



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es



“Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos”

Módulo 4. Componentes Ópticos Pasivos y Activos

Autores: Carmen Vázquez García

Revisado: David Sánchez Montero

Colaboradores: Pedro Contreras/ Plinio Jesús Pinzón

Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF)

Dpto. de Tecnología Electrónica

Universidad CARLOS III de Madrid





- **M4. Componentes ópticos**
 - Emisores y detectores (M1 y M3)
 - Moduladores
 - Acopladores
 - Filtros, mux/demux e interleavers
 - OADMs
 - Amplificadores
 - Conmutadores
 - Otros

Conceptos básicos: ancho de banda de modulación en Comunicaciones Ópticas

Ancho de banda eléctrico. Cuando se considera el conversor O/E (Óptico / Eléctrico) necesario.

Definición: “*f* a la cual la relación de potencia de la señal eléctrica P_e/P_s se reduce 3dB”: P_e =potencia señal de entrada ; P_s =potencia señal de salida

$$RE_{dB} = 10 \log_{10} \left[\text{Potencia eléctrica salida (detector)} / \text{Potencia eléctrica entrada (fuente)} \right] =$$

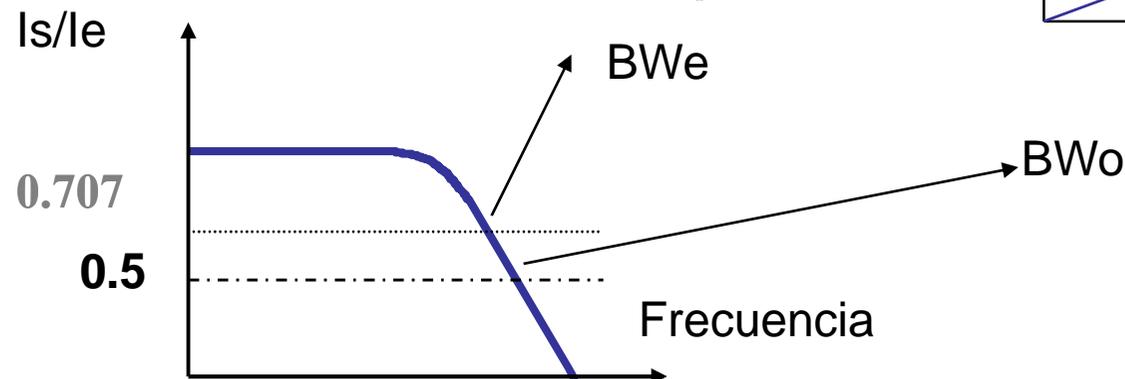
$$= 10 \log_{10} \left(I_s^2 \cdot R_s / I_e^2 \cdot R_e \right) = \alpha \cdot 10 \log_{10} \left(I_s^2 / I_e^2 \right)$$

Ancho de banda eléctrico

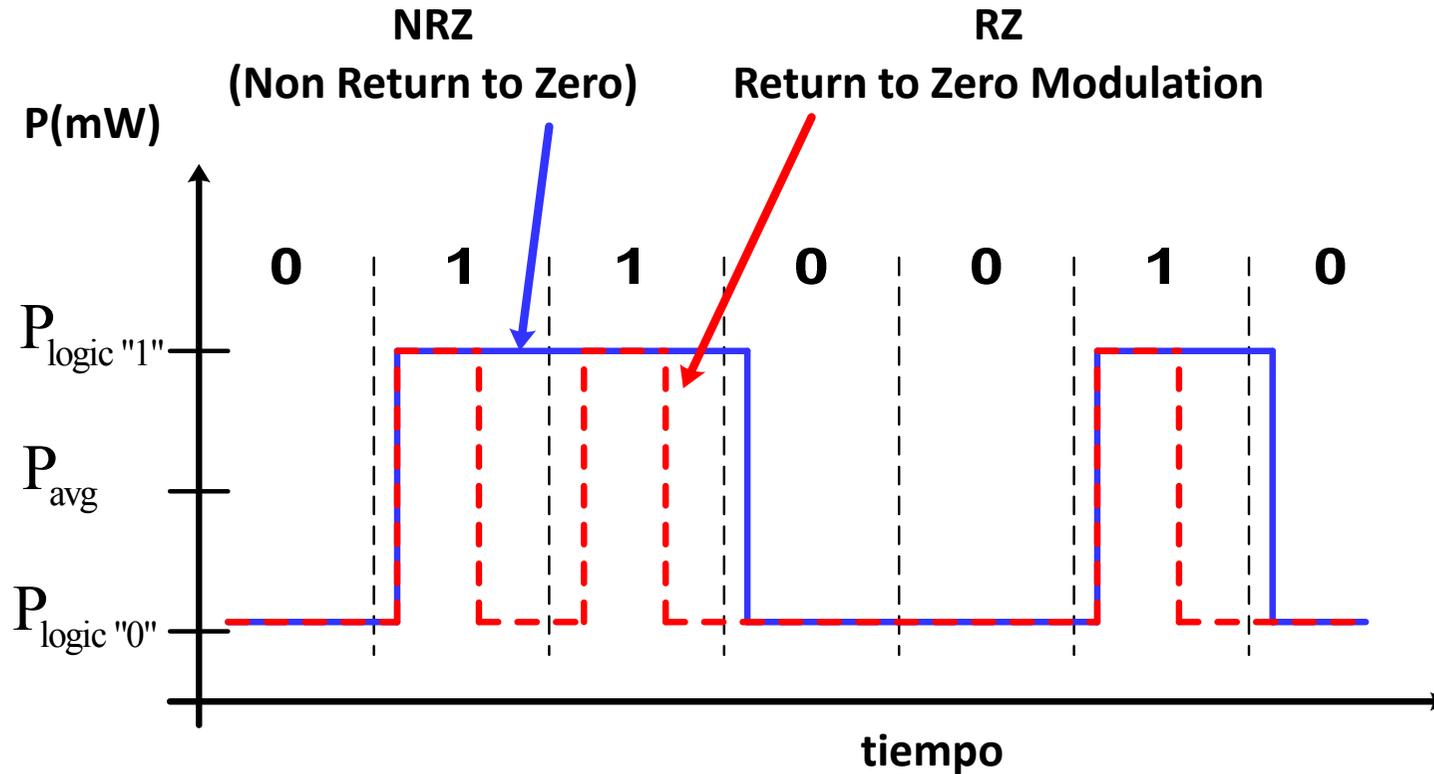
$$BW_e \Rightarrow \left[I_s^2 / I_e^2 \right] = 0.5 \Rightarrow I_s / I_e = 0.707$$

Ancho de banda óptico

$$BW_o \Rightarrow \left[I_s / I_e \right] = 0.5 ; P_{\text{óptica}} = S \cdot I$$



Modulación: codificar la información en pulsos de luz

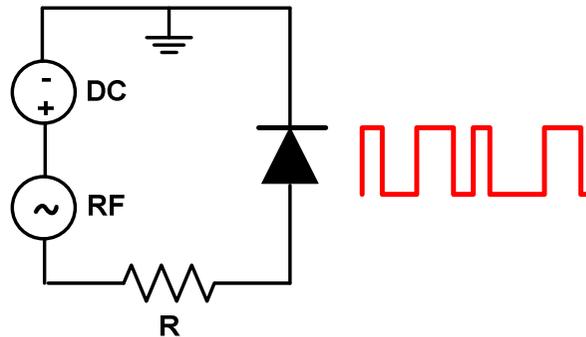


$$E = \frac{P_{\text{logic "1"}}}{P_{\text{logic "0"}}}, \quad E(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{logic "1"}}}{P_{\text{logic "0}}} \square 10\text{dB}$$

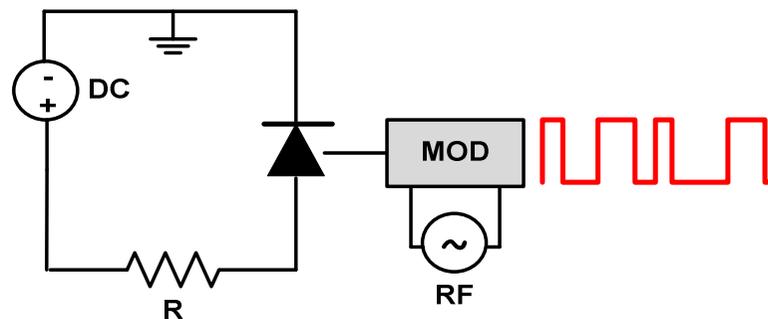
$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{2} (P_{\text{logic "1"}} + P_{\text{logic "0"}})$$

Tipos de modulación: directa e indirecta

Directa: corriente modulación láser de 1.5Mbps a 2.5Gbps



Indirecta: modulador externo, 10-40Gbps y mayores

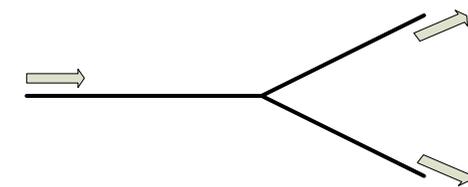


Tipos de moduladores ópticos: Mach-Zehnder, electro-absorción, acusto-óptico, etc.

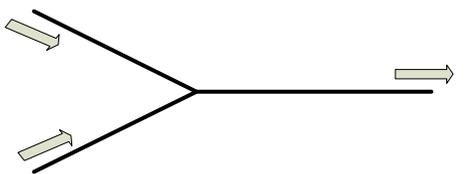
Dispositivos pasivos asociados

División de la potencia óptica. Distribución espacial:

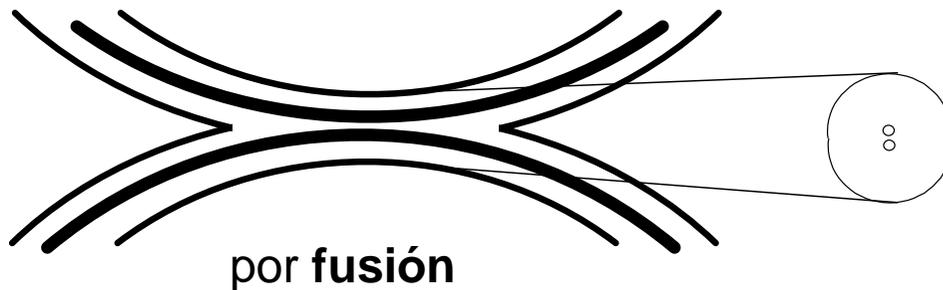
- Acopladores 2x2
- Divisores en Y
- Acopladores en estrella
(passive star coupler)



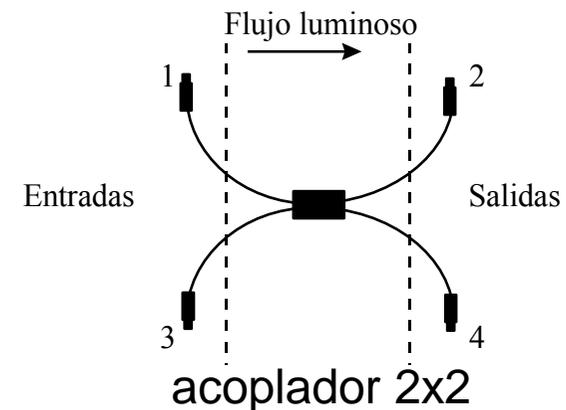
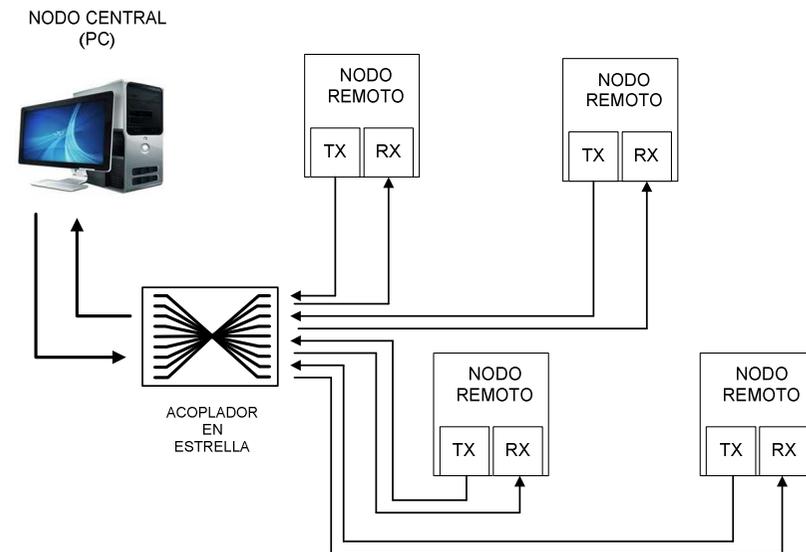
Divisor de potencia



Combinador de señal



por fusión



Divisores de haz: objetivo



La información que entra por el puerto 1 se reparte entre todos los puertos de salida, normalmente de forma homogénea

Potencia de salida = Potencia de entrada/N – pérdidas en exceso

- IDEAL → Sin pérdidas en exceso

División del haz

Divisores (*Tree Couplers*)



Acopladores (*Star Couplers*)

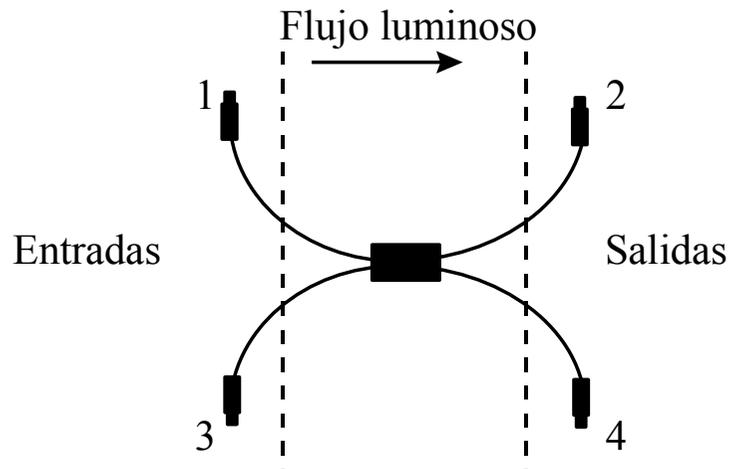


Normalmente son 2x2

Aplicaciones:

- Distribución de señales (problema: no está controlada, *broadcast*)
- Posibilidad de realizar transmisión dúplex por una única fibra óptica
- Obtención de referencias:
 - Emisión de fuentes
 - Sensores
- Parte muy importante para realizar dispositivos más complejos

Parámetros:



- Pérdidas en exceso, $L_{\text{exc-i}}$
- Pérdidas de inserción, L_{ij}
- Coeficiente de acoplo, K_j
- Directividad, D_i

$i=1,\dots,N$ entradas

$j=1,\dots,M$ salidas

$$L_{\text{exc-i}} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_i}{\sum P_j} \right)$$

$$K_r = \frac{P_r}{\sum P_j}$$

$r =$ puerto de salida
considerado

$$L_{ij} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_j} \right)$$

$$D_i = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_k} \right)$$

$P_k =$ potencia que
sale por la entrada k



Características componentes comerciales (Catálogos)

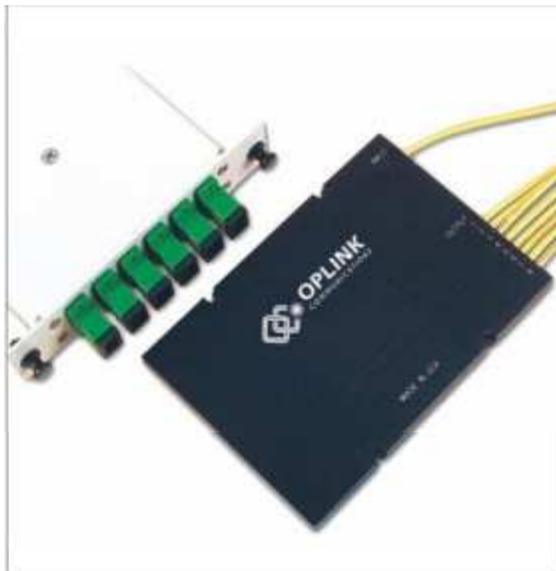
| Fabricante | Lexc(dB) | K | Conectores | λ (nm) | Dimensiones (mm) |
|-----------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|---|
| SIFAM 1x2, 2x2 | 3.6 – 3.8 | 5, 10, 20, 30, 40, 50 | | 1300/1550 | |
| E-TEK 1x2, 2x2(*) | 3.4 – 4.3 | 50/50, 40/60, 30, 20, 10, 5,1 | FC/PC, ST, FC/APC, SC | 1550, 1310, 1480, 980, 830, 633 | 3(\emptyset)x40(L) 85(L)x17.5(W) |
| JDS | 7.5 - 15 | 1xN, 2xN, N=4,8,16 (2) | | 1310/1550 \pm 25nm | 6x60 a 9x100 |

(*) 1x3, 3x3, 2x4, 4x4, 40nm, fusionados. SM, MM

(2) Tecnología de integración PLC (Planar Lightwave Circuit)

Otros parámetros: directividad, PDL (Polarization Dependent Loss), especificaciones ambientales,...

