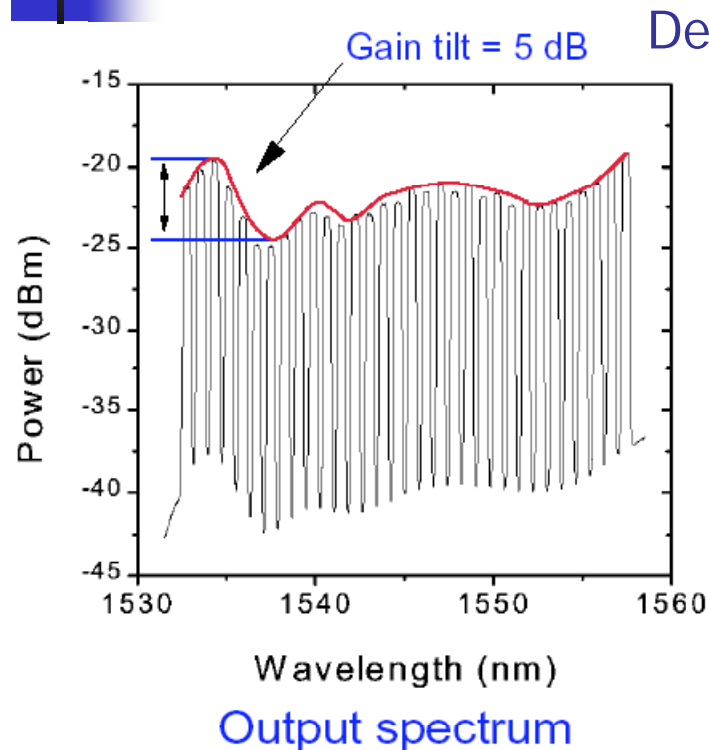
### Bombeo contrapropagante



### Bombeo doble co- y contrapropagante

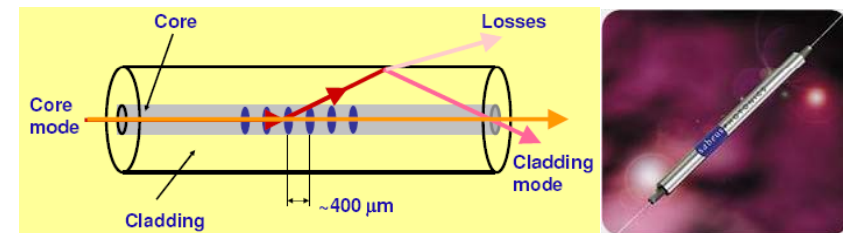






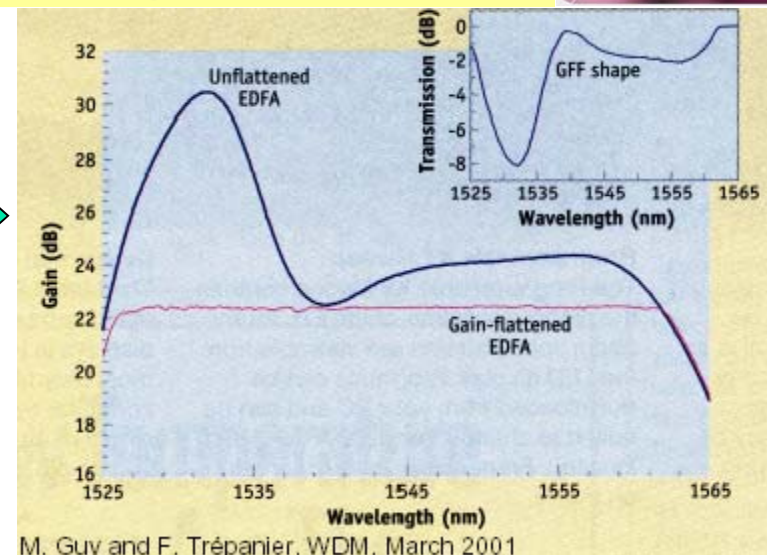
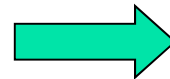
## Dependencia de la ganancia con $\lambda$

La variación de la ganancia con la longitud de onda es un problema en sist. con WDM porque cada canal tiene una potencia diferente a la salida (esto condiciona la calidad de estos sistemas)



Posibles soluciones:

- Preénfasis
- Filtros ecualizadores de la ganancia
- Dopado de la fibra amplif. con otros compuestos
- Control con la potencia, esquema y longitud de bombeo



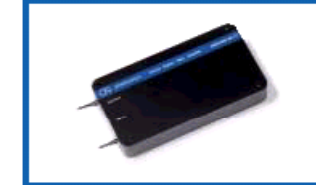
## Soluciones comerciales, hojas características



FIBERAMP-BT 1.3 is a praseodymium-doped fiber amplifier operating around 1.3  $\mu\text{m}$ .




FIBERAMP-BT single and dual pump versions are available in the bench-top format, offering respectively +17 and +20 dBm saturated output power.



FIBERAMP-SM is a compact single-pump gain module. It offers +17 dBm saturated output power



Bench-top version	BT 17	BT 20	BT F	BT 1.3
OEM module version	SM 17			
Wavelength range	1525-1560 nm	1525-1560 nm	1530-1560 nm	1270-1330 nm
Output power <sup>(1)</sup>	+17 dBm	+20 dBm	+14 dBm <sup>(2)</sup>	+17 dBm
Small signal gain <sup>(3)</sup>	25 dB	30 dB		25 dB
Fixed small signal gain <sup>(4)</sup>			22 $\pm$ 2 dB	
Noise figure	6 dB (4.5 dB typ.)	6 dB	6 dB	6 dB
Polarization sensitivity of gain <sup>(5)</sup>	0.5 dB	0.5 dB	0.5 dB	0.5 dB
Spectral gain flatness at -30 dBm <sup>(6)</sup>	3 dB typ.	2 dB typ.		2 dB typ.
Power independent spectral gain flatness <sup>(7)</sup>			2 dB (1 dB typ.)	
Input and output isolation	35 dB	35 dB	35 dB	35 dB

- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión

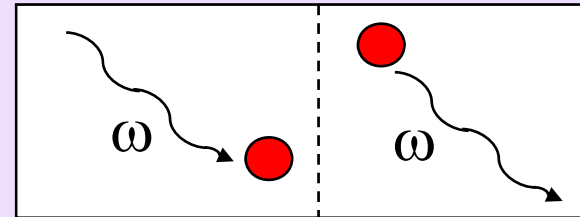


## Scattering: lineal y no lineal.

Se llama scattering a la interacción entre luz y materia que produce un trasvase de potencia desde el modo guiado a campo difundido

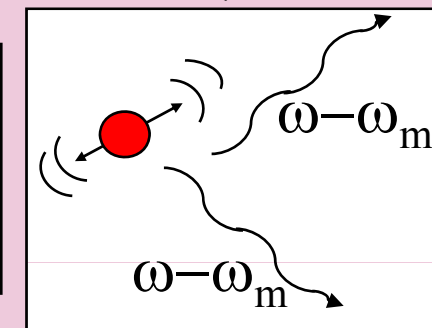
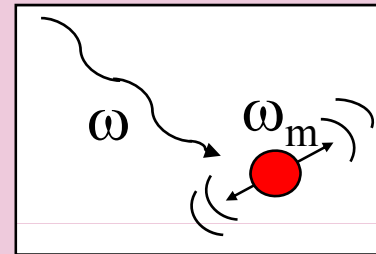
### Scattering Rayleigh: naturaleza lineal

la luz dispersada es de la misma frecuencia que la incidente



Scattering no lineal: Se produce por la interacción de la luz con  
Pérdidas no lineales fonones (vibraciones moleculares de la sílice)

la luz dispersada es de menor energía y por tanto menor frecuencia (mayor longitud de onda) que la incidente

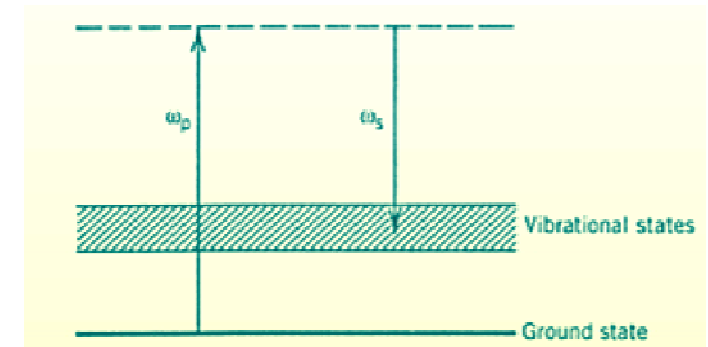
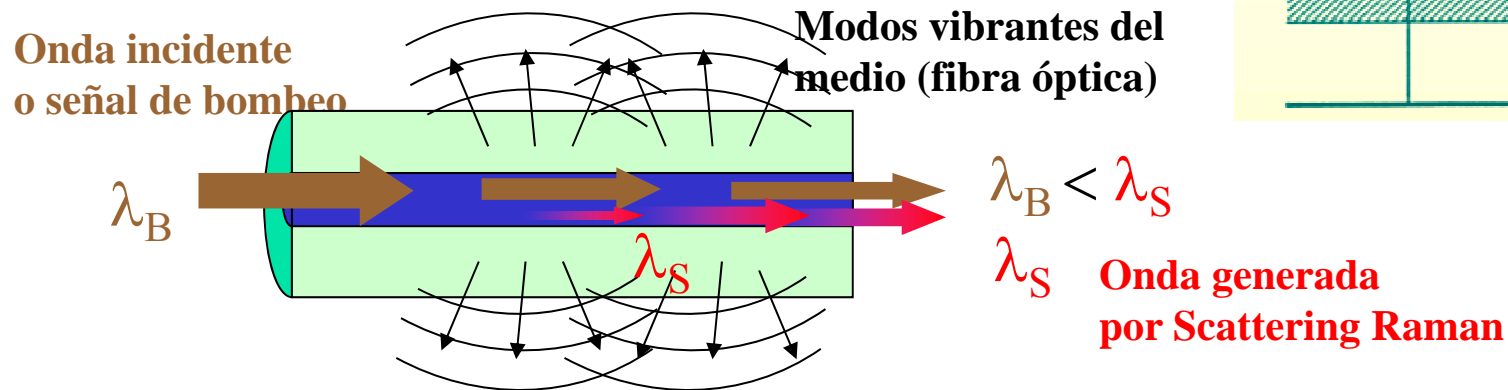


Dispersión de Raman estimulada (SRS): fonón óptico

Dispersión de Brillouin estimulada (SBS): fonón acústico

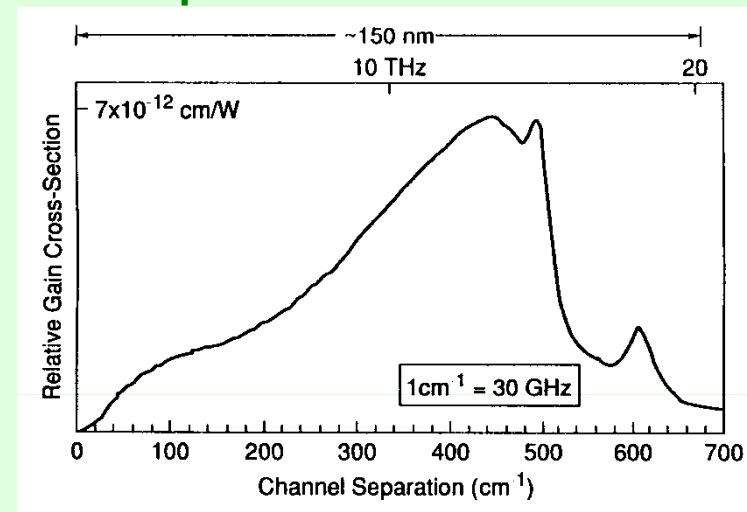
## Scattering Raman

Parte de la potencia óptica se transmite a la red de moléculas del material, esto es, a modificar el estado de vibración de dichas moléculas.



