

simplifyjarod.com

COPT

Resúmenes

Apuntes y exámenes ETSIT UPM



Si alguna vez estos
apuntes te sirvieron
de ayuda, piensa que
tus apuntes pueden
ayudar a muchas
otras personas.

Comparte tus apuntes
en [simplyjarod.com](https://www.simplyjarod.com)

COPT

Tema 1: Conceptos básicos

1. Sistemas de Comunicaciones Ópticas
2. Técnicas de Multiplexación
3. Evolución de los sistemas
4. Redes Ópticas

1. Sistemas de Comunicaciones

- Tx Óptico: convierte datos eléctricos en ópticos
(corriente eléctrica) (Potencia óptica)
- Canal: fibra: respuesta dependiente de λ
- Rx: convierte potencia óptica en corriente eléctrica
regenera la señal
- Amplificador: amplifica en el dominio óptico (no pasa a eléctrico)

velocidad de fase de la luz: $v = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
vector de onda = $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $v = \lambda \cdot \nu$; $\nu = \text{frecuencia óptica (Hz)}$
 $n = \text{índice de refracción}$

FWHM: Full Width at Half Maximum: anchura de un pulso a -3dB,
es decir, a 50% de su nivel máximo.

Anchura temporal rms = σ_t (ps)

Anchura espectral rms: $\sigma_x, \sigma_w, \sigma_\nu$ (nm, , GHz)

Constante de Planck: $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ (J}\cdot\text{s)} = h$

$E_{\text{fotón}} = h \cdot \nu$ (J) , $E_{\text{electrón}} = q \cdot V$; $1 \text{ (eV)} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (J)} = q \cdot 1V$

$E_{\text{fotón}} = \frac{h\nu}{q} \text{ (eV)} = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \text{ (eV)}$; $\mathcal{I} \text{ (W)} = N \text{ (fotones/s)} \cdot h \cdot \nu \text{ (J)}$

$P_{\text{eléctrica}} \propto P_{\text{óptica}}^2$

Modulaciones:

Habitualmente: modulaciones en amplitud: RZ, NRZ, OnOff Keying

$$P(t) = \{0, P_0\}$$

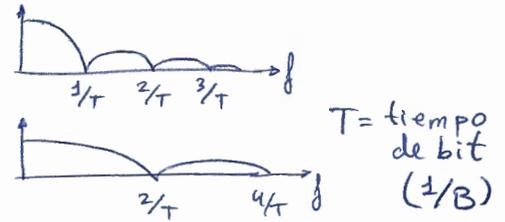
Modernamente: PSK: DPSK, QPSK, QAM

$$P(t) = P_0$$

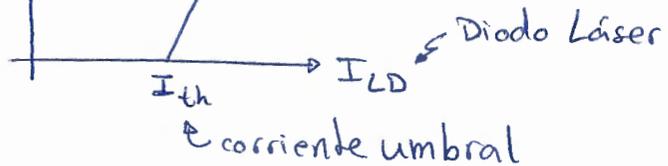
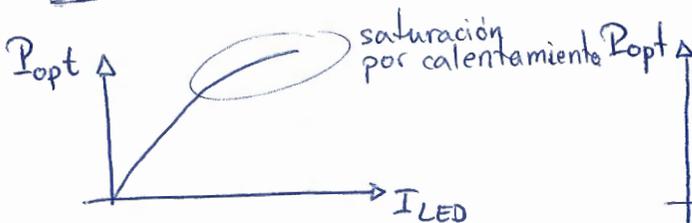
Códigos:

NRZ: Ancho de Banda = $\frac{\text{Tasa binaria}}{2}$

RZ: Ancho de Banda \approx Tasa binaria



Transmisores:



LED: $\Delta\lambda_{FWHM} = 50 - 150 \text{ nm}$

LD: $\left\{ \begin{array}{l} \text{MLM} = 1 - 5 \text{ nm} \\ \text{SLM} = 0,00001 - 0,001 \text{ nm} \end{array} \right.$

Modulación OOK en LED: $\left\{ \begin{array}{l} \text{corriente del LED conmuta entre } 0 \text{ y } I_{on} \\ \text{potencia óptica conmuta entre } 0 \text{ y } P_{on} \\ \text{si NRZ atenuada ó Manchester: } P_{LED} = \frac{P_{on}}{2} \end{array} \right.$

Modulación OOK en LD: $\left\{ \begin{array}{l} \text{LD emite potencia en ON y OFF} \\ \text{relación de extinción: } r_{ex} = \frac{P_{on}}{P_{off}} \\ \text{si NRZ atenuada ó Manchester: } P_{LD} = \frac{P_{on} + P_{off}}{2} \end{array} \right.$

Receptores: Fotodiodos (PD)

$$\text{Responsividad} = \frac{I_P}{P_{opt}} = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c} \eta(\lambda) \text{ (A/W)}$$

$$\eta(\lambda) = \frac{I_P/q}{P_{opt}/h\nu} \leq 1 \text{ (eficiencia cuántica)}$$

Tipos de Diodos:

PIN =

APD = Avalanche Photodetector

Fibra Óptica:

SM: Single Mode (monomodo) → core: $\varnothing = 8-12 \mu\text{m}$ } cladding + plástico externo
 MM: Multi Mode (multimodo) → core: $\varnothing = 50 \mu\text{m}$ }

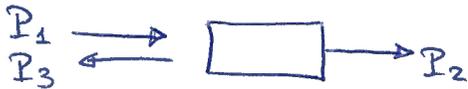
$$\text{Atenuación} = \alpha = \frac{10 \log(P(0)/P(L))}{L \text{ (km)}} \text{ (dB/km)}$$

