

Fotodetección

- 1- Conceptos básicos de Fotodetección
- 2- Responsividad
- 3- Tiempo de respuesta y Ancho de banda

Prof. Miguel A. Muriel

1- Conceptos básicos de Fotodetección

Fotodetección \Rightarrow ABSORCIÓN

Tipos de Fotodetectores

1) Térmicos

\rightarrow Absorben la energía óptica \rightarrow cambian su temperatura.

Convierten la energía del flujo de fotones incidentes en calor \rightarrow

\rightarrow el cambio de temperatura afecta a alguna propiedad que puede medirse externamente.

-Bolómetro $\rightarrow R(T)$ (cambia su resistencia eléctrica)

-Piroeléctrico $\rightarrow C(T)$ (cambia su capacidad)

Tiempos de respuesta muy grandes \rightarrow No son adecuados para Comunicaciones

2) Fotoeléctricos

- Absorben la energía del flujo de fotones →
- originan transiciones electrónicas a niveles de energía más altos →
- generan portadores de carga (e^- y h^+) →
- mediante un campo externo aplicado producen una fotocorriente →
- fotocorriente que genera una tensión en una impedancia de carga

Dos tipos:

a) (Efecto externo) Emisión Fotoeléctrica

- los electrones fotogenerados escapan del material como electrones libres.

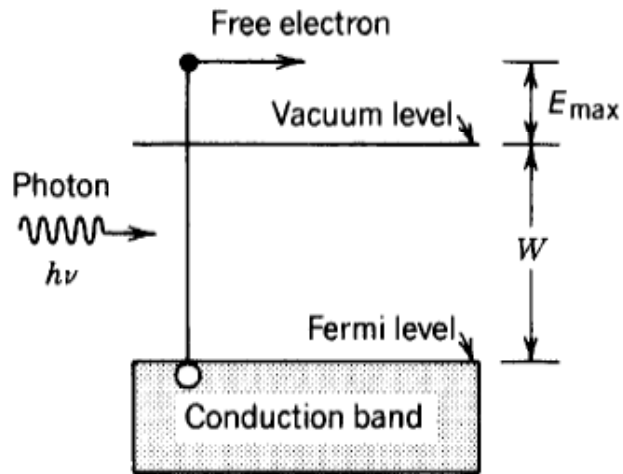
b) (Efecto interno) Fotoconducción

- los electrones fotogenerados quedan dentro del material semiconductor
- aumentan su conductividad

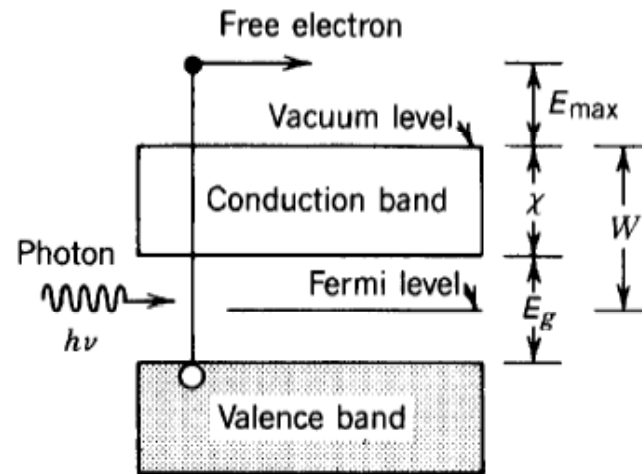
Emisión Fotoeléctrica

$$E_{\max} = h\nu - W$$

$$E_{\max} = h\nu - (E_g + \chi)$$

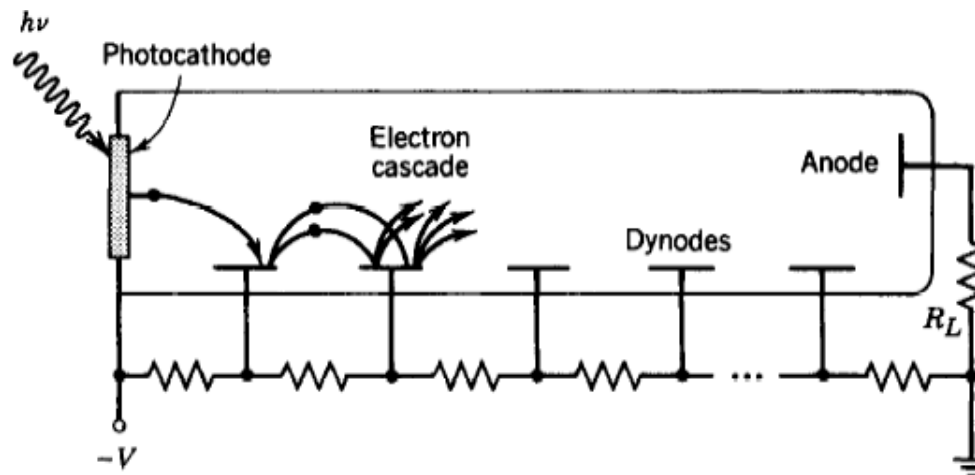
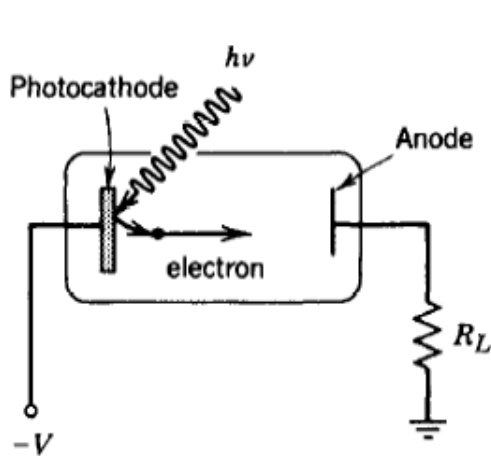


