Sergi

SISTEMES DE RADIOFREQÜENCIA I ÒPTICS

QT06 Examen 10.11.06 (mínimos 1-3)

Las preguntas deben contestarse de forma clara, pero concisa, comenzando por las que os parezcan más sencillas y cortas de responder. Tiempo del examen: 90 minutos.

---

1. Fotones: saber explicar sus propiedades básicas, los procesos de absorción y emisión, su interacción con un gas (espectros de emisión y de absorción) y saber resolver ejemplos numéricos sencillos de potencias emitidas.

1.- El Mercurio (Hg) emite radiación en tres longitudes de onda: 435.8 nm (color añil), 2159 nm (infrarrojo cercano) y una tercera que corresponde al color verde (entre 492 y 577 nm). Para simplificar consideramos que un átomo aislado de mercurio presenta tan solo tres estados (o niveles de energía) posibles que denominamos E_0, E_1 y E_2, y asignamos al estado fundamental un valor cero de energía (E_0=0 eV).

a) (3p) Demuestra que E_1=2.271 eV y E_2= 2.845 eV.
b) (2p) Para cada una de las situaciones que se presentan a continuación, indicar, justificándolo, que le ocurre al fotón incidente, que le ocurre al átomo y cómo se denomina el fenómeno físico que tiene lugar.
   - un fotón de longitud de onda 2.159 μm interacciona con un átomo que se encuentra en E_1.
   - un fotón de longitud de onda 517 nm interacciona con un átomo que se encuentra en E_0.

~~Se~~ tiene en una ampolla de cristal vapor de mercurio y se sabe que a una cierta temperatura $N_1/N_0 = 9.2\times10^{-6}$, que el número de átomos total es de $N = 2.42 \times 10^{17}$ átomos y que el tiempo de vida media de un átomo en el estado E_1 es de $\tau_1=1\times10^{-8}$s.

c) (5p) Explica, indicando el nombre del fenómeno físico que tiene lugar, por qué el gas radia potencia a la longitud de onda que corresponde a la transición E_1-E_0 y calcula, justificando todos los pasos que realices, la potencia radiada por el gas.

2. Fotodiodo: saber explicar y utilizar los conceptos de eficiencia cuántica y responsividad y saber deducir la expresión que los relaciona. Para una señal óptica continua o digital, saber resolver ejemplos numéricos sencillos a partir de la estadística de Poisson.

2.- Un receptor óptico de alta sensibilidad está formado por un fotodiodo con responsividad R=0.66 A/W seguido por un circuito de decisión.

1. (2p) Definir el concepto de eficiencia cuántica y demostrar que R (A/W) = η λ (μm)/1.24.
2. (3p) Calcular la corriente de oscuridad del fotodiodo si se sabe que, en ausencia de luz a la entrada del receptor, la probabilidad de que no llegue al circuito de decisión ningún electrón en un tiempo de 16 nanosegundos es del 36.79%.

$I_{dark} = \dfrac{\lambda_n}{16n} \cdot 1,6\cdot10^{-19}$

Este receptor óptico se utiliza en un enlace digital binario con código NRZ a la velocidad de transmisión de 2.0 Gbps y la potencia óptica que incide sobre el fotodiodo del receptor para el "1" binario es de −48 dBm. El circuito de decisión requiere como mínimo 3 electrones para conmutar entre el estado bajo ("0" binario) y el estado alto ("1" binario).

3. (5p) Calcular la probabilidad de error cuando se recibe un "1" binario.

$p(9) = p(0)\,p(1/0) + p(1)\,p(0/1)$

$1 - P(16n) = 36,79\% = 0,3679$

$\frac{1}{2}p(0/0) + \frac{1}{2}p(0/1) = 0,3679$

$\dfrac{\lambda_n e^{-\lambda_n}}{2!} = 0,3679$

$\Rightarrow e^{-\lambda_n} = 1$

3. Amplificación óptica: saber explicar la interacción de fotones con una fibra dopada con erbio, la inversión de población, los procesos de bombeo y emisión estimulada y saber resolver ejemplos numéricos sencillos de ganancia y potencias de un módulo EDFA formado por fibra dopada, láseres de bombeo, multiplexores y aisladores.

3. En el proceso de amplificación de un EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) intervienen tres niveles de energía de los iones de Erbio: $E_0 = 0$ eV, $E_1 = 0.800$ eV y $E_2 = 0.838$ eV.

a) (2p) Para cada una de las situaciones que se presentan a continuación, indicar, justificándolo, que le ocurre al fotón incidente, que le ocurre al átomo y cómo se denomina el fenómeno físico que tiene lugar.
   - un fotón de 1480 nm interacciona con un ión que se encuentra en E_0.
   - un fotón de 1480 nm interacciona con un ión que se encuentra en E_1.
   - un fotón de 1550 nm interacciona con un átomo que se encuentra en E_0.
   - un fotón de 1550 nm interacciona con un átomo que se encuentra en E_1.