Ejemplo: acopladores NxM



Performance Specifications (Based on equal splitting) Fuente: www.oplink.com

| SWTC Series (NxM) | Nx4 | Nx5 | Nx6 | Nx8 | Nx16 | Nx32 | Nx40 |
|--|---|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Standard Configurations | N=1,2,4 | N=1 | N=1,2 | N=1,2,8 | N=1,2,16 | N=1,2 | N=1,2 |
| Grade | A/B | A/B | A/B | A/B | A/B | A/B | A/B |
| Operating Wavelength | 1310 \pm 40 or 1550 \pm 40 | | | | | | |
| Operating Temperature ($^{\circ}$ C) | -40 to +70 | | | | | | |
| Storage Temperature ($^{\circ}$ C) | -40 to +85 | | | | | | |
| Maximum Insertion Loss (dB) | 6.7/7.4 | 8.3/8.7 | 9.2/9.6 | 10.2/11.2 | 13.5/14.5 | 17.5/18.5 | 18.8/20.0 |
| Max Uniformity (dB) | 0.8/1.0 | 1.0/1.2 | 1.2/1.4 | 1.2/1.8 | 1.5/2.0 | 2.5/3.0 | 2.8/3.5 |
| Polarization Sensitivity (dB) | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.8 |
| Temperature Sensitivity (dB/ $^{\circ}$ C) | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.006 | 0.007 |
| Directivity (dB) | ≥ 55 | | | | | | |
| Package Dimension (mm) | P1 | P1 | P2 | P2 | P3* | P4 | P4 |
| | P1: (L)100x(W)80x(H)7 P2:(L)130x(W)90x(H)9 P3:(L)160x(W)110x(H)11 P4: (L)120x(W)120x(H)20 | | | | | | |
| | * except for 16x16 which uses P4 package | | | | | | |

Matriz de pérdidas

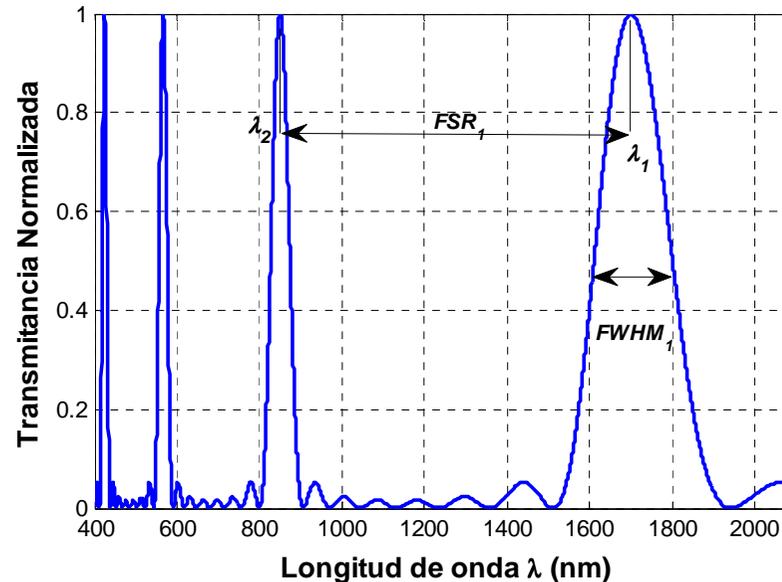


4x4

| Output (j) | Input (i) | | | | | | | |
|------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 50.4 | 48.8 | 47.2 | 49.7 | 6.8 | 6.9 | 6.7 | 6.7 |
| 2 | 47.6 | 50.1 | 47.4 | 49.7 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 6.6 |
| 3 | 49.8 | 47.6 | 48.2 | 46.9 | 6.6 | 6.8 | 6.8 | 6.7 |
| 4 | 50.5 | 48.2 | 48.9 | 46.2 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.7 |
| 5 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.7 | 49.9 | 47.3 | 48.9 | 46.6 |
| 6 | 6.7 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 47.8 | 48.9 | 49.7 | 48.3 |
| 7 | 6.7 | 6.9 | 6.8 | 6.7 | 48.3 | 46.5 | 48.2 | 48.5 |
| 8 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 6.8 | 47.3 | 46.7 | 49.1 | 47.9 |

- Selección de una determinada anchura espectral
- Si son periódicos, los canales deben ubicarse dentro del FSR (Rango Espectral Libre) del filtro

Espectral Libre) del filtro



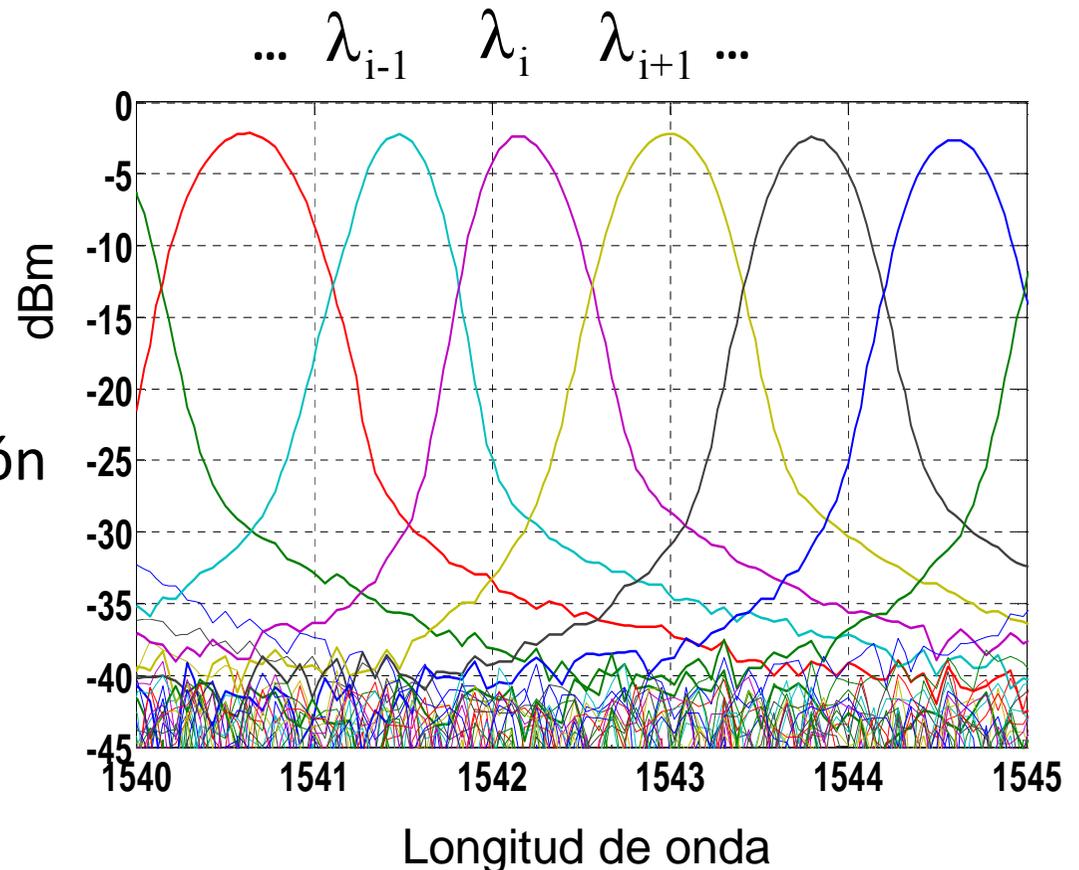
- Pueden ser sintonizables
- Elementos base para dispositivos más complejos como MUX/DEMUX
- Diferentes tecnologías

Banda de paso:

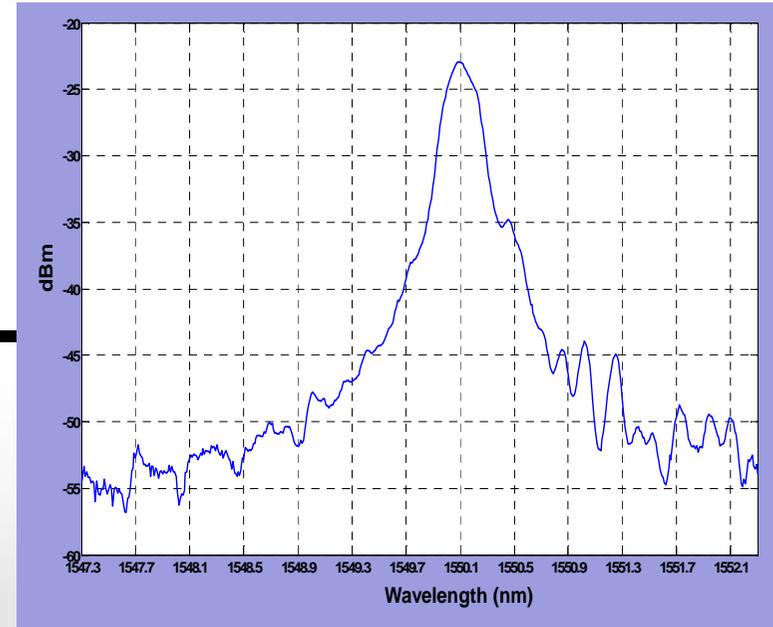
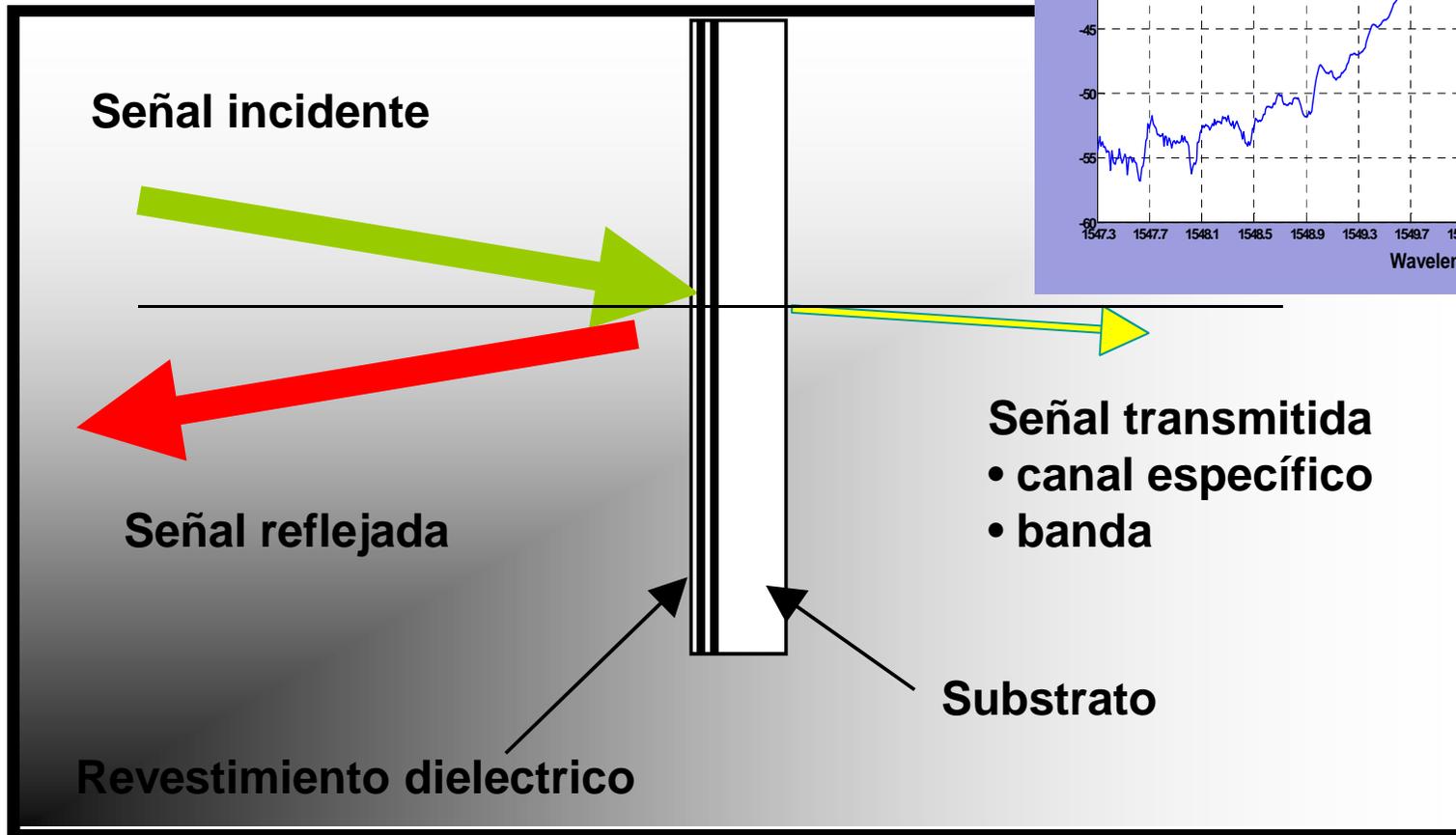
- Pérdidas de inserción
- Rizado
- Longitud de onda (central, cortes)
- Ancho de banda (0.5dB, 3dB,...)
- Dependencia con polarización
- Crosstalk

Banda eliminada:

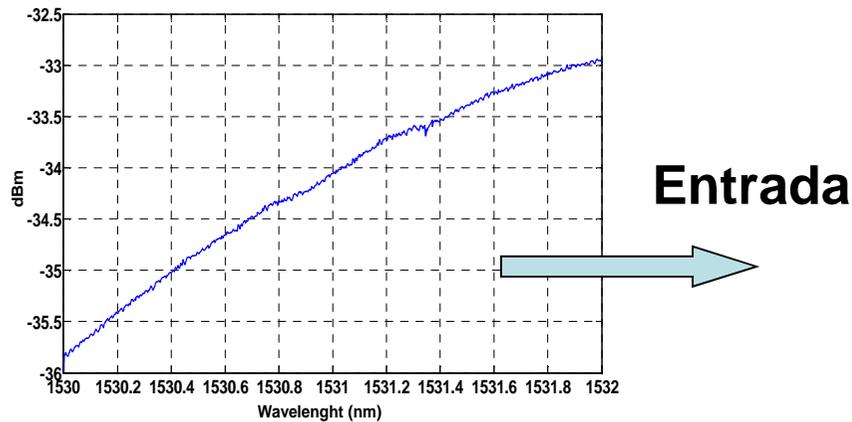
- Relación de rechazo



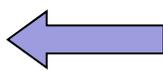
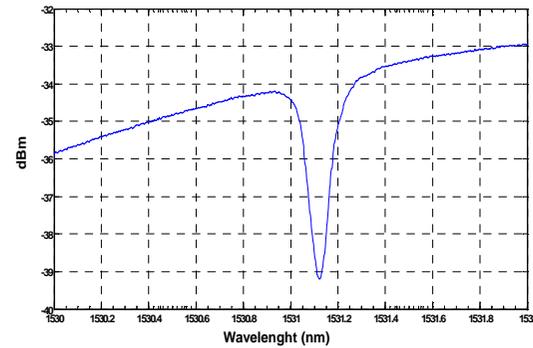
Thin-Film Filters (TFF)



