Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 19 de Novembre de 2008

Temps : 1h 15’ Nom:

TEST (6 punts)

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

1. L’avantage d’emprar una unió PN en “heterojunction” en la fabricació de fonts òptiques és que:
   a. Incrementa el tamany de la zona activa
   b. Redueix el cost del dispositiu
   c. Ajuda a guiar la llum emesa cap a l’exterior
   d. Les respostes a i c són correctes
2. El concepte de nivell de transparència d’un material semiconductor fa referència a la concentració de portadors necessària per a que:
   a. El guany del material iguali les pèrdues de scattering
   b. El guany del material iguali les pèrdues de la cavitat
   c. El guany del material iguali les pèrdues de scattering més les de la cavitat
   d. El procés d’emissió estimulada iguali el procés d’absorció
3. El guany en passada única d’una cavitat làser es defineix com:
   a. $G \equiv \exp\left\{\left(\Gamma g_m - \alpha_s - (1/2L)\ln(1/R)\right)L\right\}$
   b. $G \equiv \exp\left\{\left(\Gamma g_m - \alpha_s - (1/L)\ln(1/R)\right)L\right\}$
   c. $G \equiv \exp\left\{\Gamma\left(g_m - \alpha_s - (1/2L)\ln(1/R)\right)L\right\}$
   d. $G \equiv \exp\left\{\Gamma\left(g_m - \alpha_s - (1/L)\ln(1/R)\right)L\right\}$
4. Si fem tendir la longitud de la cavitat d’un diode làser a zero, la densitat de corrent llidar tendirà a:
   a. Infinit
   b. Zero
   c. No canviarà
   d. No es pot dir res al respecte
5. 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
6. 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
7. Després de modular sinusoïdalment un LED (τ_{sp}=1ns), l’índex de modulació de la potència òptica és un 75% inferior a l’índex de modulació del corrent estímul. A quina freqüència s’ha modulat ?:
   a. 140 MHz b. 212 MHz c. 616 MHz d. 636 MHz
8. 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:
   a. $\mathrm{P(t)} = \mathrm{P}_0\, \mathrm{e}^{-t/\tau_{sp}}$
   b. $\mathrm{P(t)} = \mathrm{P}_0\, \mathrm{e}^{t/\tau_{sp}}$
   c. $\mathrm{P(t)} = \mathrm{P}_0 \left[1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_{sp}}\right]$
   d. $\mathrm{P(t)} = \mathrm{P}_0 \left[1 - \mathrm{e}^{t/\tau_{sp}}\right]$

9. Un diode làser semiconductor té una zona activa de longitud L=200 micres, un índex de refracció n=3.5 i és simètric en sentit longitudinal. Determineu el valor de les reflectivitats de les parets del làser sabent que el temps de vida del fotó és de 3.5 ps i que les pèrdues totals són degudes en un 50% al fenomen de scattering:

a. R = 0.31
b. R = 0.56
c. R = 0.37 **sortia 0.72**
d. R = 0.61

ANUL·LADA

10. Una cavitat làser monomode té unes dimensions L= 300 micres, W=2.6 micres, d=1 micra, un índex de refracció n=3.5. Assumint unes pèrdues per scattering nul·les així com l'emissió espontània de llum menyspreable, determineu la concentració de fotons en la cavitat quan el corrent d'alimentació és de 50mA:

a. $S=3.6\cdot10^{21}\ J^{-1}m^{-3}$
b. $S=10^{21}\ J^{-1}m^{-3}$
c. $S=3.6\cdot10^{21}\ m^{-3}$
d. $S=10^{21}\ m^{-3}$ **sortia $S=1.2\cdot10^{21}\ m^{-3}$**

ANUL·LADA

11. Per tal d'estimar el corrent llindar d'un làser es mesuren 2 punts de la corba L-I en la zona làser: $(I_1, P_1) - (I_2,P_2)$. L'expressió que estima I_{th} és:

a. $I_{th} \approx I_1 - P_1\left[(P_2-P_1)/(I_1-I_2)\right]$
b. $I_{th} \approx I_1 - P_1\left[(I_1-I_2)/(P_2-P_1)\right]$
c. $I_{th} \approx I_1 - P_1\left[(P_2-P_1)/(I_2-I_1)\right]$
d. $I_{th} \approx I_1 - P_1\left[(I_2-I_1)/(P_2-P_1)\right]$