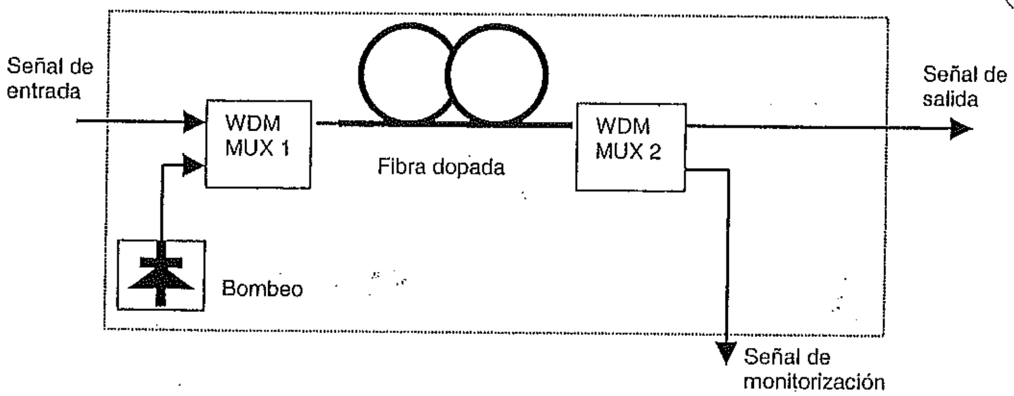
b) (2p) Justificar por qué es necesaria la inversión de población para que tenga lugar la amplificación y por qué es conveniente que el nivel E_1 sea un nivel metaestable (un nivel con un tiempo de vida media anormalmente grande).

Cuando se inyecta en la fibra una potencia de bombeo de 120 mw, a la salida de la misma hay una potencia residual de bombeo de 28.65 mW.

c) (3p) Calcular la potencia que se pierde en forma de calor debido a la transición entre los niveles 2 y 1 (el tiempo de vida media de los iones de erbio en el nivel 2 es muy pequeño y se puede considerar que se relajan de forma instantánea al estado E_1).

La fibra dopada con Erbio forma parte del módulo EDFA de la figura.

$P = \frac{E}{t} = \frac{\text{nº fotones} \cdot \Delta E\ \text{transición}}{t} = J/s$



MUX 1 y 2
- Pérdidas de inserción: 0.5 dB Aislamiento: 18 dB

Fibra dopada con Erbio
- Ganancia para la señal: 13.70 dB Atenuación para el bombeo: 6.22 dB

Conectores y empalmes
- Los dispositivos están interconectados mediante empalmes de 0.05 dB y cada conector de entrada/salida del dispositivo global presenta unas pérdidas de 0.2 dB.

d) (3p) Si la señal de entrada es de 4 mW y la potencia emitida por el láser de bombeo es de 100 mW, calcular la potencia de señal y de bombeo presente en la salida de monitorización (dar el resultado en mW y en dBm).

CONSTANTES Y FÓRMULAS:

$h = 6.62620\times10^{-34}$ J s, $k = 1.380\times10^{-23}$ J K^{-1}, $e = 1.602\text{x}10^{-19}$ C

$$P(z) = \frac{z_m^z e^{-z_m}}{z!}, \qquad \frac{N_i}{N_j} = e^{-\frac{E_i - E_j}{kT}}$$

$p(z=0) + p(z=1) + p(z=2) + p(z=3)$

z_m

$1-P$

Asignatura: SRO

Nombre: Sergio Lluch Guirado — Fecha: 10-11-2006 (8)

MÍNIMO 1

a) Sabemos por definición que $\Delta E = h \cdot f$ y que $f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1'24}{\lambda(\text{micra})}$

$\lambda_1 = 435'8\,nm \longrightarrow 2'845\,eV$

$\lambda_i = 492\,nm \longrightarrow 2'520\,eV$

$\lambda_f = 577\,nm \longrightarrow 2'149\,eV$

Entre estas dos longitudes de onda existe una λ_2 a la que le corresponde $2'271\,eV$.

$\lambda_3 = 2159\,nm \longrightarrow 0'574\,eV$

Podemos obtener $\lambda_2 = \frac{1'24}{2'271\,eV} = 546\,nm$ que efectivamente se encuentra entre 492 y 577 nm.