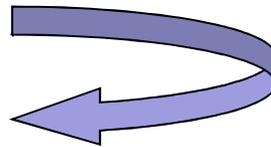
Fiber Bragg Grating (FBG)



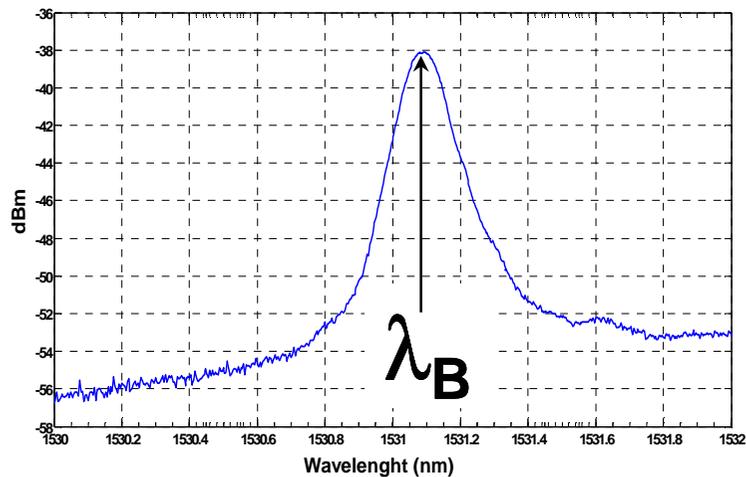
Salida



λ_{Bragg}



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



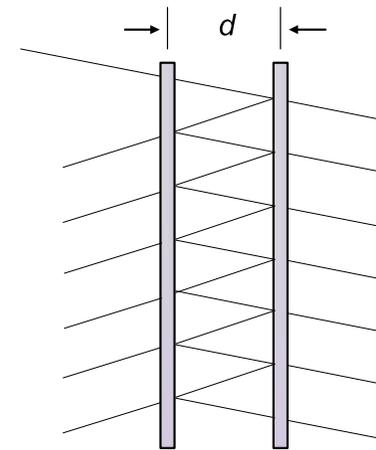
λ_B : longitud de onda de Bragg

Λ : período de la red

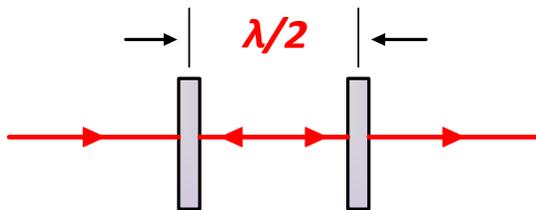
n_{eff} : índice de refracción efectivo

Filtros Fabry-Perot (FP)

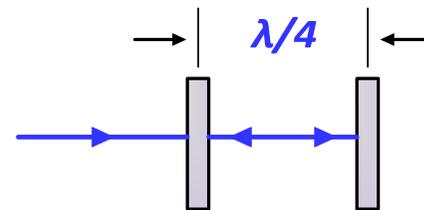
Cavidad resonante con múltiples reflexiones/transmisiones



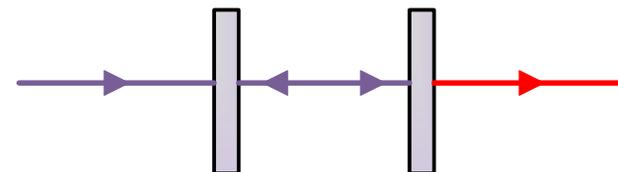
Si $d = \lambda/2$ las reflexiones y transmisiones interfieren constructivamente



Si $d = \lambda/4$ las reflexiones y transmisiones interfieren destructivamente

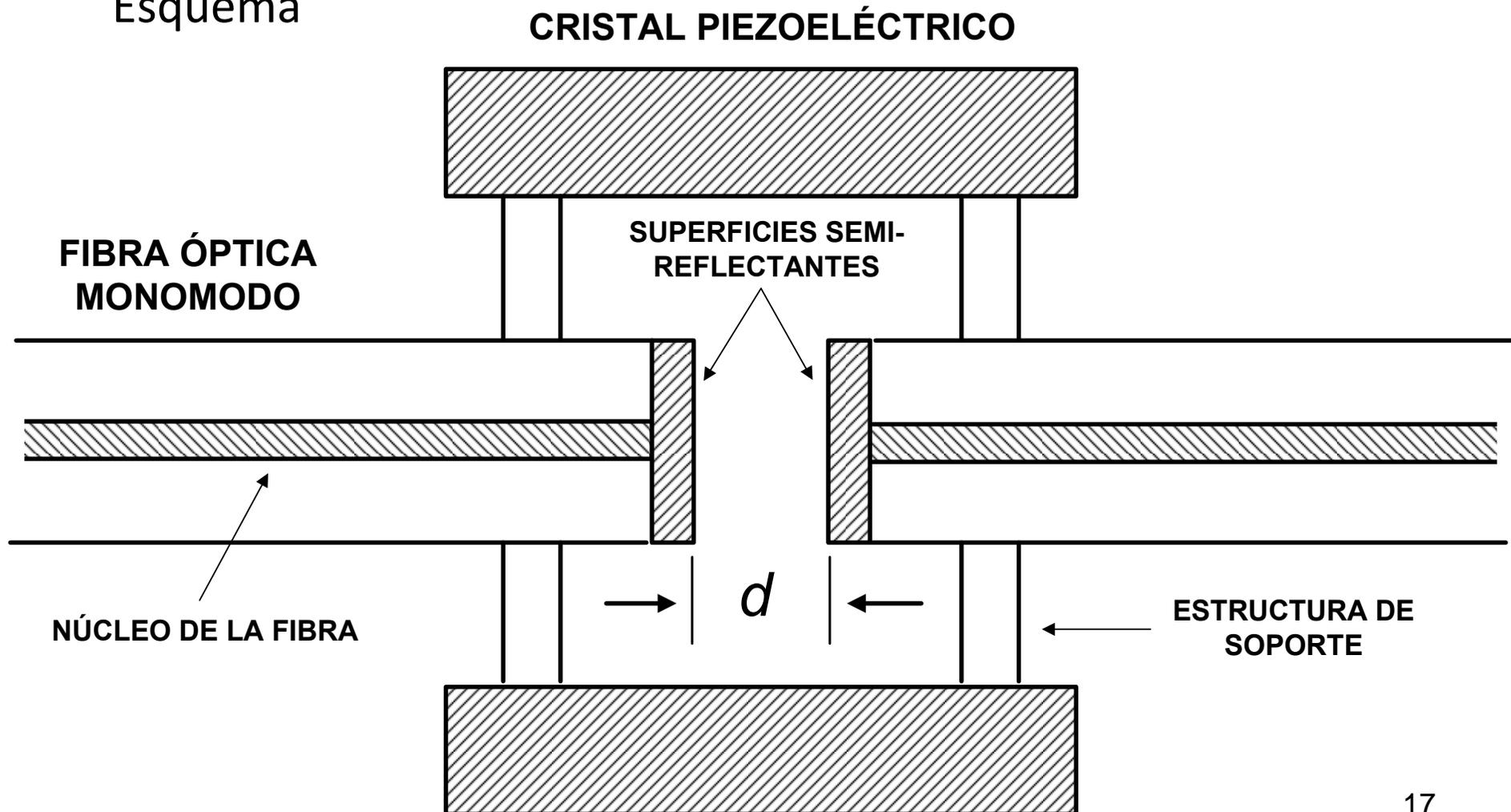


Lo que se corresponde con un filtro



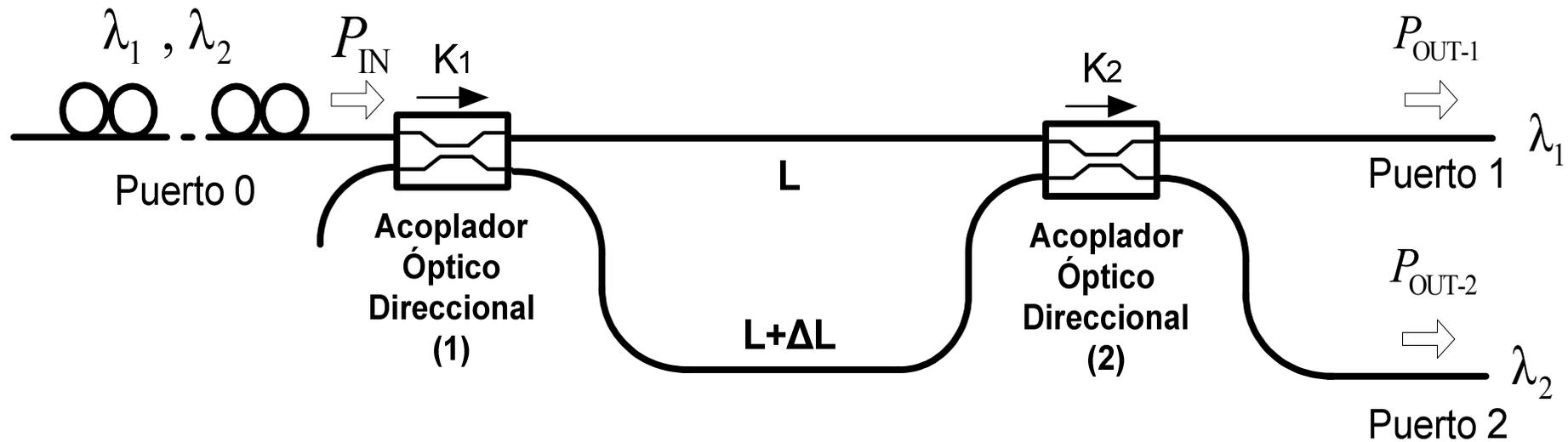
Filtros Fabry-Perot sintonizable

Esquema

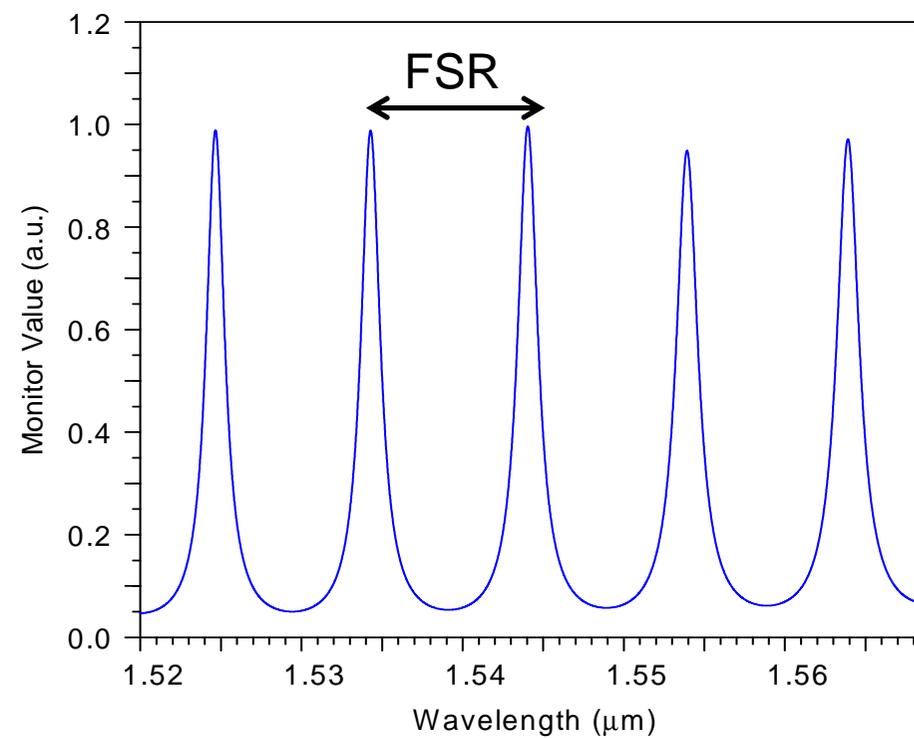
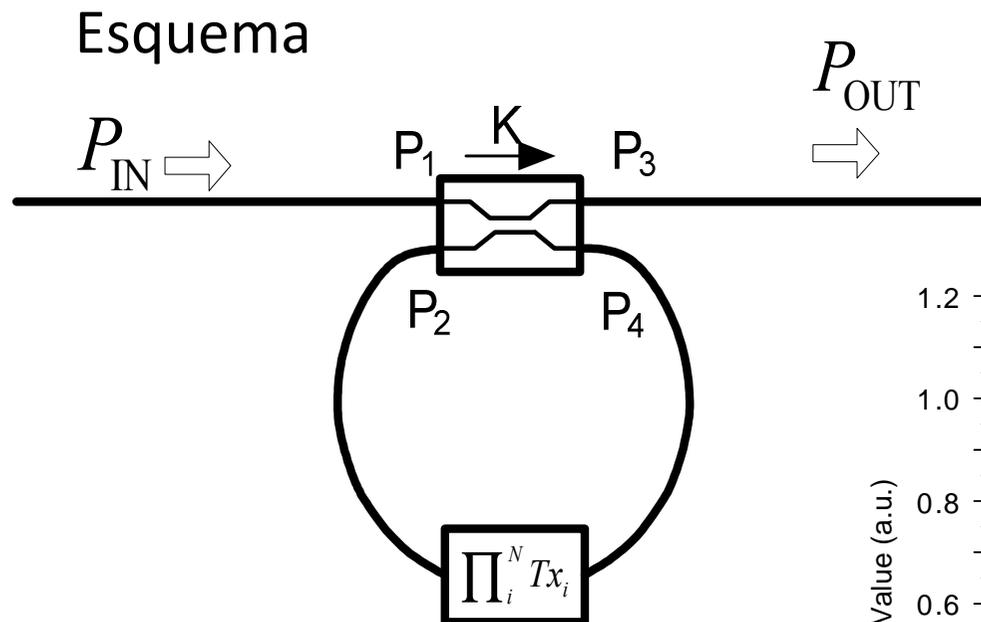


Filtros Mach-Zehnder (MZI)

Esquema basado en interferómetros Mach-Zehnder (MZI)



