UPC · telecom BCN · Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona · UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA DEPARTAMENT DE TEORIA DEL SEÑYAL Y COMUNICACIONS	**Comunicaciones Ópticas** 23 de juny 2010 Data notes provisionals: 30 de juny Període d'al.legacions: 30 juny – 1 juliol Data notes revisades: 2 de juliol

Professors: Joan M. Gené, Sergio Ruiz Moreno, MªJosé Soneira

Informacions addicionals:

- Durada de la prova: 2 hores .
- Les respostes dels diferents exercicis s'entregaran en fulls separats.

Ejercicio 1 (30%)

Las fuentes ópticas más utilizadas en comunicaciones por fibra óptica son el diodo emisor de luz (LED) y el diodo láser (DL). Sin embargo, ambos tipos tienen características bien diferenciadas.
a) Explicar las diferencias más importantes en la característica luz/corriente de estos dos tipos de fuentes semiconductoras.
b) A ambas fuentes se les aplica un escalón de corriente de nivel inferior 0 y superior I. Deducir el tiempo de respuesta de cada una de ellas.
c) En la situación del apartado anterior, explicar con ayuda de gráficas el comportamiento dinámico de ambas fuentes comentando las diferencias entre ellas.

Ejercicio 2 (30%)

Se pretende estudiar un conjunto formado por un amplificador óptico, una sección de fibra óptica y un fotodiodo PIN (en este orden). Para ello se inyectan bits ópticos ideales de formato NRZ cuyo número medio de fotones vale $\langle n \rangle$ o 0.

Las ecuaciones que caracterizan el amplificador óptico para la esperanza y varianza a su salida son

$$\langle m \rangle \approx G\langle n \rangle + G\rho$$

$$\sigma_m^2 \approx G^2(\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + G\langle n \rangle + G\rho + 2\rho G^2\langle n \rangle + \rho^2 G^2$$

donde G, $\langle n \rangle$>>1 y ρ es el parámetro de emisión espontánea. Se sabe que A es la relación de potencias salida/entrada del tramo de fibra, que η es la eficiencia cuántica del PIN y que se pueden despreciar la corriente de oscuridad y el ruido térmico. Utilizando las ecuaciones dadas,
a) deducir las ecuaciones estadísticas que caracterizan un conjunto formado por una sección de fibra y un PIN.
b) Calcular la esperanza y la varianza del número de fotoelectrones a la salida del conjunto amplificador-fibra-PIN.
c) Calcular, aproximadamente, la relación señal-ruido (SNR) y el factor Q.
d) Deducir, con el criterio que se considere oportuno, bajo qué condiciones es mejor el uso de un amplificador óptico.

Ejercicio 3 (test ,40%)

1. Es pretén dissenyar una fibra òptica de salt d'índex que presenti un comportament monomode tant a segona com a tercera finestres. Si es demana que el diàmetre del nucli sigui de 50 micres, determineu la condició que haurà de complir l'angle d'acceptació resultant:

   a) $\theta_a < 0.57^o$ b) $\theta_a < 1.15^o$ c) $\theta_a < 1.36^o$ d) $\theta_a < 2.72^o$

2. Determineu les pèrdues en dB associades a una transició ideal de la fibra 1 a la fibra 2 amb uns radis del nucli $a_1 > a_2$, un mateix índex de refracció del nucli n_1 i uns índex de refracció del revestiment $n_{2,1}$ i $n_{2,2}$ a partir de la definició de freqüència normalitzada V:

   a) $20\log(V_1/V_2)$ si $n_{2,1} < n_{2,2}$ b) $10\log(V_1/V_2)$ si $n_{2,1} < n_{2,2}$
   c) $20\log(V_1/V_2)$ si $n_{2,1} > n_{2,2}$ d) $10\log(V_1/V_2)$ si $n_{2,1} > n_{2,2}$

3. Es connecten dues fibres exactament iguals i perfectament alineades que tenen un radi del nucli a i una obertura numèrica $NA = \sqrt{2} - 1$. Les pèrdues degudes exclusivament a la distància de separació entre elles (D) seran del 50% si (assumiu n_0=1):

   a) $D = a$ b) $D = \sqrt{2}a$ c) $D = 2a$ d) no és possible

4. Determineu l'eficiència d'acoblament de la potència òptica emesa des d'una font puntual envers una fibra de salt d'índex amb obertura numèrica NA=0.2 i índex de refracció del nucli n_1=1.5. La font radia en un únic sentit de l'espai de la forma $\cos^5(\theta)$ i l'índex de refracció de l'ambient és n_0=1. Suposeu que la font està a molt poca distància de la fibra:

   a) -0.7 dB b) -9.6 dB c) -14.5 dB d) -23.4 dB

5. El que limita la màxima distància de transmissió d'un sistema de comunicació per fibra òptica (sense amplificadors intermitjos) podem dir que:
   a) És la dispersió quan la velocitat de transmissió és baixa i és l'atenuació en cas contrari.
   b) És l'atenuació quan la velocitat de transmissió és baixa i és la dispersió en cas contrari.
   c) És sempre l'atenuació.
   d) És sempre la dispersió.

