

### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tema que se va a presentar



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

### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tema que se va a presentar



BLOQUE	II.2. Modulación de la portadora óptica con la información
Objetivos	<ul> <li>Se pretende que el alumno sea capaz de:</li> <li>Argumentar cuál es la modulación habitual y por qué se utiliza habitualmente el formato IM/DD</li> <li>Describir cómo es la modulación directa en LED y LD, conociendo sus ventajas y limitaciones</li> <li>Explicar qué es el chirp, por qué se produce y cuáles son sus efectos</li> <li>Señalar en qué casos conviene la modulación externa y qué desventajas presenta</li> <li>Comprender cuál es la diferencia fundamental entre la modulación óptica y la eléctrica</li> </ul>
Duración	2 horas
Programa	Introducción Tipos (Amplitud, fase/frecuencia) Modulación directa Características de transferencia Espectros ópticos Chirp Respuesta a la modulación Modulación externa Modulador electroóptico de fase Modulador de electroabsorción



- Introducción
- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones

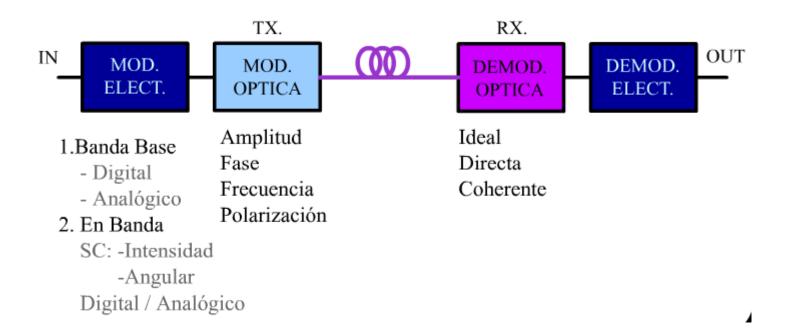
### Introducción

- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones



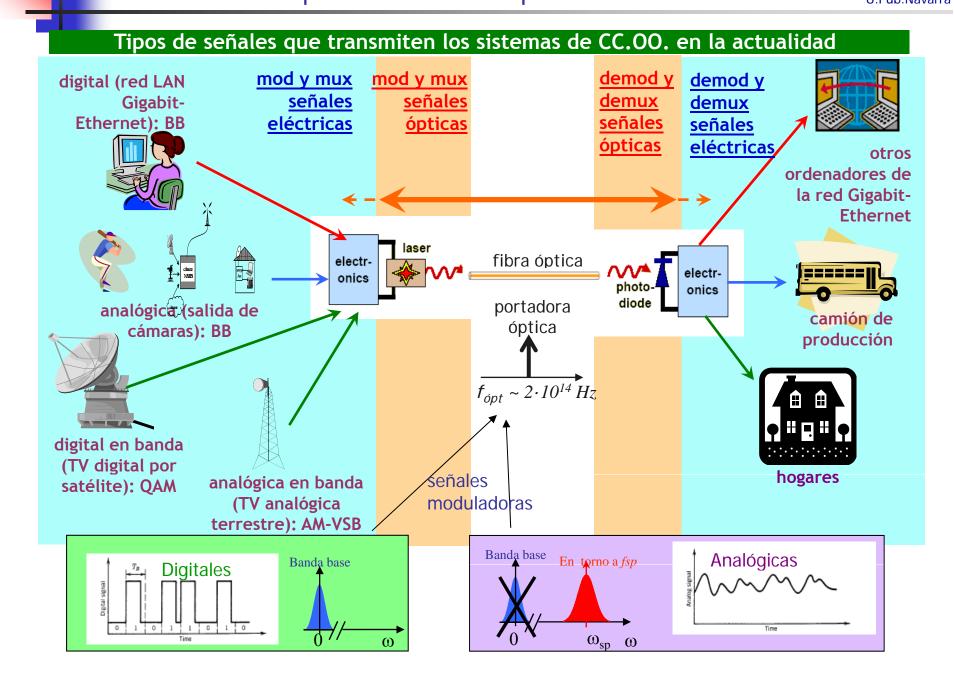


El objetivo es la transmisión de señales eléctricas a través de fibra óptica. Para ello, estas señales –de distintos tipos y distintas modulaciones- han de modular a una portadora óptica que pueda viajar por la fibra. En el rx, se necesita el proceso de demodulación óptica para recuperar la señal eléctrica enviada



### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Introducción: tipos de señales empleadas en sistemas de cc.oo U.Púb.Navarra



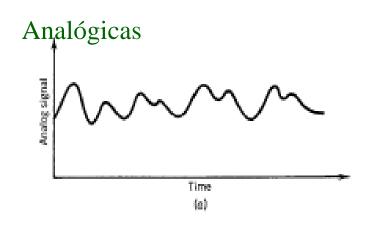


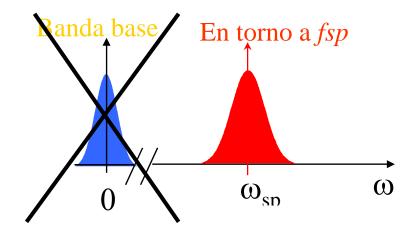


### Ing. Telec., CC.OO.: modulación

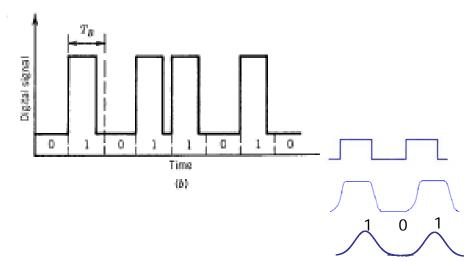


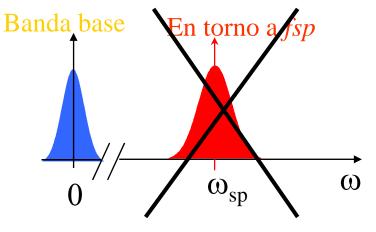






#### Digitales





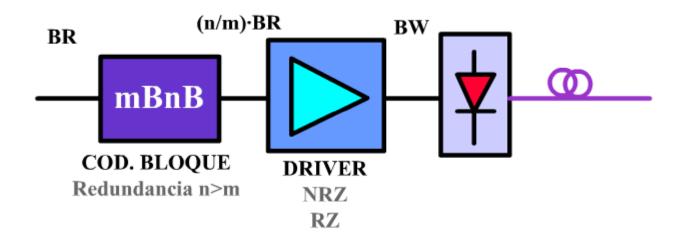




#### Codificación de línea y codificación de bloque

En el caso de las señales digitales banda base, previamente a la modulación óptica (y posible mux. óptica) se llevan a cabo los procesos de codificación

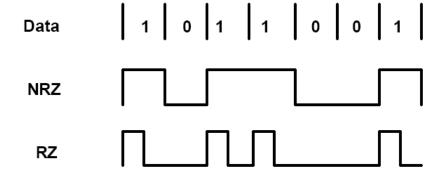
- Codificación de bloque o streaming: adición de nuevos bits o mapeo de toda la secuencia para mantener el nivel DC y posible corrección de errores
- Codificación de línea: elegir la forma y duración de los bits que codifican la información, influye en la recuperación de reloj, la eficiencia espectral, la influencia de la dispersión y las no-linealidades

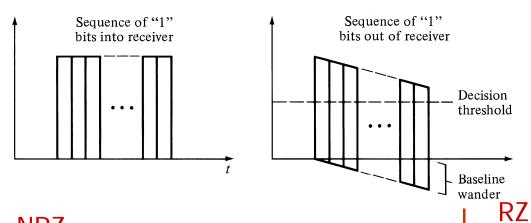


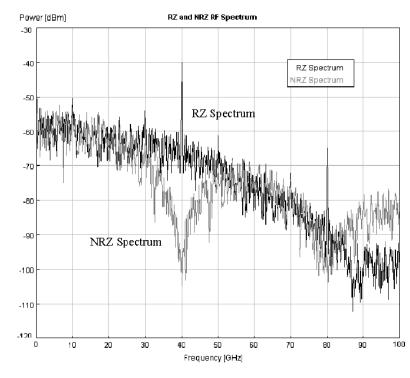




#### Codificación de línea







#### **NRZ**

Menor ancho de banda

Menos transiciones: más díficil recuperación de reloj

Nivel DC no nulo

Mayor ancho de banda

Más transiciones: más fácil recuperación de reloj

Nivel DC no nulo (aunque no tanto como NRZ)