(a)



(b)

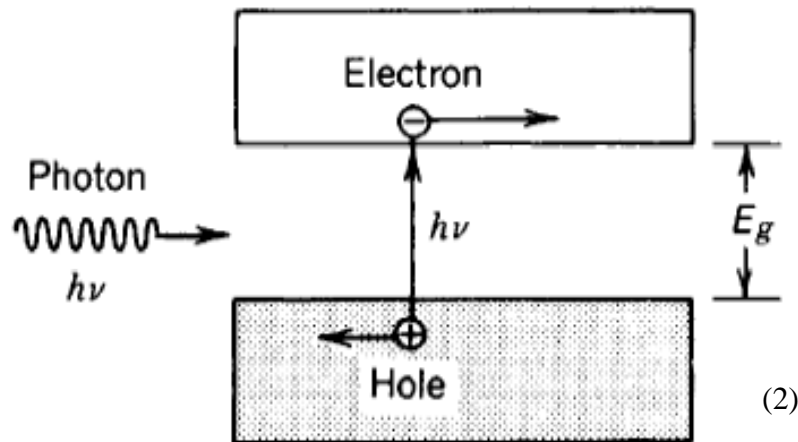
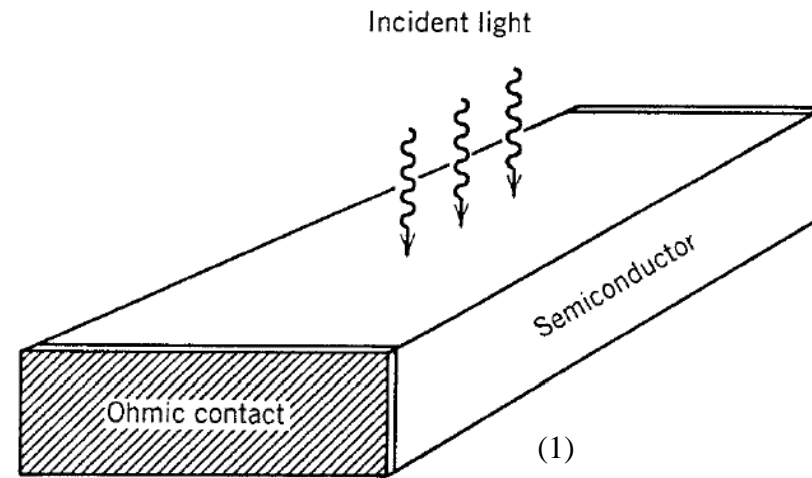
Photoelectric emission from (a) a metal and (b) a semiconductor.



(2)

Fotoconducción (Semiconductores)

Fotogeneración de un par electrón-hueco



$$h\nu \geq E_g$$

$$h\nu \geq E_g \rightarrow h \frac{c}{\lambda} \geq E_g \rightarrow \boxed{\lambda \leq \frac{hc}{E_g}} \leftarrow \lambda_c \text{ (\lambda de corte)}$$