6. Es pretén transmetre un senyal modulat en intensitat en format NRZ de R_b [bits/s] per una fibra monomode amb un paràmetre de dispersió cromàtica D [s/m^2]. Considerant que la funció de transferència de la fibra és gaussiana i que l'amplada espectral òptica del senyal a transmetre és $\Delta f = 2R_b/\pi$ [Hz], quina serà la màxima distància de transmissió?:

   a) $\sqrt{\ln 2}/\left(D R_b^2 \lambda^2/c\right)$ b) $\sqrt{\ln 2}/\left(D R_b^2\right)$ c) $\sqrt{\ln 2}/\left(2D R_b^2 \lambda^2/c\right)$ d) $\sqrt{\ln 2}/\left(2D R_b^2\right)$

7. Una fibra monomode presenta un paràmetre de dispersió del material D_m = -10 ps/(nm·km) a la freqüència de treball. Es transmet un senyal NRZ de 50 Mb/s, procedent d'un LED ($\Delta\lambda$=50nm), per 10 Km d'aquesta fibra i es mesura un eixamplament dels bits d'un 50%. Trobeu el valor del paràmetre de dispersió de guia-ona en ps/(nm·Km).

   a) -10 b) 0 c) 10 d) -20

8. Determineu la màxima distància de transmissió d'un senyal NRZ ideal a R_b [bit/s] amb una potència òptica mitjana (temporal) P_T per una fibra amb un paràmetre d'atenuació α [dB/Km] si es disposa d'un receptor ideal (límit quàntic) i es demana una probabilitat d'error de 10^{-9}.

   a) $10/\alpha \cdot \log\left(P_T/\left(10 \cdot hf \cdot R_b\right)\right)$ b) $10/\alpha \cdot \log\left(P_T/\left(18 \cdot hf \cdot R_b\right)\right)$
   c) $10/\alpha \cdot \log\left(P_T/\left(10 \cdot hf \cdot 2R_b\right)\right)$ d) $10/\alpha \cdot \log\left(P_T/\left(18 \cdot hf \cdot 2R_b\right)\right)$

9. En un procés de detecció directa emprant un fotodiode PIN:
   a) Sempre domina el soroll tèrmic
   b) Sempre domina el soroll shot
   c) Quan la potència òptica del senyal és elevada domina el soroll tèrmic mentre que quan la potència és reduïda domina el soroll shot
   d) Quan la potència òptica del senyal és reduïda domina el soroll tèrmic mentre que quan la potència és elevada domina el soroll shot

10. Assenyaleu la relació que hi ha entre la variància adimensional del número d'electrons per bit σ_e^2 i la variància de fotocorrent σ_i^2, després del procés de fotodetecció:

    a) $\sigma_e^2 = \sigma_i^2 \left(T_b/q\right)^2$ b) $\sigma_e^2 = \sigma_i^2 \left(q/T_b\right)^2$ c) $\sigma_e^2 = \sigma_i^2 \left(T_b/q\right)$ d) $\sigma_e^2 = \sigma_i^2 \left(q/T_b\right)$

11. La sensibilitat d'un receptor ideal operant a λ=0.87 μm és - 36 dBm. Quina és la sensibilitat a 1.55 μm si la velocitat de transmissió es manté constant ?:

    a) -33.5 dBm b) -35.3 dBm c) -35.8 dBm d) -38.5 dBm

12. Sigui un fotodiode APD amb factor de soroll en excés $F(M) = M^x$ i corrent de foscor menyspreable. Obteniu el valor del guany de multiplicació M òptim per a que la relació senyal a soroll màxima estigui únicament 10 dB per sota de la relació senyal a soroll del límit quàntic:

    a) $M_{OPT}^x = 20\eta/(x+2)$ b) $M_{OPT}^x = 10\eta/(x+2)$ c) $M_{OPT}^x = 20\eta/(x+1)$ d) $M_{OPT}^x = 10\eta/(x+1)$