¿??

Con las longitudes de onda obtenemos diferencia de potencia, ΔE.

1 Si $E_0 = 0\,eV$, y se que cuando vamos en dirección ascendente

3 de los niveles la diferencia de potencia entre ellos va disminuyendo

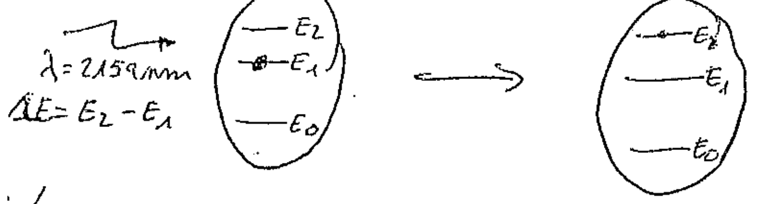
es decir, $E_1 - E_0 > E_2 - E_0$.

por tanto, $E_1 - E_0 = 2'271\,eV$ y $E_2 - E_1 = 0'574\,eV$

Entonces como $E_0 = 0\,eV$,

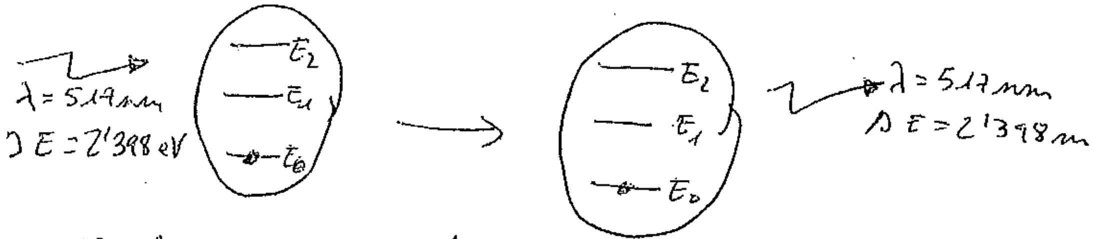
$\boxed{E_1 = 2'271\,eV \quad y \quad E_2 = 2'845\,eV}$

b)



El fotón será absorbido por el átomo de manera que el electrón subirá de E_1 a E_2, el fenómeno se denomina absorción estimulada

1/2



El electrón se queda igual y el fotón se va tal como llega c)

$$\frac{N_1}{N_0} = 9'2 \cdot 10^{-6}$$

$N = 2'42 \cdot 10^{17}$

$\tau_1 = 1 \cdot 10^{-8}\, s$

El fenomeno se denomina emisión ~~estimulada~~ y cuando incide una longitud de onda que corresponde a $E_1 - E_0$ esto hace que los electrones de E_1 bajen a E_0 con lo que por cada foton que incide desciende un electrón y salen 2 fotones identicos al de entrada.

La potencia por definicion: $P = \frac{energia}{t} = \frac{n^o\ electrones \cdot \Delta E}{t}$

Podemos considerar sin cometer un error apreciable que

3/5 $N_0 = N$

con lo que $N_1 = N_0 \cdot 9'2 \cdot 10^{-6} = N \cdot 9'2 \cdot 10^{-6}$

N_1: numero de electrones en nivel E_1;

entonces

$$P = \frac{N_1 \cdot \Delta E_{1-0}}{\tau_1} = \frac{N \cdot 9'2 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta E_{1-0}}{\tau_1}$$

$$\Delta E_{1-0} = 2'271\, eV \cdot \frac{1'6 \cdot 10^{-19}\, J}{1\, eV} = 3'63 \cdot 10^{-19}\, J$$

$$\boxed{P} = \frac{2'42 \cdot 10^{17} \cdot 9'2 \cdot 10^{-6} \cdot 3'63 \cdot 10^{-19}}{10^{-8}} = \boxed{80'9\, W}$$ Potencia radiada por el gas

Asignatura : SRO (9)

Nombre : Sergio Lluch Guirado Fecha : 10-11-2006

MÍNIMO 2

$R = 0'66\ A/W$

1/ La eficiencia cuantica relaciona el numero de electrones que generan un par e-h con el numero de fotones que inciden, es decir, ~~...~~ el numero de fotones incidentes necesarios para producir un par e-h.

