

Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 13 de Novembre de 2009

Temps : 1h 30'

Nom:

TEST (6 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

- En referència als materials semiconductors:
 - Els tipus P tenen una concentració d'electrons superior a la de forats mentre que els tipus N a l'inrevés
 - Els tipus P tenen una concentració de forats superior a la d'electrons mentre que els tipus N a l'inrevés
 - Tant els tipus P com els tipus N tenen una concentració d'electrons superior a la de forats
 - Tant els tipus P com els tipus N tenen una concentració de forats superior a la d'electrons
- L'energia de GAP en un semiconductor és:
 - El diferencial energètic entre el màxim de la banda de conducció i el màxim de la banda de valència
 - El diferencial energètic entre el mínim de la banda de conducció i el mínim de la banda de valència
 - El diferencial energètic entre el mínim de la banda de conducció i el màxim de la banda de valència
 - El diferencial energètic entre el màxim de la banda de conducció i el mínim de la banda de valència
- El concepte de nivell de transparència d'un material semiconductor fa referència a la concentració de portadors necessària per a que:
 - El guany del material iguali les pèrdues de scattering
 - El guany del material iguali les pèrdues de la cavitat
 - El guany del material iguali les pèrdues de scattering més les de la cavitat
 - El procés d'emissió estimulada iguali el procés d'absorció
- Quants fotons per segon corresponen a 1W de llum de 3ª finestra:
 - $7.8 \cdot 10^{18}$ fot/s
 - $6.5 \cdot 10^{18}$ fot/s
 - $4.3 \cdot 10^{18}$ fot/s
 - Cap de les anteriors
- Un LED de segona finestra polaritzat amb un corrent constant, emet $25\mu\text{W}$ de potència òptica. Si l'eficiència quàntica és 0.5 i les dimensions són $0.1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, quin és el nombre total de recombinacions per unitat de temps i de volum que es produeixen?:
 - $3.273 \cdot 10^{32}$ recomb/seg/ m^3
 - $3.273 \cdot 10^{-32}$ recomb/seg/ m^3
 - $3.902 \cdot 10^{-32}$ recomb/seg/ m^3
 - $3.902 \cdot 10^{32}$ recomb/seg/ m^3
- La potència òptica generada internament dins d'un LED és 28.4 mW amb un corrent de 60 mA. Determineu la longitud d'ona d'emissió quan l'eficiència quàntica interna és del 50 % i l'eficiència quàntica externa és del 1%.
 - $\lambda \approx 13.1\ \mu\text{m}$
 - $\lambda \approx 1.31\ \mu\text{m}$
 - $\lambda \approx 13.1\ \text{nm}$
 - $\lambda \approx 1.31\ \text{nm}$
- Després de modular sinusoidalment un LED ($\tau_{sp}=1\text{ns}$), l'índex de modulació de la potència òptica és un 75% inferior a l'índex de modulació del corrent estimulat. A quina freqüència s'ha modulat?:
 - 140 MHz
 - 212 MHz
 - 616 MHz
 - 636 MHz
- Un diode LED (temps de vida del portador τ_{sp}) alimentat en contínua lliura una potència òptica P_0 . Si es talla l'alimentació sobtadament, la potència òptica seguirà una evolució:
 - $P(t) = P_0 e^{-t/\tau_{sp}}$
 - $P(t) = P_0 e^{t/\tau_{sp}}$
 - $P(t) = P_0 [1 - e^{-t/\tau_{sp}}]$
 - $P(t) = P_0 [1 - e^{t/\tau_{sp}}]$

9. Si es vulgués modular digitalment un LED a 1 Gb/s, de quin ordre hauria de ser el temps de vida del portador si s'exigeix que el "rise time" 25% -75% sigui inferior a un 10% del temps de bit:
- a) 10 ns b) 1 ns c) 100 ps d) 10 ps

10. En règim estacionari d'oscil·lació, la distribució longitudinal de potència òptica dins de la zona activa d'un làser Fabry-Perot és aproximadament:
- a) Gaussiana b) Sinusoidal c) Constant d) Lambertiana