Para mantener la misma pot. óptica media que en NRZ (mismo BER) la potencia pico debe ser mayor no linealidades





#### Codificación de bloque

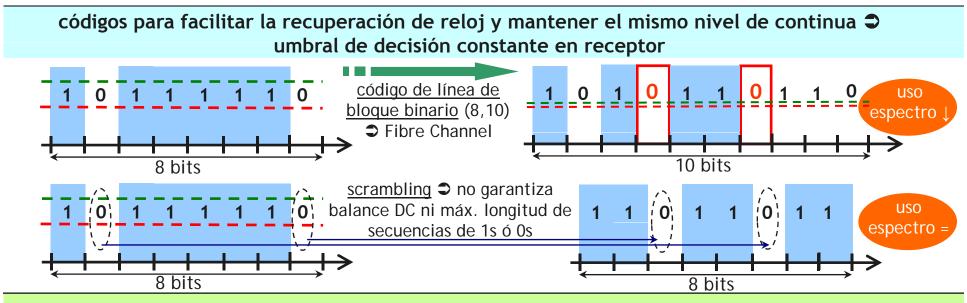
**Códigos mBnB**: cada m bits añaden bits de redundancia hasta obtener n, para evitar largas cadenas de 0s o de 1s y mantener el nivel DC; exigen mayor velocidad. Ejemplos:

1B/2B (Manchester) -> Ethernet

4B/5B -> FDDI, Fast Ethernet

8B/10B -> Fibre Channel, GigabitEthernet

Scrambling: usado por ejemplo en SDH, con el mismo objeto de códigos mBnB



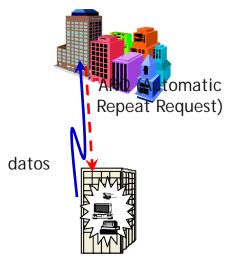
- NRZ en la mayoría de los sistemas de alta velocidad entre 155Mbps-10Gbps; con scrambling (SDH)
- Códigos de línea en enlaces de datos de alta velocidad (Fibre Channel, Gigabit Etherneet, FDDI)
  - RZ para ciertos sistemas de alta velocidad (Dispersion-Managed soliton systems, p.ej.)

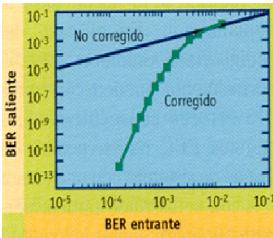




#### Codificación de bloque

**Códigos para corregir errores**: CRC,Reed Salomon -> FEC (Forward Error Correction): sirven para mejorar el BER; exigen mayor velocidad





- Códigos de detección de errores y petición de retransmisión de información errónea → bits de paridad → códigos usados en SDH/SONET y en comunicaciones de datos
- Códigos FEC (Forward Error Correction) para detección y
   corrección de errores basados un mayor número de bits de redundancia
- © FEC permite el mismo BER con menos potencia consumida
- 8 Los FEC implican procesado adicional en el receptor

Ej.: códigos Reed-Solomon

Se utilizan en sistemas a 10Gpbs y en enlaces submarinos. Los estandarizados por la ITU son el (255,239) -menos de 7% de redundancia y puede corregir hasta 8 bytes erróneos en un bloque de 239 bytes- y el (255,223) -menos de 15% de redundancia y puede corregir 16 bytes erróneos en un bloque de 223 bytes-.

Los códigos Reed-Solomon pueden reforzarse con estrategias de interpolación de bytes.



- Introducción
- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones



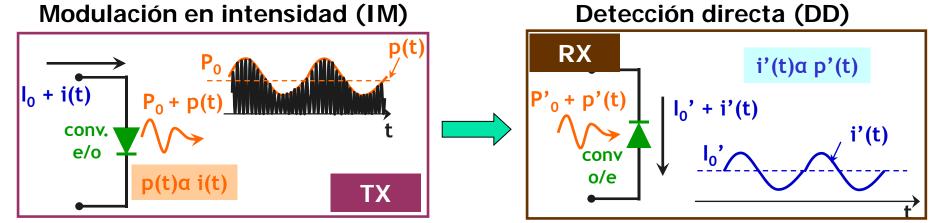
### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tipos de modulaciones empleadas en sistemas de cc.oo.



Modulaciones clásicas en sistemas eléctricos: amplitud, fase, frecuencia, polarización

$$E(t) = \hat{e} A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

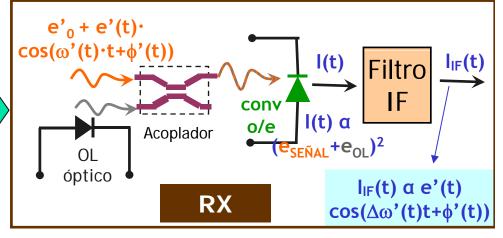
Todas ellas son potencialemente posibles en sist. cc.oo., pero sólo se usa la modulación en intensidad (que no en amplitud) por ser la única que permite la detección directa



#### Mod. fase o frecuencia

# $e_0 + i(t)$ $e_0 + e(t) \cdot \cos(\omega(t) \cdot t + \phi(t))$ e/o $e^2(t) \circ \omega(t) \circ \phi(t)) \circ \phi(t)$ TX

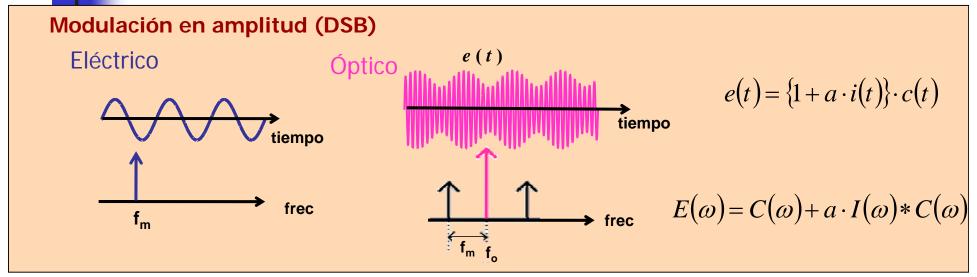
#### **Detección coherente**

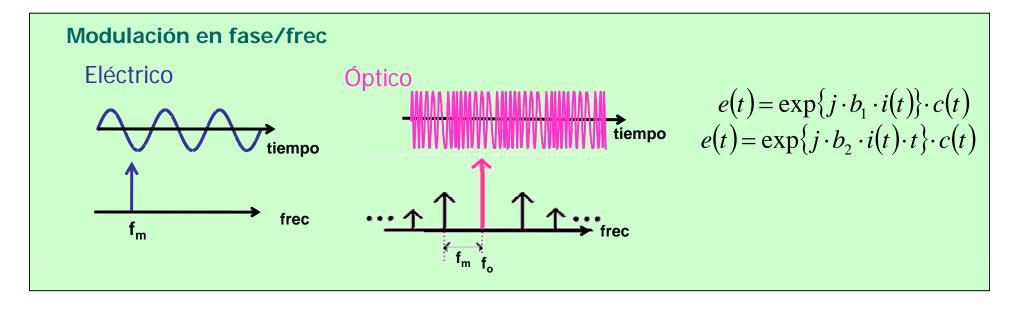




# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tipos de modulación



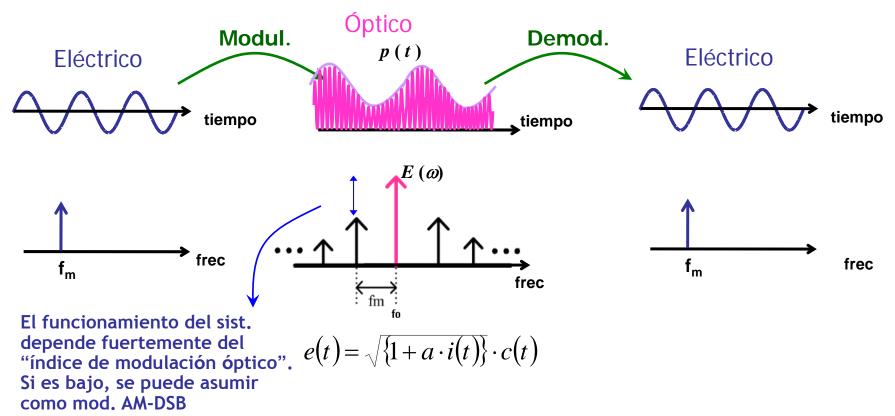




# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tipos de modulación



No hay modulación en amplitud, sino en intensidad. No es el campo E(t) el que se modula, sino la potencia,  $P(t) = |E(t)|^2$ 