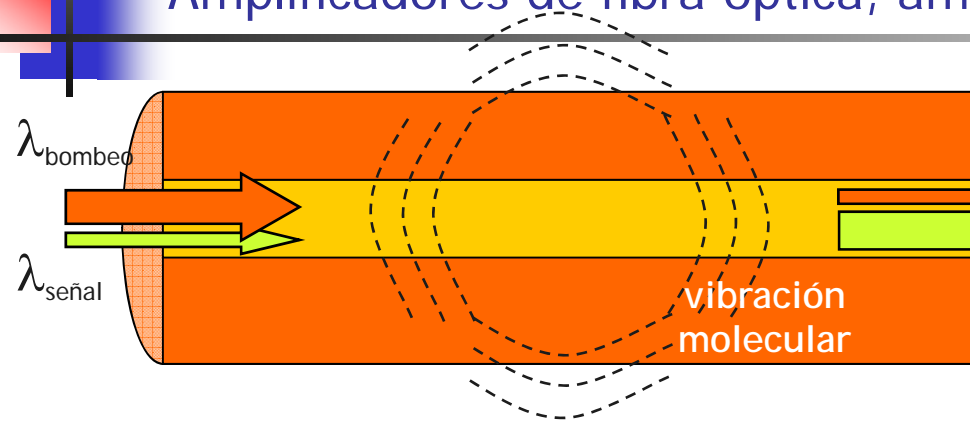
El fenómeno de SRS se traduce en la aparición de **ganancia óptica** en el medio.

- Gran ancho de banda (unos 150 nm, pero puede llegar hasta 40 THz).
- El coeficiente de ganancia crece de forma casi lineal hasta su valor máximo en 13.2 THz, para caer de forma rápida a mayores frecuencias.
- El fenómeno por lo tanto es más importante al aumentar la separación de frecuencia entre las señales implicadas.



# Ing. Telecom., CC.OO., bloque 1: tx. por fibra óptica

## Amplificadores de fibra óptica, ampl. Raman



### EFFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA

$\lambda$  de bombeo unos 13THz por debajo de la  $\lambda$  de señal a amplificar ➡  
bombeo a 1460-1480nm para amplificar 1550-1600nm

### VENTAJAS FRENTE A EDFA

- EDFAS sólo en las bandas C y L (1528-1605nm). Raman amplifica a cualquier  $\lambda$ , abriendo nuevos canales en WDM incluyendo 2ª ventana y la banda S por debajo de 1528nm.
- Se pueden utilizar distintas  $\lambda$  de bombeo con diferentes potencias para conseguir un espectro plano de ganancia
- Se pueden hacer amplificadores distribuidos en los que el medio amplificador es la propia fibra de transmisión

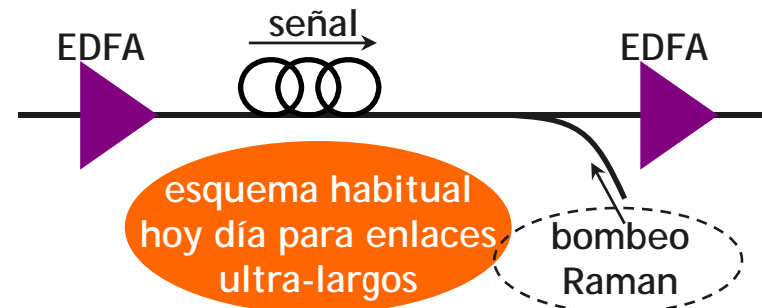
### DESVENTAJAS FRENTE A EDFA

Potencias de bombeo del orden de 1W

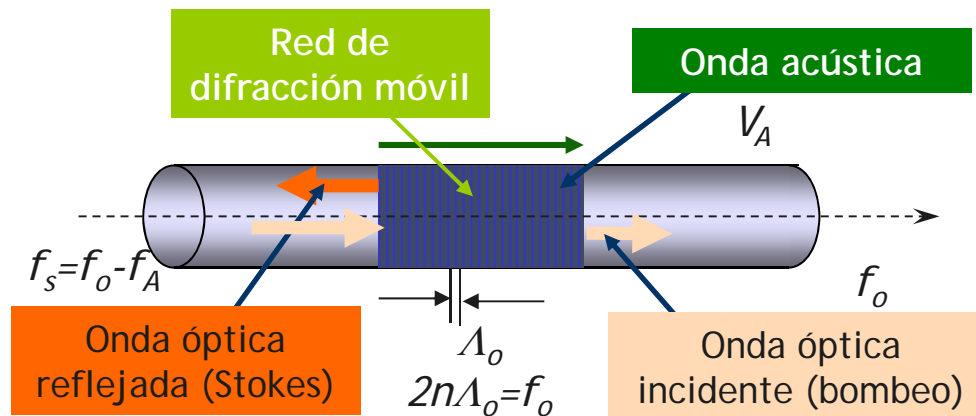
Las fluctuaciones de la potencia de bombeo son ruido para la información

Diafonía entre canales en WDM

se minimizan en esquemas contra-propagantes (el ruido predominante en Raman suele ser la emisión espontánea, que es relativamente baja)



La señal óptica intensa genera una onda acústica por electrostricción en el núcleo de la fibra. La onda acústica modula el índice de refracción del núcleo - red de difracción. La frec. Bragg sería la de la señal óptica. Pero al moverse la onda acústica con una velocidad (acústica)  $V_A$  se origina un desplazamiento Doppler  $f_A$  de la frecuencia de Bragg (a frecuencia más baja).



- El proceso sólo es eficiente generando potencia en contrapropagación
- Para la dirección de propagación se nota en forma de pérdida de potencia o atenuación

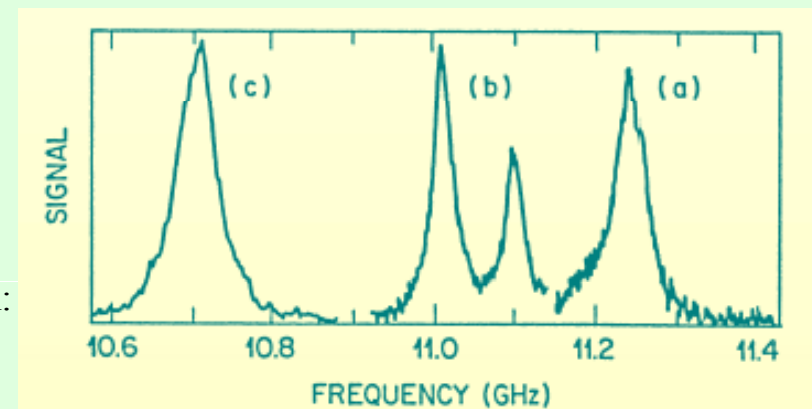
## Ganancia Brillouin

El fenómeno de SBS se traduce en la aparición de **ganancia óptica** en el medio.