12. Un diode làser semiconductor presenta les següents característiques:

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

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'exercicia anterior, determineu la logitud d'ona dels modes d'oscil·lació extrems:

a. λ_{up}=1304.51 nm , λ_{down}=1295.34 nm
b. λ_{up}=1304.90 nm , λ_{down}=1295.10 nm
c. λ_{up}=1304.90 nm , λ_{down}=1295.34 nm
d. λ_{up}=1304.51 nm , λ_{down}=1295.10 nm

14. En un diode làser monomode simètric amb unes pèrdues de scattering de 100 cm^{-1} es pot assumir que el nivell de transparència és nul i que el residu d'emissió espontània (β) és menyspreable. Per efecte de l'envelliment les reflectivitats dels miralls han disminuït un factor e (R'=R/e). Si es vol mantenir el corrent llindar del làser la longitud de la cavitat hauria de:

a. augmentar 100 μm
b. disminuïr 100 μm
c. augmentar 10 μm
d. disminuïr 10 μm

15. Un diode làser simètric té els següents paràmetres: L=200 μm, W= 5 μm i d=0,2 μm, $a=2,5\cdot10^{-20}\ m^2$, n = 3.5, Γ=1 y I_{th}=22mA. Si es modula el làser amb $I_{ON}= 3\cdot I_{TH}$ i $I_{OFF}= 1.1\cdot I_{TH}$, determineu quin hauria τ_{sp} per a que el temps de commutació fos 10 vegades menor que en el cas d'haver modulat amb $I_{ON}= 3\cdot I_{TH}$ i I_{OFF}=0:

Temps de commutació en la zona làser: $t_{ON}^2 = \dfrac{2qV}{v\Gamma a}\dfrac{\ln(P_{ON}/P_{OFF})}{I_{ON}-I_{OFF}}$ [s^2]

a. τ_{sp} =1ns
b. τ_{sp} =2ns
c. τ_{sp} =10ns
d. τ_{sp} =20ns

PROBLEMA (4 punts)

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

La funció de transferència electroòptica normalitzada d'un diode làser, en petita senyal, segueix l'expressió:

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

On ω és la polsació 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.

1) Si el nivell de transparència és zero, ω_c i α es poden expressar de la manera següent:

a. $\alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)$, $\omega_c^2 = \frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)$

b. $\alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)$, $\omega_c^2 = \frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)$

c. $\alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)$, $\omega_c^2 = \frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)$

d. $\alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)$, $\omega_c^2 = \frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)$

2) 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. $J_0 = 1.5J_{th}$ c. $J_0 = 2J_{th}$ d. $J_0 = 2.5J_{th}$

3) Prenent l'expressió: $\alpha/\omega_c = \sqrt{\tau_{ph}/\tau_{sp}}\left\{\left(J_0/2J_{th}\right)\Big/\sqrt{\left(J_0/J_{th}\right)-1}\right\}$, determineu per a quins marges de corrent el làser ressonarà:

a. $\frac{J_0}{J_{th}} \in \left(1, \frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\right] \cup \left[\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1+\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right), \infty\right)$

b. $\frac{J_0}{J_{th}} \in \left[\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right), \frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1+\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\right]$

c. $\frac{J_0}{J_{th}} \in \left(1, \frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1+2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\right] \cup \left[\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1+\sqrt{1+2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right), \infty\right)$

d. $\frac{J_0}{J_{th}} \in \left[\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1+2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right), \frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1+\sqrt{1+2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\right]$

4) Si es pretén que el làser no ressoni mai, quina condició s'ha de complir:

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

5) Prenent un corrent $J_0 = 2J_{th}$ així com $\tau_{ph} = \beta\,\tau_{sp}$ $(\beta << 1)$, determineu l'amplada de banda a -3dB aproximada del dispositiu:

a. $\omega_{3dB} \approx \frac{1+\sqrt{2}}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-2\right)$ b. $\omega_{3dB}^2 \approx \frac{1+\sqrt{2}}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-2\right)$ c. $\omega_{3dB} \approx \frac{1+\sqrt{2}}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-1\right)$ d. $\omega_{3dB}^2 \approx \frac{1+\sqrt{2}}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-1\right)$