Resonador en anillo



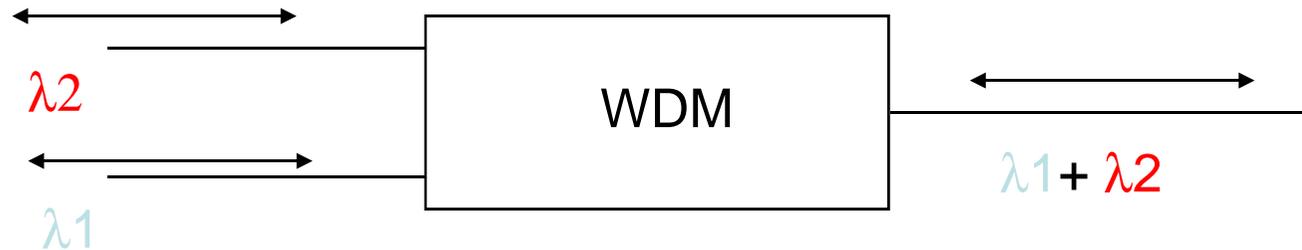


Comparativa de filtros ópticos

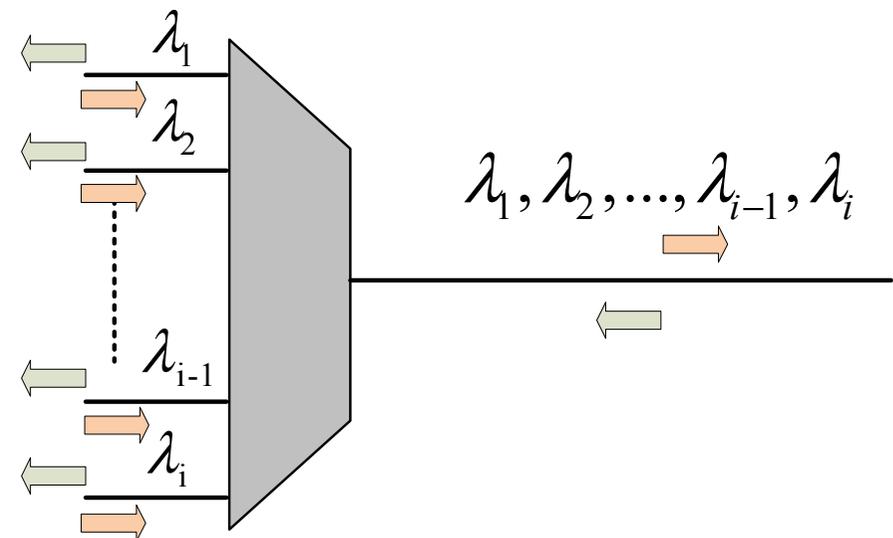
| Tipo | Pérdidas de inserción | Espaciado entre canales / aislamiento | BW (3dB) | Rango de ajuste | Velocidad de ajuste | Mecanismo de ajuste |
|--------------------------|---|---------------------------------------|----------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| FFP (Fabry-Perot) | 2 dB | 2nm / 30dB | < 0.5nm | ~ 10nm | ms | PZT |
| FP cristal líquido | 3 dB | 2nm / 30dB | < 0.5nm | ~ 50nm | μs | Orientación cristal |
| FP + micromáquina | 1 dB | 2nm / 30dB | < 0.5nm | ~ 60nm | 100μs | Micromáquina |
| MZI en cascada | LiNbO ₃ : 19dB Silica: 1 dB | 0.4nm / 22dB " | < 0.2nm | ~ 4nm | 50ns | Electro-óptico |
| FBG | 0.1 dB | 1.6nm / 22dB | < 0.2nm | < 10nm | 2ms | Temperatura, elongación |
| AOTF | 4 dB | 4nm / 30dB | ~ 1.5nm | > 60nm | μs | Acusto-óptico |
| EOTF | 4 dB | 2nm / 25dB | ~ 1.5nm | ~ 50nm | ns | Electro-óptico |
| AWG config. sintonizable | 8dB | 0.8nm / 30dB | < 0.2nm | ~ 40nm | 10ms | Termo-óptico |
| Filtro activo | Con ganancia | < 0.1nm / 30dB | < 0.1nm | < 5nm | ns | Inyección de corriente |
| Resonador anillo | 3 dB | 2nm / 30dB | ~ 0.2nm | 25nm | ms | Temperatura |

(1) Acousto-Optic Tunable Filter (2) Electro-Optic Tunable Filter

Multiplexores, demultiplexores

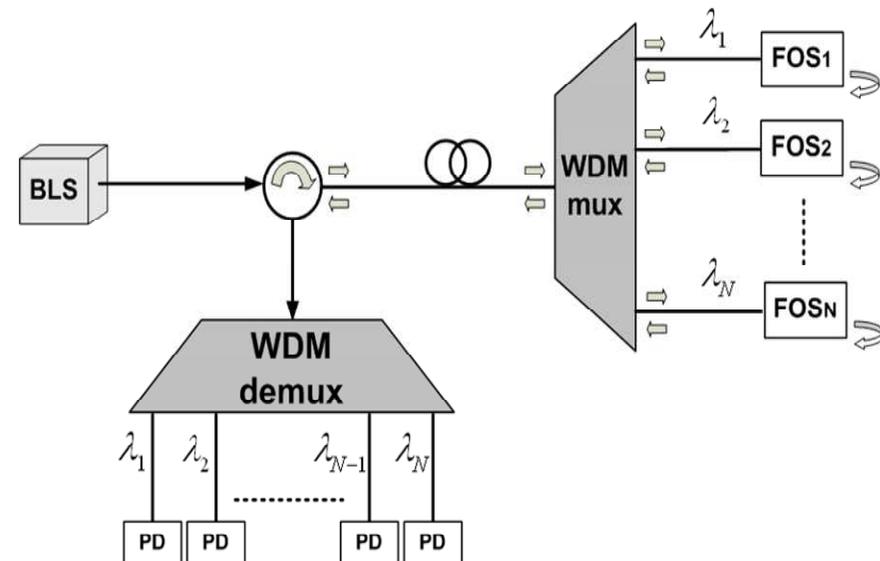
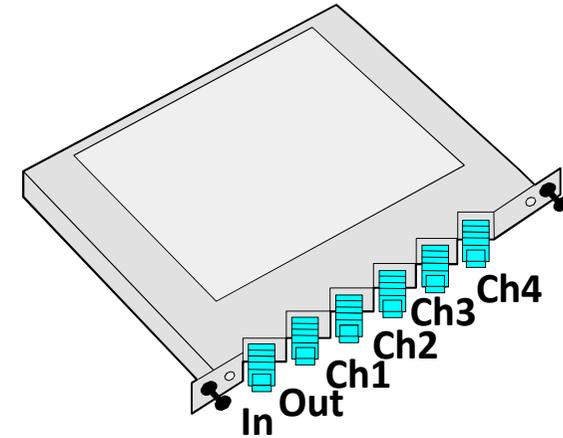


- Multiplexan (**juntan**) o demultiplexan (**separan**) la potencia óptica de diferentes longitudes de onda
- Cruce entre canales (crosstalk), aislamiento entre canales

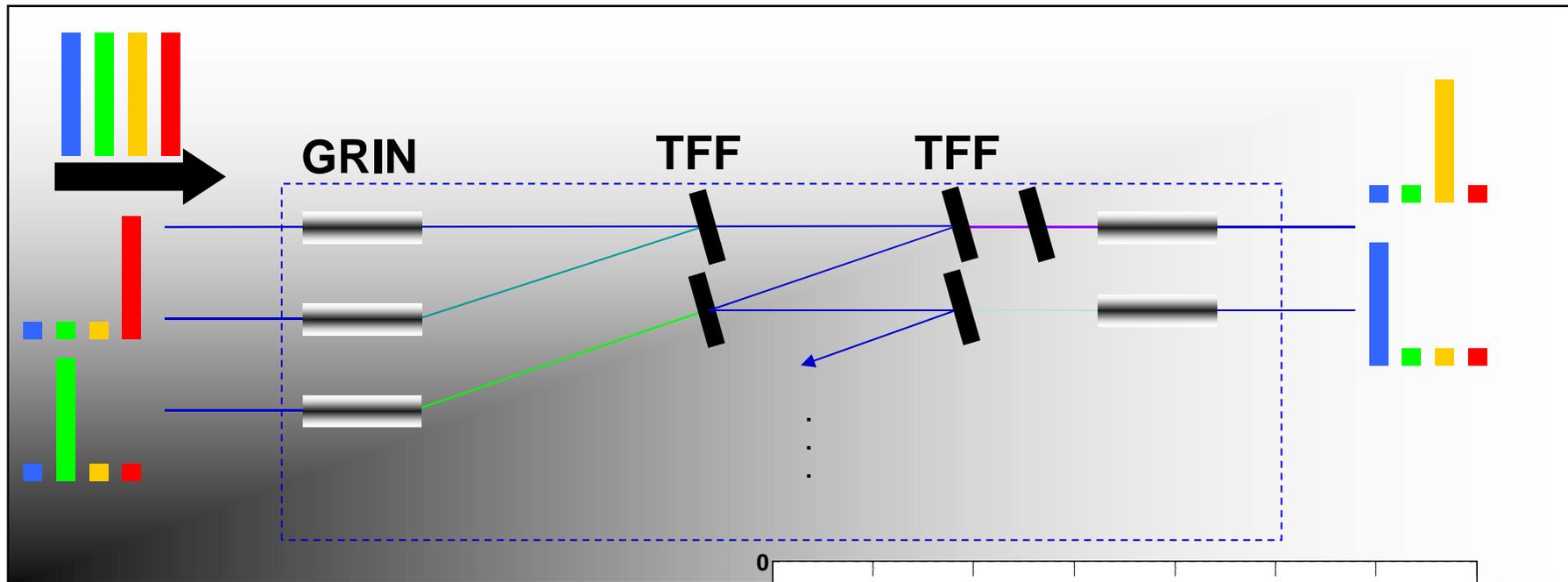


Multiplexores, demultiplexores

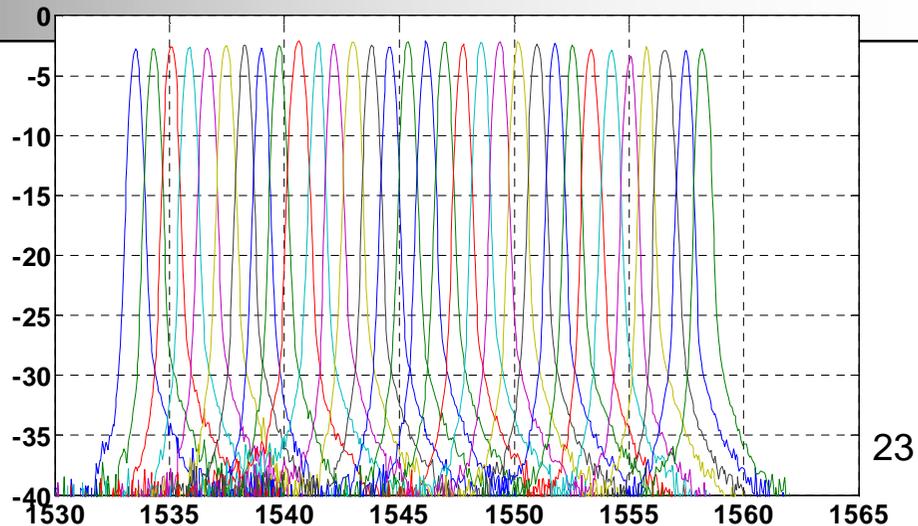
- Es el componente clave en sistemas de multiplexación por división en longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing)
- Diferentes tecnologías
 - Filtros dieléctricos en cascada
 - FBGs en cascada
 - AWGs (Arrayed Waveguide Grating)
- Resulta esencial reducir el cruce entre canales (crosstalk)



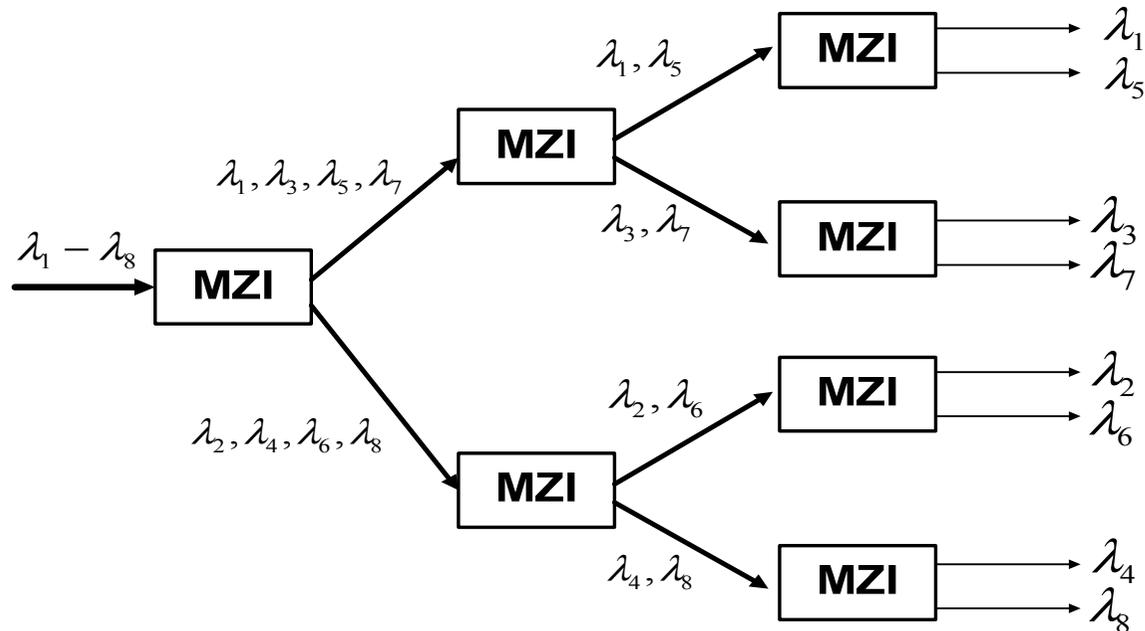
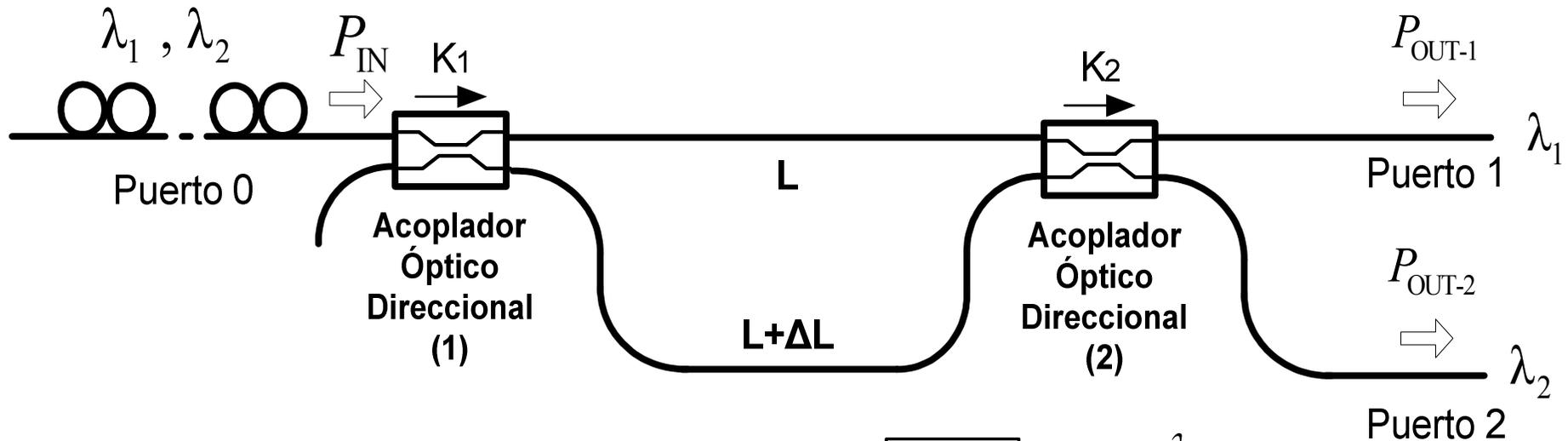
Thin-Film Filters: demux