11. Per tal de millorar la "monomodalitat" d'un diode làser aniria bé:

- a) Augmentar la longitud de la cavitat
b) Augmentar el paràmetre β d'emissió espontània
c) Aconseguir una condició de guany més selectiva
d) Totes són certes

12. Un diode làser semiconductor presenta les següents característiques:

Dimensions	$L=500 \mu\text{m}$, $W=10 \mu\text{m}$, $d=1 \mu\text{m}$	Índex de refracció del SC	$n=3,5$
Pèrdues en el material	$\alpha_s=500 \text{ m}^{-1}$	Temps de vida del portador	$\tau_{sp}=5 \text{ ns}$
Nivell de transparència	$N_0=10^{22} \text{ m}^{-3}$	Confinament perfecte	
Guany del material	$g_m=3000 - \gamma(\lambda - \lambda_p)^2 \text{ m}^{-1}$	on $\lambda_p=1,3 \mu\text{m}$ i $\gamma=6,2 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$	

Calculeu el número de modes d'oscil·lació de la cavitat:

- a) $M = 19$ b) $M = 20$ c) $M = 21$ d) $M = 22$

13. Continuant amb l'exercici anterior, determineu la longitud d'ona dels modes d'oscil·lació extrems:

- a) $\lambda_{up}=1304.51 \text{ nm}$, $\lambda_{down}=1295.34 \text{ nm}$ b) $\lambda_{up}=1304.90 \text{ nm}$, $\lambda_{down}=1295.10 \text{ nm}$
c) $\lambda_{up}=1304.90 \text{ nm}$, $\lambda_{down}=1295.34 \text{ nm}$ d) $\lambda_{up}=1304.51 \text{ nm}$, $\lambda_{down}=1295.10 \text{ nm}$

Si el nivell de transparència és zero, a funció de transferència electro-òptica normalitzada d'un diode làser, en petita senyal, segueix l'expressió:

$$|M(\omega)|^2 = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right]^2 + \left[2\alpha \frac{\omega}{\omega_c^2}\right]^2} \quad \alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}} \left(\frac{J_0}{J_{th}}\right), \quad \omega_c^2 = \frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}} \left(\frac{J_0}{J_{th}} - 1\right)$$

On ω és la pulsació de la modulació, ω_c és la freqüència de ressonància, α és la constant d'amortiment, τ_{sp} i τ_{ph} els temps de vida del portador i del fotó respectivament, J_0 és el nivell de contínua del senyal de modulació i J_{th} la densitat de corrent llindar.

14. Per tal de descriure el caràcter ressonant del làser, es pren com a referència la relació α/ω_c . Determineu per quin valor de corrent s'obté un mínim:

- a) $J_0 = J_{th}$ b) $J_0 = 1.5 J_{th}$ c) $J_0 = 2 J_{th}$ d) $J_0 = 2.5 J_{th}$

15. Si es pretén que el làser no ressoni mai ($\alpha/\omega_c > 1/\sqrt{2}$), quina condició s'ha de complir ?:

- a) $\tau_{ph} \geq 2\tau_{sp}$ b) $\tau_{ph} \leq 2\tau_{sp}$ c) $\tau_{ph} \leq \tau_{sp}/2$ d) $\tau_{ph} \geq \tau_{sp}/2$

PROBLEMA (4 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

Un diode làser semiconductor presenta les següents característiques:

$$\begin{array}{llll} \lambda_p = 1.3 \mu\text{m} & L = 300 \mu\text{m} & W = 10 \mu\text{m} & d = 2 \mu\text{m} \\ n_s = 3.5 & \tau_{sp} = 2\text{ns} & \alpha_s = 1100 \text{ m}^{-1} & N_0 = 2.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3} \quad \Gamma a = 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 \end{array}$$

- 1) Es caracteritza el làser mesurant 2 punts de la corba llum-corrent. La potència òptica de sortida és de 2.4 mW i 6.3 mW quan el corrent d'alimentació és de 30 mA i 40 mA respectivament. Determineu el corrent llindar de la font:

- a) $I_{th} = 12 \text{ mA}$ b) $I_{th} = 16 \text{ mA}$ **c) $I_{th} = 24 \text{ mA}$** d) $I_{th} = 48 \text{ mA}$