- Forma lorentziana, **muy estrecho** (típicamente entre 10 y 50 MHz)
- El máximo está situado a unos 10-11.3 GHz (en torno a los 1550 nm)

Ganancia Espectral de tres fibras de  $\lambda_p = 1.55 \mu\text{m}$ :

- Fibra con núcleo de sílice.
- Fibra con revestimiento rebajado.
- Fibra con dispersión desplazada.

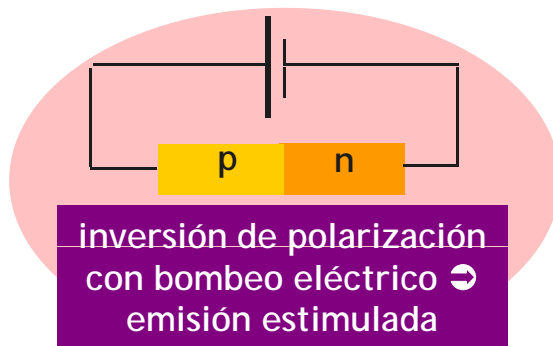
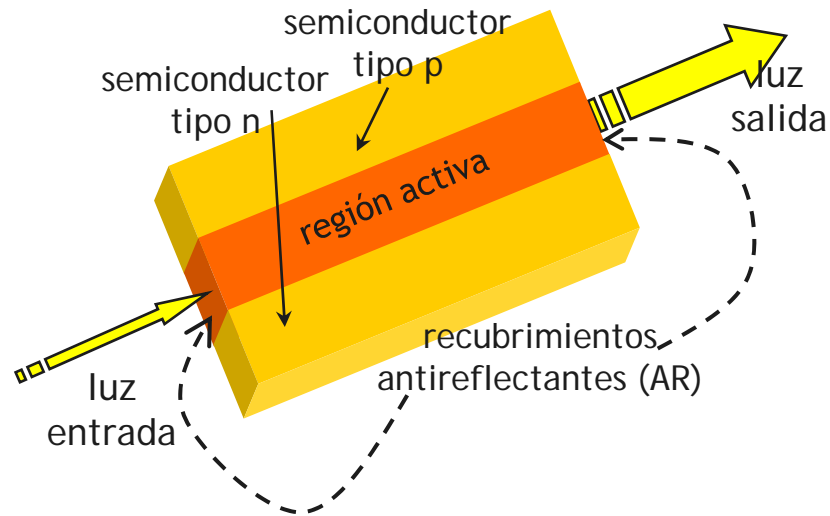




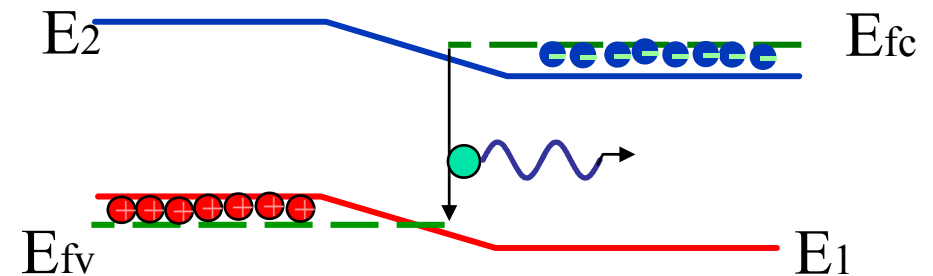
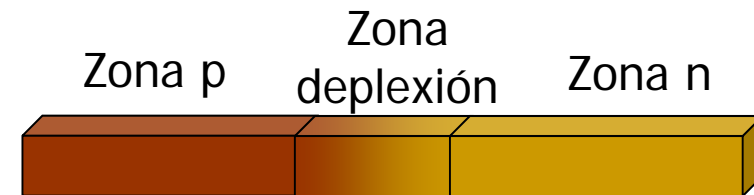
- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión
- 



## Principio de funcionamiento

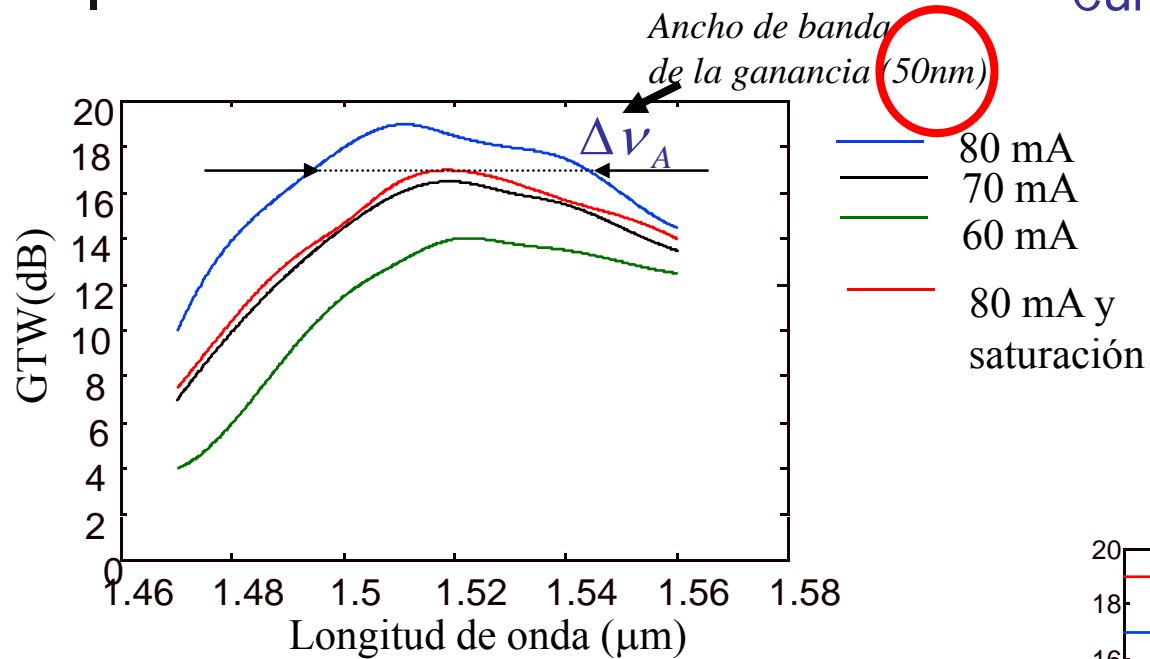


Son estructuralmente iguales que un láser de semiconductor si bien se previene la realimentación para evitar que se comporte como un oscilador.