@ 850nm	$\alpha \approx 2,5 \text{ dB/km}$
@ 1310nm	$\alpha \approx 0,3 \text{ dB/km}$
@ 1550nm	$\alpha \approx 0,2 \text{ dB/km}$

Dispersión temporal = ensanchamiento temporal de los pulsos

- ↳ Interferencia entre pulsos
- ↳ Limita la máx. tasa binaria

Componentes Pasivos:



Pérdidas de inserción: $10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$

Pérdidas de retorno: $10 \log\left(\frac{P_1}{P_3}\right) \approx 40 \text{ dB}$

→ Amplificador óptico:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

→ Regeneradores:

1R = Regeneration

2R = Regeneration and Reshaping

3R = Regeneration, Reshaping and Retiming

Balances

C_L = Channel Losses, M_S = Margen de Seguridad

De Potencias: $\text{Sensib. Rx} + C_L + M_S \leq P_{Tx} \leq P_{sat Rx} + C_L - M_S$

De tiempos: $T_{rsist}^2 = T_{rTx}^2 + T_{r fibra}^2 + T_{r Rx}^2$

$$T_{rsist} \leq \begin{cases} NRZ \Rightarrow 0,7/B \\ RZ \Rightarrow 0,35/B \\ RZdc \Rightarrow \frac{0,7 \cdot \text{ciclo trabajo}}{B} \end{cases}$$

$$T_{r fibra} = \sqrt{T_{r modal}^2 + T_{r GVD}^2}; T_{r modal} = \frac{0,44 \cdot L^2}{B_0} \leftarrow \text{factor de concentración}$$

$$T_{r Rx} = \frac{0,35}{\Delta f_{Rx}} \quad T_{r GVD} \approx |D| L \Delta f_{FWHM}$$

2. Técnicas de Multiplexación

TDM = Time Division Multiplexing (en el tiempo, eléctricamente)
OTDM = Optical TDM (en el dom. óptico)

WDM = Wavelength Division Multiplexing (equivalente a FM)

↳ WDM: onda amplia ($\Delta\lambda_{ch} > 50\text{nm}$)

↳ DWDM: onda densa ($\Delta\lambda_{ch} < 8\text{nm}$)

↳ CWDM: onda gruesa ($\Delta\lambda_{ch} = 20\text{nm}$)

PM = Multiplexación por Polarización

Tema 2: Elementos Ópticos

1. Pasivos no selectivos en λ
2. Pasivos selectivos en λ

1. Pasivos no selectivos en λ

Elemento pasivo \Rightarrow Ni genera ni detecta la señal

Conectores: $\longrightarrow \square \longrightarrow$

- FC: Fiber Connector
- SC: Snap Connector
- ST: Straight Connector
- SMA: Subminiature Assembly

tipo de contacto: $\left. \begin{array}{l} \text{PC: Physical Contact} \\ \text{APC: Angled P.C.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{PC} \\ \text{APC} \end{array}$

\hookrightarrow menor reflexión que PC pero mayores pérdidas

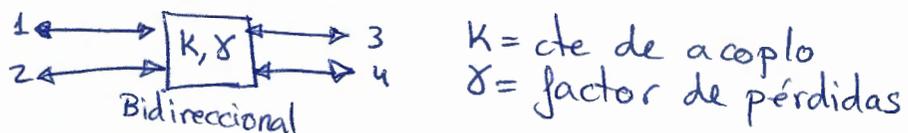
$$\text{Pérdidas de inserción} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \approx 0,5 \text{ dB}$$

$$\text{Pérdidas de retorno} = \frac{P_{in}}{P_{refl}} ; \text{ PC} \approx 40 \text{ dB}$$

$$\text{Pérdidas por Polarización} = \frac{T_{max}}{T_{min}} ; T = \text{pérdidas para todos los estados de polariz.}$$

APC $\approx 60 \text{ dB}$

Acopladores:



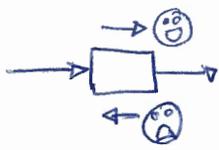
$$\text{si: } \begin{array}{l} 1 = IN \\ 3 = OUT \\ 4 = OUT \end{array} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K = \frac{P_4}{P_3 + P_4} ; 0 < K < 1 \\ \delta = 1 - \frac{P_3 + P_4}{P_1} ; \text{ ideal} \end{array} \right.$$

$$\text{Pérdidas de exceso: } \Gamma = -10 \log(1 - \delta) = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_3 + P_4}\right) \approx 0,2 \text{ dB (ideal=0)}$$

$$\text{Pérdidas de inserción: } IL = -10 \log((1 - \delta)K) = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_4}\right)$$

$$\text{Directividad: } D = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \approx 50 \text{ dB ideal } \infty$$

Aislador:



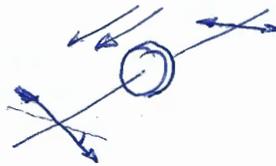
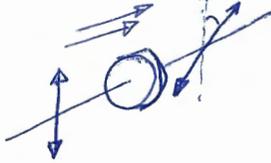
permite el paso sólo en un sentido

$$IL \approx 1 \text{ dB}$$

$$\text{Relación de aislamiento} = 10 \log \left(\frac{P_{\rightarrow}}{P_{\leftarrow}} \right) \approx 50 \text{ dB}$$