6) Es pot dir que si reduïm la longitud de la cavitat làser, l'amplada de banda:

a. depèn de més paràmetres b. no canvia c. decreix d. creix

Donat que el làser es modula digitalment, es pot prendre el temps de resposta del dispositiu com a paràmetre de referència:

$$t_r^2 = \frac{2qV}{v\Gamma a}\frac{\ln\left(P_{on}/P_{off}\right)}{I_{on}-I_{off}}$$

7) Donada una modulació on es manté constant el diferencial de corrent entre els bits "1" i "0", per a quin valor de contínua es donaria un temps de resposta mínim:

a. $\mathrm{I_{dc}=0}$ b. $\mathrm{I_{dc}=I_{th}}$ c. $\mathrm{I_{dc}=2I_{th}}$ d. $\mathrm{I_{dc}=\infty}$

8) Ara assumint que el làser se satura per a un corrent superior a 3 cops el corrent llindar i que el diferencial es demana que sigui dos cops el corrent llindar, quan valdrà el nivell de contínua:

a. $\mathrm{I_{dc}=0}$ b. $\mathrm{I_{dc}=I_{th}}$ c. $\mathrm{I_{dc}=2I_{th}}$ d. $\mathrm{I_{dc}=3I_{th}}$

9) Quan val el temps de resposta en aquest cas ?:

a. $\mathrm{t_r=0}$ b. $\mathrm{t_r=1ps}$ c. $\mathrm{t_r=10\,ps}$ d. $\mathrm{t_r=\infty}$

Per tal de millorar les prestacions es decidex fixar el nivell de contínua a $2I_{th}$ i optimitzar el diferencial entre bits tenint en compte tant el temps de resposta com la relació d'extinció. El paràmetre de qualitat és el següent:

$$\mathrm{Q\equiv\left(I_{on}-I_{off}\right)/t_r}$$

error de plantejament

10) Trobeu el valor òptim del diferencial de corrents entre els bits "1" i "0" que maximitza el paràmetre Q:

a. $\mathrm{2I_{th}/\sqrt{3}}$ b. $\mathrm{2I_{th}/3}$ c. $\mathrm{2I_{th}/\sqrt{2}}$ d. $\mathrm{I_{th}}$

ANUL·LADA

Resolució

1) Si el nivell de transparència és nul (N_0=0), podem fer el següent:

$$\mathrm{2\alpha=\frac{1}{\tau_{sp}}+\tau_{ph}\frac{v\Gamma a}{qd}\left(J_0-J_{th}\right)=\frac{1}{\tau_{sp}}+\tau_{ph}v\Gamma a\frac{J_{th}}{qd}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)=\frac{1}{\tau_{sp}}+\tau_{ph}v\Gamma a\frac{N_{th}}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)}$$

$$\mathrm{\frac{J_{th}}{qd}=\frac{N_{th}}{\tau_{sp}}}$$

$$\mathrm{=\frac{1}{\tau_{sp}}\left(1+\tau_{ph}v\Gamma aN_{th}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)\right)=\frac{1}{\tau_{sp}}\left(\cancel{1}+\cancel{\tau_{ph}}\,\cancel{v\alpha_t}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-\cancel{1}\right)\right)=\frac{1}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)}$$

$$\mathrm{N_0=0\rightarrow\Gamma a\,N_{th}=\alpha_t} \qquad \mathrm{\tau_{ph}=\frac{1}{v\alpha_t}}$$

$$\mathrm{\omega_c^2=\frac{v\Gamma a}{qd}\left(J_0-J_{th}\right)=v\Gamma a\frac{J_{th}}{qd}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)=v\Gamma a\frac{N_{th}}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)=\frac{v\alpha_t}{\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)=\frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)}$$

2) Així doncs el quocient α/ω_c queda:

$$\frac{\alpha}{\omega_c}=\sqrt{\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\frac{\frac{J_0}{2J_{th}}}{\sqrt{\frac{J_0}{J_{th}}-1}}\quad \begin{array}{l} \xrightarrow{J_0\to J_{th}}\infty \\ \xrightarrow{J_0\to 2J_{th}}\left(\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\right)^{\frac{1}{2}} \\ \xrightarrow{J_0\to\infty}\infty \end{array}$$