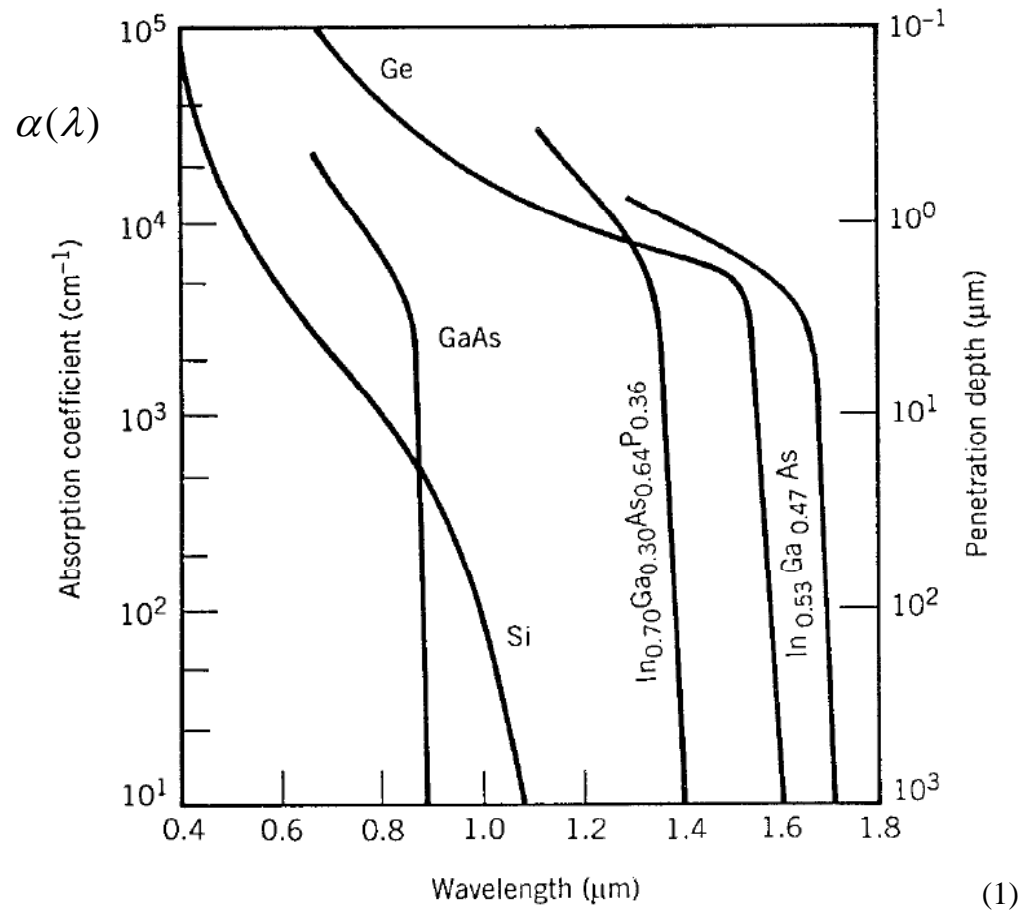
$\underbrace{E_g}_{\lambda_c}$

No hay absorción para $\lambda \geq \lambda_c$

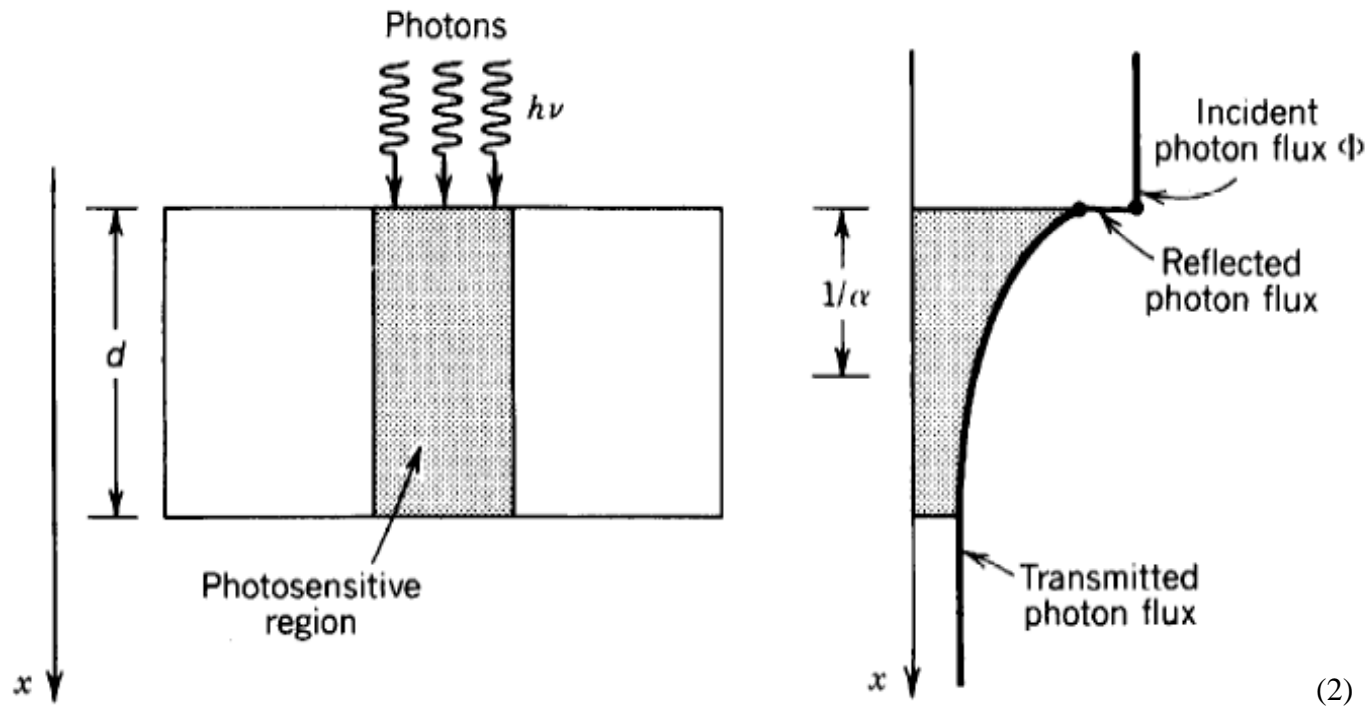
Cada fotón absorbido \rightarrow par $e^- - h^+$ \rightarrow $\underbrace{\eta_R(\lambda)}_{\substack{\text{Eficiencia} \\ \text{cuántica} \\ \text{de recepción}}} = \frac{P_{\text{absorbida}}}{P_{\text{in}}}$

$$P_{transmitida} = P_{in} e^{-\alpha(\lambda)d}$$

$\alpha(\lambda) \rightarrow$ Coeficiente de Absorción del semiconductor



Wavelength dependence of the absorption coefficient for several semiconductor materials.



Effect of absorption on the quantum efficiency η .

$$\underbrace{x_{\text{penetración}}}_{\text{Profundidad de penetración}} \rightarrow e^{-\alpha x_{\text{penetración}}} = e^{-\frac{x_{\text{penetración}}}{1/\alpha}} = \frac{1}{e} \rightarrow x_{\text{penetración}} = \frac{1}{\alpha}$$

$$P_{in} \rightarrow \underbrace{(1-R)P_{in}}_{T \approx 1} \rightarrow \underbrace{(1-R)P_{in} e^{-\alpha(\lambda)d}}_{P_{transmitida}}$$

$$P_{absorbida} = (1-R)P_{in} \frac{\int_0^d e^{-\alpha x} dx}{\int_0^\infty e^{-\alpha x} dx} = (1-R)P_{in} \overbrace{(1 - e^{-\alpha(\lambda)d})}^{0(\alpha d=0) \quad 1(\alpha d=\infty)}$$

$\underbrace{\eta(\lambda)}_{\substack{\text{Eficiencia} \\ \text{óptica} \\ \text{de absorción}}} = \frac{P_{absorbida}}{P_{in}} = \underbrace{(1-R)}_{\approx 1} (1 - e^{-\alpha(\lambda)d})$	$[\lambda < \lambda_c]$
---	-------------------------