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{\frac{\text{carga}}{\cancel{\text{tiempo}}}}{\frac{\text{Energia}}{\cancel{\text{tiempo}}}} = \frac{\text{nº electrones} \times |e^-|}{\text{nº fotones} \times \Delta E_{foton}} = \eta \frac{\cancel{|e^-|}}{\frac{1'24}{\lambda(\text{micras})} \times \cancel{|e^-|}}$$

1/2 Por definicion de I y P

η

$\Delta E_{foton} = \frac{1'24}{\lambda(\text{micras})} \times |e^-|$

$$\Longrightarrow \boxed{R = \eta \frac{\lambda(\text{micras})}{1'24}}$$

2) La probabilidad de que no llegue ningún electrón en 16 ns :

$$P(Z=0|0'0') = \frac{Z_{m_0}^{0}\, e^{-Z_{m_0}}}{0!} = e^{-Z_{m_0}} = 36'79\%$$

1/3 $\Longrightarrow Z_{m_0} = -\ln 0'3679 \simeq 1$ electron ✓

Z_{m_0} : nº electrones en media cuando estamos en oscuridad

La intensidad por definición es Q/t y $Q = \text{nº electrones} \times |e^-|$ por tanto,

$$\boxed{I_{osc}} = \frac{Z_{m_0} \cdot |e^-|}{t} = \frac{1 \cdot 1'602 \cdot 10^{-19}}{16 \cdot 10^{-9}} = \boxed{0'01\, nA}$$

intensidad de oscuridad

3)

$V_t = 2.0\ Gbps$

'1' $\longrightarrow P_{opt} = -48\,dBm$

'0': El bit '0' es cuando tenemos oscuridad y del apartado anterior $\underline{Z_{m_0} = 1}$

Por definición, sabemos que:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \longrightarrow I_{ph} = R \cdot P_{opt}$$

La potencia optica viene dada por el bit '1':

$$P_{opt} = -48\,dBm = 15'85 \cdot 10^{-6}\,mW$$ ✓

Entonces, ✓

$$I_{ph} = 0'66 \cdot 15'85 \cdot 10^{-6}\,m = \underline{10'46\,nA}$$

Como $I = \frac{Q}{t} = Q \cdot f = Q \cdot V_t$ = nº electrones $\cdot |e^-| \cdot V_t$

donde, nº electrones $= Z_{m_1}$: nº electrones para el bit '1'

Entonces

tiempo de bit $(12 \cdot 10^9)^{-1}$

1/5

$$Z_{m_1} \cong \frac{I_{ph}}{|e^-| \cdot V_t} = \frac{10'46\,n\,10^{-9}}{1'602 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 10^9} = \cancel{5'45}$$ ~~electrones en media~~

La probabilidad de error cuando ~~recibimos~~ un '1' es la probabilidad de recibir un '0' cuando esperamos un '1', esto es:

$$P_\varepsilon = P(Z < 3\,|\,'1') = P(Z=0\,|\,'1') + P(Z=1\,|\,'1') + P(Z=2\,|\,'1')$$

Poisson

$$P(Z=0\,|\,'1') = \frac{Z_m^{\,z}\, e^{-Z_m}}{z!} \underset{\substack{Z_m = Z_{m_1} \\ Z=0}}{=} e^{-5'45}$$

$$P(Z=1\,|\,'1') = 5'45\, e^{-5'45}$$

$$P(Z=2\,|\,'1') = \frac{(5'45)^2\, e^{-5'45}}{2}$$

$$\Rightarrow \boxed{P_\varepsilon = e^{-5'45}\left(1 + 5'45 + \frac{(5'45)^2}{2}\right) = 0'0915 = 9'15\%}$$

probabilidad de error cuando recibimos un '1'