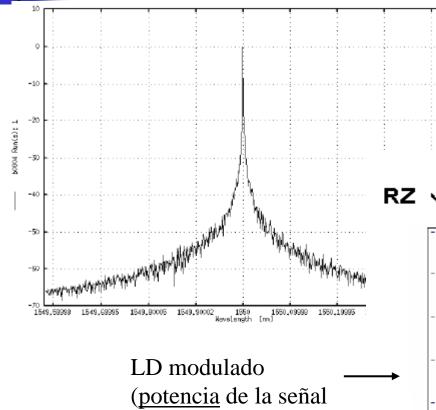
Es decir, el proceso es no lineal, se generan diferentes bandas

Pero luego, con detección directa, el proceso se deshace (¡ cuidado con lo que ocurre entre ambos procesos !)



### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Tipos de modulaciones





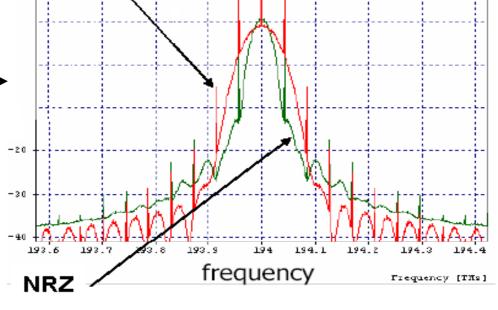
Simulaciones con OptSim

LD sin modular

transmitted power spectrum

que se envía a la fibra)

Ejercicio: probar con OptSim diferentes modulaciones (intensidad, fase,...) con diferentes "portadoras" (LED,FP,DFB,...) y diferentes amplitudes de la señal (diferentes "índices de modulación")

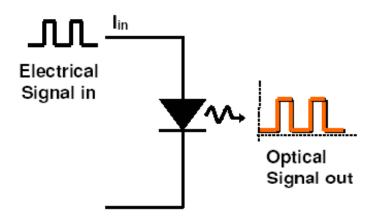




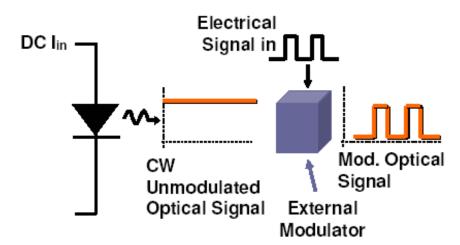


La modulación en intensidad, variación de la luz generada por una fuente óptica (LED o LD) según la señal que se desea enviar, puede hacerse de dos formas: por modulación directa (la onda electromagnética del rango óptico se genera ya con la información incluida) o con moduladores externos (tras la generación una onda em de amplitud constante se varía su potencia con un dispositivo ajeno al LD) Algo análogo puede hacerse con la modulación en fase

### **Direct Modulation**



### **External Modulation**

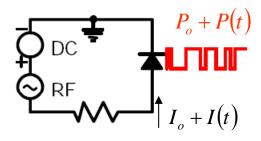




- Introducción
- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones

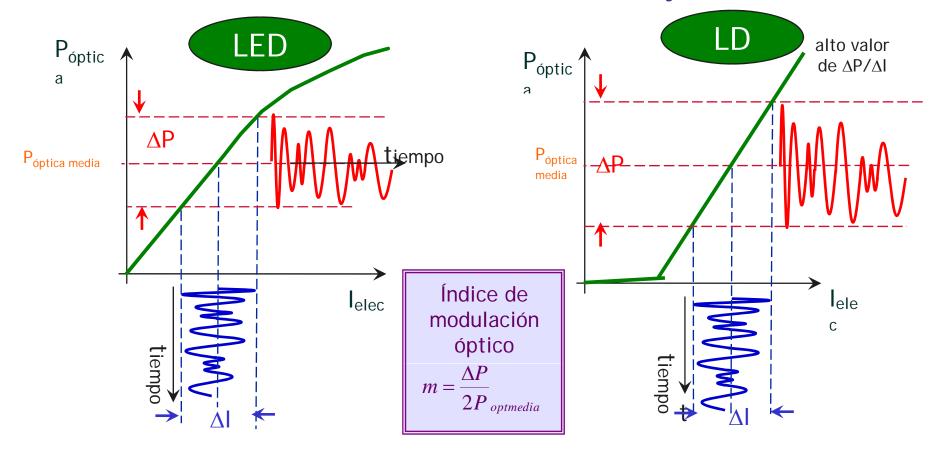






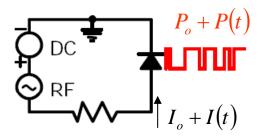
La modulación en intensidad por modulación directa de un LED o LD se basa simplemente en inyectar una intensidad eléctrica no constante sino que incluya las variaciones temporales propias de la señal que se quiere transmitir.

### Características de transferencia I-P en LED y LD



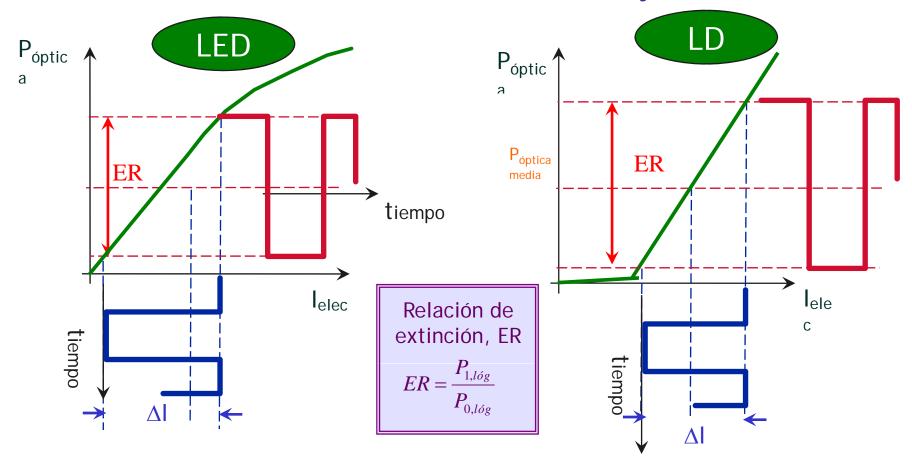






La modulación en intensidad por modulación directa de un LED o LD se basa simplemente en inyectar una intensidad eléctrica no constante sino que incluya las variaciones temporales propias de la señal que se quiere transmitir.