Thin-Film Filters (TFF)
32 canales x 100GHz

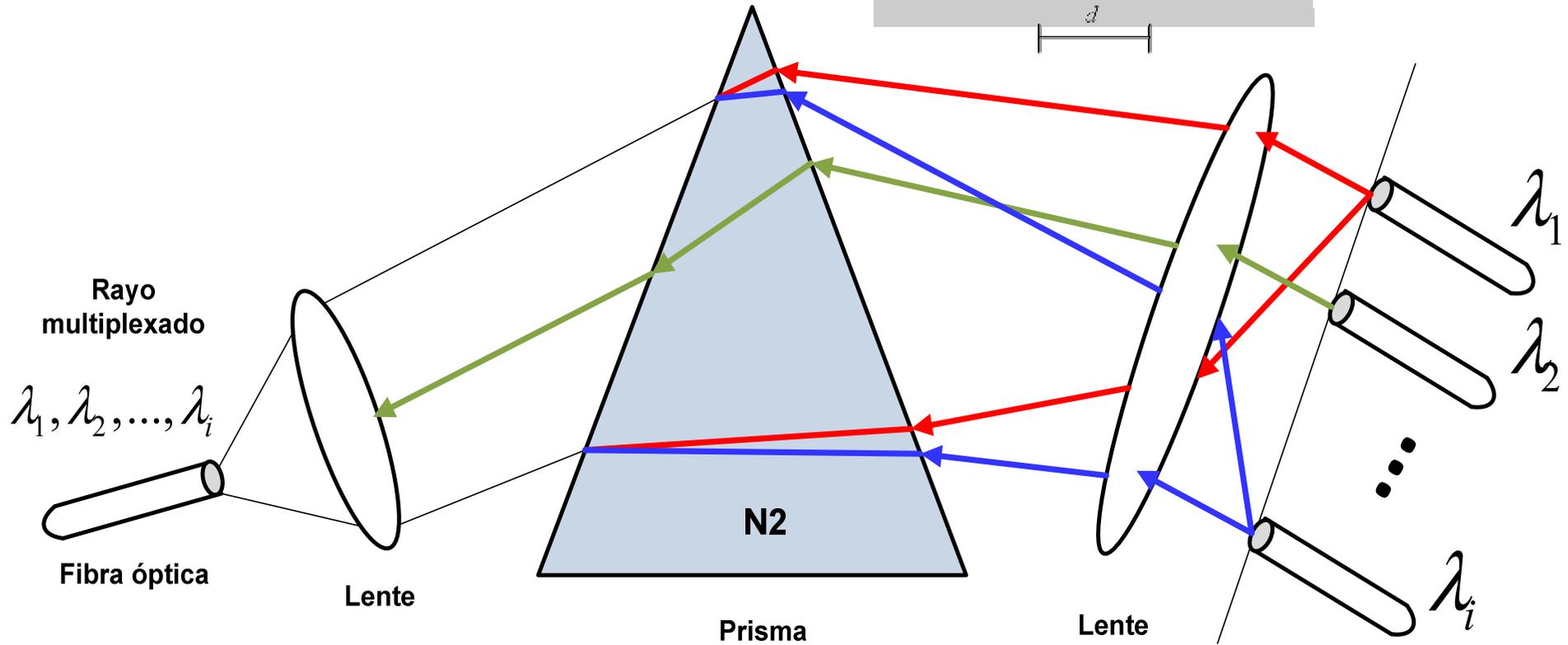
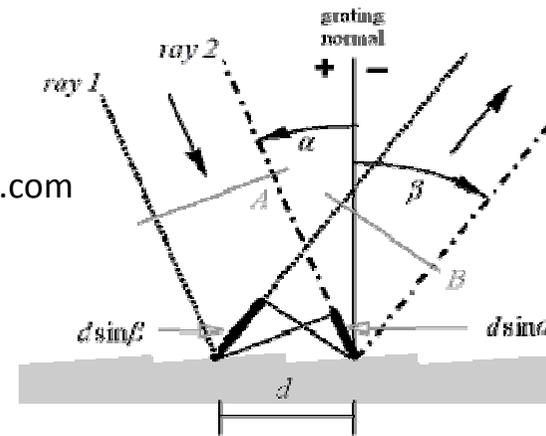


Demux Mach-Zehnder

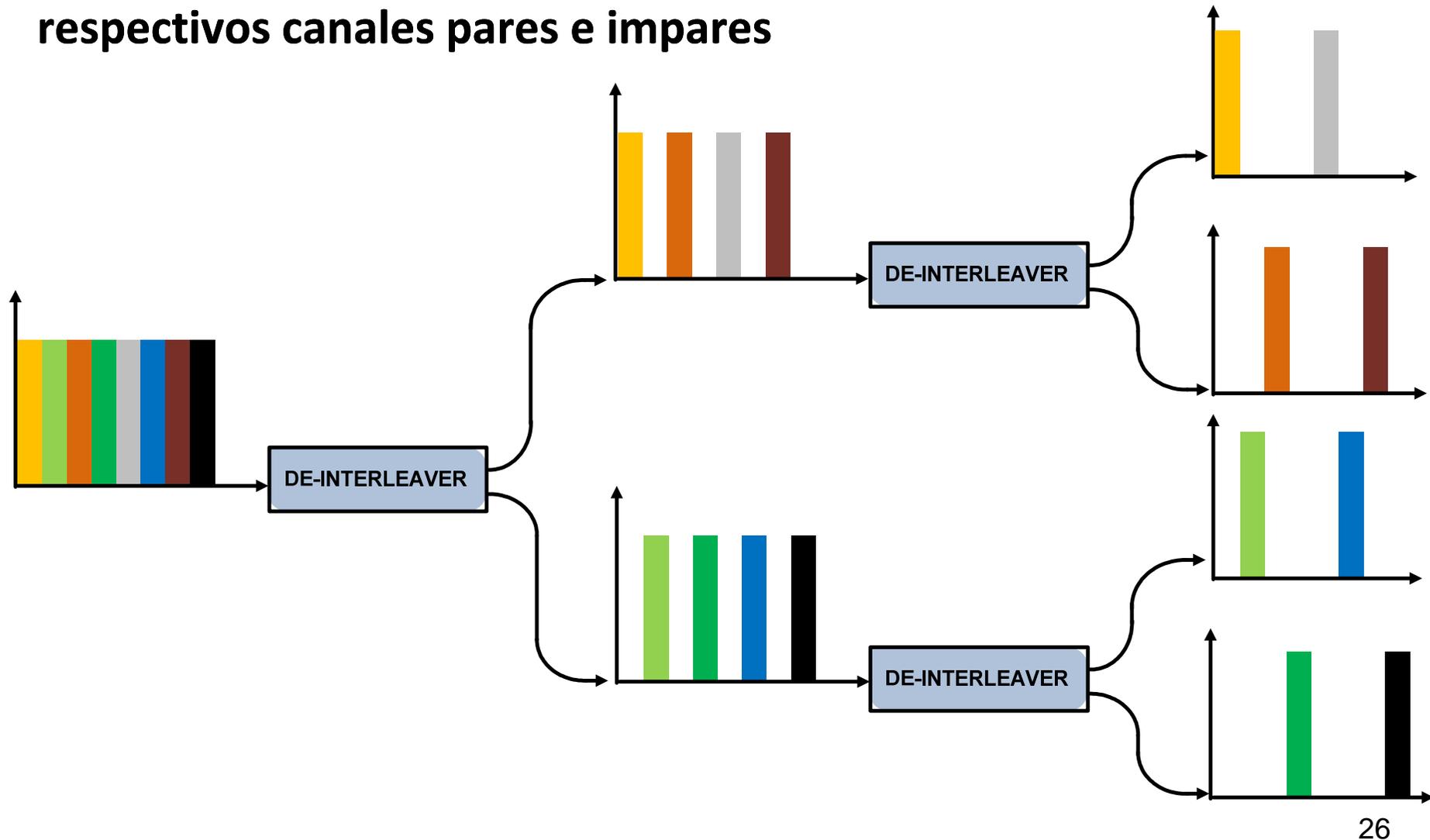


Redes de difracción (Diffraction Gratings)

Fuente:
www.newport.com

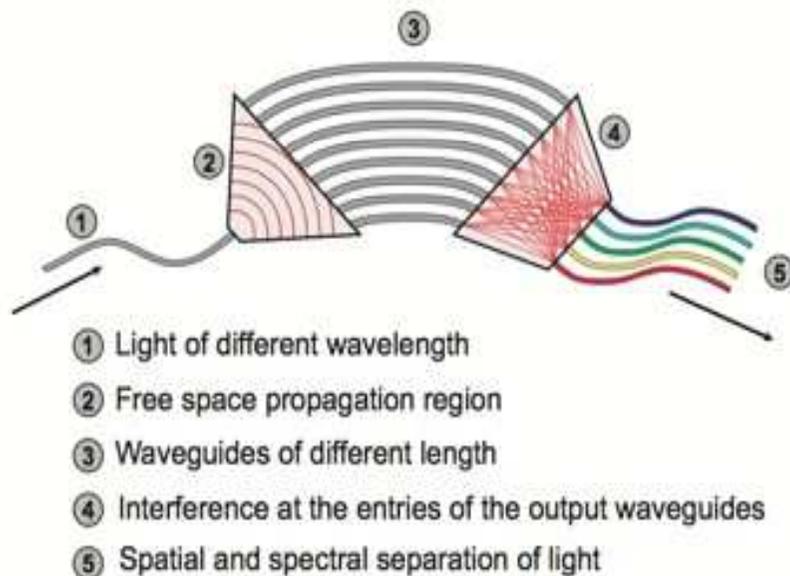


Interleavers: conforma/separa una señal DWDM en sus respectivos canales pares e impares



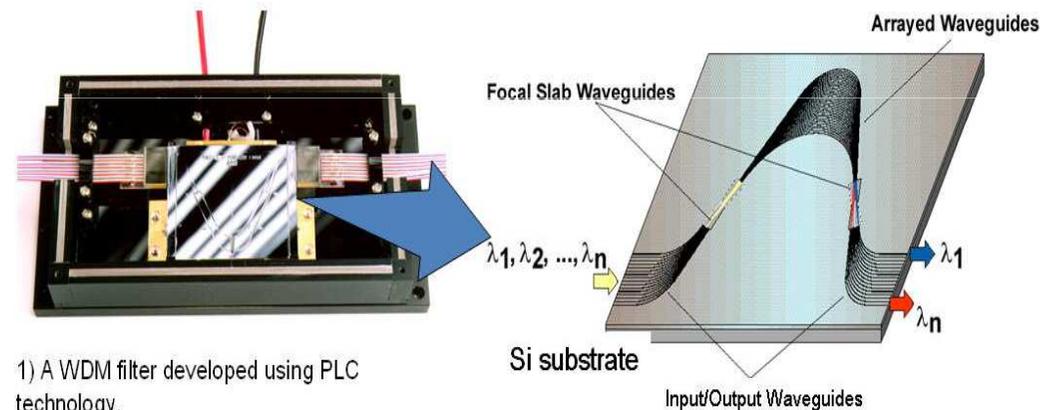
Dispositivo AWG (Arrayed Waveguide Grating)

- Realizados sobre tecnología planar de silicio (PLC), los AWG representan la última generación en demultiplexores en longitud de onda



Fuente: Fraunhofer, Heinrich Hertz Institute

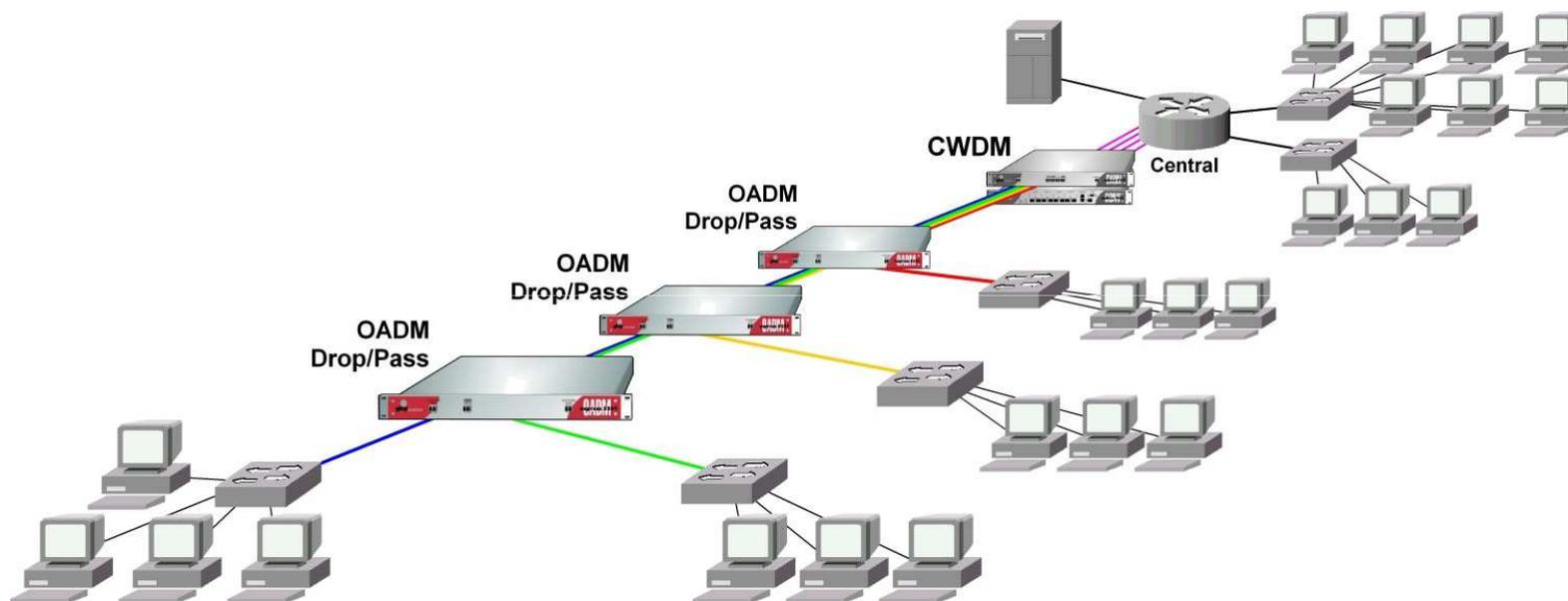
AWG: Arrayed-Waveguide Grating



Fuente: NTT Photonics Laboratories

Dispositivo OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) (I)

- Aplicación

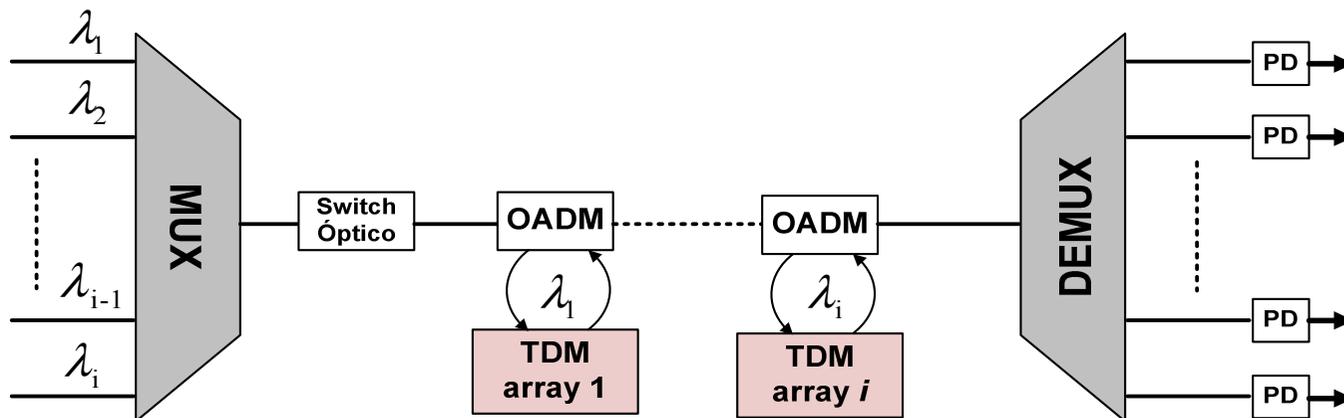


Conexión de la central a diferentes estaciones de trabajo utilizando equipamiento CWDM/OADM de inserción y extracción de diferentes longitudes de onda