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \sim 10^4 \text{ cm}^{-1} \\ d \sim 5 \mu\text{m} \end{array} \right\} \rightarrow \eta = 1 - e^{-10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,993 \approx 1$$

$$\underbrace{\eta_R(\lambda)}_{\substack{\text{Eficiencia} \\ \text{cuántica} \\ \text{de recepción}}} = \zeta \underbrace{\eta(\lambda)}_{\substack{\text{Eficiencia} \\ \text{óptica} \\ \text{de absorción}}} = \underbrace{\zeta}_{\approx 1} \underbrace{(1-R)(1-e^{-\alpha(\lambda)d})}_{\approx 1}$$

$$\zeta = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pares } e^- \text{-} h^+ \text{ generados que contribuyen a la corriente}}{\text{N}^\circ \text{ de pares } e^- \text{-} h^+ \text{ generados}}$$

$$P_{in} \rightarrow \xrightarrow{\eta(\lambda)} P_{absorbida} \xrightarrow{\zeta} I_{ph}$$

2- Responsividad $[\mathcal{R}]$

$$\underbrace{I_{ph}}_{\text{Fotocorriente}} = \underbrace{\eta_R}_{\substack{\text{Eficiencia} \\ \text{cuántica} \\ \text{de recepción}}} \underbrace{P_{in}}_{\text{Potencia incidente}} \left(\frac{q}{h\nu} \right)$$

$$\eta_R = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pares } e^- \text{-} h^+ \text{ generados que contribuyen a la corriente}}{\text{N}^\circ \text{ de fotones incidentes}}$$

$$= \frac{\text{Fotones } \rightarrow e^- \text{-} h^+}{\text{Fotones } \rightarrow e^- \text{-} h^+ + \text{Fotones } \not\rightarrow e^- \text{-} h^+}$$

Photons

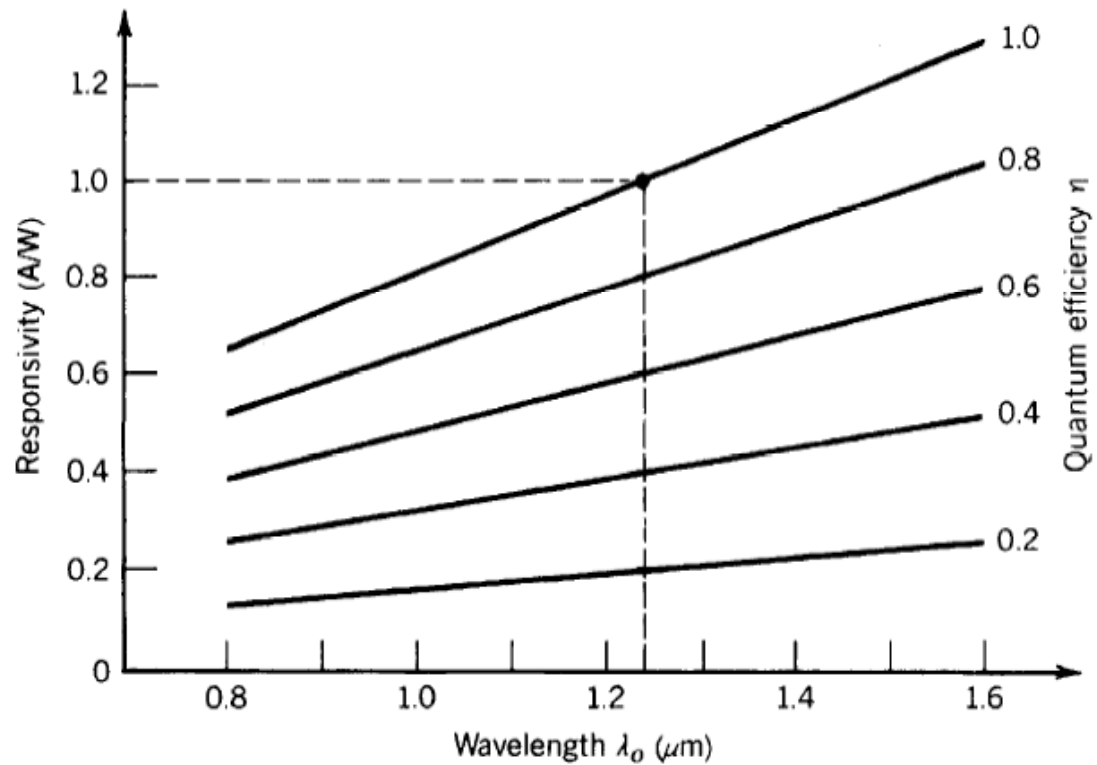


Photoelectrons



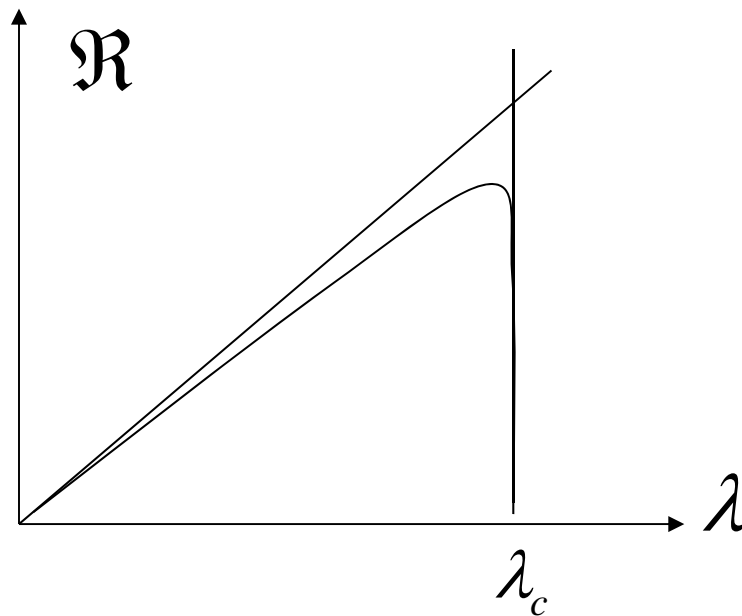
(2)