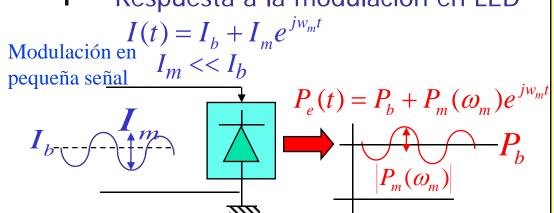
### Características de transferencia I-P en LED y LD

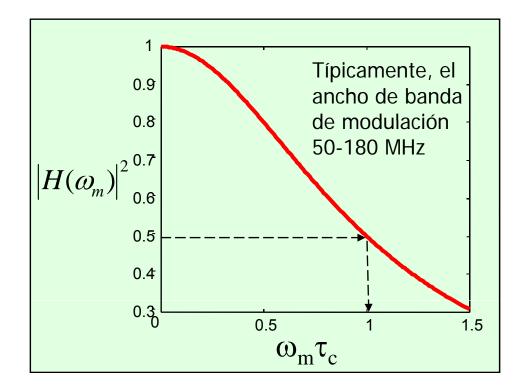






### Respuesta a la modulación en LED





La ecuación de emisión del LED relaciona la densidad de portadores, n(t), y la potencia emitida con la intensidad eléctrica y el tiempo de vida medio de dichos portadores

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - \frac{n(t)}{\tau_c}$$

$$P_e = \eta_i (h v) \frac{n(t)V_{act}}{\tau_c}$$

Con su solución se encuentra la respuesta en frecuencia a la modulación y el correspondiente ancho de banda de modulación

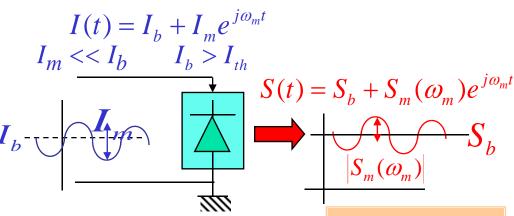
$$H(\omega_m) = \frac{P_m(\omega_m)}{P_m(0)} = \frac{1}{1 + j\omega_m \tau_c}$$

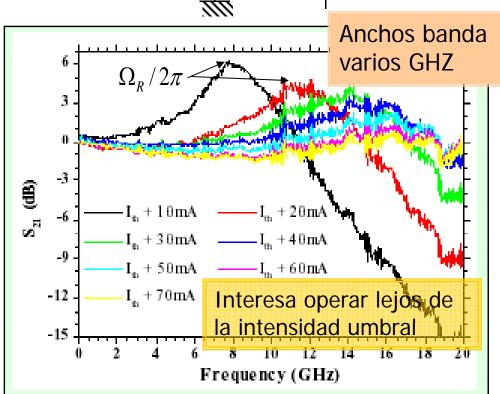
$$\Delta f_{3dB,opt} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau_c} \Delta f_{3dB,elec} = \frac{1}{2\pi\tau_c}$$





Respuesta a la modulación LD, pequeña señal





La ecuaciones de emisión del láser relacionan la densidad de portadores, n(t) eléctricos y fotones, S(t), (proporcional a la potencia emitida) con la intensidad eléctrica y el tiempo de vida medio de dichos portadores

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - \frac{n(t)}{\tau_{c}} - GS(t)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = GS(t) - \frac{S(t)}{\tau_{ph}} + R_{sp}$$

Con su solución se encuentra la respuesta en frecuencia a la modulación y el correspondiente ancho de banda de modulación

$$H(\omega_m) = \frac{\Omega_R^2 + \Gamma_R^2}{(\Omega_R + \omega_m - j\Gamma_R)(\Omega_R - \omega_m + j\Gamma_R)}$$

$$f_{3dB,opt} pprox rac{\sqrt{3}\Omega_R}{2\pi} pprox \left[ rac{3\eta_i v_g \Gamma \sigma_g}{4\pi^2 e V_{act}} (I_b - I_{th}) 
ight]^{1/2}$$



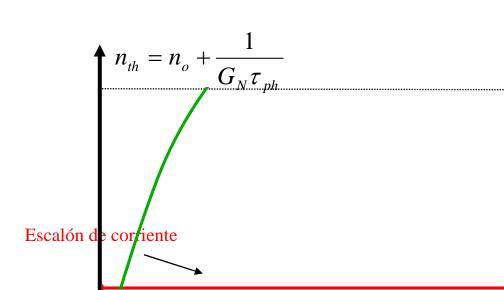


Respuesta a la modulación LD, pequeña señal

A diferencia de lo que ocurre en un LED, la respuesta a un escalón de corriente de un láser no es la de un pasobajo, sino que se producen dos fenómenos:

Retardo de conmutación y oscilaciones de relajación





Crecimiento exponencial del nº de electrones n en la unión pn. El proceso viene determinado por las ecuaciones del diodo pn.

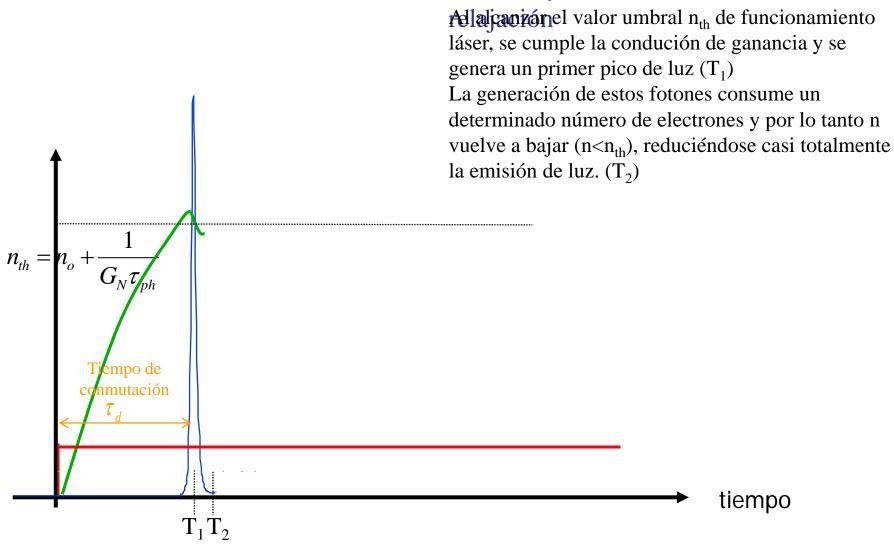
No existen todavía términos de emisión estimulada. El dispositivo es como un LED.





### Respuesta a la modulación LD, pequeña señal

#### Retardo de conmutación y oscilaciones de



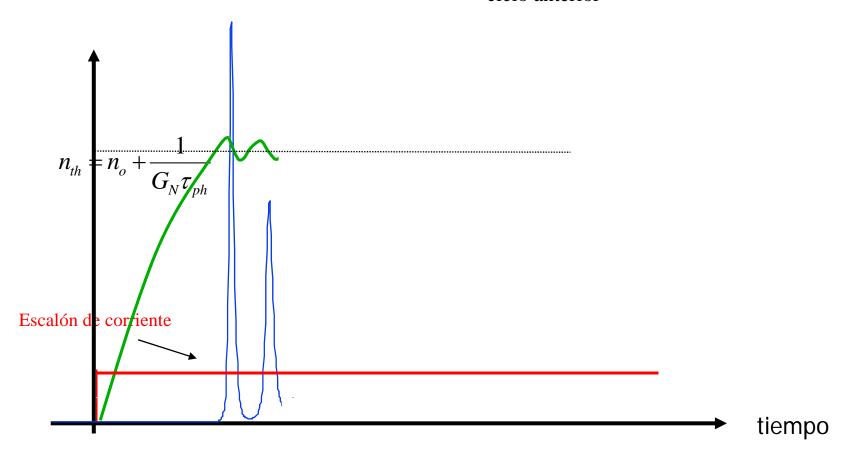




### Respuesta a la modulación LD, pequeña señal

### Retardo de conmutación y oscilaciones de

Relajación. A continuación la corriente aplicada I(t) volverá a "cargar" de electrones el láser y se repetirá el ciclo anterior