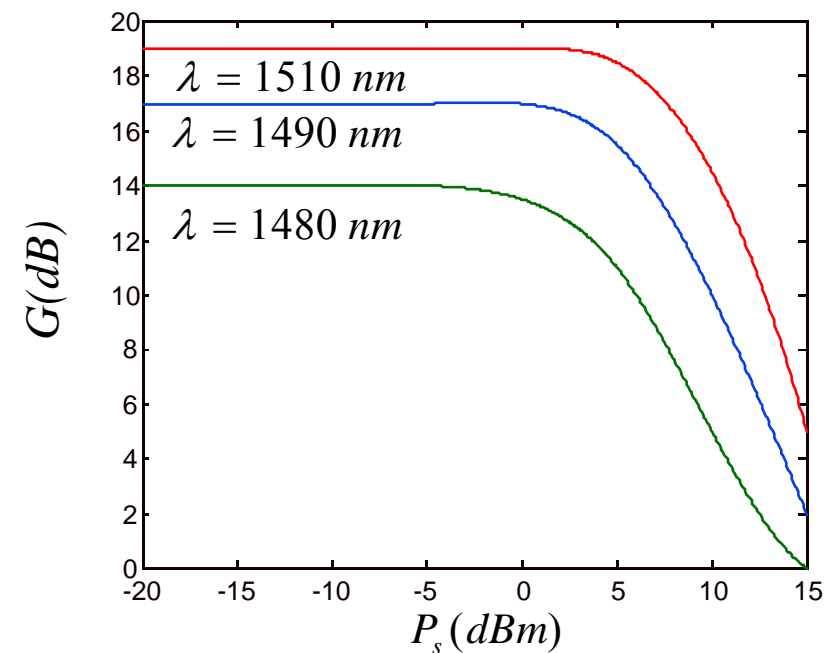
Unión P-N directo: se producen recombinaciones e-h que pueden ser radiantes

## Curva de ganancia



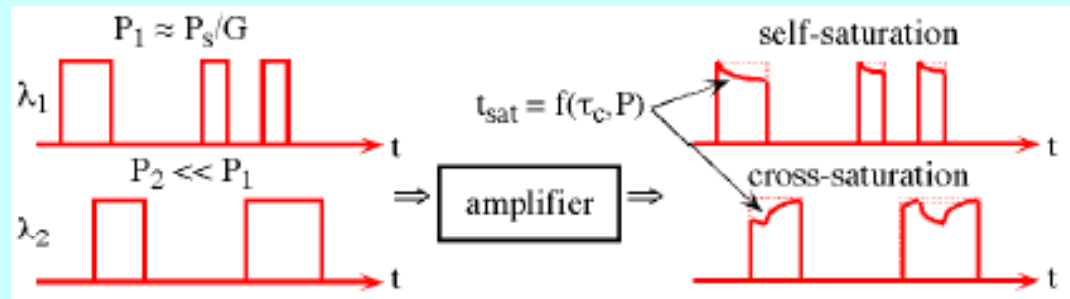
Depende de la intensidad eléctrica inyectada y de la long. de onda (alto ancho de banda, relativamente plana)

También se produce el fenómeno de saturación de ganancia



## Diafonía

Uno de los mayores inconvenientes de los SOA es la alta diafonía que introducen cuando hay varias señales a su entrada. Esta diafonía se produce porque tanto la ganancia como el índice de refracción dependen de la presencia de portadores eléctricos en la BC y este número se ve afectado por la presencia de otra señal



## Comparación con EDFA

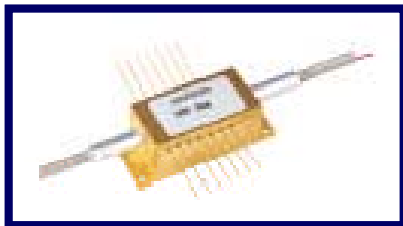
### VENTAJAS FRENTE A EDFA

- ☞ Ancho de banda de amplificación mucho mayor en SOA (unos 100nm frente a los 50nm de un EDFA)
- ☞ Integrable (interesante como preampl., amp. potencia)
- ☞ Bombeo con intensidad eléctrica

### DESVENTAJAS FRENTE A EDFA



- ☞ SOA introduce diafonía en WDM
- ☞ EDFA tiene  $G \uparrow$  y potencia de salida  $\uparrow$
- ☞ EDFA tiene pérdidas de inserción  $\downarrow$  y PDL  $\downarrow$
- ☞ SOA es más ruidoso
- ☞ SOA sensible a la polarización

## Soluciones comerciales, hojas características



### **CARACTERÍSTICAS**

- 1550 nm window
- Bit rate transparency
- Bidirectional
- High fiber-to-fiber gain (25 dB at  $P_{in} = -25$  dB)
- Low gain ripple (0.2 dB at  $G = 20$  dB)
- Low polarization sensitivity (0.5 dB)
- High saturation output power (7 dBm at 200 mA)
- Low-noise figure
- Large optical bandwidth (40 nm)
- Low switching time (1 ns)
- Compact 14-pin Butterfly package
- Peltier thermo-electric cooler
- Single-mode pigtails
- High reliability