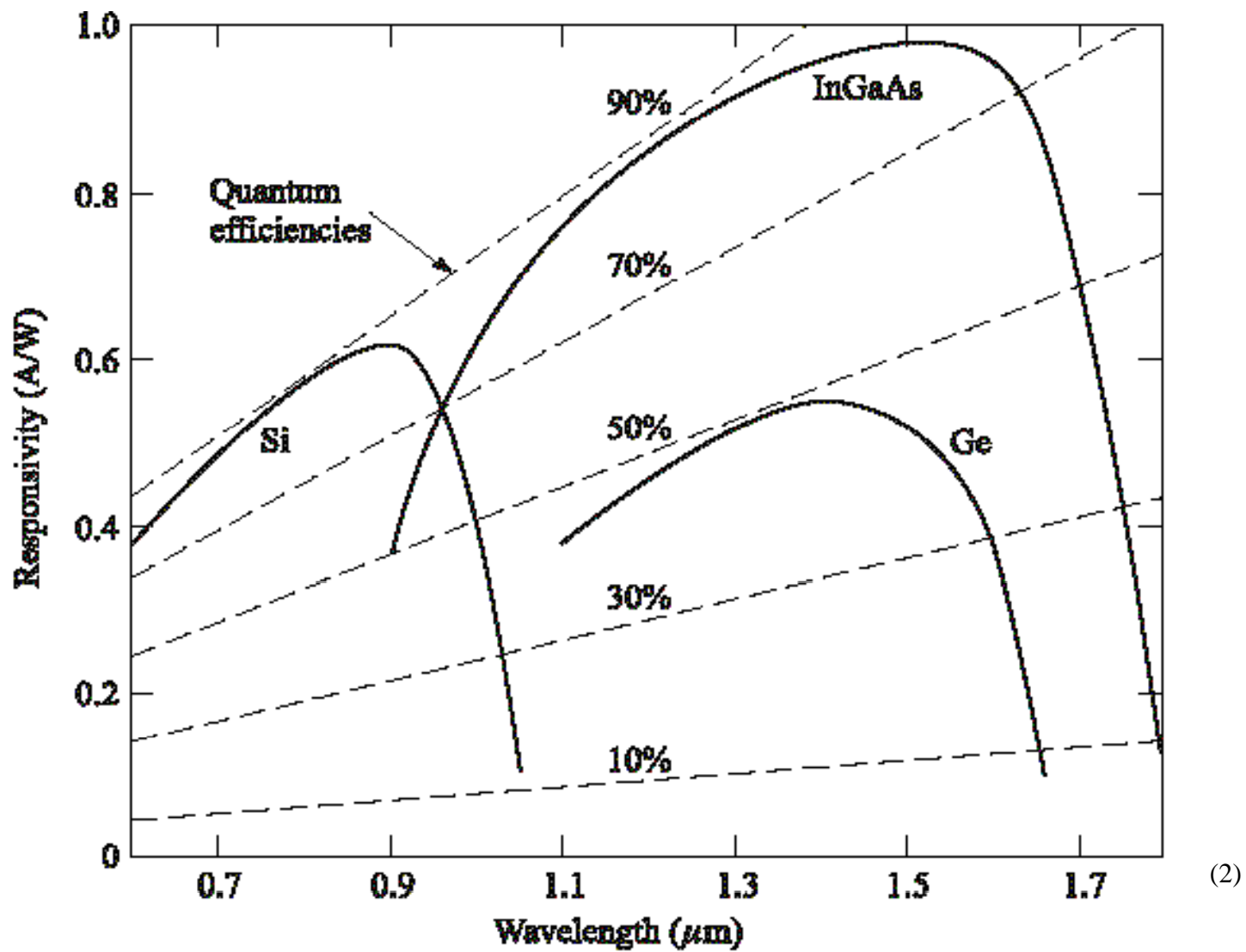
$$\boxed{\mathfrak{R} = \frac{I_{ph}}{P_{in}}} = \eta_R \left(\frac{q}{h\nu} \right) = \eta_R \frac{\lambda}{hc} = \eta_R \frac{\lambda(\mu m)}{1,24} [A/W]$$



Responsivity \mathfrak{R} (A/W) versus wavelength λ_o with the quantum efficiency η as a parameter. $\mathfrak{R} = 1$ A/W at $\lambda_o = 1.24 \mu\text{m}$ when $\eta = 1$.