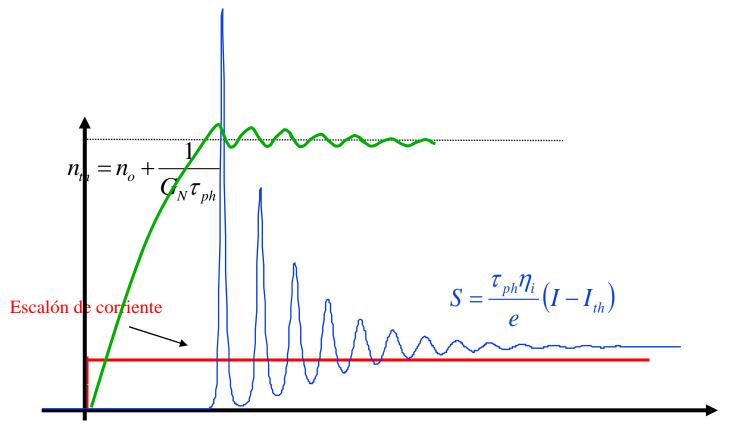




### Respuesta a la modulación LD, pequeña señal

#### Retardo de conmutación y oscilaciones de

relaisación cierto tiempo el láser alcanza el estado estable y los valores de portadores eléctricos, n, y ópticos, S, se mantendrán fijos





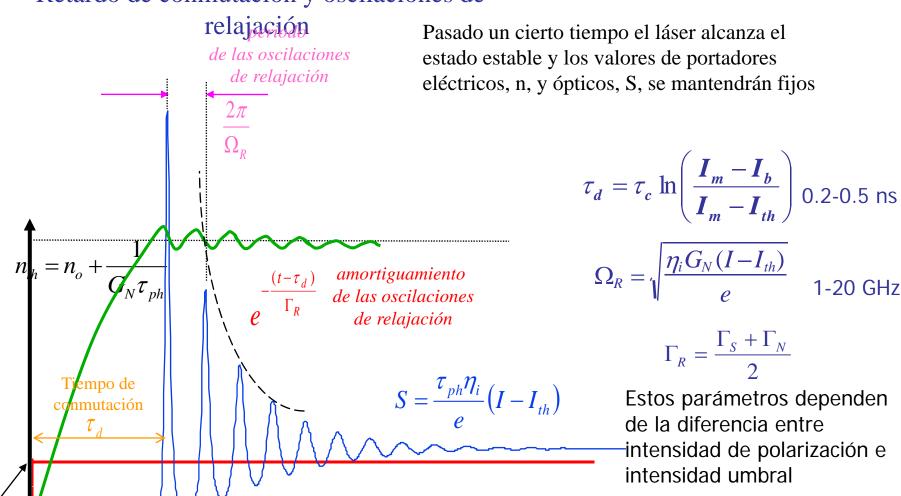
Escalón de corriente

### Ing. Telec., CC.OO.: modulación Modulación directa



### Respuesta a la modulación LD, pequeña señal

#### Retardo de conmutación y oscilaciones de



tiempo



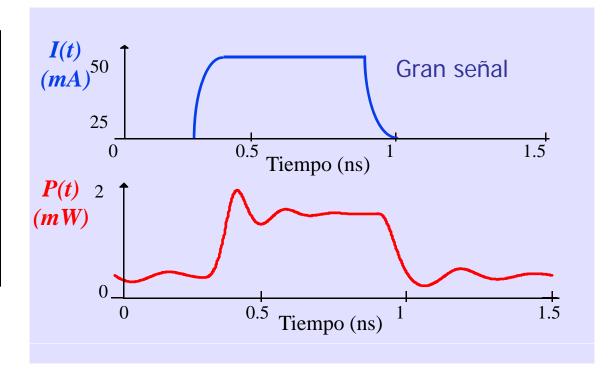
### Respuesta a la modulación en LD, gran señal

La solución analítica anterior sólo es válida para pequeña señal, es decir, para pequeñas variaciones de intensidad en torno al valor de la polarización. Para mayores excursiones en intensidad (lo habitual en señales digitales), hay que recurrir a la solución numérica de las ecuaciones de la dinámica del láser (las anteriormente indicadas junto a la que indica el cambio de la fase del campo emitido en función del tiempo)

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - \frac{n(t)}{\tau_c} - GS(t)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = GS(t) - \frac{S(t)}{\tau_{ph}} + R_{sp}$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2}G_N(n(t) - n_{th})$$





intensidad

eléctrica

potencia

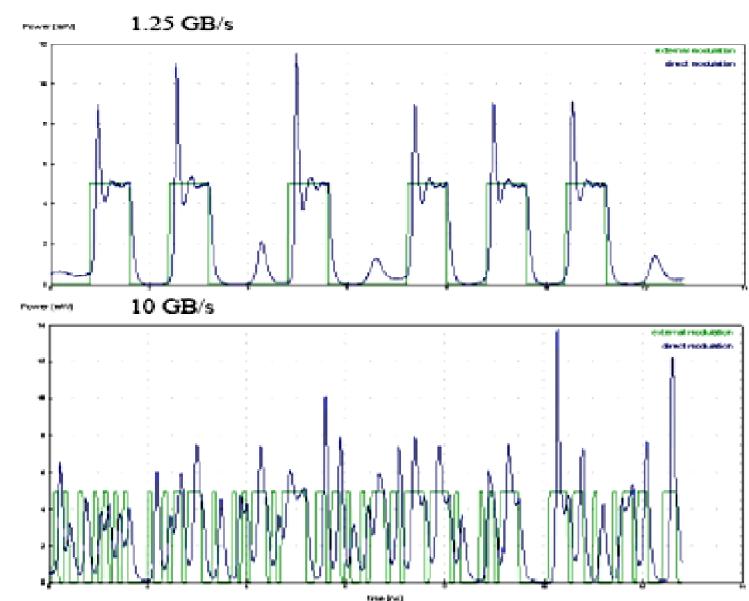
óptica

# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Modulación directa



### Respuesta a la modulación LD

#### Velocidad de modulación limitada



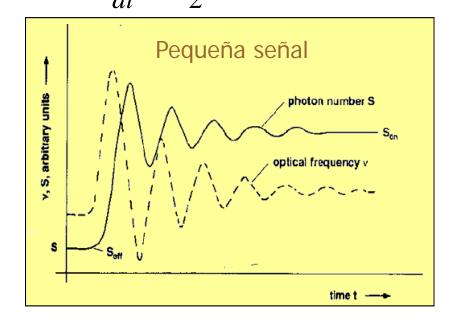




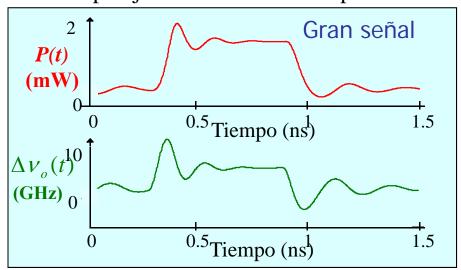
#### Respuesta a la modulación en LD, chirp

Con el aumento de portadores eléctricos debido al aumento de la intensidad de la unión p-n se produce un incremento en el índice de refracción efectivo de la zona activa, que resulta en un cambio de fase en la cavidad y por tanto en cambios en la frecuencia de emisión del láser, es decir, la modulación directa en potencia de un LD lleva aparejada una modulación parásita en

frecuencia  $\longrightarrow$  Chirp  $\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2}G_N(n(t) - n_{th})$ 



Interacción con dispersión de la fibra (tema 2.4)



$$\Delta v(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left( \frac{d(\ln S(t))}{dt} + \frac{1}{\tau_{ph}} \left[ \varepsilon_{NL} S(t) - \frac{n_{sp}}{S(t)} \right]^{0} \right)$$
Chirp transitorio
$$\Delta \text{ frec. en las transiciones} \qquad \Delta \text{ frec. al variar el nivel}$$

α: factor de ensanchamiento de línea, típ. 3.5-8

de la señal (flancos)

de la señal ("0" o "1")