- 
- Cómo paliar la atenuación con medios ópticos:  
amplificadores ópticos
    - Amplificadores ópticos: conceptos generales
    - Amplificadores de fibra óptica
      - Basados en dopado con tierras raras (EDFAs)
      - Basados en no linealidades
    - Amplificadores de semiconductor (SOA)
  - Cómo paliar la disp. con medios ópticos:  
compensadores de dispersión
    - Prechirp; nuevos formatos de modulación
    - Fibras compensadoras de dispersión
    - Filtros compensadores de dispersión
- 

Si se utilizan A.O., la atenuación deja de ser el factor limitante de la distancia de los enlaces, es la dispersión cromática la que entonces impone la mayor restricción en la capacidad de los enlaces

Un compensador de dispersión es un igualador de canal que trata de compensar los efectos de la dispersión cromática debidos a un tramo de fibra óptica de longitud  $L$

Función de transferencia de la fibra  
(sin pérdidas)

$$H_f(w) = \exp[-j\beta(w)L]$$

Función de transferencia del  
Compensador (ideal)

$$H_{DC}(w) = \frac{1}{H_f(w)} = e^{j\beta(w)L}$$

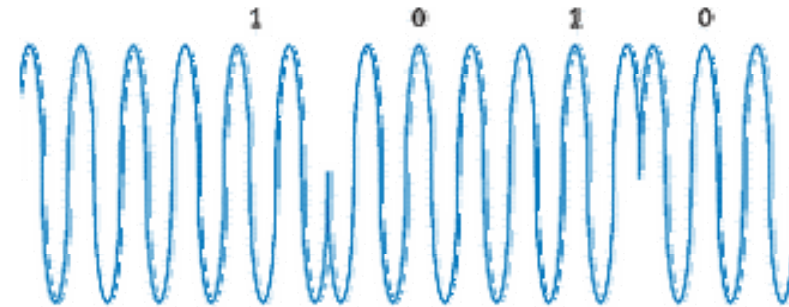
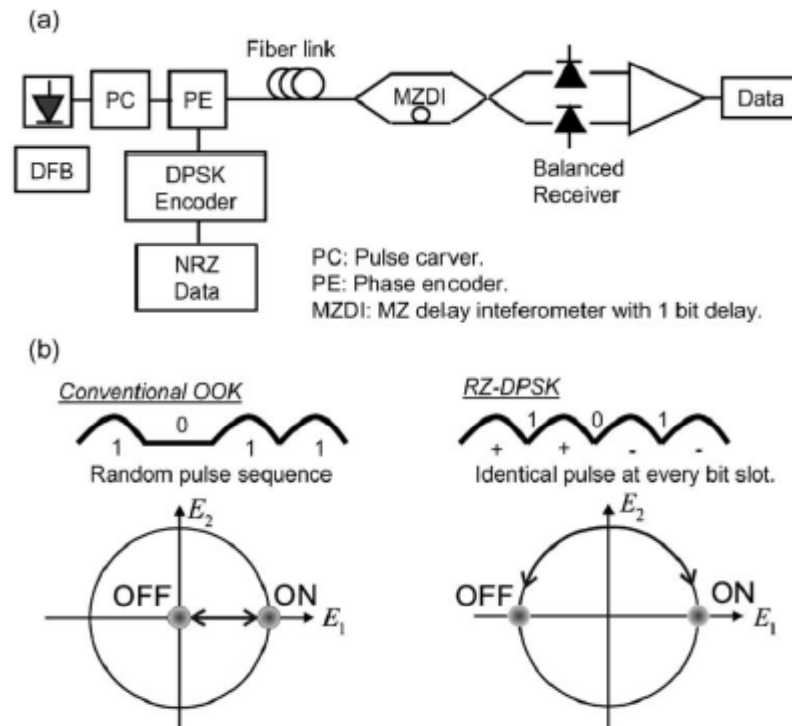
En general es muy difícil compensar completamente la dispersión cromática, por lo que el diseño se centra bien en la compensación de la dispersión de primer o de segundo orden

$$H_{DC}^1(w) = e^{j\frac{\beta_2 L w^2}{2}}$$

$$H_{DC}^2(w) = e^{j\frac{\beta_3 L w^3}{6}}$$

## DPSK

La información está contenida en la fase, más concretamente en la diferencia de fase entre dos bits consecutivos



IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 10, NO. 2, MARCH/APRIL 2004

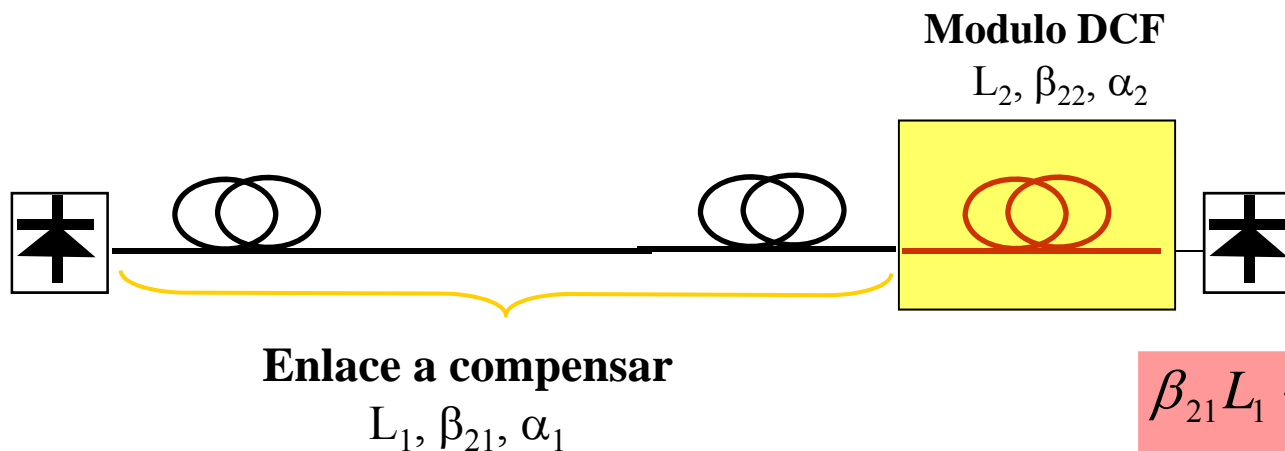
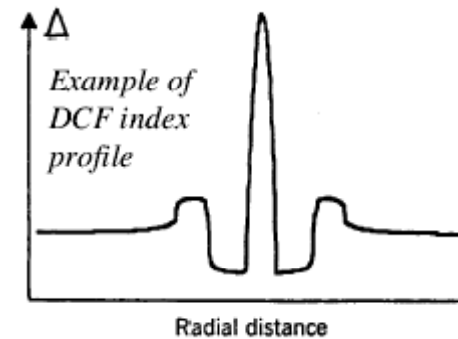
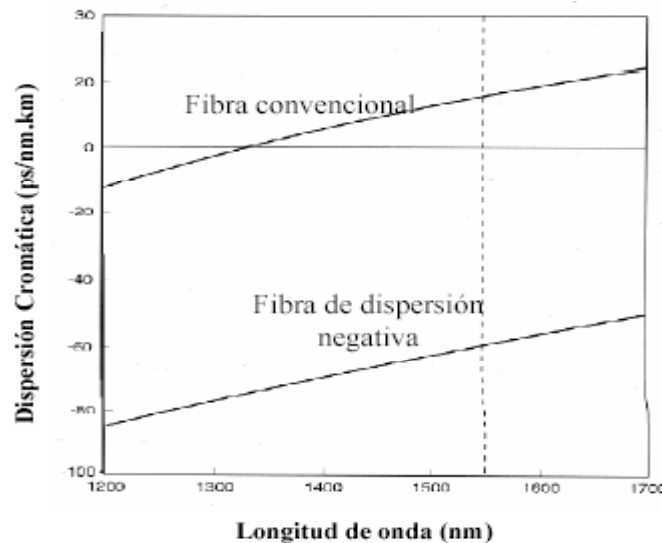
Chris Xu, Xiang Liu, *Member, IEEE*, and Xing Wei