Girador de Faraday:

produce un giro en la polarización en ambos sentidos

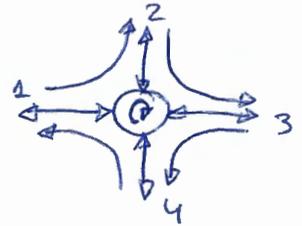


Circulador: "Aislador de 3-4 puertas"

$$IL \approx 1 \text{ dB}$$

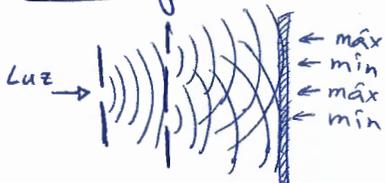
$$\text{Relación de aislamiento} \approx 40 \text{ dB}$$

sólo permite el paso a la puerta contigua:

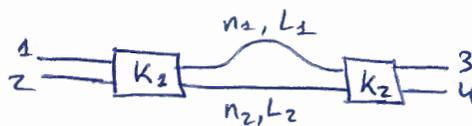


2. Pasivos selectivos en λ

Interferómetro de Young. (2 rendijas)



Mach-Zehnder:



Diferencia de fases: $\Delta\phi = k_0 (n_1 L_1 - n_2 L_2)$

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{P_4}{P_2} = \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)$$

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)$$

$$m = \frac{U}{\Delta U}$$

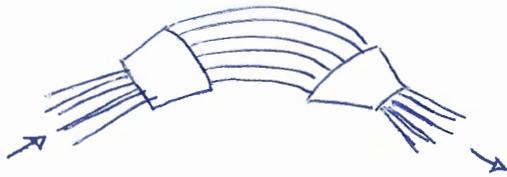
máximo: (interf. construct.) $\Rightarrow \Delta\phi = 2\pi m$; $m = \text{orden del máximo} \in \mathbb{N}?$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_m} (n_1 L_1 - n_2 L_2) \Rightarrow \begin{cases} \lambda_m = \frac{n_1 L_1 - n_2 L_2}{m} \\ \nu_m = \frac{c}{\lambda_m} \end{cases}$$

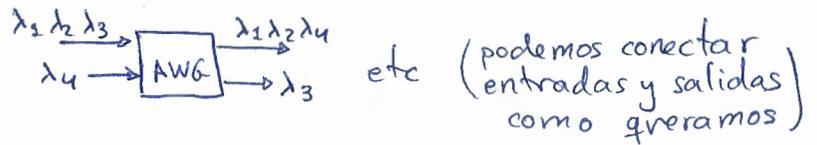
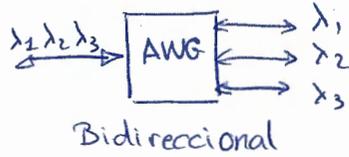
separación entre máximos: $\Delta\nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{n_1 L_1 - n_2 L_2} = \frac{c}{\text{eff}(L_1 - L_2)}$

$$\Delta\lambda = (n_1 L_1 - n_2 L_2) \frac{1}{m(m+1)}$$

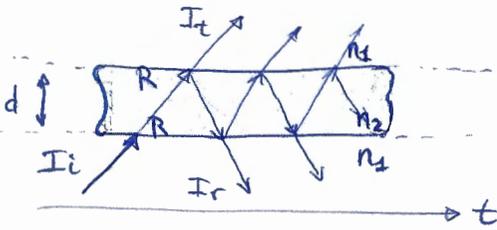
AWG: Array Waveguide Grating



N guiondas con ΔL constante
usado como MUX/DEMUX



Fabry-Perot



$$\pi = \frac{2dn_2}{c} = \text{tiempo de ida y vuelta}$$

$$\mathcal{J} = 2k_0 n_2 d = 2\pi \nu \pi = \text{desfase de ida y vuelta}$$

$$\text{interf. construct} \Rightarrow \mathcal{J} = 2\pi m$$

R = reflectividad de las capas

$$\text{Coeficiente Finesse} = F = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

$$\text{Contraste} = C = \frac{\text{máx. de } T_x}{\text{mín de } T_x} = 1 + F$$

$$\text{Rango espectral libre} = \text{FSR} = \frac{1}{\pi} = \text{separación entre máx. de tranx. consecutivos (Hz)}$$

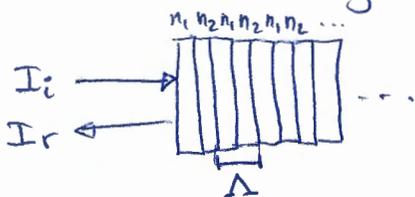
$$U_m = \frac{m}{\pi}$$

$$\text{Anchura FWHM} \Rightarrow \Delta U \approx \frac{1-R}{\pi \sqrt{R}}$$

$$\text{Fimura o Fineza} = \frac{\text{FSR}}{\Delta U} \approx \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

Reflector de Bragg: DBR

estructura con variación periódica del índice
si en Λ se desfasa 2π toda la potencia se refleja



si $N \uparrow \Rightarrow$ reflectividad $R = 1$

$$\text{anchura relativa} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_{\text{Bragg}}} \approx \frac{\Delta n_0}{n_{\text{av}}}$$

$$\text{anchura del filtro} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_{\text{Bragg}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta n_0}{n_{\text{av}}}\right)^2 + \left(\frac{2}{N}\right)^2}$$

$$\text{distancia entre canales} = \Delta \lambda = \lambda^2 \frac{\Delta U}{c}$$

n_{av} = índice de refracción promedio

Λ = periodo espacial de red

$L = N \cdot \Lambda$ = longitud de la red

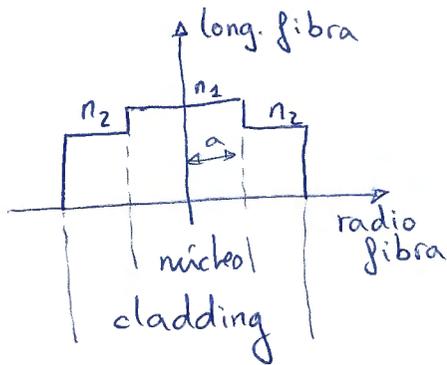
$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 n_{\text{av}} \Lambda = \lambda$ reflejada (las otras λ pasan)