13. En un receptor òptic el fotodiode APD, amb factor de soroll F(M) = M i corrent de foscor menyspreable, s'ha optimitzat per tal de maximitzar la SNR quan la potència òptica rebuda és P. Si la potència òptica passa de manera sobtada a ser 2P, determineu la variació que ha experimentat la SNR.

    a) -3.8 dB b) -8.3 dB c) 3.8 dB d) 8.3 dB

14. En un enllaç per fibra òptica (α=0.2 dB/km) amb un receptor ideal, el transmissor emet polsos òptics ideals de $\langle n_1 \rangle = 10^4$ i $\langle n_0 \rangle = 10^2$ fotons per al bit "1" i "0" respectivament. Si s'exigeix un factor de qualitat Q=9, quina és la màxima longitud permesa de l'enllaç ?

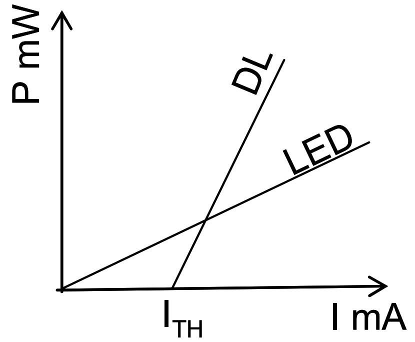
    a) 50 Km b) 100 Km c) 150 Km d) 200 Km

15. Un fotodetector PIN (soroll tèrmic i corrent de foscor menyspreables) rep una potència P_1 per al bit "1" i $P_0 = 0$ per al bit "0" per a garantir un factor de qualitat Q . Determineu l'increment en la potència òptica rebuda necessària si s'afegeix un corrent de foscor que incrementa un 50% el nivell de corrent dels "1".

    a) 2.9 dB b) 3.8 dB c) 5.7 dB d) 7.6 dB

Solución ejercicio 1:

a) la característica luz/corriente de una fuente óptica semiconductora es la representación gráfica de la potencia óptica emitida por la fuente en régimen estacionario y la corriente. Para un LED y un DL son, idealmente:



La diferencia fundamental entre las características L-I de ambas fuentes está en el valor umbral de la corriente en el DL a partir del cual el DL oscila emitiendo luz de emisión estimulada y la potencia óptica crece linealmente con la corriente. Por debajo de este valor (I_{TH}) el DL no oscila y no funciona como un láser.

b) Si $I<I_{TH}$ el DL opera como un LED y su tiempo de respuesta se define como el tiempo de subida del 10% al 90% del valor final de la salida (o de la densidad de portadores).
Si $I>I_{TH}$ el DL oscila, y con el escalón de corriente aplicado su tiempo de respuesta se define como el tiempo que tarda la densidad de portadores en alcanzar su valor umbral, N_{TH}.
Para obtener el tiempo de respuesta de cualquiera de las fuentes hay que resolver la ecuación de ritmo (para la densidad de portadores) del LED:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qVol} - \frac{N(t)}{\tau_s} \rightarrow N(t) = \tau_s \frac{I}{qVol}(1 - e^{-t/\tau_s})$$

En general,

$t=t_f \rightarrow N=N_f \rightarrow N_f = \tau_s \frac{I}{qVol}(1 - e^{-t_f/\tau_s}) = N(1 - e^{-t_f/\tau_s})$ siendo N el valor en régimen estacionario de la densidad de portadores para el nivel superior de corriente I.