Differential Phase-Shift Keying for High Spectral  
Efficiency Optical Transmissions

Fig. 2. (a) Schematic illustration of a binary DPSK system with MZDI. (b) Comparison of conventional OOK and DPSK (assuming the same peak power of "1s" in the two formats). For the phasor diagram, the horizontal axes are the real part of E-field, and the vertical axes are the imaginary part of E-field.

### Fibra compensadora de dispersión, DCF

Se pueden diseñar fibras con un perfil de índice tal que resulte un coeficiente de dispersión de signo contrario al de la fibra convencional y de valor alto, p.ej.  $-60 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$



$$\begin{aligned}\beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2 &= 0 \\ D_1L_1 + D_2L_2 &= 0\end{aligned}$$



El objetivo sería conseguir compensar disp. de segundo y tercer orden

$$D_{DCF} L_{DCF} = D_{G.652} L_{G.652}$$

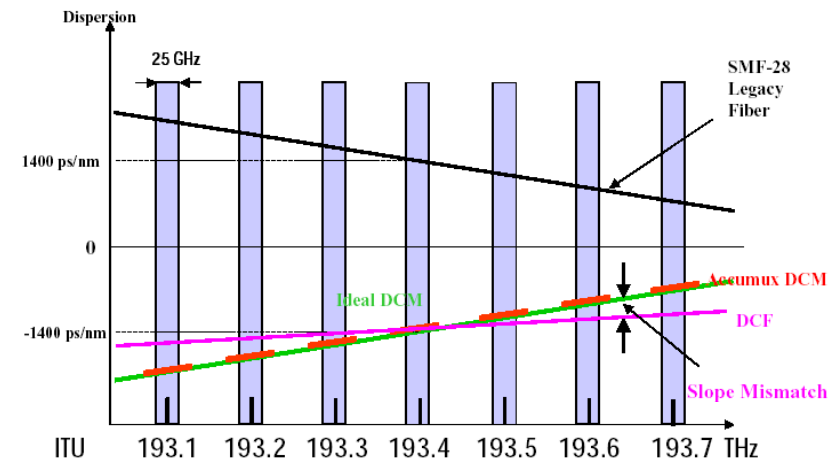
$$S_{DCF} L_{DCF} = S_{G.652} L_{G.652}$$

Valores (no está estandarizada, puede variar)

$$D_{DCF} = -100 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$$

$$S_{DCF} = -0.3 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$$

Pero no se suele conseguir completamente



Inconvenientes:

Mayor coef. de no linealidad, menor área efectiva (típ. 20  $\mu\text{m}^2$ )

Mayores pérdidas (0.5 dB/km)

Pérdidas en empalmes con fibra normal

Ventajas:

Único dispositivo para varios canales WDM (cuidado con S)

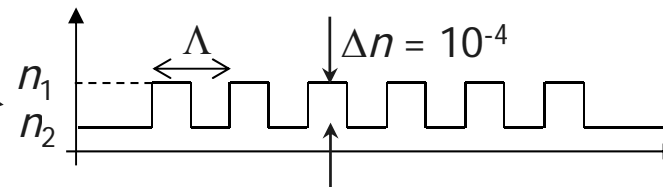
Puede emplearse para tx.

Sencillo

La técnica más utilizada junto a la DCF es el empleo de filtros ópticos de tipo pasa-todo con fase cuadrática (idealmente), es decir, no cambian el módulo del espectro, sólo introducen un retardo lineal con pendiente de signo opuesto a la de la fibra. El más popular es una **red de difracción impresa en fibra con chirp lineal, CFBG (chirped fiber Bragg grating)**

**Redes de difracción Bragg en fibra óptica (FBG):** Variación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica

Perfil del índice de refracción de la fibra



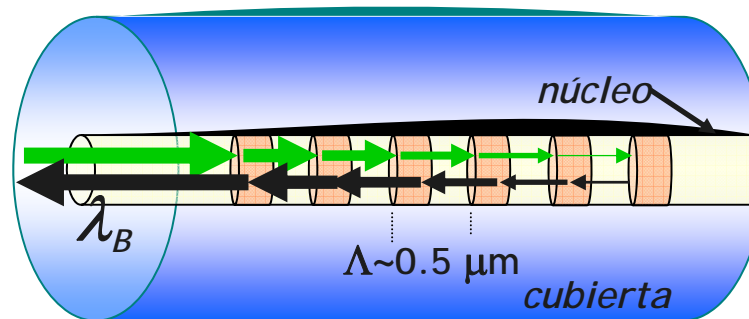
Puede ser cuadrada, o más frecuentemente sinusoidal