Tema 3: Fibra Óptica

1. La fibra
2. Fibras monomodo
3. Atenuación
4. Dispersión temporal
5. Nomenclatura y Parámetros según ITU
6. Efectos no lineales

1. La fibra

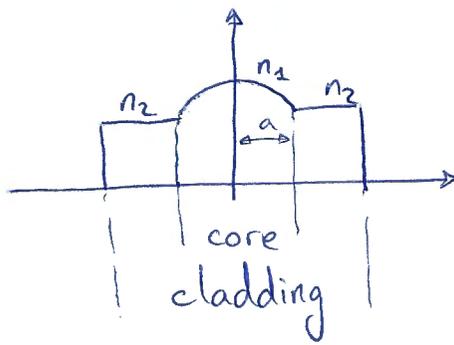
Salto de índice:



$$n = \begin{cases} n_1 & \rho < a \\ n_2 & \rho > a \end{cases}$$

$$\Delta := \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \ll 1$$

Índice gradual:



$$n = \begin{cases} n_2(r) \left[1 - \Delta \left(\frac{\rho}{a} \right)^\alpha \right] & \rho < a \\ n_2(r) (1 - \Delta) \approx n_2 & \rho > a \end{cases}$$

común $\alpha = 2$

Habitualmente: $n_1 = 1,47$, $n_2 = 1,45$

$$n_{\text{eff}} = \bar{n} = \frac{\beta(\omega)}{k_0} = n_1 \cos(\theta(\omega)); \quad 0^\circ \leq \theta(\omega) \leq \theta_c$$

NA = apertura numérica

$$\text{Frecuencia Normalizada} = V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}; \quad \text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Constante de propagación Normalizada:

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\beta(\omega)/k_0 - n_2}{n_1 - n_2}$$

$$V_{SI} = 2,405 \quad \left. \begin{array}{l} \text{si } V < 6 \Rightarrow N^\circ \text{ de modos según gráfica } b-V \\ \text{si } V > 6 \Rightarrow N = M; \end{array} \right\} \begin{array}{l} M_{SI} \approx \frac{V^2}{2} \\ M_{GI} \approx \frac{\alpha}{\alpha+2} \cdot \frac{V^2}{2} \end{array}$$

$$\text{Factor de confinamiento} = \Gamma = \frac{P_{\text{núcleo}}}{P_{\text{núcleo}} + P_{\text{cubierta}}}$$

si $V < 2,405 \Rightarrow$ monomodo

2. Fibras monomodo

$$P_{\text{total}} = P_{\text{núcleo}} + P_{\text{cubierta}}$$

$$\text{Factor de confinamiento } \Gamma = \frac{P_{\text{núcleo}}}{P_{\text{total}}} \approx 1 - e^{-2\left(\frac{a}{w}\right)^2}$$

$$\text{Diámetro del campo modal} = \text{MFD} = 2w$$

$$\text{Área efectiva} = A_{\text{eff}} = \pi w^2$$

Al aumentar la frecuencia, el modo va estando más confinado, y su índice efectivo va acercándose al núcleo.

3. Atenuación

$$\text{Atenuación} = \alpha = \frac{10 \log \left(\frac{P(0)}{P(L)} \right)}{L \text{ (km)}} \quad (\text{dB/km})$$

$$\alpha \text{ (dB/km)} = 4,34 \alpha_g \text{ (Np/km)}$$

Pérdidas por curvatura de la fibra:

$R \gg a \Rightarrow \text{Pérdidas} \propto e^{-\frac{R}{R_c}}$; $R > 5 \text{ mm} \Rightarrow$ despreciables pérdidas para fibra monomodo: $R_c = \text{Radio crítico} = 0,2 - 0,4 \text{ mm}$

4. Dispersión temporal

Tipos:

	modal (sólo en fibras MM)
	cromática (GVD)
	por modos de polarización (PMD)

Dispersión Modal: (intermodal)

$$\text{Tiempo de subida} = T_r = \frac{q \mu \cdot L^q}{B_0} ; \quad \begin{array}{l} q = \text{factor de concatenación (0,5-1)} \\ B_0 = B_w \text{ para } L = 1 \text{ km (MHz} \cdot \text{km)} \end{array}$$

Dispersión Cromática: (intramodal)

GVD = Group Velocity Dispersion

$$v_{\text{fase}} = \frac{\omega_0}{\beta_0}$$

$$v_{\text{grupo}} = \frac{1}{\beta_1}$$

$$\text{Tiempo de retardo de grupo} = T_g = \beta_1 L$$

$$\text{Ensanchamiento temporal} = \Delta T_g \Big| = \beta_2 \cdot L \cdot \Delta \omega$$

$$= D \cdot L \cdot \Delta \lambda$$

$$D = \text{Dispersión cromática} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad \left(\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right)$$

Pulso de entrada normalizado:

$$P_{in}(t) = |A(0,t)|^2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_t(0)} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\sigma_t(0)}\right)^2\right]$$

↑ anchura temporal del pulso de entrada

Respuesta al impulso:

$$h_L(t) = 10^{-\alpha L/10} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_D} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \beta_2 L}{\sigma_D}\right)^2\right]$$

$$\sigma_D = |\beta_2| \cdot L \sigma_\omega = |D| \cdot L \cdot \sigma_\lambda$$