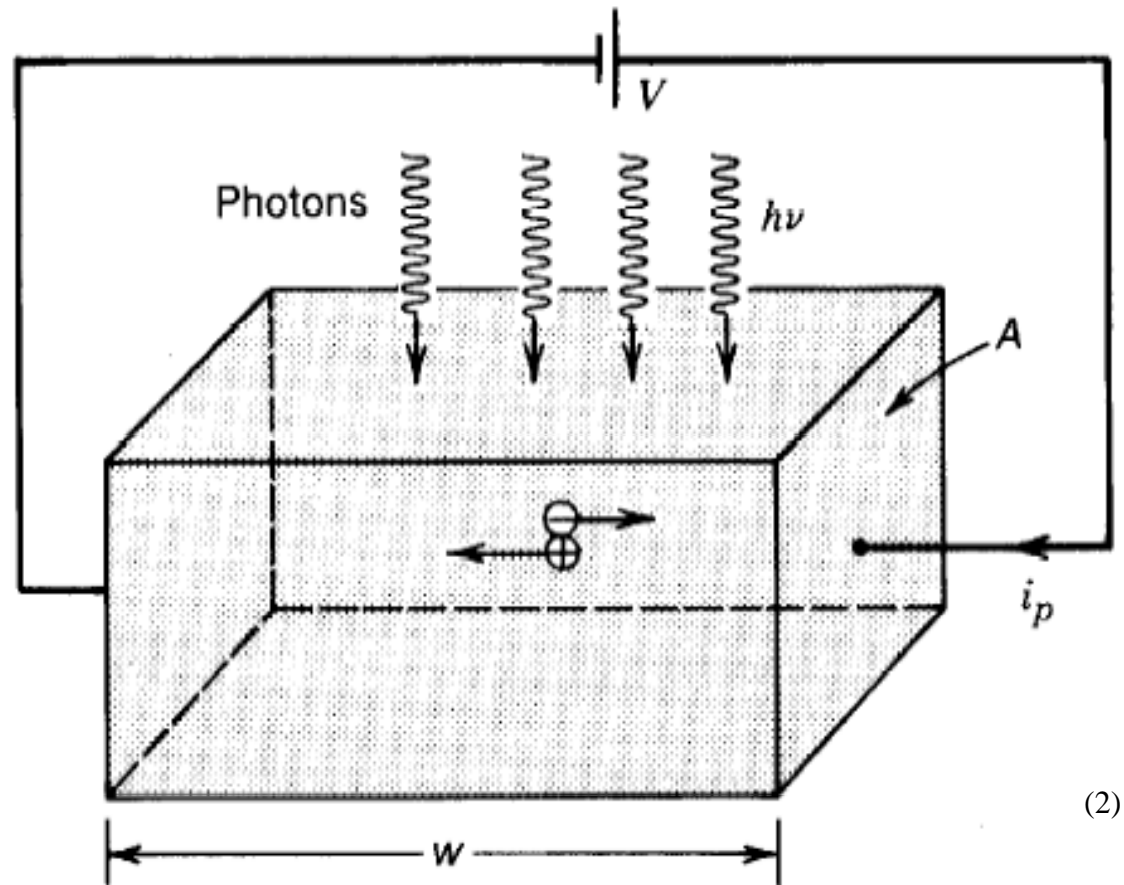
$$\mathfrak{R} = \eta_R \frac{\lambda(\mu m)}{1,24} = (1 - e^{-\alpha(\lambda)d}) \frac{\lambda(\mu m)}{1,24} \quad [\lambda < \lambda_c]$$



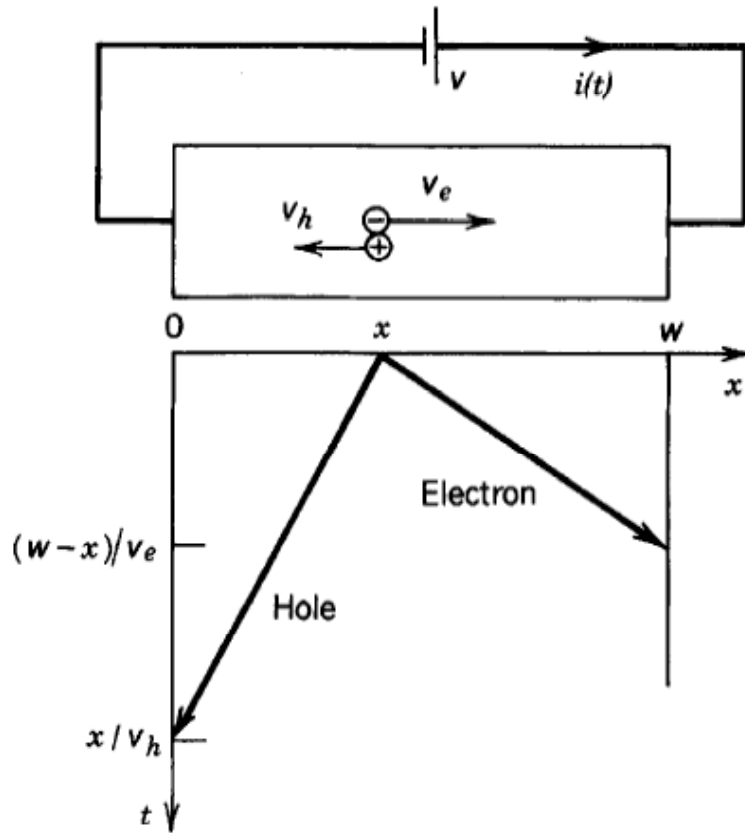


(2)