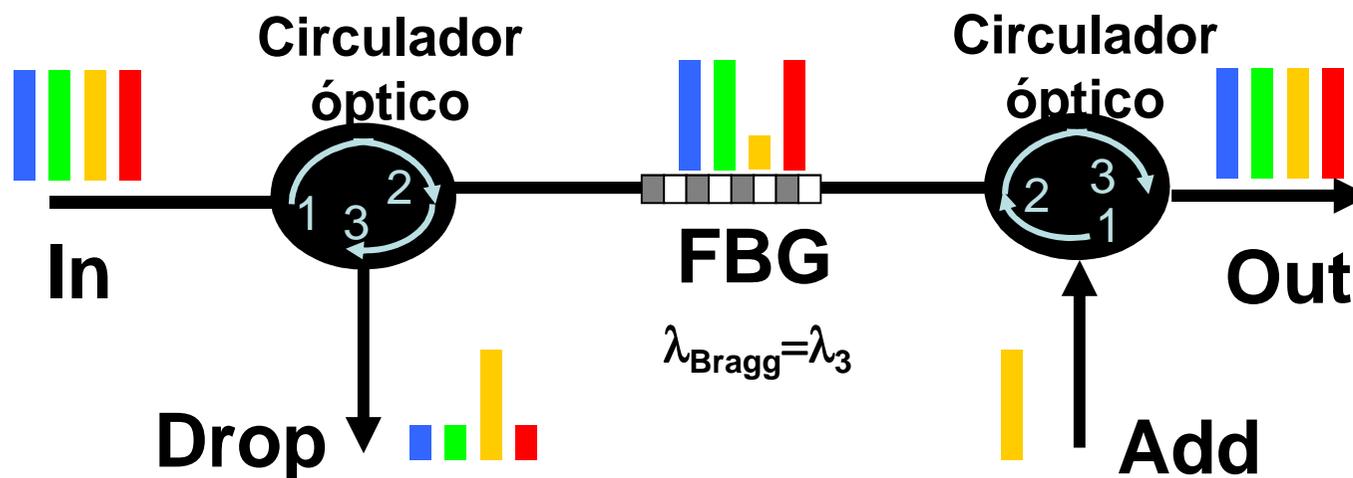
CWDM:1271, 1291, 1311, 1331, 1351, 1371, 1431, 1451, 1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611 nm

Dispositivo OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) (II)

- Aplicaciones: red híbrida WDM+TDM



- OADM: FBG + 2 circuladores

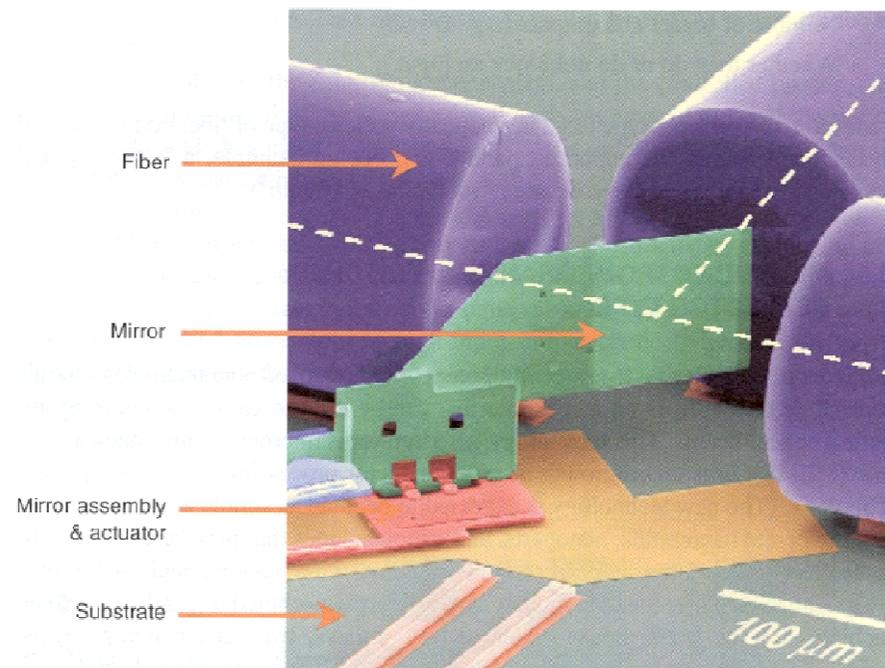
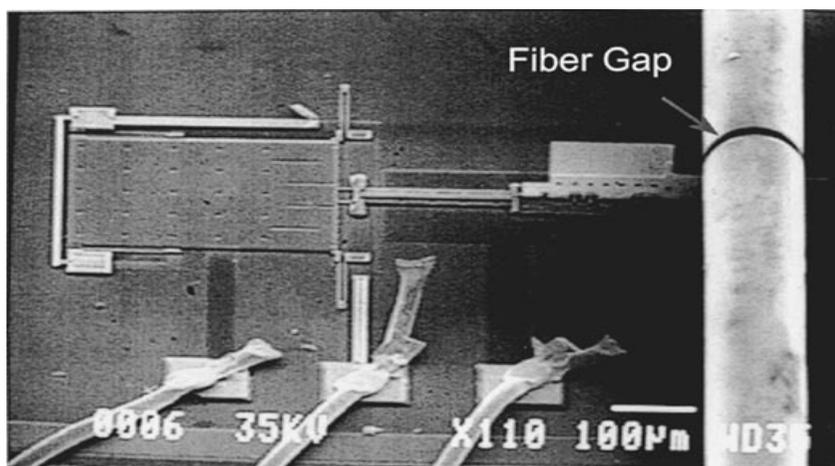


Micro-ElectroMechanical Systems (MEMS)



Haz de luz

Fuente: Tanner
Labs

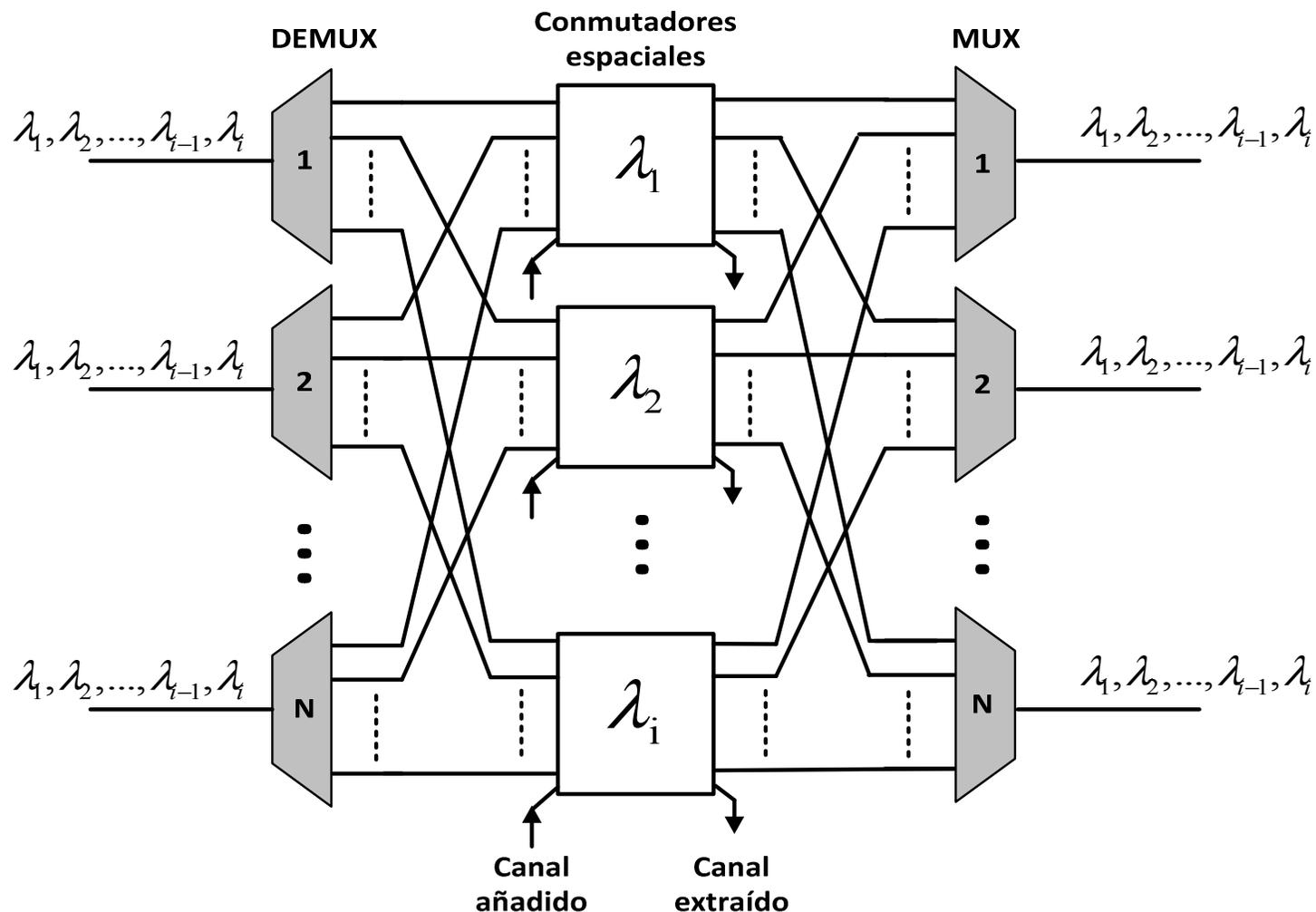


Fuente: Lamda Router Mirror
Switch – Lucent

Fuente: C.R. Giles *et al.*, "A silicon MEMS optical switch attenuator and its use in lightwave subsystems", IEEE Sel. Topics Quant. Electron., 5(1), 18- 25, 1999.

OXC: Optical Cross-Connect

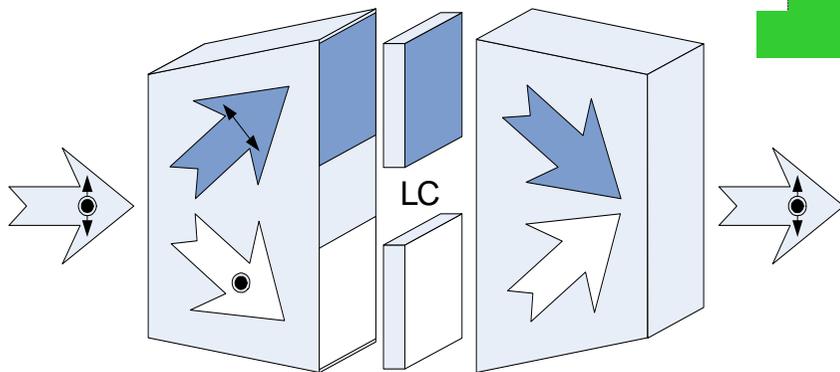
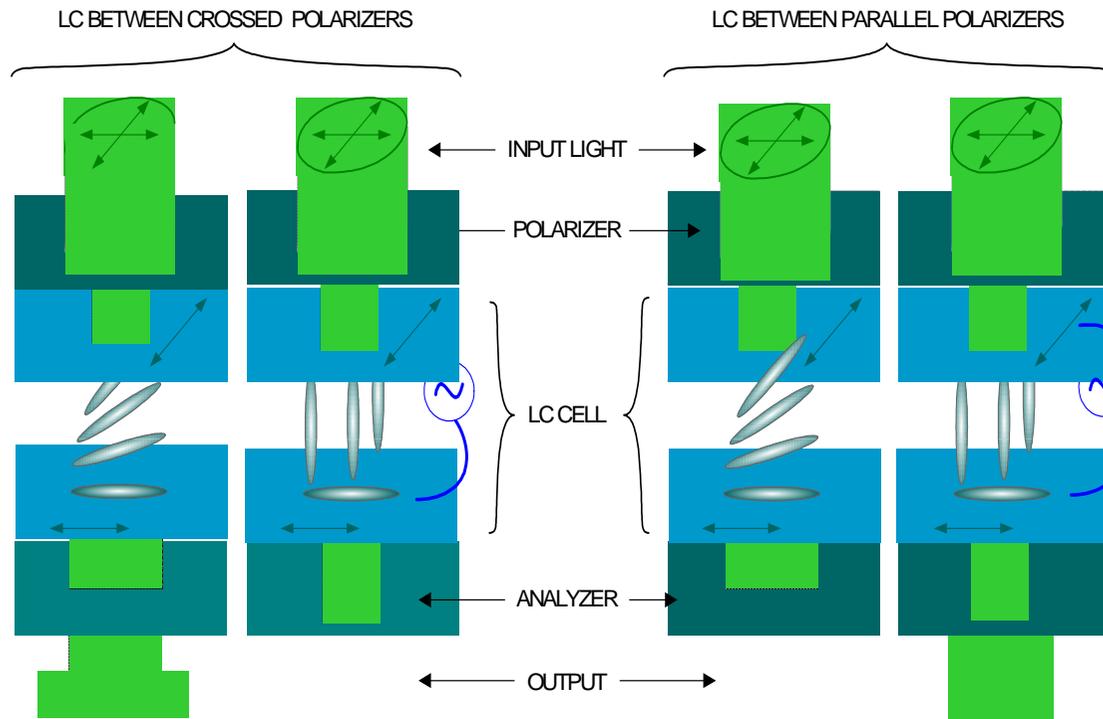
- Dispositivo que permite intercambiar diferentes señales ópticas a alta velocidad



M4. Componentes Ópticos: Conmutadores

Conmutación con cristal líquido (LC, Lyquid Cristal)

Principio de funcionamiento de un LC

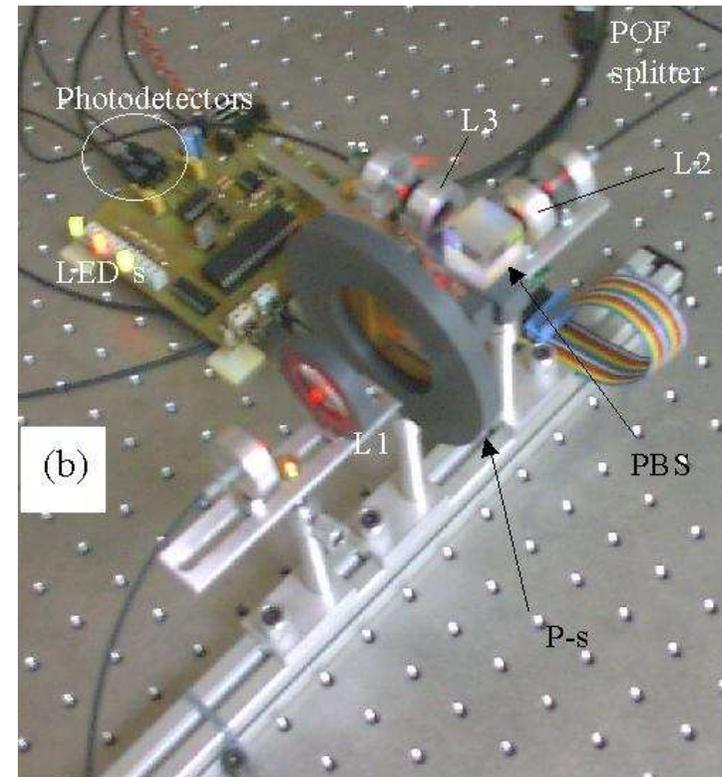
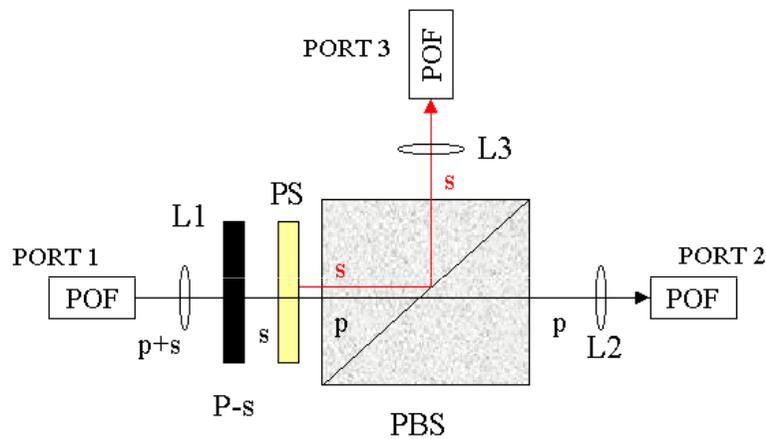