↑ anchuras espectrales eficaces (rms) de la fuente óptica

$$\sigma_\omega = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

Pulso de salida:

$$P_{out}(t) = |A(L,t)|^2 = P_{in}(t) * h_L(t) = \dots$$

$$\sigma_t^2(L) = (\sigma_t^2(0) + \sigma_D^2) = \sigma_t^2(0) + (\beta_2 L \sigma_\omega)^2$$

↑ σ_t = anchura temporal del pulso de salida (L)

BitRate:

$$\sigma_t(L) \leq \frac{T_b}{4} \Rightarrow B \sigma_t(L) \leq \frac{1}{4}; \quad B = \text{Bitrate}$$

$$\text{como } T_r = \sqrt{2\pi} \sigma_t(L) \Rightarrow T_r \leq \frac{2,507}{4B} \approx \frac{0,7}{B} \quad \leftarrow \text{si predomina la respuesta de la fibra}$$

$$B \cdot L \leq \frac{1}{4|D| \sigma_\lambda} \quad \leftarrow \text{si predomina la dispersión}$$

Dispersión material y guía onda:

$$D = D_M + D_W$$

↑ disp. del material ↑ disp. guía onda

$$D_M \approx 122 \left(1 - \frac{\lambda_{ZDM}}{\lambda}\right) \left(\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}\right) \quad D_W \approx - \frac{\lambda}{4\pi^2 c a^2 n_1}$$

$$\lambda_{ZDM} = 1,276 \mu\text{m} \quad (\text{Zero Dispersion})$$

Dispersión diferencial = S = $\frac{dD}{d\lambda}$

$$S = \frac{4\pi c}{\lambda^3} \beta_2 + \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)^2 \beta_3 \quad D(\lambda) \approx \frac{\lambda S_{ZD}}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_{ZD}}{\lambda}\right)^4\right)$$

Dispersión temporal por modos de polarización PMD

$$\sigma_t^{\text{PMD}}(L) \approx D_p \sqrt{L} \quad ; \quad 0.01 < D_p < 2 \left(\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}} \right)$$

↑ parámetro PMD

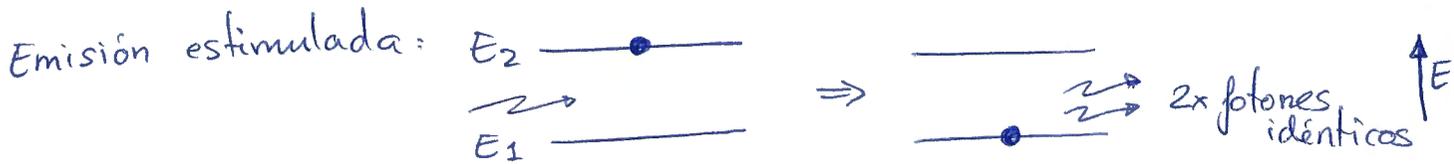
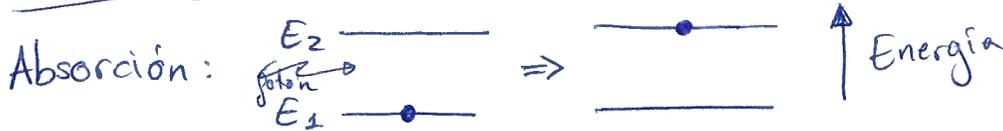
$$\sigma_t^{\text{PMD}}(L) \leq \frac{T_b}{10} \quad (\text{recomendación UIT})$$

6. Efectos no lineales

$$\text{Longitud efectiva} = L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha_f L}}{\alpha_f} \quad ; \quad \alpha \text{ (dB/km)} = 4.34 \alpha_f \text{ (Np/km)}$$

Tema 4: Transmisores Ópticos

1. Definiciones: $E = E_2 - E_1 = h\nu$



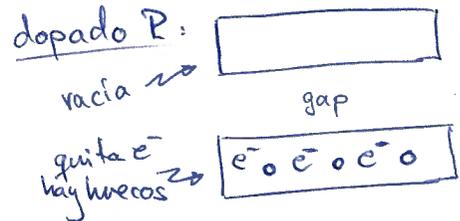
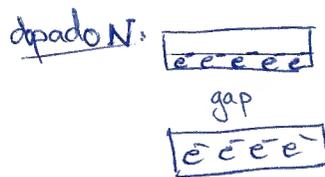
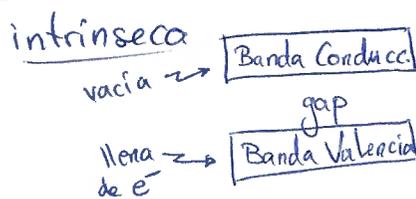
En E_1 habrá N_1 átomos o moléculas, en E_2 habrá N_2 .

Emisión Estimulada Neta = Estimulada - Absorción $\propto \rho(\nu) \cdot (N_2 - N_1)$
densidad de radiación \downarrow

ganancia $g \propto N_2 - N_1$

inversión de población $\Rightarrow N_2 > N_1 \Rightarrow g > 0$

SEMICONDUCTORES:



- Absorción (detectores) \Rightarrow un fotón mueve un e^- de $\begin{matrix} BC \\ \uparrow \\ BV \end{matrix} \Rightarrow$ se genera un e^- y un hueco
- Em. espontánea (LEDs) \Rightarrow un e^- de $\begin{matrix} BC \\ \downarrow \\ BV \end{matrix}$ rellena un hueco \Rightarrow se genera un fotón
- Em. estimulada (LDs, Amplis) \Rightarrow un fotón mueve un e^- de $\begin{matrix} BC \\ \downarrow \\ BV \end{matrix}$ rellena hueco \Rightarrow genera fotón idéntico al orig.