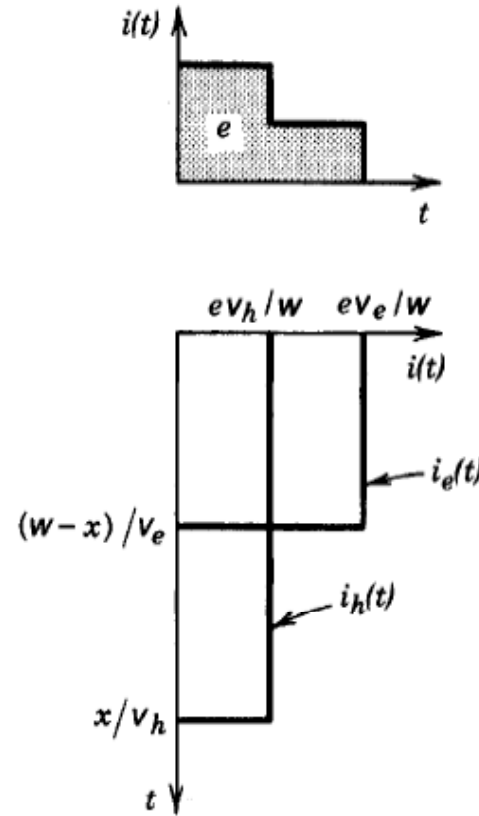
3- Tiempo de respuesta y Ancho de banda



$$\underbrace{v_d}_{\text{velocidad de arrastre}} = \mu E \rightarrow \begin{cases} v_e = \mu_e E \\ v_h = \mu_h E \end{cases} \rightarrow I = \frac{Q}{w} v_d \rightarrow I = \frac{Q}{w} \mu E$$

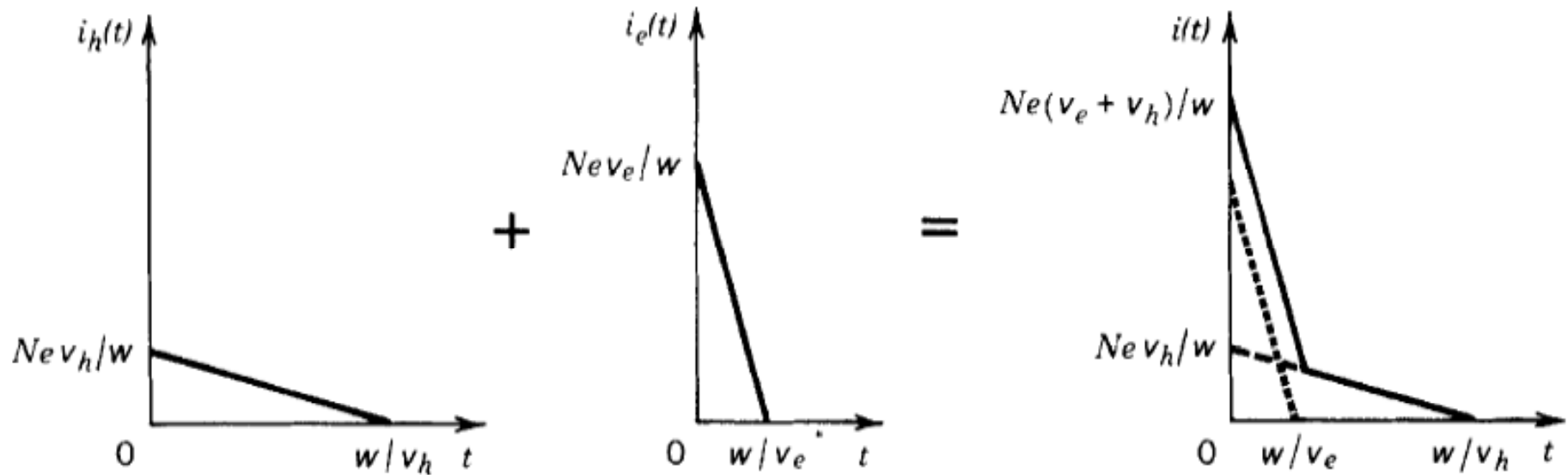


(a)



(b)

(a) An electron-hole pair is generated at the position x . The hole moves to the left with velocity v_h and the electron moves to the right with velocity v_e . The process terminates when the carriers reach the edge of the material. (b) Hole current $i_h(t)$, electron current $i_e(t)$, and total current $i(t)$ induced in the circuit. The total charge induced in the circuit is e . (2)