Control y conmutación en función de la polarización de la luz

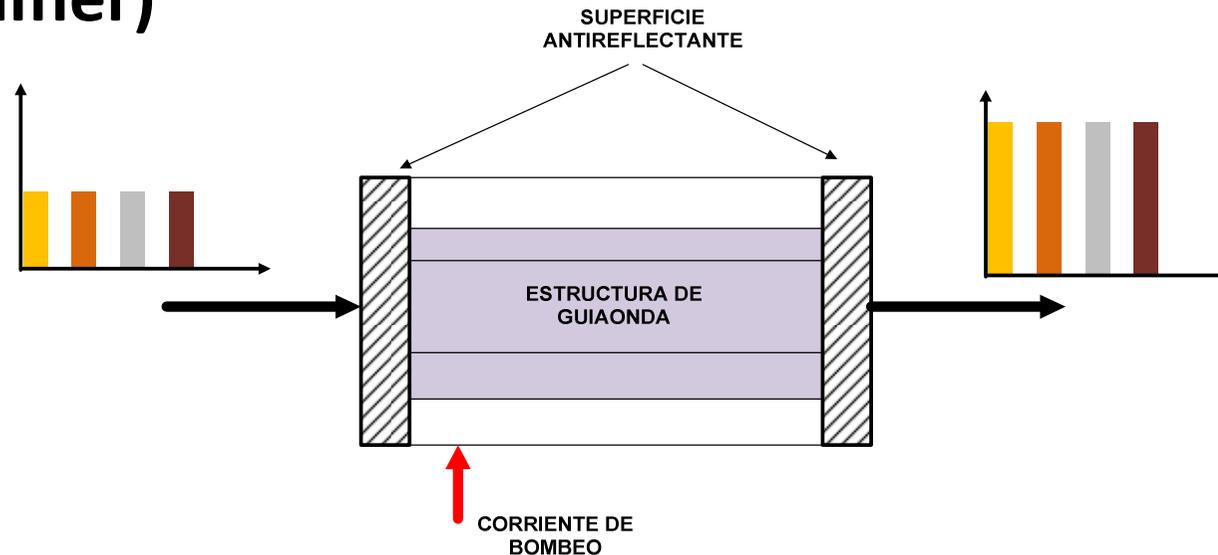
| | | | | |
|--------|-------------------------|-----------------------|---------------|---------|
| Inputs | Polarization Separation | Polarization Handling | Recombination | Outputs |
|--------|-------------------------|-----------------------|---------------|---------|

M4. Componentes Ópticos: Conmutadores

Conmutación con cristal líquido (LC)



- **Amplificador Óptico Semiconductor (SOA, Semiconductor Optical Amplifier)**

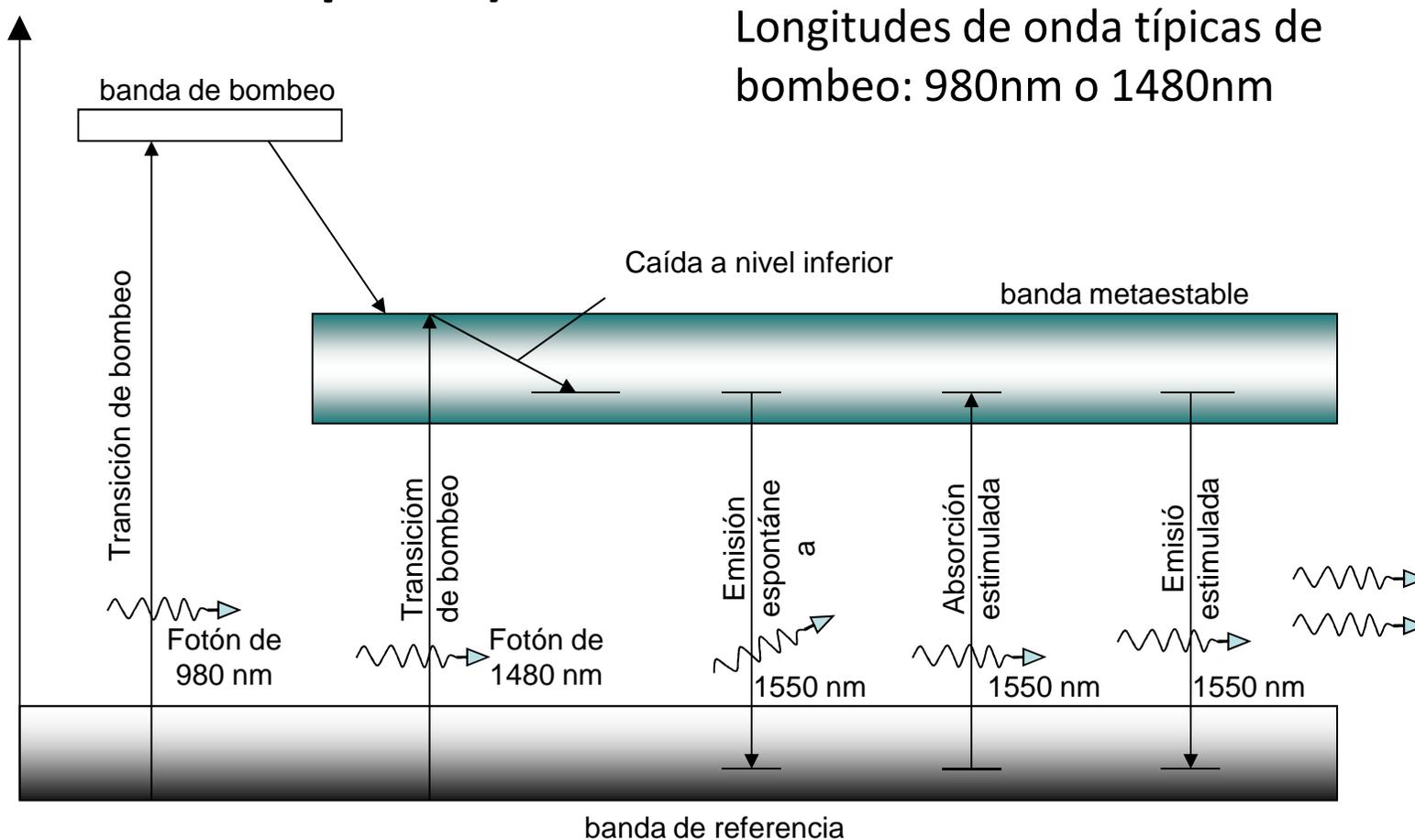


- **Amplificador de Fibra Dopada (DFA, Doped Fiber Amplifier)**

- Más común → Erbium-DFA (EDFA), bandas C+L
- Otros: Praseodimio (1300nm), Iterbio (1 μ m), Tulio (banda S)

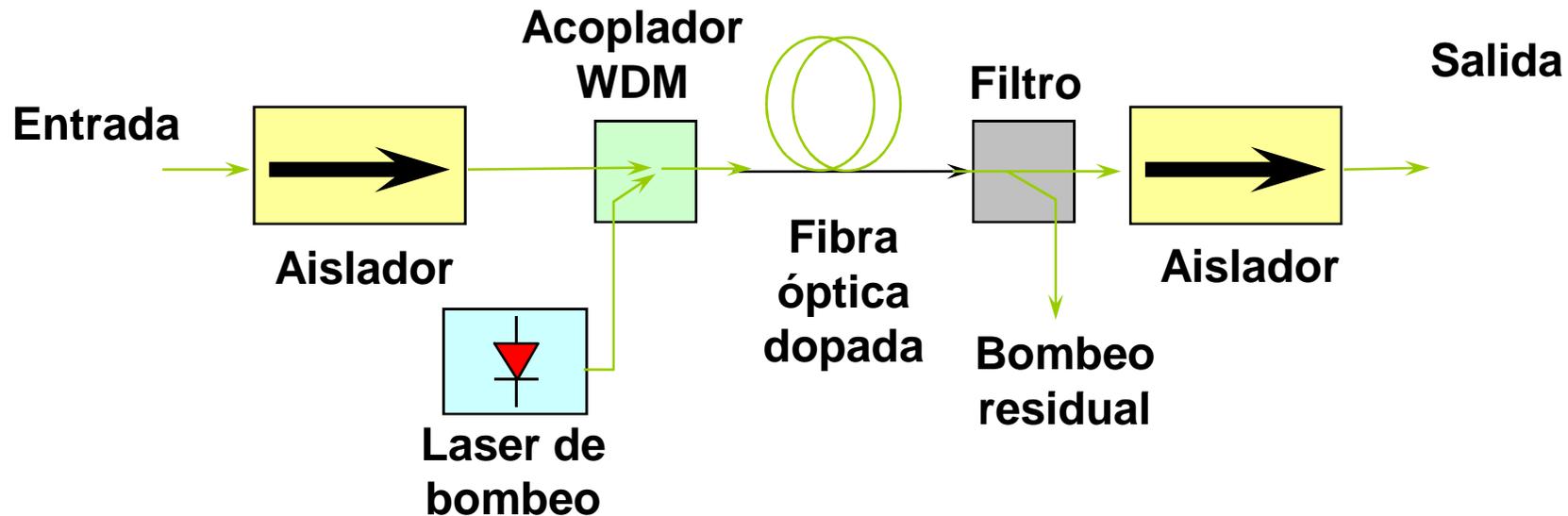
M4. Componentes Ópticos: Amplificadores

• Amplificador de Fibra Dopada con Erbium (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)



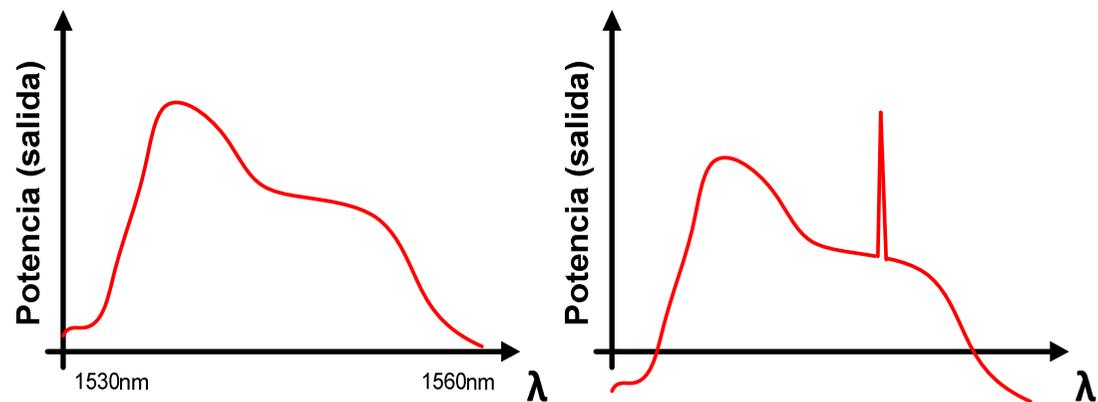
M4. Componentes Ópticos: Amplificadores

• Diagrama de bloques EDFA



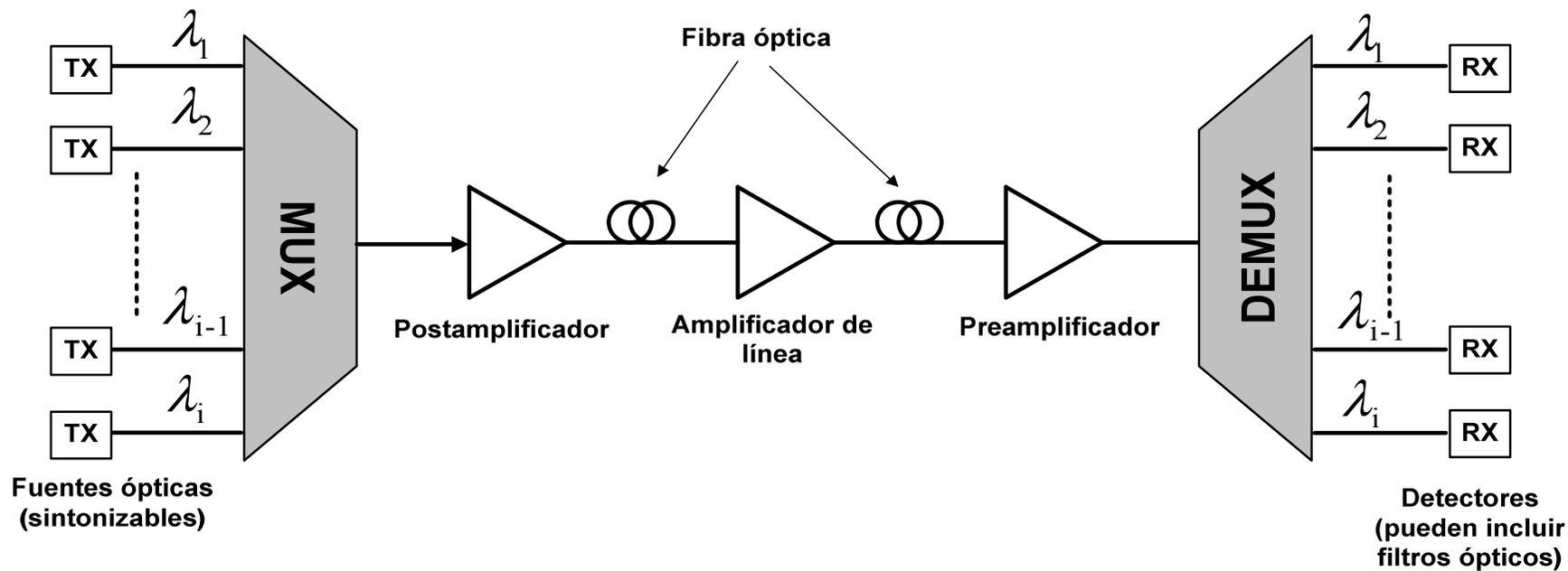
• Espectro de salida

- ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission)
- ASE+señal amplificada



Funciones del amplificador óptico

- Según su posición en el enlace de comunicaciones ópticas, el amplificador puede operar como:
 - Amplificador de potencia (*booster*)
 - Amplificador en línea
 - Preamplificador