2. LEDs



Emisión espontánea!

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_{\text{spont}}} + \frac{1}{\tau_{\text{nr}}} ; \begin{cases} \tau_c = \text{tiempo de vida de portadores} \\ \tau_{\text{spont}} = \text{tiempo de vida espontáneo (o radiativo)} \\ \tau_{\text{nr}} = \text{tiempo de vida no radiativo} \end{cases}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{q \cdot V_{\text{act}}} - \frac{N(t)}{\tau_c} ; \begin{cases} N(t) = \text{densidad de portadores en región activa (cm}^{-3}\text{)} \\ I(t) = \text{corriente inyectada en región activa (A)} \\ V_{\text{act}} = \text{volumen de la región activa (cm}^{-3}\text{)} \end{cases}$$

Pot. op. generada internamente = $P_{\text{int}} = R_{\text{spont}} \cdot V_{\text{act}} \cdot h \cdot \nu = \frac{\tau_c}{\tau_{\text{spont}}} \cdot \frac{h\nu}{q} I$ (W)

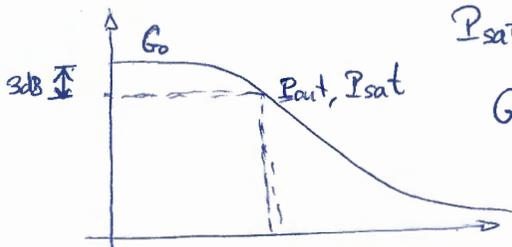
Rendimiento cuántico interno = $\eta_{\text{int}} = \frac{\tau_c}{\tau_{\text{spont}}} \approx 1 = \frac{\text{fotones generados}}{\text{fotones inyectados}}$

$P_{\text{out}} = \eta_{\text{extr}} \cdot P_{\text{int}} = \eta_{\text{extr}} \cdot \eta_{\text{int}} \frac{h\nu}{q} I = \eta_{\text{ext}} \frac{h\nu}{q} I$

Eficiencia de extracción = $\eta_{\text{extr}} = \frac{\text{fot. extraen}}{\text{fot. generados int.}} < 1\%$

$\text{FWHM}_{\mu\text{m}} = 1,45 \cdot \frac{k_B \cdot T}{\text{eV}} \cdot \lambda_{\text{peak}}^2 = \text{ancho espectral de emisión del LED} \approx 30-150 \text{ nm}$
 $= \frac{1,8 \cdot k_B \cdot T \cdot \lambda^2}{h \cdot c}$

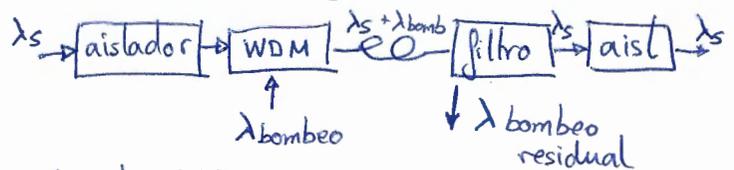
3. Amplificadores



$P_{\text{sat}} = G_0 - 3\text{dB}$

$G \approx \frac{G_0}{1 + \frac{G_0 P_{\text{in}}}{P_{\text{sat}}}}$

Amplis EDFA: gran uso, solo 3ª ventana



Amplis ASE:

en equilibrio \Rightarrow absorción $\Rightarrow G < 0$
 cuando se bombea \Rightarrow inversión $\Rightarrow G > 0$ de población

$P_{\text{out}} \leq P_{\text{in}} + \frac{\lambda_{\text{bombeo}}}{\lambda_{\text{señal}}} P_{\text{bombeo}}$

Power Conversion Efficiency = $\text{PCE} = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{bombeo}}} \approx \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{bombeo}}} \leq \frac{\lambda_{\text{bombeo}}}{\lambda_{\text{señal}}} \leq 1$

4. LDs p-n Emisión estimulada.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{q \cdot V_{\text{act}}} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \frac{v_g G(N) N_{\text{ph}}(t)}{\text{recombinación estimulada}}$$

$G(N) = \text{coef. de ganancia (cm}^{-1}\text{)}$
 $v_g = \text{velocidad de grupo}$
 $N_{\text{ph}}(t) = \text{densidad de fotones en la cavidad (cm}^{-3}\text{)}$

pérdida de fotones \propto pérdidas totales: $\alpha_{\text{tot}} = \frac{1}{\tau_{\text{ph}} \cdot v_g}$; $P_{\text{out}}(t) \propto N_{\text{ph}}(t)$

$P_{\text{out}} = \eta_{\text{slope}} (I - I_{\text{th}})$; $\eta_{\text{slope}} = \eta_{\text{pendiente (W/A)}}$

$I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}(T_{\text{ref}}) e^{\frac{T - T_{\text{ref}}}{T_0}}$; $T_0 = t^{\text{a}} \text{ característica}$

$\frac{I_{\text{th}}(T_2)}{I_{\text{th}}(T_1)} = e^{\frac{T_2 - T_1}{T_0}}$

Láser Fabry-Perot: Side Mode Supresion Ratio = $\text{SMSR} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{main mode}}}{P_{\text{side mode}}} \right)$

$2KL = 2\pi m$; $\Delta\nu = \frac{c}{n_{\text{eff}} 2L}$; $\lambda_m = \frac{n_{\text{eff}} 2L}{m}$; $\nu_m = \frac{mc}{n_{\text{eff}} 2L}$