- 2) Si es fa tendir la longitud de la zona activa a zero, el corrent llindar tendeix a:

a) $I_{th} = \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a \cdot \ln \frac{1}{R}}$ b) $I_{th} = \frac{qWd}{\tau_{sp} \ln \frac{1}{R}} \Gamma a$ c) $I_{th} = \frac{qWd}{\tau_{sp}} \Gamma a \cdot \ln \frac{1}{R}$ **d) $I_{th} = \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a} \ln \frac{1}{R}$**

- 3) Quan la longitud de la zona activa decreix, el pendent de la característica llum-corrent:

- a) Creix** b) No canvia
c) Decreix d) No es pot afirmar res al respecte

- 4) Quan es redueix la zona activa del làser també es redueix la màxima potència disponible (potència de saturació). Assmunint que la potència de saturació és la que es dona per a un corrent d'alimentació $I = 2 \cdot I_{th}$, determineu la longitud mínima necessària per a garantir una potència de saturació de 12 mW.

- a) $L = 357 \mu\text{m}$ b) $L = 375 \mu\text{m}$ **c) $L = 537 \mu\text{m}$** d) $L = 753 \mu\text{m}$

- 5) Es pretén modular digitalment la font làser. La modulació resultant ha de complir que la relació de potències entre el bit "1" i el bit "0" (relació d'extinció) sigui de, com a mínim, 10 dB. Preneu un corrent de modulació per al bit "1" igual a 2 cops el corrent llindar i determineu què passa amb el temps de resposta quan la longitud de la cavitat làser augmenta.

- a) Augmenta** b) No canvia
c) Disminueix d) No es pot afirmar res al respecte

- 6) Si la velocitat modulació ha de ser de 2 Gb/s i el temps de resposta ha de ser, com a màxim, d'un 20 % del temps de bit. Deduïu quan ha de valer la longitud de la zona activa.

- a) $L = 100 \mu\text{m}$ **b) $L = 200 \mu\text{m}$** c) $L = 300 \mu\text{m}$ d) $L = 400 \mu\text{m}$

- 7) El làser presenta una forta dependència en quant a la temperatura de treball. L'expressió de la potència òptica de sortida es pot modelar de la forma següent:

$$P_{out} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q\alpha_i L} (I - I_{th}(T)) , \quad I_{th}(T) = I_0 e^{(T-T_0)/T_e} , \quad T_e = 6T_0 = 150^\circ C$$

On $I_0 = 30$ mA és el corrent llindar a la temperatura de referència T_0 . Quina és la variació del corrent llindar (en percentatge) per grau centígrad ?:

- a) 14 %/°C b) 1.4 %/°C c) 7 %/°C **d) 0.7 %/°C**

- 8) El làser es modula amb un senyal digital $I_{on} = 2 \cdot I_{th}$ i $I_{off} = 1.1 \cdot I_{th}$ per a una temperatura de treball de $25^\circ C$. Donat l'escalfament del material semiconductor, la temperatura puja fins als $55^\circ C$. Si els corrents de modulació es mantenen constants, determineu quina és la màxima velocitat de modulació en aquesta situació si el temps de commutació ha de ser inferior al 20% del temps de bit ?:

- a) 350 Mb/s **b) 700 Mb/s** c) 35 Mb/s d) 70 Mb/s

- 9) Si es vol garantir que el làser es mantingui en la zona de treball làser, quina és la màxima variació de temperatura que es pot donar ?:

- a) $14^\circ C$** b) $21^\circ C$ c) $7^\circ C$ d) $18^\circ C$

- 10) Si el que es vol garantir és que les variacions en el temps de commutació siguin inferiors a un 10% respecte el seu valor a T_0 , quina és la màxima variació de temperatura que es pot donar ?:

- a) $12^\circ C$ **b) $6^\circ C$** c) $18^\circ C$ d) $24^\circ C$

Constants

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ K$$

Formulari LED

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g + K_B T / 2} , \quad \Delta\lambda \approx \frac{2K_B T}{hc} \lambda_0^2$$

$$I(t) = I_0 \left[1 + m_I e^{(j\omega_0 t + \phi)} \cdot u(t) \right] \rightarrow N(t) = \frac{I_0 \tau_r}{qV} \left\{ 1 + \underbrace{\frac{m_I}{1 + j\omega_0 \tau_r}}_{m_N} e^{j\phi} \left[e^{j\omega_0 t} - e^{-t/\tau_r} \right] \cdot u(t) \right\}$$

$$H(\omega_0) = \eta \frac{hf}{q} \frac{1}{1 + j\omega_0 \tau_r}$$

Formulari LASER

$$g = \Gamma \left(a(N - N_0) - \gamma(\lambda - \lambda_p)^2 \right) , \quad f_m = m \frac{c}{2nL} , \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda_p^2}{2nL}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_r} - v \sum_i g_i S_i$$

$$I_{th} = \frac{qV}{\tau_{sp}} \left(N_0 + \frac{1}{\Gamma a} \left(\alpha_s + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right)$$

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = v(g_i - \alpha_i) S_i + \beta \frac{N}{\tau_r}$$

$$P_{out} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q\alpha_i L} (I - I_{th})$$

$$|M(\omega_0)|^2 = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega_c} \right)^2 \right]^2 + \left[2\alpha \frac{\omega_0}{\omega_c^2} \right]^2} , \quad \omega_c^2 = \frac{v\Gamma a}{qd} (J_0 - J_{th}) , \quad 2\alpha = \frac{1}{\tau_{sp}} + \omega_c^2$$

$$t_r = \tau_{sp} \ln \frac{I_{on} - I_{off}}{I_{on} - I_{th}} , \quad t_r^2 = \frac{2qV}{v\Gamma a} \frac{\ln \frac{I_{on} - I_{th}}{I_{off} - I_{th}}}{I_{on} - I_{off}}$$

Resolució

1) Es caracteritza el làser mesurant 2 punts de la corba llum-corrent. La potència òptica de sortida és de 2.4 mW i 6.3 mW quan el corrent d'alimentació és de 30 mA i 40 mA respectivament. Determineu el corrent llindar de la Font làser:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 - I_{th}}{I_1 - I_{th}} \rightarrow P_2(I_1 - I_{th}) = P_1(I_2 - I_{th}) \rightarrow I_{th} = \frac{P_2 I_1 - P_1 I_2}{P_2 - P_1} = 24 \text{ mA}$$

2) Si es fa tendir la longitud de la zona activa a zero, el corrent llindar tendeix a:

$$I_{th} = \frac{qV}{\tau_{sp}} \left(N_0 + \frac{1}{\Gamma a} \underbrace{\left(\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right)}_{\alpha_t} \right) = \frac{qWd}{\tau_{sp}} \left(L \left(N_0 + \frac{\alpha_s}{\Gamma a} \right) + \frac{1}{\Gamma a} \ln \frac{1}{R} \right) \xrightarrow{L=0} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a} \ln \frac{1}{R}$$

3) Quan la longitud de la zona activa decreix, el pendent de la característica llum-corrent:

$$P_{out} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q\alpha_t L} (I - I_{th}) = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \underbrace{\frac{1}{\alpha_s L + \ln \frac{1}{R}}}_{pendent} (I - I_{th}) \rightarrow \text{creix}$$

4) Quan es redueix la zona activa del làser també es redueix la màxima potència disponible (potència de saturació). Assmunint que la potència de saturació és la que es dona per a un corrent d'alimentació $I = 2 \cdot I_{th}$, determineu la longitud mínima necessària per a garantir una potència de saturació de 12 mW.

$$\begin{aligned} P_{sat} &= \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \underbrace{\left(\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right)}_{\alpha_t} L I_{th} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \underbrace{\left(\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right)}_{\alpha_t} \cancel{L} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a} \left(\Gamma a N_0 + \alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) = \\ &= \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a} \left(\frac{\Gamma a N_0}{\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}} + 1 \right) \rightarrow \frac{P_{sat}}{\frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a}} - 1 = \frac{\Gamma a N_0}{\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} = \frac{\Gamma a N_0}{\frac{P_{sat}}{\frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a}} - 1} - \alpha_s \rightarrow L = \frac{\ln \frac{1}{R}}{\frac{\Gamma a N_0}{\frac{P_{sat}}{\frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q} \frac{qWd}{\tau_{sp} \Gamma a}} - 1} - \alpha_s} = 537 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