40 mA 35 mA

30 mA 25 mA

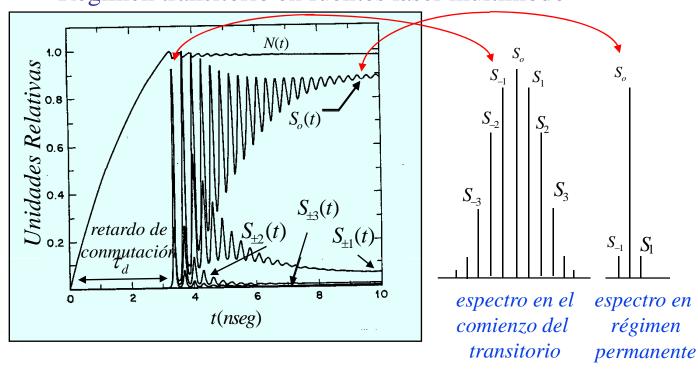
20 mA 16 mA

I = 14 mA

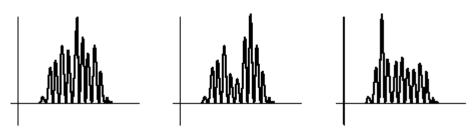
λ (nm)



### Régimen transitorio en fuentes láser multimodo



### Mode-hopping: provoca ruido de partición modal

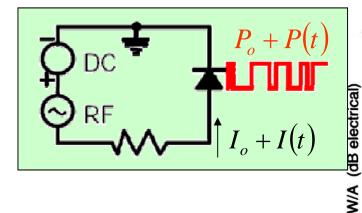


Typical Mode Hopping Behaviour in an Unguided FP Laser

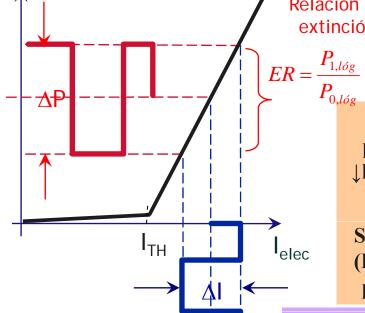




Modulación directa



P<sub>óptica</sub>



Relación de extinción

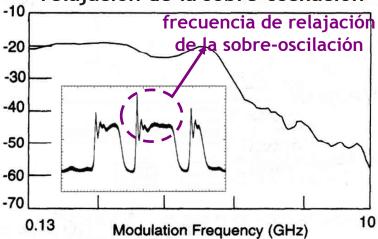
Sencilla

↑ la corriente de polarización (>I<sub>TH</sub>) **↓la sobre-oscilación,** ↑ el Bwmod, \chirp

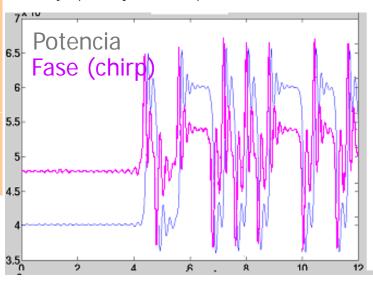
SIN EMBARGO, ER ↓↓ (BER↑↑) para la misma potencia óptica media

Se puede conseguir una ER≅ 10dB típica con chirp "controlado" hasta 2.5Gbps

BW<sub>mod</sub> limitado por la frecuencia de relajación de la sobre-oscilación



Chirp: ensanchamiento frecuencial y (+dispersión) límite BR·L

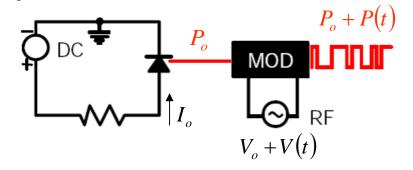




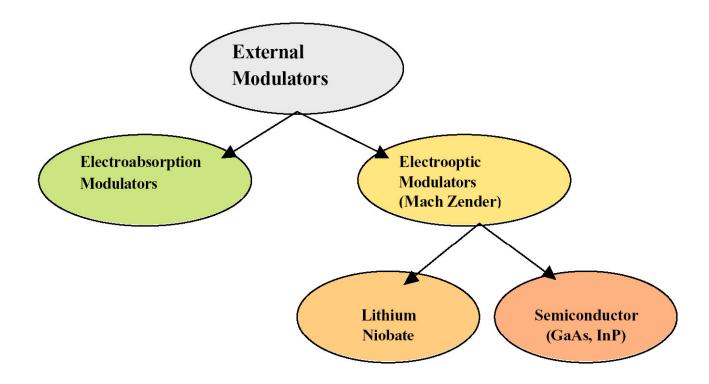
- Introducción
- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones







La modulación externa emplea la fuente de semiconductor (LD,LED) como generador de potencia óptica de frecuencia y amplitud constantes y añade un dispositivo —el modulador externo- para modificar una de las características (normalmente su amplitud) de dicha onda continua (CW)







Los moduladores electro-ópticos están basados en el efecto del mismo nombre, es decir, en el cambio en el índice de refracción de un material cuando se le aplica un campo eléctrico. Normalmente, están basados en el efecto Pockels (efecto lineal) y están hechos sobre Niobato de Litio, LiNbO<sub>3</sub>

$$\underbrace{n(E)}_{\text{Refractive Index}} = n_0 + \underbrace{a_1 E}_{\text{Linear}} + \underbrace{a_2 E^2}_{\text{Kerr}}$$

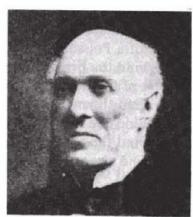
$$\underbrace{Electro - Effect}_{\text{optic}}$$

$$\underbrace{Effect}_{\text{(Pockels)}}$$

$$\underbrace{Effect}_{\text{(Pockels)}}$$



Friedrich Pockels (1865-1913) was first to describe the linear electro-optic effect in 1893.

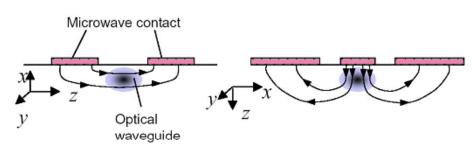


John Kerr (1824-1907) discovered the quadratic electro-optic effect in 1875.

La relación es mediante tensores, influye la dirección del campo aplicado

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} -r_{22}E_y^a + r_{13}E_z^a & -r_{22}E_x^a & r_{51}E_x^a \\ -r_{22}E_x^a & r_{22}E_y^a + r_{13}E_z^a & r_{51}E_y^a \\ r_{51}E_x^a & r_{51}E_y^a & r_{33}E_z^a \end{bmatrix}$$

Cambio local en el índice de refracción  $\Delta n_{eo} = -(n^3 r/2)E^a$ 



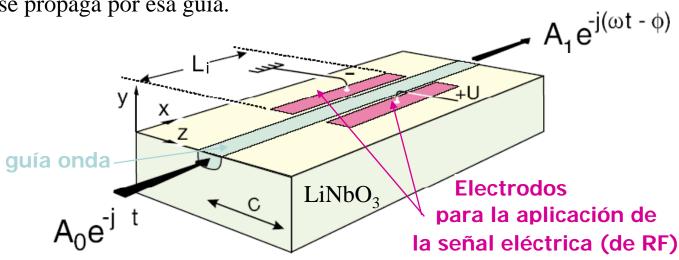
x-cut z-cut





#### Modulador EO de fase

Un modulador electro-óptico de fase se construye en una guía de LiNbO<sub>3</sub> en la que el cambio de índice de refracción producido se traduce en un cambio de fase para la onda e.m. que se propaga por esa guía.



$$\Delta n = \frac{1}{2} n_r^3 r_{33} E_z$$

$$\phi = \frac{2\pi\Delta nL_i}{\lambda_c} = \pi n_r^3 r_{33} \frac{VL_i}{d\lambda}$$

$$V_{\pi} = \frac{d\lambda}{n_r^3 r_{33} L_i}. \quad \phi = \pi \frac{V}{V_{\pi}}$$

d: distancia entre electrodos, anchura de la guía

#### Parámetros importantes:

Pérdidas de inserción  $IL=-20*log_{10}(A_1/A_0)$ 

Dependencia con la polarización de la luz entrada

Tensión de media onda,  $V_{\pi}$  (tensión eléctrica para un cambio de fase de  $\pi$  radianes)