5. Transmisores

LED, LD-FP, LD-DFB, DBR-sintonizable, VCSEL

$$P_{ON} = \eta_{slope} \cdot (I_{ON} - I_{th})$$

LED: $P_{ON}(t) = P_{ON} (1 - e^{-t/\tau_c})$

$$P_{OFF}(t) = P_{ON} e^{-t/\tau_c}$$

tiempo subida 10-90%
 $\tau_r = \ln(9) \cdot \tau_c \approx 2,2 \cdot \tau_c$; $\tau_c \approx 1-5$ ns
 Relación extinción = $10 \log \left(\frac{P_{ON}}{P_{OFF}} \right)$ (dB)

LED en p.eq. señal: $H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_c}$

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega\tau_c)^2}$$

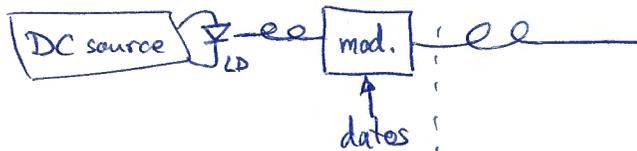
máx: 125 Mbps

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \int_{3dB} = \frac{1}{2 + \tau_c}$$

LD: tiempo de retardo o encendido: $\tau_d = 0,2 - 0,5$ ns

$$\tau_d = \tau_c \ln \left(\frac{I_{ON} - I_{OFF}}{I_{ON} - I_{th}} \right)$$

Modulación externa:



necesario en: } mod. en intensidad (OOK)
 > 2,5 - 10 Gbps

Modulador Mach-Zehnder:

Tema 5: Receptores y Sensibilidad

1. Definiciones:

$$I_p = \eta \cdot P_{in} \cdot \frac{q}{h\nu} ; \eta = \frac{\text{n}^\circ \text{ de pares } e^-h^+ \text{ generados}}{\text{n}^\circ \text{ de fotones inyectados}}$$

$\left. \begin{array}{l} \text{I corriente} \\ \text{fotodiodo} \end{array} \right\} \text{Eff. cuántica de recepción}$

$$\text{Responsividad } R = \frac{I_p}{P_{in}} = \eta \frac{q}{h\nu} \text{ (A/W)} = \eta \frac{\lambda (\mu\text{m})}{1,24 (\frac{\text{W}}{\text{A}} \mu\text{m})} = (1 - e^{-\alpha(\lambda)w}) \frac{\lambda}{1,24}$$

Coef de absorción del semiconductor: $\alpha(\lambda)$: $P_{tr} = P_{in} e^{-\alpha(\lambda)w}$, $w = \text{espesor}$

$$P_{abs} = P_{in} - P_{tr} = P_{in} (1 - e^{-\alpha(\lambda)w})$$

λ de corte = $\frac{hc}{E_g} \geq \lambda$; $E < E_{gap} \Rightarrow \text{abs} \geq 0 \Rightarrow \text{semicond. transparente}$

tiempo de subida = $T_r = \ln(9)(\tau_{tr} + \tau_{rc}) \approx 2,2 \cdot (\tau_{\text{fotodiodo}} + RC) \approx \frac{2,2}{2\pi\Delta f}$

$\Delta f = \text{ancho de banda (típico 100MHz - 20GHz)}$

2. Fotodetectores PIN y APD

Fotodiodo PIN tiene una capa intrínseca entre p y n.

Fotodiodo APD (avalancha) incrementa su responsividad con una ganancia M

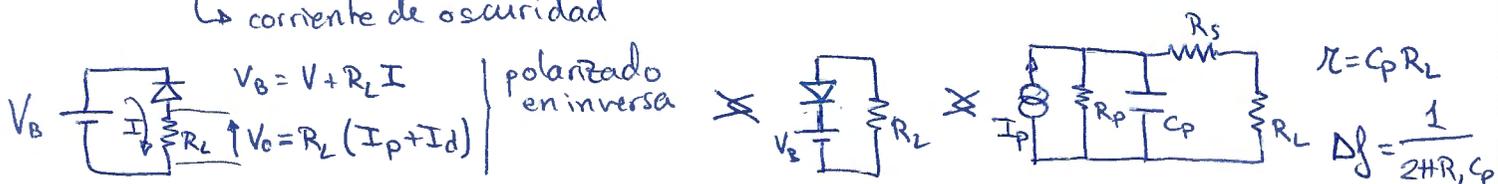
$$I_{APD} = M \cdot I_p ; R_{APD} = M \cdot R$$

3. Circuitos Receptores

Front-End: convierte P_{opt} en $P_{eléct}$ en un compromiso velocidad-sensib.

$$I = I_d \cdot (e^{qV/KT} - 1) - I_p ; I_p = R \cdot P_{in}$$

$\left. \begin{array}{l} \text{I corriente} \\ \text{de oscuridad} \end{array} \right\}$



preamplificador de transimpedancia:

Alta sensibilidad: $V_o = -I_p R_L$

Gran Ancho de Banda: $\Delta f = \frac{G}{2\pi R_L C_T}$; $C_T = C_p + C_{ampl}$

Mayor ruido

4. Ruido:

- shot o cuántico: debido a la naturaleza discreta de los fotones y e^-
- térmico: en los componentes resistivos

Ruido shot: PIN

Densidad espectral de ruido constante $\Rightarrow S_{\text{shot}}(f) = q \cdot \bar{I} = q e = q (R \cdot P_{\text{in}} + I_d)$

RMS = $\langle i_s^2(t) \rangle = \sigma_s^2 = 2q\bar{I}\Delta f$ (A^2); Δf = Ancho Banda electr. del receptor

Señal continua $\Rightarrow P_{\text{señal}} = R_L I_p^2 = R_L (R P_{\text{in}})^2$