De periodo corto: los modos que intercambian potencia son el modo fundamental progresivo y el modo fundamental regresivo,  $\beta_0 = -\beta_1 = 2 \cdot \pi / \lambda \cdot n_{\text{eff}}$

## Condición de Bragg

$$\lambda = \lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

Sólo se refleja esta longitud de onda (y un cierto rango en torno a ella)

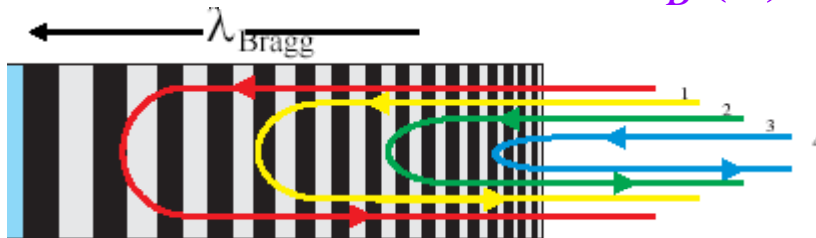


### Características

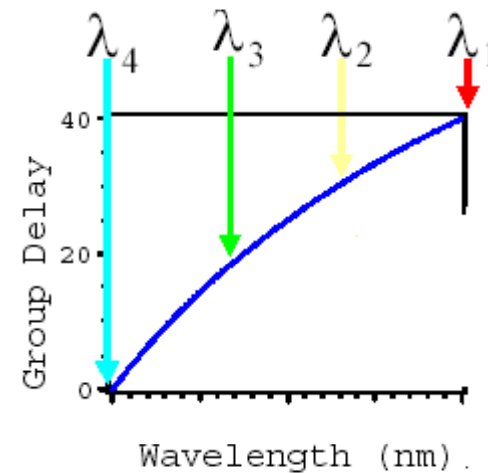
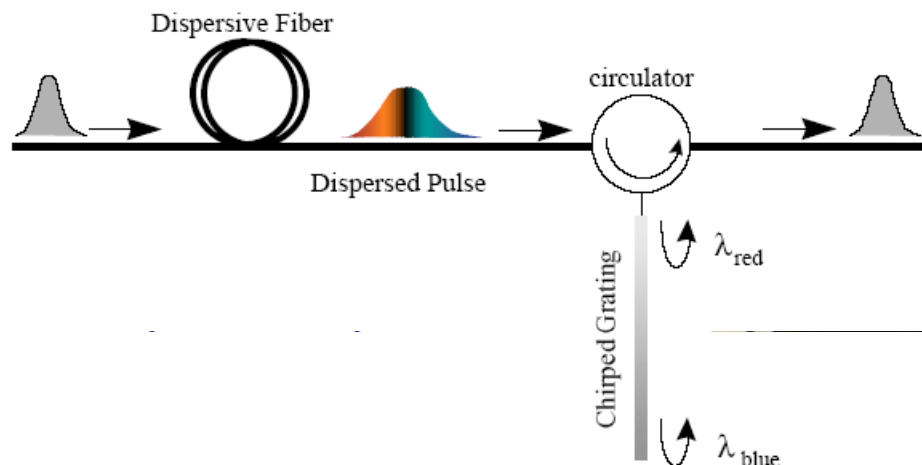
- ▣ Bajas pérdidas
- ▣ Fácil acoplo con otros dispositivos de fibra
- ▣ Baja PDL
- ▣ Baja dependencia con  $T^a$
- ▣ Fácil empaquetamiento
- ▣ Bajo coste

Redes de difracción con *chirp*: el periodo de la perturbación (la condición Bragg) cambia con la posición

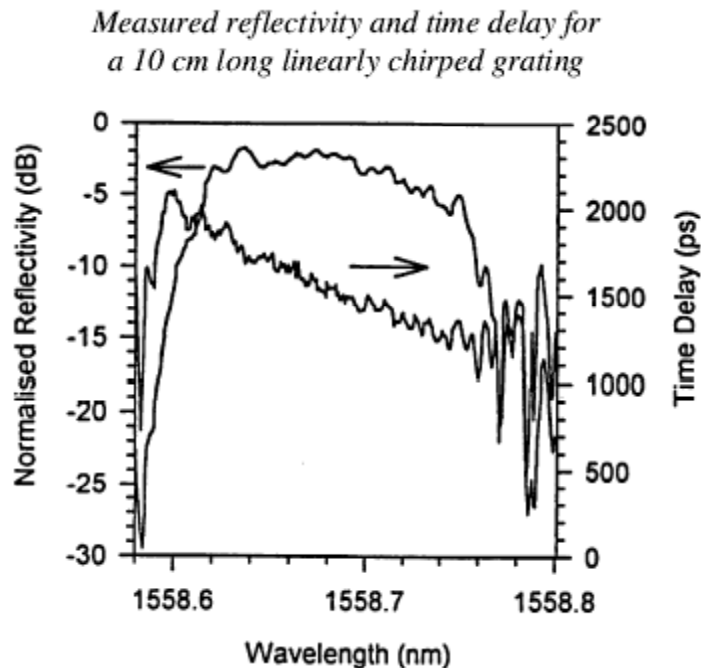
$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}\Lambda(z)$$



Diferentes longitudes de onda tienen que recorrer diferentes distancias dentro del dispositivo antes de ser reflejadas, por tanto, tardan diferentes tiempos en salir de la CFBG



Chirp lineal:  
retardo lineal con  
 $\lambda$  : compensador  
de dispersión  
cromática



- Dispersion: 5000 ps/nm
- Optical bandwidth: 0.12 nm
  - sufficient for 10 Gbit/s

#### Inconvenientes:

Ancho de banda limitado, sólo sirven para un canal

Funcionan en reflexión, necesitan circuladores

#### Ventajas:

Poca longitud (típ. cm), , poco voluminosos, no introducen tanta atenuación

No se producen no-linealidades