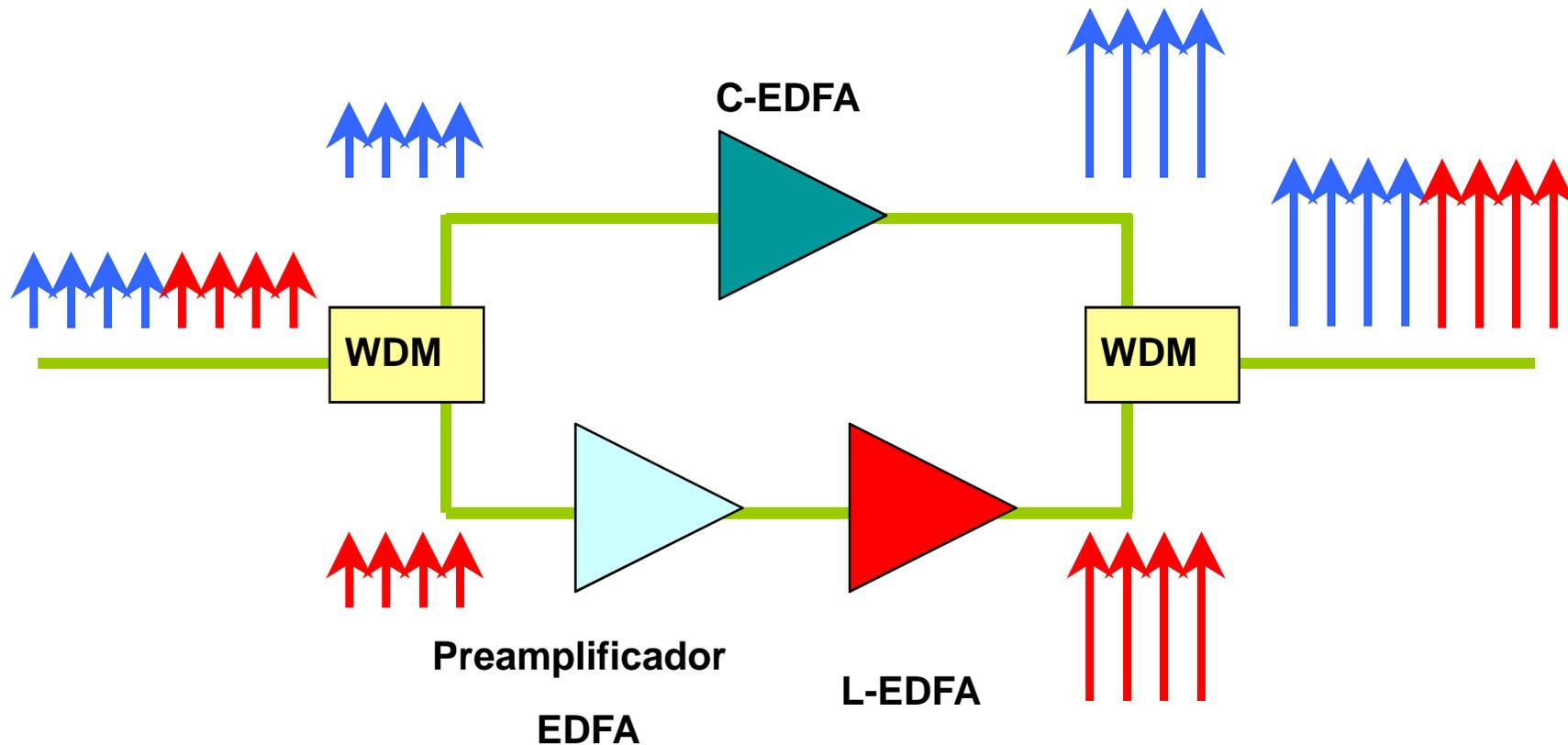




Características EDFA - SOA

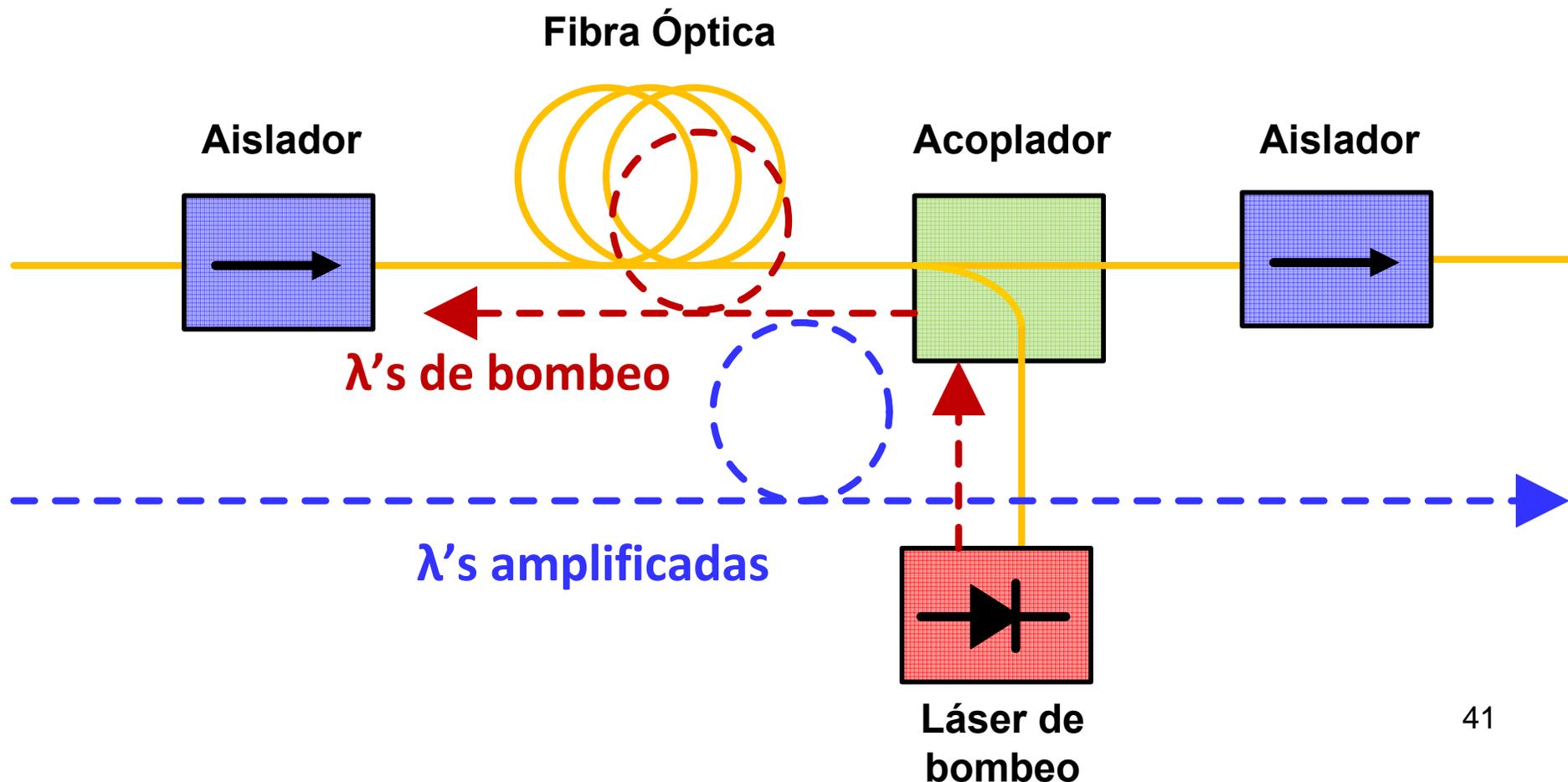
| | SOA | EDFA |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Ganancia | 25-30 dB | 30-50 dB |
| Potencia de saturación | 5-10 dBm | 13-23 dBm |
| Factor de ruido | 5-6 dB | 4 dB |
| Dimensiones | < 1 mm | 10-100 m |
| Banda de paso | 30-60 nm | 20-30 nm |
| Margen (nm) | 1300-1600 nm | 1530-1565 nm |
| Integración | posible | --- |

Amplificador de banda ancha, bandas C+L (I)



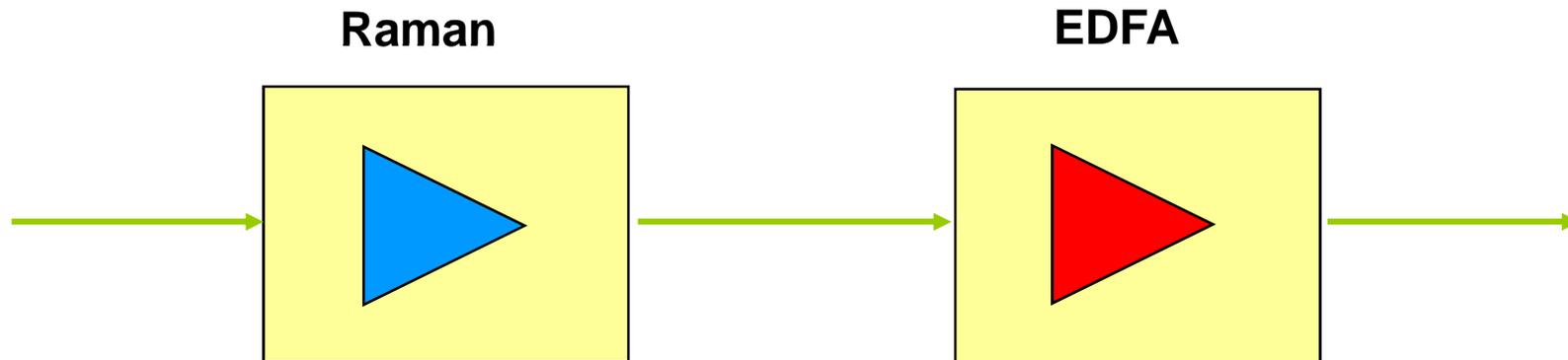
Amplificador Raman

- Basados en el efecto Raman, interacción no lineal entre la señal óptica y la señal de bombeo de alta potencia



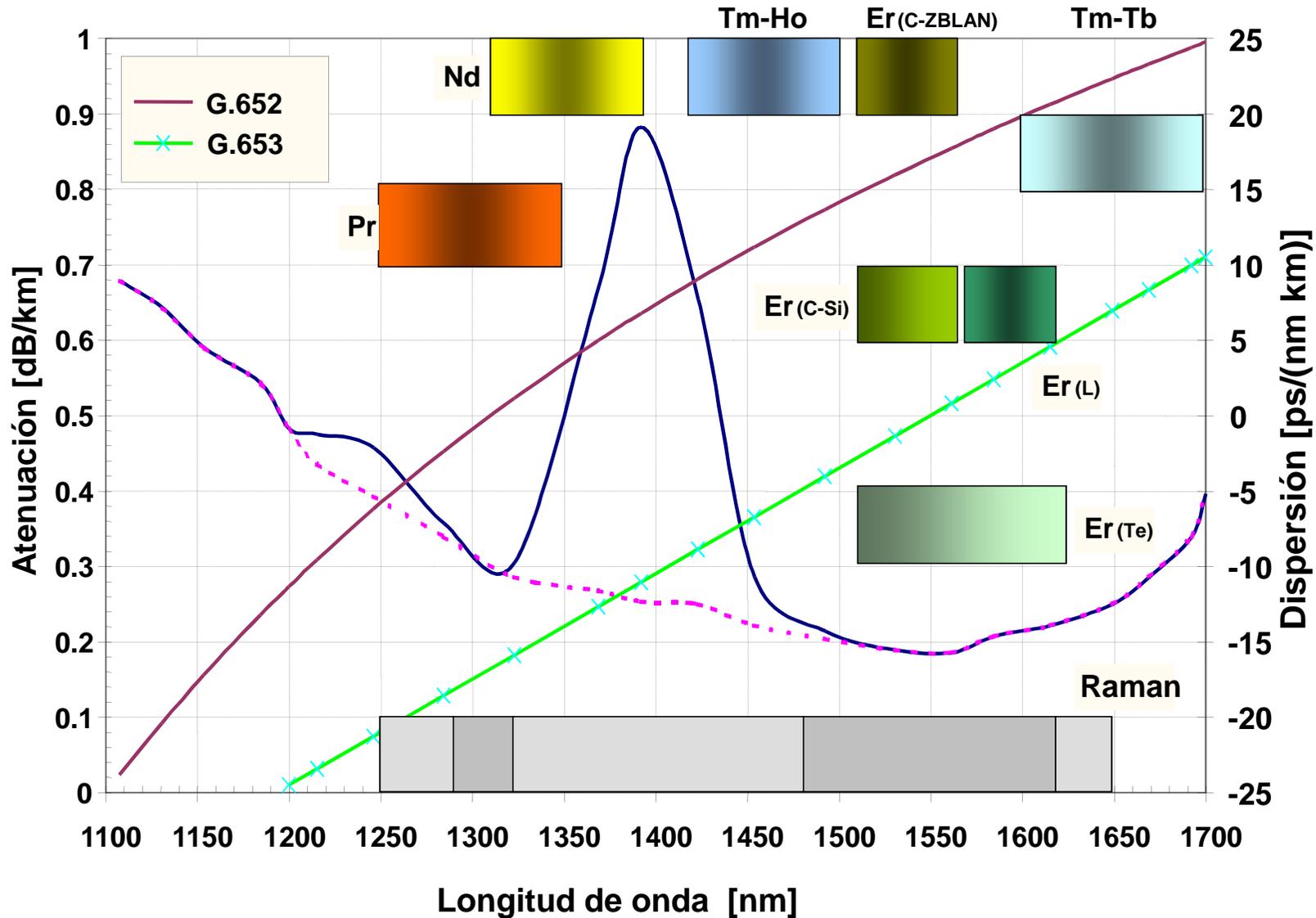


Amplificador híbrido Raman + EDFA



M4. Componentes Ópticos: Amplificadores

Amplificadores para diferentes bandas



Otros: Aislador

- Función: Protección de láseres y amplificadores frente a reflexiones que provocan inestabilidades



Símbolo

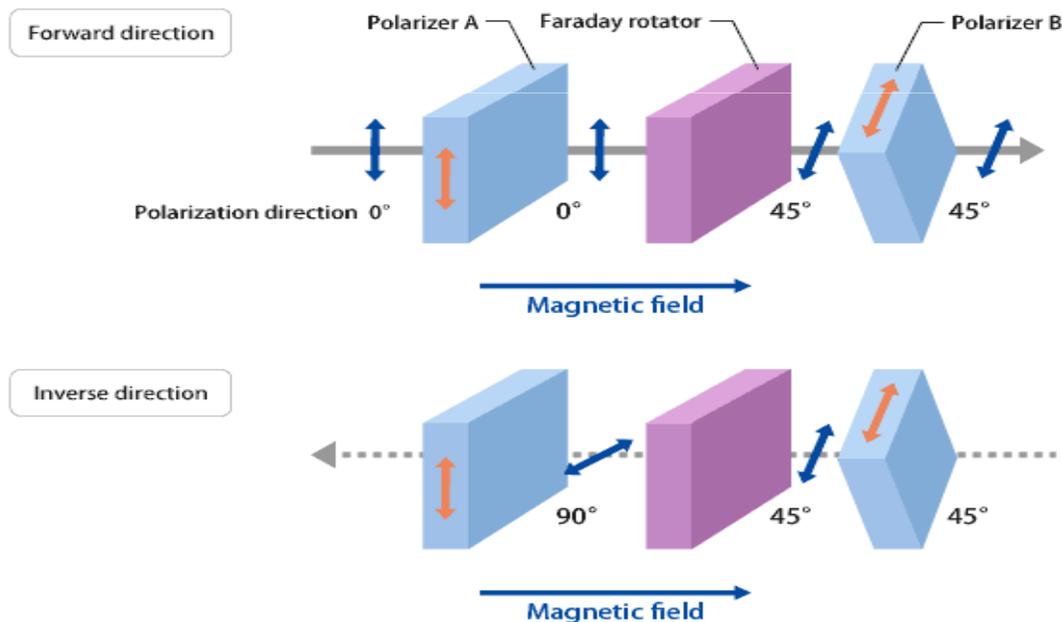


Diagrama de bloques

Fuente: Sumitomo
(www.smm.co.jp)

- Bajas en sentido de propagación: 0.2 – 2dB
- Pérdidas elevadas en sentido contrario a la propag.: 20 – 80dB