$P_{\text{ruido shot}} = R_L \langle i_s^2(t) \rangle = R_L \cdot \sigma_s^2 = R_L 2q\bar{I}\Delta f$

Ruido shot: APD

$\bar{I}_{\text{APD}} = M(R P_{\text{in}} + I_d)$; $\sigma_s^2 = 2q M^2 F_{\text{APD}} \bar{I} \Delta f$ (A^2); $F_{\text{APD}} = 1$ si $M=1$ (PIN)
 $F_{\text{APD}} = M^x$; si $0.3 < x < 0.5$
 x factor de exceso de ruido; $G_e \Rightarrow 0.7 < x < 1$

$P_{\text{señal}} = R_L M^2 I_p^2$; $P_{\text{ruido shot}} = R_L \sigma_s^2 = R_L 2q M^2 F_{\text{APD}} \bar{I} \Delta f$

Ruido térmico: $T \neq 0$

$\langle i_T^2(t) \rangle = \sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f$ (A^2); $P_{\text{ruido térm.}} = R_L \langle i_T^2(t) \rangle = R_L \sigma_T^2 = 4k_B T \Delta f$ (W)

Ruido amplificador: $T_A = t^a$ amplificador

$\langle i_A^2(t) \rangle = \sigma_A^2 = \frac{4k_B T_A}{R_L} \Delta f$; $T + T_A = T_e = F_n T$; $F_n = 1 + \frac{T_A}{T}$

SNR Limite: por ruido térmico:

habitual PIN $\rightarrow \frac{S}{N} = \frac{R_L R^2 P_{\text{in}}^2}{4k_B T F_n \Delta f} M^2$
 $(\sigma_T^2 \gg \sigma_s^2)$

por ruido shot: $(\sigma_s^2 \gg \sigma_T^2)$

$\frac{S}{N} = \frac{R P_{\text{in}}}{2q F_{\text{APD}} \Delta f}$ ($I_p \gg I_d$)
 \leftarrow habitual APD

5. Ruido en amplis ópt.

$S_{\text{spontánea}}(\nu) = h\nu n_{\text{spont}}(G(\nu) - 1)$ (W/Hz); $n_{\text{sp}} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} > 1$ (factor de inversión de población)

Pot. ASE $\approx S_{\text{sp}}(\nu) \Delta\nu_{\text{opt}}$ (W)

$F_n = \frac{\text{SNR}_{\text{in}}}{\text{SNR}_{\text{out}}} \approx 2n_{\text{sp}}$ $F_n^{\text{ideal}} = 2 = 3\text{dB}$

6. Sensibilidad

$$BER = \frac{\text{no pulsos erróneos}}{\text{no pulsos enviados}} = p(1) \cdot P(0/1) + p(0) \cdot P(1/0)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{ruido térmico} \rightarrow \text{gausiana } \bar{i}_T = 0, \sigma_T^2 \\ \text{ruido shot} \rightarrow \text{poisson } \bar{i}_S = 0, \sigma_S^2 \end{array} \right\} \sigma^2 = \sigma_S^2 + \sigma_T^2$$

$$BER = \frac{1}{4} \left[\text{erfc} \left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma \sqrt{2}} \right) + \text{erfc} \left(\frac{I_0 - I_1}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right] = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{Calidad del bit} = Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} ; Q > 4 \Rightarrow BER \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-Q^2/2}}{Q}$$

$$Q = 6 \Rightarrow BER = 10^{-9}$$

$$\text{Sensibilidad sin amplif.} = \overline{P}_{\text{recib. NRZ ER} \rightarrow \infty} = \frac{Q}{R} \left(\underbrace{q F_{\text{APO}} Q \Delta f}_{\text{shot}} + \underbrace{\frac{\sigma_T}{M}}_{\text{term.}} \right)$$

$$\text{Sensibilidad con preamplif.} = \overline{P}_{\text{AO in}} = h \nu 2 n_{\text{sp}} \Delta f \left(Q^2 + Q \sqrt{\frac{\Delta \nu_{\text{opt}}}{\Delta f}} \right)$$

$$\text{Limite de fotodetección} \Rightarrow P(\text{recibir } n \text{ fotones}) = \frac{e^{-\bar{n}} \bar{n}^n}{n!} ; \text{ si } n \gg \bar{n} \Rightarrow P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{n}}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\bar{n}}}$$

$$BER = \frac{1}{2} e^{-\bar{n}} ; \bar{n} = 20 \Rightarrow BER \approx 10^{-9}$$

7. Complementos

$$\text{Penalizaciones de potencia: } \mathcal{D}(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P \text{ incrementada por degradación}}{P \text{ original sin degradación}} \right)$$

$$P_{\text{emisor}} \geq P_{\text{min rx}} + C_L + M_S + \sum \mathcal{D}$$

(sensib.) ($\alpha \cdot L + \text{correct.}$)

$$\text{rel. ext. } \infty \Rightarrow \mathcal{D}_{\text{ext}} = 10 \log \left(\frac{r_{\text{ex}} + 1}{r_{\text{ex}} - 1} \right)$$

$$\mathcal{D}_{\text{dispersión}} = 10 \log \left(\frac{\sigma_x(L)}{\sigma_x(0)} \right)$$

$$\mathcal{D}_{\text{diafonía}} = 10 \log(1 + X) ; X = \sum_{n \neq m}^N T_{mn} ; X = \text{fracción de } P \text{ fugada en 1 ch desde todos los otros canales}$$

$$\text{Diseño en transparencia} \Rightarrow P_{\text{out}} = P_{\text{in}} = c h \nu$$

$$G = \alpha \cdot L$$