Asignatura: SRO

Nombre: Sergio Lluch Guirado

Fecha: 10-11-2006

5

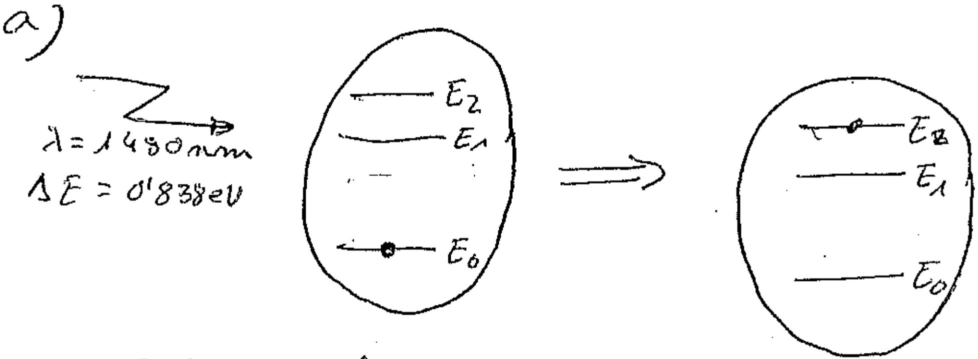
MÍNIMO 3

$E_0 = 0\,eV$

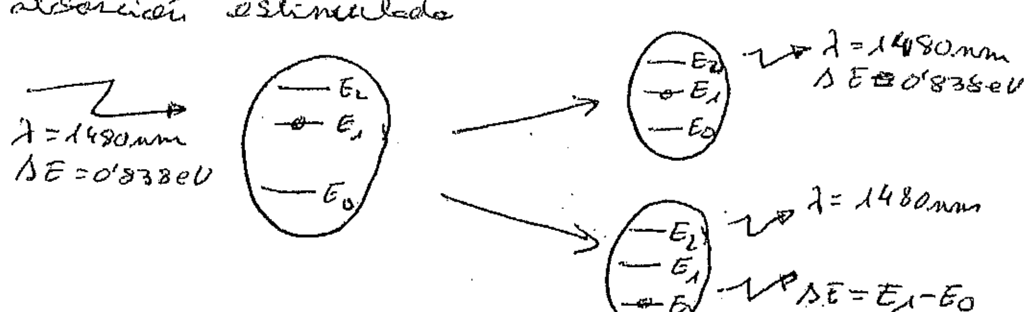
$E_1 = 0'8\,eV$

$E_2 = 0'838\,eV$

a)

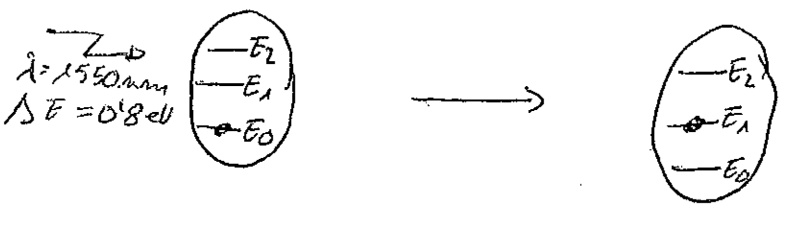


El fotón es absorbido de manera que el electrón sube de E_0 a E_2 ya que $E_2 - E_0 = 0'838\,eV$. Este fenómeno se denomina absorción estimulada

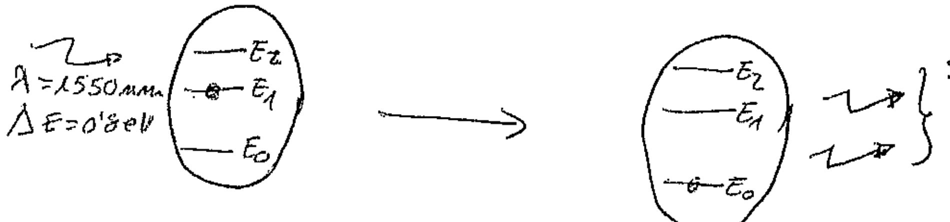


2/2

La diferencia $E_2 - E_1$ y $E_1 - E_0$ son diferentes a $\Delta E = 0'838\,eV$ por tanto, el fotón pasa de largo pero el electrón se puede mantener en E_1 con lo que no pasa NADA o que pase a E_0 que se denomina emisión ESPONTANEA.



Absorción estimulada
El atomo absorve el fotón y el electrón pasa de E_0 a E_1



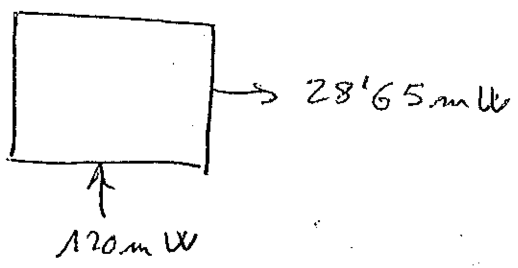
Salen dos fotones identicos con $\lambda = 1550\,nm$ y $\Delta E = 0'8\,eV$

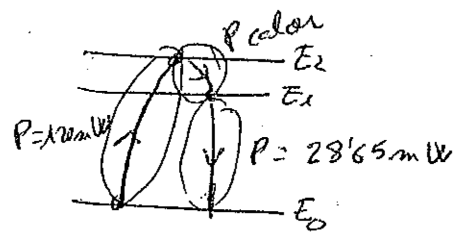
El electrón desciende del nivel E_1 al E_0 este fenómeno físico se denomina emisión espontanea b-) Para que haya amplificación tiene que pasar que haya más potencia a la salida que a la entrada. La señal de entrada provoca que los electrones de E_1 pasen a E_0 y haya emisión estimulada, pero para que haya suficientes electrones en E_1 como para que la señal de entrada pueda provocar una emisión estimulada necesitamos la invesión de población.