#### MPZ-LN/MPX-LN Lithium Niobate Low frequencies to 40 GHz Phase Modulators

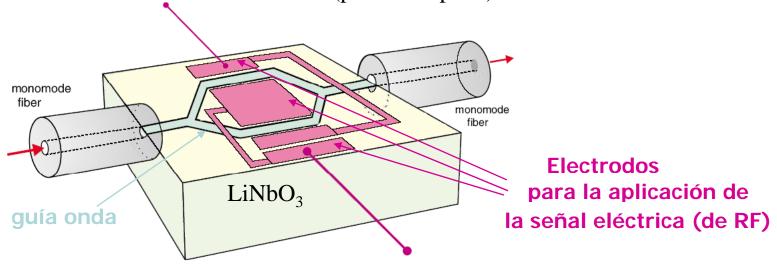
Electrical		Min	Тур	Max
MPZ-LN-10 electro-optic bandwidth S <sub>21</sub> @-3 dB	GHz	08	10	
MPZ-LN-10 V <sub>+</sub> @ 50kHz *	V		5	6
MPZ-LN-10 V <sub>π</sub> @ 10 GHz *	V		7	8
				W.
MPZ-LN-40 electro-optic bandwidth S <sub>21</sub> @-3 dB	GHz	25	32	
MPZ-LN-40 V <sub>π</sub> @ 50kHz *	V		7	8
MPZ-LN-40 V <sub>π</sub> @ 32 GHz *	V		10	12
electrical return loss S <sub>11</sub> 0- cut-off bandwidth	dB		-12	-10
ripple	dB		0.5	1
input resistance RF connector	Ω		40	7,00
Optical				
Crystal		Lithium Niobate z-cut, y-propagating		
Waveguide process	Titanium diffusion			
Insertion loss (z axis)	dB		2.5	3.5
Polarization dependant loss	dB		1	1.5
Optical return loss	dB	-45	-50	
Interfaces				
Input and output fibers		polarization maintaining 1550 nm ,		
	Panda t	Panda type, length : 1.5 meter,		
	buffer d	buffer diameter : 900 μm		
Output fiber (option)	single n	single mode type SMF 28		
		length : 1.5 meter, buffer diameter : 900 μm		
Package size	100 x 15	100 x 15 x 9.5 mm³		
Input RF connector	50 $\Omega$ Wiltron Female K type			

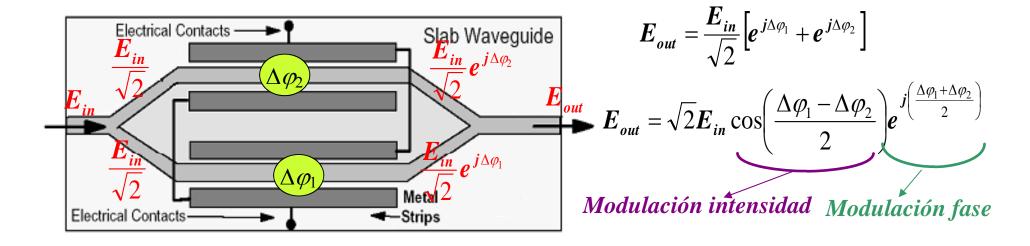




#### Modulador EO de intensidad

Un modulador electro-óptico de intensidad se construye a partir de uno (dos) mod. de fase como los anteriores y formando un interferómetro Mach-Zehnder para convertir las variaciones de fase en variaciones de intensidad (potencia óptica).

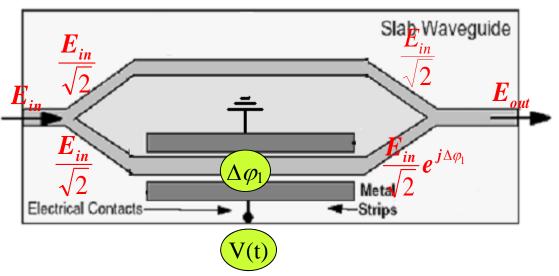








### Modulador EO de intensidad *single-drive*



$$E_{out} = \sqrt{2}E_{in}\cos\left(\frac{\Delta\varphi_1}{2}\right)e^{j\left(\frac{\Delta\varphi_1}{2}\right)} = \sqrt{2}E_{in}\cos\left(\frac{\pi}{2V_{\pi}}V(t)\right)e^{j\left(\frac{\pi}{2V_{\pi}}V(t)\right)}$$



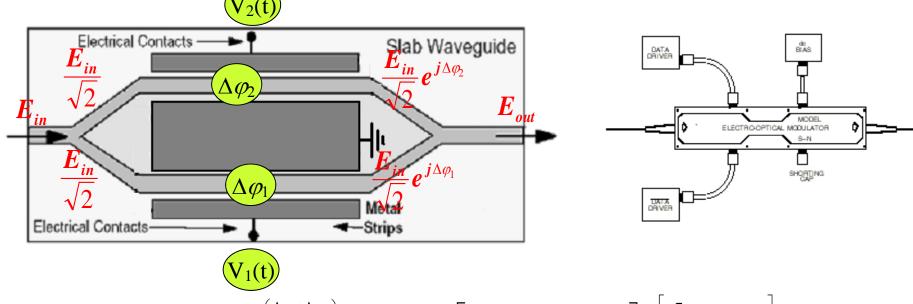
Modulación intensidad

$$P_{out} = E_{out} \cdot E_{out}^* = 2P_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi}{2V_{\pi}} V(t)\right)$$
$$\frac{d\phi}{dt} = v(t) = \frac{\pi}{2V_{\pi}} \frac{dV(t)}{dt}$$





#### Modulador EO de intensidad <u>dual-drive</u>



$$E_{out} = \sqrt{2}E_{in}\cos\left(\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2}\right)e^{j\left(\frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2}\right)} = \sqrt{2}E_{in}\cos\left[\frac{\pi}{2V_{\pi}}(V_1(t) - V_2(t))\right]e^{j\left(\frac{\pi}{2V_{\pi}}(V_1(t) + V_2(t))\right)}$$

Modulación intensidad 
$$P_{out} = E_{out} \cdot E_{out}^* = 2P_{in} \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2V_{\pi}} (V_1(t) - V_2(t)) \right]$$
Modulación fase, chirp 
$$\frac{d\phi}{dt} = v(t) = \frac{\pi}{2V_{\pi}} \frac{d[V_1(t) + V_2(t)]}{dt} \qquad \alpha = \frac{\frac{d\phi}{dt}}{1 + \frac{dP}{dt}} \approx \frac{dV_1(t) + dV_2(t)}{dV_1(t) - dV_2(t)}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = v(t) = \frac{\pi}{2V_{\pi}} \frac{d[V_1(t) + V_2(t)]}{dt}$$

$$\alpha = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{1}{2P}\frac{dP}{dt}} \approx \frac{dV_1(t) + dV_2(t)}{dV_1(t) - dV_2(t)}$$

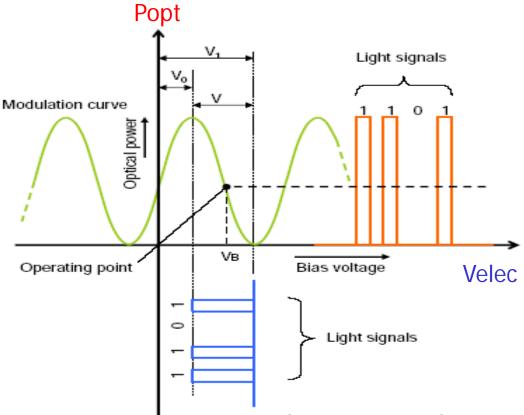
Chirp controlable: positivo, negativo, nulo





#### Modulador EO de intensidad

En todos los casos la curva Popt-Velec es de tipo cos<sup>2</sup>



- ► Necesidad de linealización de esta función de transferencia en el caso de señales analógicas
- ► ER limitada en el caso de señales digitales
- ► En ambos casos es necesario elegir adecuadamente el punto de operación, es decir, la tensión constante (de bias) aplicada al modulador





#### Modulador EO de intensidad

#### Parámetros importantes:

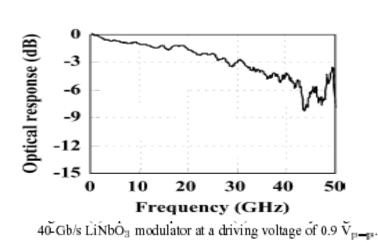
Pérdidas de inserción IL=-10\*log<sub>10</sub>(P<sub>out</sub>/P<sub>in</sub>)