Es veu com tant quan el corrent tendeix al corrent llindar com a infinit, el quocient tendeix a infinit, mentre que per a un corrent igual a $2I_{th}$ es minimitza. Per a trobar el mínim de la funció hem fet ús de la derivada:

$$\frac{\partial}{\partial J_0}\left(\frac{\alpha}{\omega_c}\right)=\frac{\frac{1}{\cancel{2}\tau_{sp}}\frac{1}{\cancel{J_{th}}}\left(\frac{1}{\cancel{\tau_{sp}}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)\right)^{\frac{1}{2}}-\frac{1}{\cancel{2}\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)\frac{1}{2}\cancel{\left(\frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\right)^{\frac{1}{2}}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)^{-\frac{1}{2}}\frac{1}{\cancel{J_{th}}}}{\frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)}=0$$

$$\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{2}\frac{J_0}{J_{th}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)^{-\frac{1}{2}}\to\frac{J_0}{J_{th}}-1=\frac{1}{2}\frac{J_0}{J_{th}}\to J_0=2J_{th}$$

3) Per tant el làser ressonarà quan:

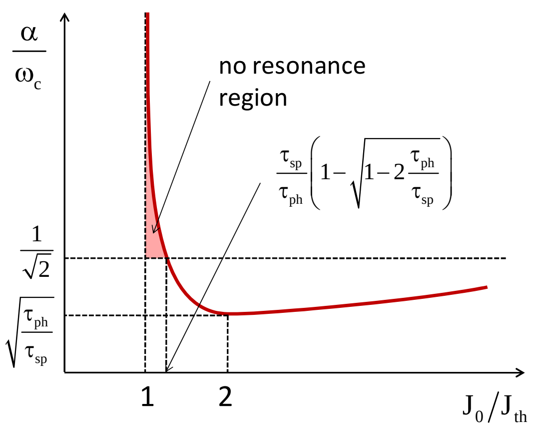
$$\frac{\alpha}{\omega_c}=\sqrt{\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\frac{\frac{J_0}{2J_{th}}}{\sqrt{\frac{J_0}{J_{th}}-1}}\le\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{J_0}{2J_{th}}\le\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}}\sqrt{\frac{J_0}{J_{th}}-1}\to\frac{1}{4}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)^2\le\frac{1}{2}\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right)\to\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)^2-2\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right)+2\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\le 0$$

$$\frac{J_0}{J_{th}}=\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\pm\frac{1}{2}\sqrt{4\left(\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\right)^2-8\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}}=\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1\pm\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\to\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\le\frac{J_0}{J_{th}}\le\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1+\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)$$

$$\frac{\tau_{sp}}{\tau_{ph}}\left(1-\sqrt{1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}\right)\in(1,2]\quad\to\quad 0\le\tau_{ph}\le\frac{1}{2}\tau_{sp}$$

Podem fer un dibuix de la dependència de α/ω_c en funció del corrent d'alimentació:



4) En la gràfica es veu clar que si $\tau_{ph}>\tau_{sp}/2$ no existeix ressonància independentpent de J_0. Per altra banda pujar τ_{ph} redueix l'amplada de banda del làser. Tenim un compromís.

5) Si $J_0=2J_{th}$, la funció de transferència queda de la manera següent:

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

$$\omega_c^2 = \frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}-1\right) \qquad \alpha = \frac{1}{2\tau_{sp}}\left(\frac{J_0}{J_{th}}\right) \qquad J_0 = 2J_{th}$$

Per tant, l'amplada de banda a -3dB:

$$|M(\omega_{3dB})|^2 = \frac{1}{\left[1-\omega_{3dB}^2\tau_{sp}\tau_{ph}\right]^2+\left[\omega_{3dB}2\tau_{ph}\right]^2} = \frac{1}{2} \rightarrow \underbrace{\left[1-\omega_{3dB}^2\tau_{sp}\tau_{ph}\right]^2}_{1+\omega_{3dB}^4\tau_{sp}^2\tau_{ph}^2-2\omega_{3dB}^2\tau_{sp}\tau_{ph}} + \underbrace{\left[\omega_{3dB}2\tau_{ph}\right]^2}_{\omega_{3dB}^2 4\tau_{ph}^2} = 2 \rightarrow$$