1/2

Necesitamos que el nivel E_1 sea metaestable para que el electron esté el tiempo necesario en E_1 para que cuando baje al E_0 sea provocado por la señal y no descienda espontaneamente

c)





La potencia que entra es igual a la que sale, pero la que sale puede salir como radiante o en forma de calor (P_{calor}), por tanto:

1/3

$$\boxed{P_{calor} = P_{bombeo} - P_{salida} = 120\,mW - 28'65\,mW = 91'35\,mW}$$

Potencia que se pierde en forma de calor

Asignatura: SRO
Nombre: Sergio Lluch Guirado   Fecha: 10 - 11 - 2006

MÍNIMO 3

d) $P_{señal} = 6'02\ dBm$

La señal primero se encuentra con un conector de entrada con perdida de 0'2 dB, despues un MUX 1 en que deja pasar a la señal así que solo tiene perdidos de inserción (0'5) dB, después se encuentra con un empalme entre MUX 1 y la fibra que tiene perdidas de (0'05 dB) y la fibra provoca una ganancia de 13'70 dB después otro ~~empalme~~ con perdidas de 0'05 dB y un MUX 2 donde la señal viaja por la dirección no deseada por tanto, provoca perdidas de inserción y aislamiento (18'5 dB), finalmente un conector de salida con perdidas de 0'2 dB, es decir, potencia de la señal en la salida de monitorización:

$$\boxed{P_{SM}} = 6'02\ dBm - 0'2\ dB - 0'5\ dB - 0'05\ dB + 13'70\ dB - 0'05\ dB - 18'5\ dB - 0'2\ dB = \boxed{0'22\ dBm} = \boxed{1'052\ mW}$$

3/3

$P_{bombeo} = 20\ dBm$

La señal de bombeo tendrá perdidas en 3 empalmes (0'15 dB), el MUX 1 solo perdidas de inserción porque va en la buena dirección y en MUX 2 igual, la fibra provoca una atenuación de 6'22 dB y un conector a la salida que provoca una perdida de 0'2 dB, por tanto,

$$\boxed{P_{BM} = 20\ dBm - 0'15\ dB - 0'5\ dB - 0'5\ dB - 0'2\ dB - 6'22\ dB = 12'43\ dBm = 17'5\ mW}$$

SRO

10 – XI – 06

Blanca Arcas

8

Confundes E con ΔE

1) $\lambda_1 = 435{,}8\,nm$ (color añil)

$\lambda_2 = 2159\,nm$ (infrarrojo cercano)

$\lambda_3 = 492\,nm - 577\,nm$ (verde)

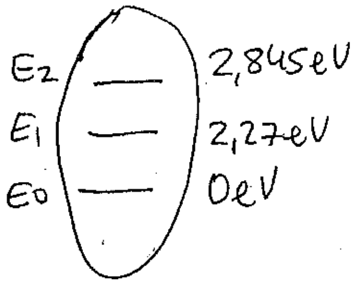
Tenemos un átomo con 3 estados de energía E_0, E_1, E_2 con $E_0 = 0\,eV$.

a) Demuestra que $E_1 = 2{,}271\,eV$ y $E_2 = 2{,}845\,eV$

$$E_{\lambda_1} = \frac{1{,}24}{\lambda(\mu m)} = \frac{1{,}24}{0{,}4358} = 2{,}845\,eV \qquad E_{\lambda_3\,max} = \frac{1{,}24}{0{,}492} = 2{,}520\,eV$$

$$E_{\lambda_2} = \frac{1{,}24}{2{,}159} = 0{,}574\,eV \qquad E_{\lambda_3\,min} = \frac{1{,}24}{0{,}577} = 2{,}149\,eV$$

1/3



teniendo en cuenta que el enunciado nos dice que $E_0 = 0\,eV$ tendremos que mantener la diferencia de niveles con el valor que inicialmente ~~es~~ $E_0 = 0{,}574\,eV$. ¿Por qué?

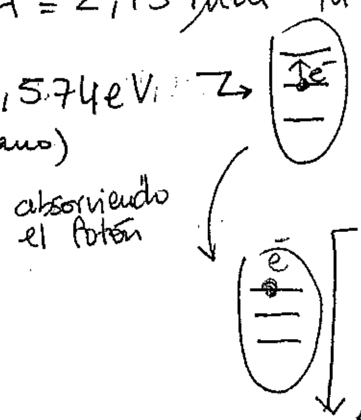
Por tanto, $E_2 = 2{,}845\,eV$ ya que nos viene de la longitud de onda del color añil; si le restamos la energía E_0 que nos viene dada por el infrarrojo cercano (ya que la tenemos que considerar $0\,eV$) nos da el valor del segundo nivel $E_1 = 2{,}27\,eV = E_2 - E_0$ (inicial, sin forzar a 0eV)

b) qué le ocurre al fotón incidente, qué le ocurre al átomo y el fenómeno físico.