5) Es pretén modular digitalment la font làser. La modulació resultant ha de complir que la relació de potències entre el bit "1" i el bit "0" (relació d'extinció) sigui de, com a mínim, 10 dB. Preneu un corrent de modulació per al bit "1" igual a 2 cops el corrent llindar i determineu què passa amb el temps de resposta quan la longitud de la cavitat làser augmenta.

$$\frac{P_{on}}{P_{off}} = \frac{I_{on} - I_{th}}{I_{off} - I_{th}} = \frac{I_{th}}{I_{off} - I_{th}} = 10 \rightarrow I_{off} = \frac{11}{10} I_{th}$$

$$I_{on} = 2 I_{th}$$

$$t_r^2 = \frac{2qV}{v\Gamma a} \frac{\ln \frac{I_{on} - I_{th}}{I_{off} - I_{th}}}{I_{on} - I_{off}} = \frac{2qV}{v\Gamma a} \frac{\ln 10}{0.9 I_{th}} = \frac{2qWd}{v\Gamma a} \frac{\ln 10}{0.9} \left[\frac{L}{I_{th}} \right] = \frac{2 \ln 10}{v \cdot 0.9} \frac{\tau_{sp}}{N_0 \Gamma a + \alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}}$$

$$I_{th} = \frac{qWdL}{\tau_{sp}} \left(N_0 + \frac{1}{\Gamma a} \left(\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \right) \rightarrow \frac{L}{I_{th}} = \frac{\frac{\tau_{sp}}{qWd}}{N_0 + \frac{1}{\Gamma a} \left(\alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right)}$$

Es veu que quan la longitud de la cavitat augmenta, el temps de resposta també augmenta.

6) Si la velocitat modulació ha de ser de 2 Gb/s i el temps de resposta ha de ser, com a màxim, d'un 20 % del temps de bit. Deduïu quan ha de valer la longitud de la zona activa.

$$t_r^2 = \frac{2 \ln 10}{v \cdot 0.9} \frac{\tau_{sp}}{N_0 \Gamma a + \alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}} \rightarrow N_0 \Gamma a + \alpha_s + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} = \frac{2 \ln 10}{v \cdot 0.9} \frac{\tau_{sp}}{t_r^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow L = \frac{\ln \frac{1}{R}}{\frac{2 \ln 10}{v \cdot 0.9} \frac{\tau_{sp}}{t_r^2} - N_0 \Gamma a - \alpha_s} \leq \frac{\ln \frac{1}{R}}{\frac{2 \ln 10}{v \cdot 0.9} \tau_{sp} (5R_b)^2 - N_0 \Gamma a - \alpha_s} = 200 \mu m$$

$$t_r \leq 0.2 T_b = \frac{1}{5R_b}$$

7) El làser presenta una forta dependència en quant a la temperatura de treball. L'expressió de la potència òptica de sortida es pot modelar de la forma següent:

$$P_{out} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}} \frac{hf}{q\alpha_i L} (I - I_{th}(T)) \quad , \quad I_{th}(T) = I_0 e^{(T-T_0)/T_e} \quad , \quad T_e = 6T_0 = 150^\circ C$$

On $I_0 = 30$ mA és el corrent llindar a la temperatura de referència T_0 . Quina és la variació del corrent llindar (en percentatge) per grau centígrad ?:

$$\Delta = e^{1/T_e} = 0.7\% / ^\circ C$$

8) El làser es modula amb un senyal digital $I_{on} = 2 \cdot I_{th}$ i $I_{off} = 1.1 \cdot I_{th}$ per a una temperatura de treball de $25^\circ C$. Donat l'escalfament del material semiconductor, la temperatura puja fins als $55^\circ C$. Si els corrents de modulació es mantenen constants, determineu el temps de commutació del dispositiu.

