

Professors: Joan M. Gené, Sergio Ruiz Moreno, M^aJosé Soneira

Informacions addicionals:

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

Ejercicio 1 (25%)

Una fibra òptica de salto de índex amb un diàmetre del nucli de 50 μm ha estat dissenyada amb una dispersió modal limitada a 35 ns/Km i té un índex de refracció del revestiment de 1,45.

- Calcular la seva apertura numèrica.
- Calcular el seu angle d'acceptació màxim.
- Calcular la seva apertura numèrica i l'angle d'acceptació màxim d'una fibra igual a la anterior però amb un diàmetre del nucli de 62,5 μm .
- Calcular el nombre de modes de propagació aproximat que presenta aquesta fibra operant a 0,88 μm .
- Si la potència òptica al cap de 450 m de longitud d'aquesta fibra és un 70% del valor inicial injectat, calcular les pèrdues de la fibra en dB/Km.
- ¿Quin és el ritme màxim de bit per a una senyal NRZ tolerada per 500 m d'aquesta fibra?
- Calcular el radi del nucli perquè aquesta fibra tingui un comportament monomode a 1,55 μm .
- Suposant que el diàmetre de la fibra monomode fos de 5 μm , calcular la seva longitud d'ona de tall.

Ejercicio 2 (30%)

De manera experimental i aproximada s'ha observat que la ganància en potència d'un cert amplificador òptic semiconductor de ona progressiva respon a la relació $G_S(\text{dB}) \approx 200I$, on I és la corrent injectada (bombament) i G_S la ganància expressada en dB. El conjunt amplificador-filtre òptic (amplada de banda del filtre òptic $\Delta f = 10$ GHz) rep una senyal òptica NRZ amb una portadora òptica $\lambda_p = 1506,6$ nm.

- Razonar quines conclusions es poden extreure basant-se en la relació $G_S(I)$.
- Si la potència de senyal (bit 1) a l'entrada és de 120 μW i l'amplificador és ideal, ¿quina és la corresponent potència total a la sortida de l'amplificador per $I = 150$ mA?
- Si aquest amplificador ideal ha de compensar les pèrdues totals d'una secció de fibra de 150 Km, amb coeficient d'atenuació 0,2 dB/Km i 6 dB de pèrdues als connectors de l'amplificador, ¿quina corrent d'injecció es requereix?
- En la situació anterior, ¿quanta és la potència d'emissió espontània a la sortida del filtre òptic?
- Estimar, aproximadament, el paràmetre de qualitat Q a la sortida del filtre òptic i trobar el valor de I per tenir una probabilitat d'error de 10^{-9} .

Ejercicio 3 (Test, 45%)

- 1) Sean V_1 y V_2 las frecuencias normalizadas de dos fibras ópticas consecutivas (fibra 1 \rightarrow fibra 2) con un mismo índice de refracción del núcleo n_1 , radios del núcleo a_1 y a_2 e índices de refracción del revestimiento n_{21} y n_{22} , respectivamente. Las pérdidas (dB) asociadas a la transición entre fibras valen
- $20 \log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{21} > n_{22}$
 - $10 \log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{21} > n_{22}$
 - $20 \log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{21} < n_{22}$
 - $10 \log(V_1/V_2)$ si $a_1 > a_2$ y $n_{21} < n_{22}$
- 2) Determinar la expresión de la fracción de potencia óptica emitida por una fuente puntual que es inyectada a una fibra óptica de salto de índice con apertura numérica NA y un índice de refracción del núcleo n_1 . La fuente radia en un único semiplano del espacio de la forma $\cos^n \theta$. Suponer que la fuente óptica está a muy poca distancia de la fibra y que R es la reflectividad fibra-aire
- $\eta_c = R \{1 - (1 - NA^2)^{(n+1)/2}\}$
 - $\eta_c = (1 - R) \{1 - (1 - NA^2)^{(n+1)/2}\}$
 - $\eta_c = R \{(1 - NA^2)^{(n+1)/2}\}$
 - $\eta_c = (1 - R) \{(1 - NA^2)^{(n+1)/2}\}$
- 3) Se dispone de una fuente láser y una fibra óptica para implementar un enlace de comunicaciones. Indicar cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:
- Si la fuente es monomodo, no habrá dispersión modal en la fibra.
 - Si la fuente es multimodo, habrá siempre dispersión modal.
 - Si la fuente es multimodo, habrá dispersión modal siempre y cuando $V < 2.405$.
 - No se puede afirmar nada al respecto.
- 4) A una fibra óptica con atenuación en potencia A (definida como $A \equiv P_{out}/P_{in}$), se le inyectan n fotones por bit. La varianza del número de fotones (m) por bit a la salida de la fibra sigue, en general, la expresión
- $\sigma_m^2 = A^2 (\sigma_n^2 - \langle n \rangle)^2 + A \langle n \rangle$
 - $\sigma_m^2 = A^2 (\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + A \langle n \rangle$
 - $\sigma_m^2 = A (\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + A^2 \langle n \rangle$
 - $\sigma_m^2 = A (\sigma_n^2 - \langle n \rangle)^2 + A^2 \langle n \rangle$
- 5) Un diodo LED (con tiempo de vida del portador τ_{sp}) alimentado en continua emite una potencia óptica P_0 . Si repentinamente se corta la alimentación, la potencia óptica seguirá una evolución del tipo
- $P(t) = P_0 e^{-t/\tau_{sp}}$
 - $P(t) = P_0 e^{t/\tau_{sp}}$
 - $P(t) = P_0 [1 - e^{-t/\tau_{sp}}]$
 - $P(t) = P_0 [1 - e^{t/\tau_{sp}}]$
- 6) Si el tiempo que tarda la potencia óptica emitida por el LED anterior en caer al 1% de su valor inicial es de 2,3 ns, ¿cuánto valdrá el tiempo de vida del portador τ_{sp} ?
- $\tau_{sp} = 0.5$ ns
 - $\tau_{sp} = 1$ ns
 - $\tau_{sp} = 1.5$ ns
 - $\tau_{sp} = 2$ ns
- 7) Se quiere modular digitalmente el LED anterior y se fija que el tiempo de conmutación (10% - 90%) sea como máximo del 20% del tiempo de bit. Deducir cuál será, aproximadamente, la máxima velocidad de modulación para una señal NRZ ideal:
- 360 Mb/s
 - 180 Mb/s
 - 120 Mb/s
 - 60 Mb/s