$$\rightarrow \omega_{3dB}^4 - \omega_{3dB}^2 2\frac{(\tau_{sp}-2\tau_{ph})}{\tau_{sp}^2\tau_{ph}} - \frac{1}{\tau_{sp}^2\tau_{ph}^2} = 0 \rightarrow \qquad \omega_{3dB}^2 = \frac{(\tau_{sp}-2\tau_{ph})}{\tau_{sp}^2\tau_{ph}} \pm \sqrt{\frac{(\tau_{sp}-2\tau_{ph})^2}{\tau_{sp}^4\tau_{ph}^2}+\frac{1}{\tau_{sp}^2\tau_{ph}^2}}$$

$$\omega_{3dB}^2 = \frac{1}{\tau_{sp}\tau_{ph}}\left\{\left(1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\right) \pm \sqrt{\left(1-2\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\right)^2+1}\right\}$$

$$= \frac{1}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-2\right)\left(1+\sqrt{1+\frac{1}{(1-2\beta)^2}}\right) \xrightarrow{\beta<<1} \frac{1+\sqrt{2}}{\tau_{sp}^2}\left(\frac{1}{\beta}-2\right)$$

$$\tau_{ph} = \beta\tau_{sp} \qquad \beta \in \left(0,\frac{1}{2}\right] \qquad \beta\uparrow \rightarrow \omega_{3dB}\downarrow$$

6) Si la longitud de la cavitat decreix, l'amplada de banda creix:

$$L\downarrow \rightarrow \alpha_t\uparrow \rightarrow \tau_{ph}\downarrow \rightarrow \beta\downarrow \rightarrow \omega_{3dB}\uparrow$$

7) Per tal de veure la tendència de la funció posem I_{on} i I_{off} en funció de I_{th}:

$$t_r^2 = \frac{2qV}{v\Gamma a}\frac{\ln(P_{ON}/P_{OFF})}{I_{ON}-I_{OFF}} = \frac{2qV}{v\Gamma a}\frac{\ln\left(\frac{I_{ON}-I_{TH}}{I_{OFF}-I_{TH}}\right)}{I_{ON}-I_{OFF}} \propto \frac{\ln\left(\frac{\alpha-1}{\beta-1}\right)}{(\alpha-\beta)I_{TH}}$$

$$P \propto (I-I_{TH}) \qquad I_{ON} = \alpha I_{TH}$$

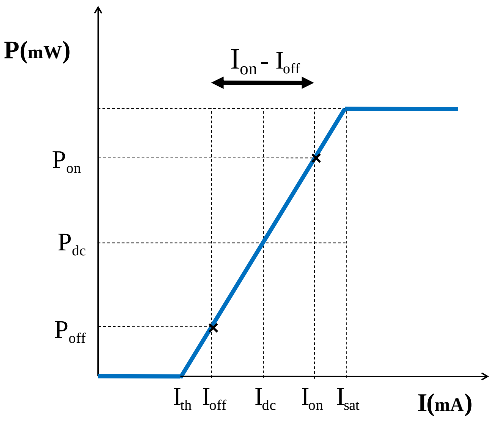
$$I_{OFF} = \beta I_{TH} \qquad \beta > \alpha > 1$$

Si es manté constant I_{on} - I_{off} i es fa créixer els dos valors simultàniament (es puja el nivell de contínua):

$$\alpha-\beta = C \rightarrow \beta = \alpha - C \longrightarrow \frac{\ln\left(\frac{\alpha-1}{\beta-1}\right)}{(\alpha-\beta)I_{TH}} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha-1}{\alpha-C-1}\right)}{C\,I_{TH}} \xrightarrow{\alpha\to\infty} \ln 1 = 0$$

Per tant el temps de commutació mínim es dóna per a un nivell de contínua infinit i tendeix a zero.

8-9) La situació és la que es veu a la figura:



Queda clar que si no es vol retallar el senyal s'ha de forçar $I_{on}=I_{sat}=3I_{th}$. Donat que l'excursió de senyal és 2 I_{th}, això fa que $I_{off}=I_{th}$, per tant $I_{dc}=2I_{th}$ .Aquesta situació límit dóna un temps de commutació infinit evidenciant que l'expressió no és vàlida en aquest tipus de situacions.

10) Si es manté el nivell de contínua, es podria pensar quina seria l'excursió de senyal òptima. Si es fa prenent com a referència el temps de commutació s'arriba a una situació absurda segons la qual l'excursió òptima és zero. La idea era tenir en compte, no només el temps de commutació sinó, també l'excursió de senyal, però hi va haver un error de plantejament. Disculpeu les molèsties.