$$t_f = \tau_s \ln \frac{N}{N - N_f}$$

<u>**LED:**</u> $t_r = t_s = t_{90\%} - t_{10\%} = \tau_s \ln 9$

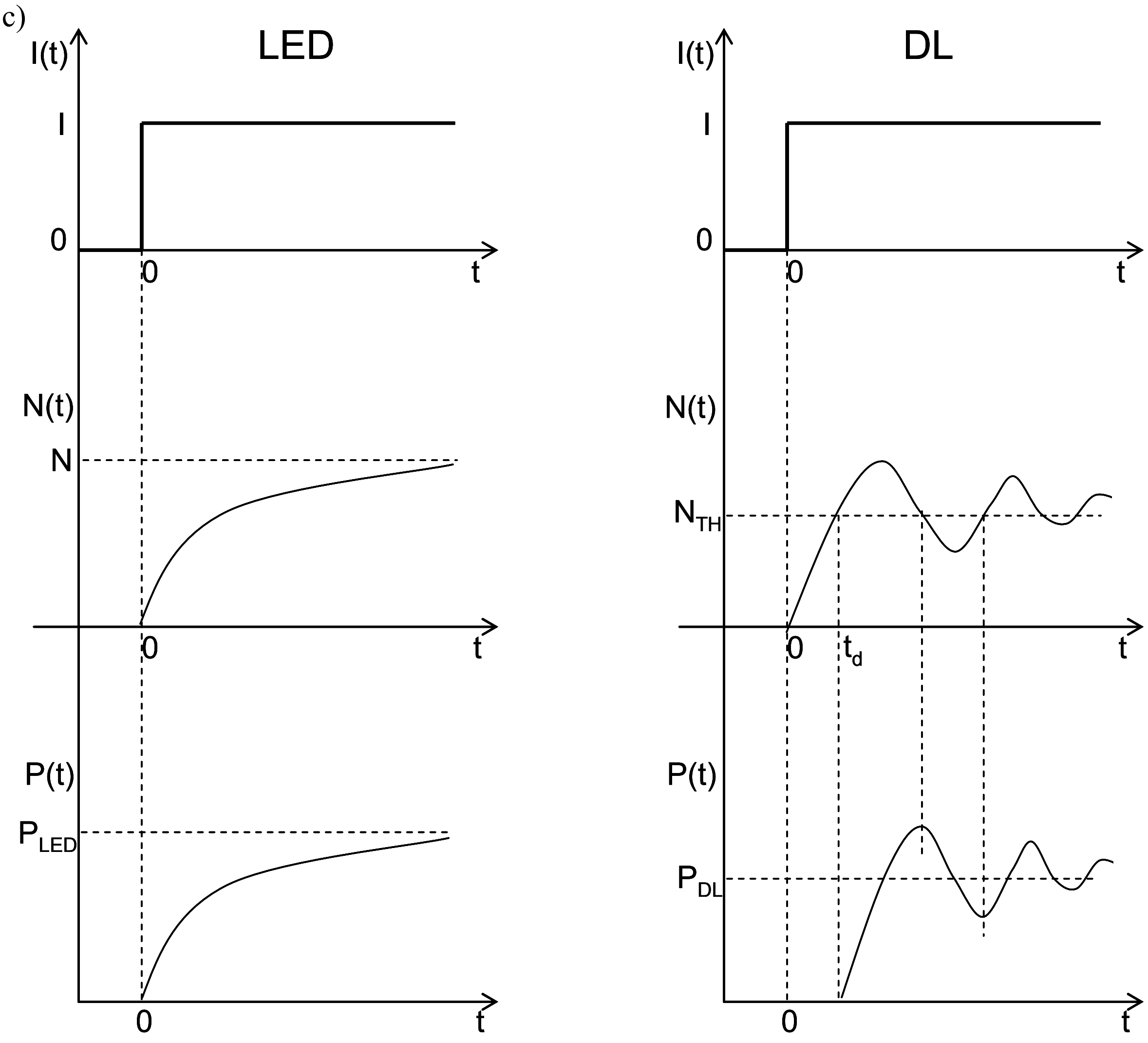
<u>**DL:**</u>

$$t_r = t_d \rightarrow N = N_{TH}$$

$$t_d = \tau_s \ln \frac{N}{N - N_{TH}} = \tau_s \ln \frac{I}{I - I_{TH}}$$

$$N_{TH} = \tau_s \frac{I_{TH}}{qVol}$$

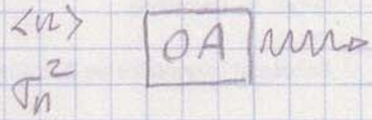
c)



En el LED la potencia óptica crece exponencialmente, con constante de tiempo τ_s, igual que la densidad de portadores.
En el DL, al producirse el salto en la corriente, la densidad de portadores crece y, eventualmente, excede el valor de N_{TH}. Para $N>N_{TH}$ la densidad de fotones y, por tanto, la potencia óptica a la salida aumenta rápidamente superando el valor final estable P_{DL}. La elevada densidad de fotones produce un alto consumo de portadores y estos comienzan a disminuir hasta caer por debajo de N_{TH}. Para $N<N_{TH}$ la densidad de fotones y, por tanto, la potencia óptica decrece rápidamente y los portadores pueden volver a crecer. Este proceso se repite dando lugar a oscilaciones amortiguadas (ringing del láser) alrededor de los valores finales estables de la densidad de portadores, N_{TH}, y de la potencia, P_{DL}.