– fotón con: $\lambda = 2{,}159\,\mu m$ interacciona con un átomo en E_1

2/2

$\Delta E = E_f = 0{,}574\,eV$ (infrarrojo cercano) $\rightarrow$



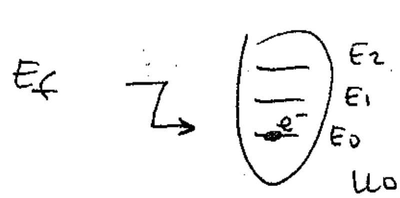
Al incidir el fotón en el átomo, el electrón absorverá la energía E_f (ya que coincide con la diferencia de niveles $E_2 - E_1$) y subirá al nivel 3 $\Downarrow$ E_2

Proceso de ABSORCIÓN ESTIMULADA

Ahora el átomo estará en E_2.

- fotón de longitud de onda 517 nm interacciona con el átomo en E_0

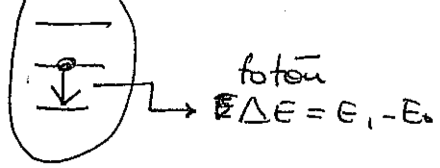
$$E_f = \frac{1,24}{0,517} = 2,39 \text{ eV}$$



Al incidir el fotón con esta energía E_f no ocurrirá nada en el electrón ya que éste sólo cambiará de nivel si la energía incidida por el fotón es exactamente igual a la diferencia de niveles y no coincide con ninguna por tanto el electrón no se moverá, se quedará en el estado fundamental, el fotón seguirá su camino sin afectar al átomo.

A cierta temperatura se cumple: $\frac{N_1}{N_0} = 9{,}2 \cdot 10^{-6}$, $N_T = 2{,}42 \cdot 10^{17}$ átomos y que $\tau_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ s.

c) se trata de átomos metaestables en E_1, el fenómeno físico que se produce es de <u>emisión espontánea</u>. En este fenómeno tenemos los átomos en nivel E1 los cuales al superar el tiempo de vida media en E_1 bajarán a nivel fundamental (ya que siempre se tiende a este nivel) emitiendo un fotón con energía igual a la diferencia de niveles E_1 y E_0



$$P = \frac{N_1 \cdot \Delta E \cdot |e|}{\tau_1}$$

considero que $N_T = N_0 \Rightarrow N_1 = N_T \cdot 9{,}2 \cdot 10^{-6} = 2{,}2264 \cdot 10^{12}$

$\Delta E = E_1 - E_0 = 2{,}271$ eV (lo multiplicaré por $|e|$ para pasarlo a Joules)

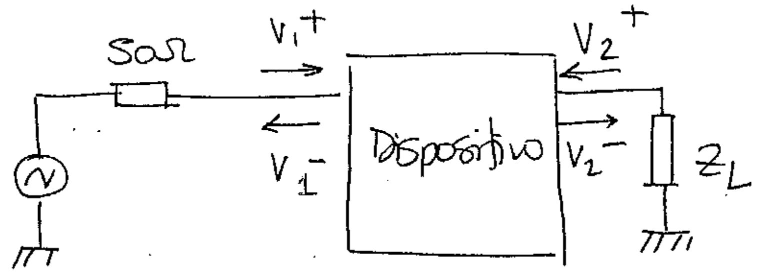
$$\boxed{P = \frac{2{,}2264 \cdot 10^{12} \cdot 2{,}271 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}}{1 \cdot 10^{-8}\text{ s}} = 80{,}99 \text{ W}}$$

11 - II - 07 SRO Blanca Arcas

MÍNIMO 5

(10)

$$[S] = \begin{pmatrix} 0{,}070 & -j0{,}071 \\ -j0{,}966 & 0{,}070 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}070\angle 0° & 0{,}071\angle 270° \\ 0{,}966\angle 270° & 0{,}070\angle 0° \end{pmatrix}$$



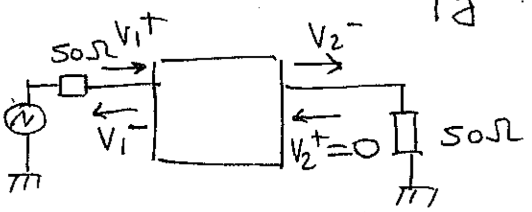
$P_{disp} = 6\,dBm = 3{,}98\,mW$

Potencia disipada por el aislador:

a) $Z_L = 50\Omega \Rightarrow$ la carga y el generador están adaptados $\Rightarrow \rho_{in} = S_{11}$