$$I_{th}(T) = I_0 e^{(T-T_0)/T_e}, \quad T_e = 6T_0 = 150^\circ C \rightarrow T_0 = 25^\circ C$$

$$I_{th}(25^\circ C) = I_0 e^{(25-T_0)/T_e} = I_0 = 30 \text{ mA}$$

$$I_{off} = 1.1 \cdot I_{th}(25^\circ C) = 1.1 \cdot I_0 = 33 \text{ mA} < I_{th}(55^\circ C) = I_0 e^{(55-T_0)/T_e} \approx 36.6 \text{ mA}$$

$$I_{on} = 2 \cdot I_{th}(25^\circ C) = 2 \cdot I_0 = 60 \text{ mA}$$

Es veu com I_{off} està per sota del corrent llindar per a $55^\circ C$, així doncs l'expressió que hem d'emprar és:

$$t_r(55^\circ C) = \tau_{sp} \ln \frac{I_{on} - I_{off}}{I_{on} - I_{th}(55^\circ C)} = \tau_{sp} \ln \frac{60 \text{ mA} - 33 \text{ mA}}{60 \text{ mA} - 36.6 \text{ mA}} \approx 0.29 \text{ ns}$$

Quina és la màxima velocitat de modulació en aquesta situació si el temps de commutació ha de ser inferior al 20% del temps de bit ?:

$$t_r(55^\circ C) < 0.2 T_b = \frac{1}{5 R_b} \rightarrow R_b < \frac{1}{5 t_r(55^\circ C)} = \frac{1}{5 \tau_{sp} \ln \frac{I_{on} - I_{off}}{I_{on} - I_{th}(55^\circ C)}} \approx 695 \text{ Mb/s}$$

9) Si es vol garantir que el làser es mantingui en la zona de treball làser, quina és la màxima variació de temperatura que es pot donar ?:

$$I_{off} = 1.1 \cdot \underbrace{I_0 e^{(T_1-T_0)/T_e}}_{I_{th}(T_1)} > \underbrace{I_0 e^{(T_2-T_0)/T_e}}_{I_{th}(T_2)} \rightarrow \underbrace{T_2 - T_1}_{\Delta T} = T_e \cdot \ln(1.1) \approx 14^\circ C$$

10) Si el que es vol garantir és que les variacions en el temps de commutació siguin inferiors a un 10% respecte el seu valor a T_0 , quina és la màxima variació de temperatura que es pot donar ?:

$$\frac{t_{r,2}}{t_{r,1}} = \frac{\left(\ln \frac{I_{on} - I_0 e^{(T-T_0)/T_e}}{I_{off} - I_0 e^{(T-T_0)/T_e}} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\ln \frac{I_{on} - I_0}{I_{off} - I_0} \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\left(\ln \frac{2 - e^{(T-T_0)/T_e}}{1.1 - e^{(T-T_0)/T_e}} \right)^{\frac{1}{2}}}{(\ln 10)^{\frac{1}{2}}} < 1.1 \rightarrow \ln \frac{2 - e^{(T-T_0)/T_e}}{1.1 - e^{(T-T_0)/T_e}} = 1.21 \cdot \ln 10 \rightarrow$$

$$I_{th}(T) = I_0 e^{(T-T_0)/T_e} \quad I_{on} = 2 \cdot I_0$$

$$I_{off} = 1.1 \cdot I_0$$

$$\rightarrow \frac{2 - e^{(T-T_0)/T_e}}{1.1 - e^{(T-T_0)/T_e}} = 10^{1.21} \rightarrow e^{(T-T_0)/T_e} (10^{1.21} - 1) = 1.1 \cdot 10^{1.21} - 2 \rightarrow$$

$$\rightarrow e^{(T-T_0)/T_e} = \frac{1.1 \cdot 10^{1.21} - 2}{10^{1.21} - 1} \rightarrow \underbrace{T - T_0}_{\Delta T} = T_e \cdot \ln \left(\frac{1.1 \cdot 10^{1.21} - 2}{10^{1.21} - 1} \right) \approx 6^\circ C$$