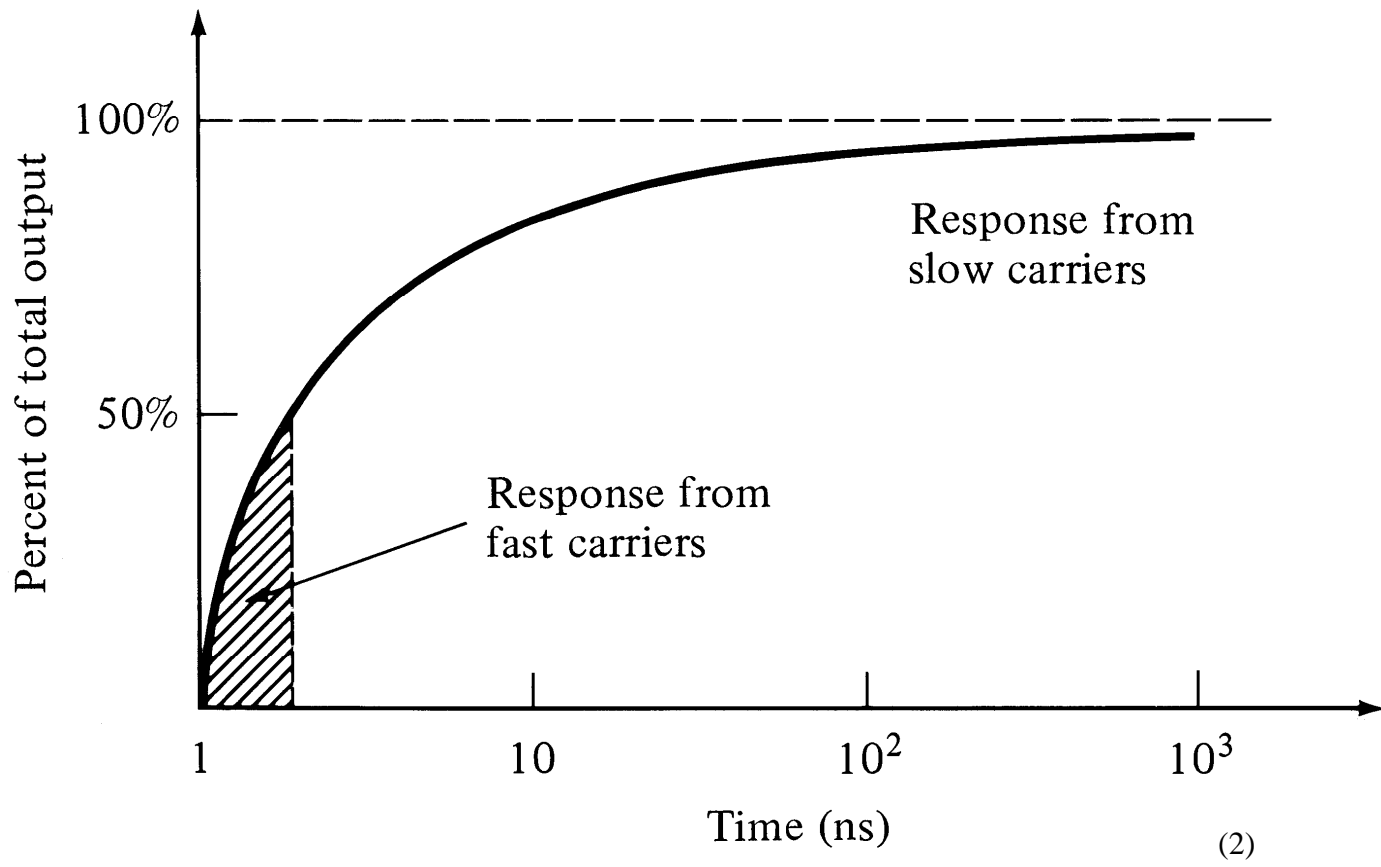


Hole current $i_h(t)$, electron current $i_e(t)$, and total current $i(t)$ induced in the circuit for electron-hole generation by N photons uniformly distributed between 0 and w .

(2)

$\tau_{tr} \rightarrow$ Tiempo de tránsito \rightarrow Combinación de τ_e y $\tau_h \rightarrow (\tau_{tr} = \frac{w}{v_d})$

Típicamente $w = 10 \mu m$, $v_d = 10^5 m/s \rightarrow \tau_{tr} = 100 ps$



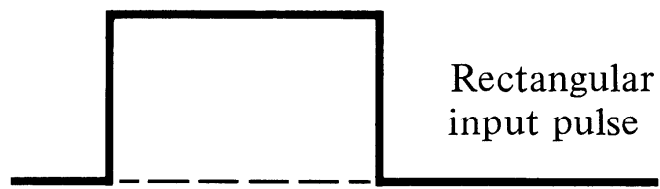
Tiempo de respuesta

1) $\tau_{\text{fotodiodo}} \rightarrow$ Combinación de τ_{tr} y $\tau_{\text{difusión}}$

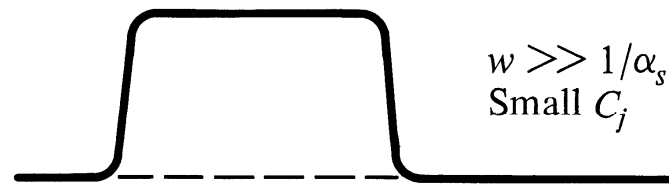
Se minimiza $\tau_{\text{difusión}} \rightarrow \tau_{\text{fotodiodo}} \approx \tau_{tr} \propto W$

2) $\tau_{RC} \rightarrow$ Tiempo del circuito equivalente (generalmente $\tau_{RC} = RC$)

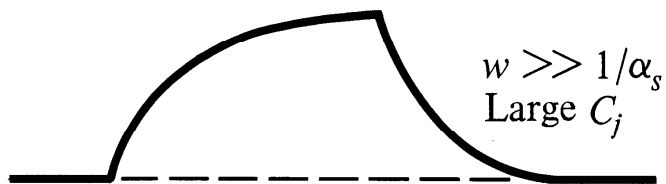
$$\underbrace{T_r}_{\text{tiempo de subida}} = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC}) \approx 2,2(\tau_{tr} + \tau_{RC})$$



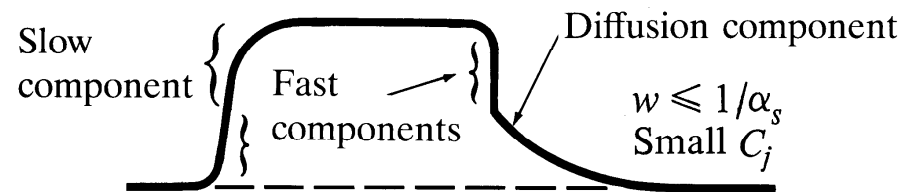
(a)



(b)



(c)



(d)

(2)

Ancho de banda

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})} \approx \frac{0,35}{T_r}$$

$$\tau_{tr} = \tau_{RC} = 100 \text{ ps} \rightarrow \Delta f < 1 \text{ GHz}$$

$$\tau_{tr} = \tau_{RC} < 10 \text{ ps} \rightarrow \Delta f > 10 \text{ GHz}$$

(1) Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd Ed., Wiley, 2002

(2) Saleh and Teich, "Fundamentals of Photonics", 1st Ed., Wiley, 2007