$\rho_g = 0$; $\rho_L = 0$

También $P_{disp} = P_1^+$ ✓ ya que el generador está adaptado



Ahora $V_2^+ = 0$ ya ✓ que [illegible] el puerto está terminado por una carga adaptada

Como $V_2^+ = 0 \Rightarrow P_2^+ = 0$

$$P_{disipada} = P_1^+ - (P_1^- + P_2^-) = 3{,}98\cdot 10^{-3} - 19{,}5\cdot 10^{-6} - 3{,}71\cdot 10^{-3};$$

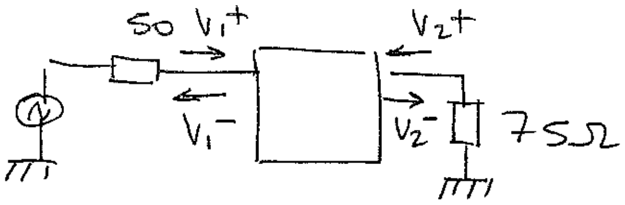
7/5

$$P_1^- = \frac{|V_1^-|^2}{2\cdot Z_0} = \left[\begin{matrix} |\rho_{in}|^2 = |S_{11}|^2 = \left|\frac{V_1^-}{V_1^+}\right|^2 \\ |V_1^-|^2 = |S_{11}|^2 |V_1^+|^2 \end{matrix} \right] = \frac{|V_1^+|^2}{2\cdot Z_0}\cdot |S_{11}|^2 = P_1^+ \cdot |S_{11}|^2 = 19{,}5\ \mu W$$

$$P_2^- = \frac{|V_2^-|^2}{2\cdot Z_0} = \left[|S_{21}|^2 = \frac{|V_2^-|^2}{|V_1^+|^2} \right] = \frac{|V_1^+|^2}{2\cdot Z_0}\cdot |S_{21}|^2 = P_1^+ \cdot |S_{21}|^2 = 3{,}71\,mW$$

$$\boxed{P_{disipada} = 250{,}5\,\mu W = 0{,}251\,mW = -6{,}003\,dBm}$$ ✓

b)



$P_{disp} = 6\,dBm = 3{,}98\,mW$

Seguimos teniendo el generador adaptado $\Rightarrow P_{disp} = P_1^+$ y $\rho_g = 0$

Ahora voy a encontrar los valores de ρ_L y ρ_{in}:

$$\boxed{\rho_L = \frac{75-50}{75+50} = 0{,}2}$$

$$\rho_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}\cdot S_{21}\cdot \rho_L}{1 - S_{22}} = 0{,}07 + \frac{0{,}071\cdot e^{j270}\cdot 0{,}966\cdot e^{j270}\cdot 0{,}2}{1-0{,}07} =$$

$$= 0{,}07 + \left(\frac{0{,}0137\cdot e^{j180}}{0{,}93}\right) = 0{,}07 + 0{,}0147\cdot e^{j180} =$$

$$= \left[e^{j180} = -1\right] = 0{,}07 - 0{,}0147 = \boxed{0{,}0553}$$

$$P_{dispositivo} = P_1^+ + P_2^+ - P_1^- - P_2^- = P_1^+ - P_1^- - P_L$$

$$\boxed{P_L = P_2^- - P_2^+ = P_{disp}\cdot\frac{|S_{21}|^2(1-|\cancel{\rho_g}|^2)(1-|\rho_L|^2)}{|(1-\cancel{\rho_g} S_{11})(1-\rho_L S_{22}) - \rho_g \rho_L \cancel{S_{21} S_{12}}|^2}} =$$

5/5

$$= P_{disp}\left(\frac{|0{,}966|^2(1-|0{,}2|^2)}{(1-0{,}2\cdot 0{,}07)^2}\right) = \boxed{3{,}66\cdot 10^{-3}\,W}$$

$$P_1^- = \frac{|V_1^-|^2}{2\cdot Z_0} = \left[|\rho_{in}|^2 = \left|\frac{V_1^-}{V_1^+}\right|^2\right] = \frac{|V_1^+|^2}{2\cdot Z_0}\cdot|\rho_{in}|^2 = P_1^+\cdot|\rho_{in}|^2$$

$$\boxed{P_1^- = 12{,}17\,\mu W}$$

$$\boxed{P_{disipada} = 307{,}83\,\mu W = 0{,}308\,mW = -5{,}114\,dBm}$$