- 8) Un láser monomodo se modula digitalmente ($R_b=1$ Gb/s) con una corriente $I = I_{DC} \pm \Delta I/2 > I_{TH}$, donde $I_{TH}=20$ mA es la corriente umbral. El tiempo de respuesta del láser se estima a partir de la expresión:

$$t_r^2 \approx \frac{K}{I_{ON} - I_{OFF}} \ln \left(\frac{I_{ON} - I_{TH}}{I_{OFF} - I_{TH}} \right) \text{ con } K=10^{-20} \text{ A}\cdot\text{s}^2. \text{ Determinar para qué nivel } I_{DC} \text{ se minimiza el tiempo de respuesta}$$

del dispositivo.

- a) $I_{DC} = 0$ b) $I_{DC} = I_{TH}$ c) $I_{DC} = 2I_{TH}$ d) $I_{DC} = \infty$

- 9) Continuando con el ejercicio anterior, suponer $\Delta I=I_{TH}$, que la señal emitida por el láser, después de una transmisión con 40 dB de atenuación y una fotodetección ideal, presenta un parámetro de calidad $Q=5$ (estadística gaussiana) y que $P_{out} = C \cdot hf (I - I_{TH})$, con $C = 4 \cdot 10^{17} \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Calcular el número de fotones del bit "0" a la entrada del fotodetector.

- a) 600 b) 800 c) 6000 d) 8000

- 10) Continuando con el ejercicio anterior, estimar en estas condiciones el tiempo de respuesta del láser.

- a) $t_r \approx 25$ ps b) $t_r \approx 250$ ps c) $t_r \approx 2.5$ ns d) $t_r \approx 25$ ns

- 11) Se dispone de una fuente láser ideal ($\lambda=1,55$ μm , $P=3$ dBm) que transmite una señal con modulación de intensidad NRZ ideal de 10 Gb/s. Asumiendo un detector totalmente ideal y un enlace formado por una fibra que únicamente atenúa (0.2 dB/Km), ¿cuál es la máxima distancia a la que se puede transmitir si se exige una BER= 10^{-9} ?

- a) 232 Km b) 245 Km c) 464 Km d) 490 Km

- 12) En una detección coherente utilizando un fotodiodo PIN, el ruido dominante es siempre

- a) El ruido shot
b) El ruido térmico
c) El ruido de emisión espontánea
d) Depende del nivel de señal a la entrada del receptor

- 13) Un receptor está formado por un fotodiodo APD con un ganancia de multiplicación M , un factor de ruido F , una eficiencia cuántica η y un ruido térmico σ_t^2 (adimensional). Si se pretende detectar una señal con modulación de intensidad NRZ ideal exigiendo un determinado parámetro de calidad Q (estadística gaussiana), determinar la sensibilidad del receptor en fotones promedio por bit:

- a) $\frac{Q}{2\eta} \left(QF + 2 \frac{\sigma_t}{M} \right)$ b) $\frac{Q}{\eta} \left(QF + 2 \frac{\sigma_t}{M} \right)$ c) $\frac{Q}{2\eta} \left(QF + \frac{\sigma_t}{M} \right)$ d) $\frac{Q}{\eta} \left(QF + \frac{\sigma_t}{M} \right)$

- 14) Si el factor de ruido del fotodetector del ejercicio anterior sigue la función $F(M)=M^x$, encontrar el factor de multiplicación que optimiza la sensibilidad del receptor:

- a) $M^{x+1} = \frac{\sigma_t}{2xQ}$ b) $M^{x+1} = 2 \frac{\sigma_t}{xQ}$ c) $M^{x-1} = 2 \frac{\sigma_t}{xQ}$ d) $M^{x-1} = \frac{\sigma_t}{2xQ}$

- 15) Determinar la condición de mejora de la sensibilidad de un receptor formado por un fotodiodo PIN (eficiencia cuántica η) y un preamplificador óptico (parámetro de emisión espontánea ρ y ganancia $G \gg 1$) con respecto a un receptor formado por un fotodiodo APD (eficiencia cuántica η , factor de ganancia M y factor de ruido F). Considerar un parámetro de calidad Q y una desviación típica del ruido térmico σ_t (adimensional).

- a) $\rho < \frac{1}{2\eta} \frac{1}{Q+1} \left(QF + 2 \frac{\sigma_t}{M} \right)$ c) $\rho < \frac{1}{2\eta} \frac{1}{Q+1} \left(2QF + \frac{\sigma_t}{M} \right)$
b) $\rho < \frac{1}{2\eta} \frac{1}{Q} \left((Q+1)F + 2 \frac{\sigma_t}{M} \right)$ d) $\rho < \frac{1}{2\eta} \frac{1}{Q} \left(2(Q+1)F + \frac{\sigma_t}{M} \right)$