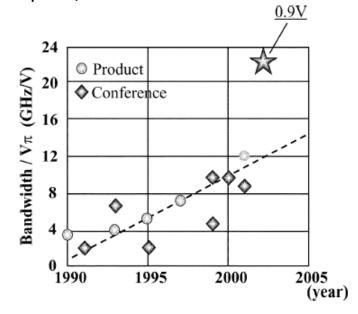
Dependencia con la polarización de la luz entrada (fibra mantenedora de polarización entre fuente semiconductor y modulador)

Chirp (single-drive, dual-drive)

Tensión de media onda,  $V_{\pi}$  (tensión eléctrica para un cambio de fase de  $\pi$  radianes)

Dependencia de  $V_{\pi}$  con la frecuencia de modulación (tipo paso-bajo por desadaptación de velocidades entre la señal eléctrica y la señal óptica)



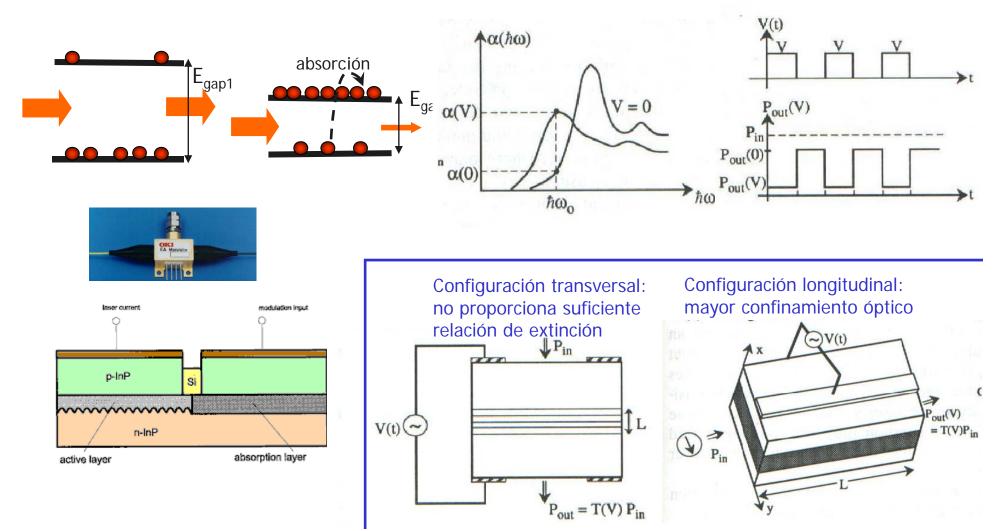






### Modulador de Electro-absorción (EAM)

Un modulador de electro-absorción se basa en el efecto Franz-Keldysh o Stark. Es decir, se basa en la disminución del gap de un semiconductor al aplicar un campo eléctrico, que hace que un material transparente pase a absorber la luz que se propaga por él

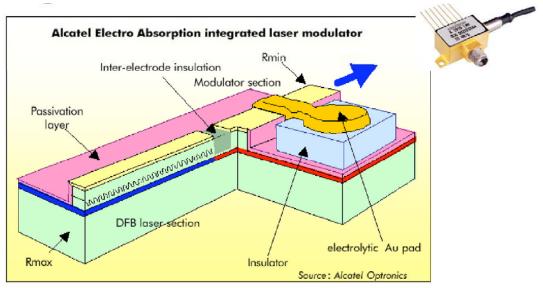






#### Modulador de Electro-absorción (EAM)

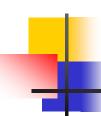
Su gran ventaja es que están hechos con los mismos materiales que los láseres de semiconductor, por ello pueden *integrarse* ambos dando lugar a soluciones compactas y de menor coste que los MEO



■ 10Gb/s module,  $I_{th} = 20mA$ ,  $P_{max} = 4mW @80mA$ , extinction ratio = 15dB for -2.5V

Sin embargo, las variaciones de la anchura del gap, es decir, las variaciones de potencia, conllevan un cambio en el índice de refracción del material, lo que se traduce en una variación de la fase. Por tanto, hay un *chirp* presente en la modulación peor que el de los MEO aunque mejor que en el caso de la modulación directa.

Permite modulaciones de hasta 40 Gbps





### Comparación entre ambos tipos de modulación externa

	Electro-absorption	Electro-optic	
Operating Principle	Change in semiconductor absorption by applying voltage	Change in the material refractive index by applying voltage	
Level of Integration	High	LiNbO₃ low – GaAs or InP high	
Chirp	Low	Very Low	
Extinction Ratio	~ 10 dB	Up to 25 dB	
Voltage (or Power)	~ 3 V	~ 7 V	
Bit rate (Gbit/s)	2.5 – 10	10 - 40	



## Ing. Telec., CC.OO.: modulación Índice



- Introducción
- Tipos (Amplitud, fase/frecuencia)
- Modulación directa
  - Características de transferencia
  - Respuesta a la modulación
  - Chirp
- Modulación externa
  - Modulador electroóptico de fase
  - Modulador electroóptico de intensidad
  - Modulador de electroabsorción
- Resumen y conclusiones



# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Resumen y conclusiones



Comparación entre las diferentes técnicas de modulación, ámbitos de aplicación de cada una de ellas

#### BANDWIDTH LIMITATIONS COMPARED.

	Power	Bandwidt h	cost,	reliability issues, coupling efficiency.	
LED*.	<1mW	5Gb/s	<£1	Good reliability. Impossible coupling into SM fibre.	
LD * FP DFB DBR	>50mW >50mW >50mW	5Gb/s 20Gb/s 10Gb/s	~100 ~£1000 ~£1000	Good reliability. Good coupling into SM fibre.	
VCSEL	<10mW	10Gb/s	~£10	Good reliability and coupling. No good devices available at 1.5um.	
EOM	>50mW	50Gb/s	£5,000	Good reliability and coupling.	
EAM *	<5mW	40Gb/s	£10,000	Good coupling. Easy to damage.	

<sup>\*</sup> including quantum-well structures



# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Resumen y conclusiones



Comparación entre las diferentes técnicas de modulación, ámbitos de aplicación de cada una de ellas

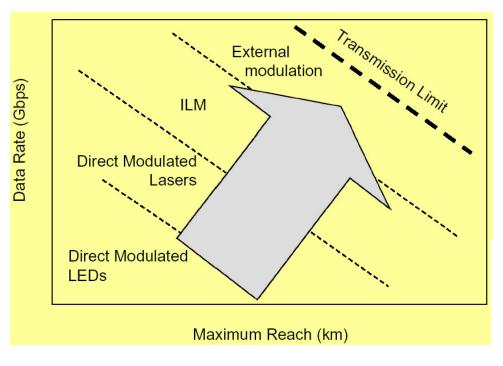
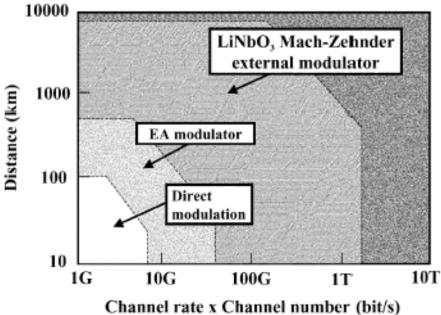


Fig. 4. Application map for optical modulators.





# Ing. Telec., CC.OO.: modulación Resumen y conclusiones



### Where to Use Lithium Niobate Modulators

Submarine		LN	LN	LN
Long Haul	2	LN EML	LN	LN
Metro/Access		DML	LN	LN
Enterprise		22.22	EML	EML
Enterprise	DML	DML	DML	
	DIVIL		EML	
THE SECOND SECON	DML	DML LN		
	622 Mb	2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s

DML: modulación directa

EML: modulación con EAM

LN: modulación con EOM