Ejercicio 2º

Ecuac. Ampl. Optico $\qquad G \gg 1$



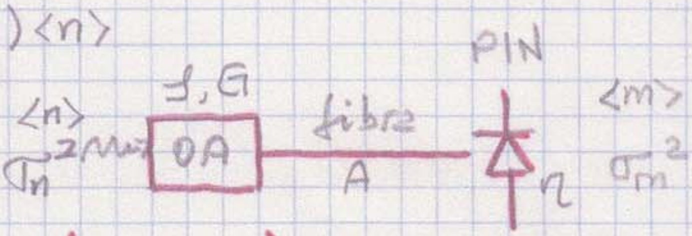
$$① \begin{cases} \langle m_1 \rangle = G\langle n \rangle + G\mathcal{f} \\ \sigma_1^2 \approx G^2(\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + G\langle n \rangle + \mathcal{f}G + 2\mathcal{f}G^2\langle n \rangle + \mathcal{f}^2G^2 \end{cases}$$

$$⓪ \begin{cases} \langle m_0 \rangle \simeq G\mathcal{f} \\ \sigma_0^2 \approx \mathcal{f}G + \mathcal{f}^2G^2 \end{cases}$$

Sección amp. - fibra + PIN :

$$① \begin{cases} \langle m_1 \rangle \simeq \eta A G \langle n \rangle \\ \sigma_1^2 \simeq \eta A G (\eta A G 2\mathcal{f} + 1)\langle n \rangle \end{cases}$$

$$⓪ \begin{cases} \langle m_0 \rangle = \eta A G \mathcal{f} \\ \sigma_0^2 = \eta^2 A^2 \mathcal{f}^2 G^2 \end{cases}$$



a) $\underset{\langle n \rangle \to \infty}{SNR_{OUT}} \simeq \dfrac{\langle n \rangle}{2\mathcal{f} + 1/\eta A G} \Longrightarrow$ (con térmico) $\dfrac{\langle n \rangle}{2\mathcal{f} + \frac{1}{\eta A G} + \frac{\sigma_p^2}{\eta A G}}$

b) $\underset{\langle n \rangle \to \infty}{Q} \approx \left(\dfrac{\langle n \rangle}{2\mathcal{f} + 1/\eta A G} \right)^{1/2}$

Seccion fibra - PIN :

$$① \begin{cases} \langle m_1 \rangle = \eta A \langle n \rangle \\ \sigma_1^2 = \eta A \langle n \rangle \end{cases}$$

$$⓪ \begin{cases} \langle m_0 \rangle = 0 \\ \sigma_0^2 = 0 \end{cases}$$

a) $SNR_{OUT}^{*} = \eta A \langle n \rangle$

b) $Q^{*} = (\eta A \langle n \rangle)^{1/2}$

Ej. 2º (cont.)

Comparativa CON / SIN : $G \gg 1$; $\langle n \rangle \gg 1$

a) $SNR_{OUT} > SNR^*_{OUT} \Rightarrow \dfrac{\langle n \rangle}{2f + 1/\eta AG} > \eta A \langle n \rangle \Rightarrow$

$\Rightarrow 2f + \dfrac{1}{\eta AG} < \dfrac{1}{\eta A} \Rightarrow 2f < \dfrac{1}{\eta A}\left(1 - \dfrac{1}{G}\right) \approx \dfrac{1}{\eta A}$

O bién, $\eta A < \dfrac{1}{2f} \Rightarrow A < \dfrac{1}{2f\eta} < \dfrac{1}{2f} \Rightarrow A < \dfrac{1}{2f}$

b) $Q > Q^* \Rightarrow \dfrac{1}{2f + 1/\eta AG} > \eta A \Rightarrow$ ident. conclus.

c) $Q \geq Q_0 \Rightarrow \dfrac{\langle n \rangle}{2f + 1/\eta AG} \geq Q_0^2 \Rightarrow \langle n \rangle \geq Q_0^2 \left(2f + \dfrac{1}{\eta AG}\right)$

d) $Q^* \geq Q_0 \Rightarrow \eta A \langle n \rangle \geq Q_0^2 \Rightarrow \langle n \rangle \geq \dfrac{Q_0^2}{\eta A}$

Ejemplo: $\left\{ \begin{array}{l} \eta = 1 \\ A = 10^{-2} \\ f = 2 \\ G = 1/A \end{array} \right\}$

c) $\Rightarrow \langle n \rangle \geq 5\, Q_0^2$

d) $\Rightarrow \langle n \rangle \geq 100\, Q_0^2$