

B.4. Detección de luz e imágenes

B.4.1. Introducción

- veremos la interacción luz-semiconductor
- => se aprovecha para procesamiento de información
- detección de luz: el componente fotónico convierte señal luminosa en electrónica

B.4.2. Breve repaso de la estructura de bandas en un semiconductor

La descripción de un electrón en un semiconductor se hace a partir de ecuación de Schrödinger:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2 \cdot m_o} \nabla^2 + U(r) \right] \cdot \psi(r) = E \cdot \psi(r) \Rightarrow \psi_k(r) = e^{ikr} \cdot u_k(r)$$

- Momento del electrón en el cristal o momento del cristal:

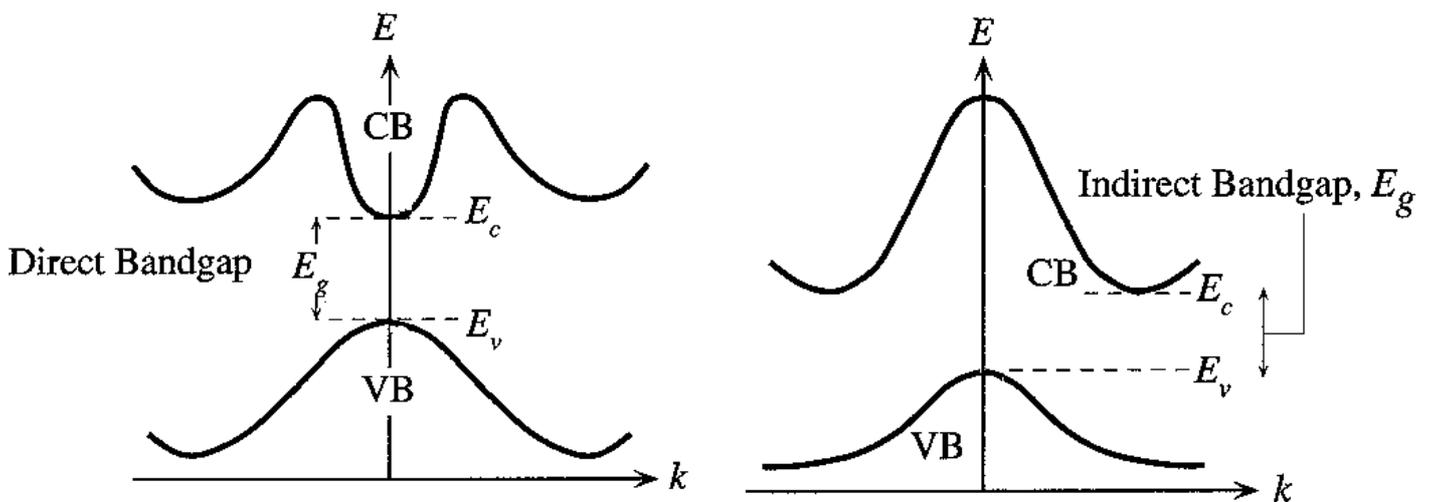
$$p = \hbar k$$

- Energía del electrón:

a) Electrón libre: $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_o}$

b) Electrón en el cristal: $E = E(k)$

(estructura de bandas del semiconductor)



Para un semiconductor de gap directo cerca del mínimo de la banda de conducción:

$$E(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$$

Con m_e^* = Masa efectiva del electrón:

$$\frac{1}{m_e^*} = \frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{d^2 E}{dk^2}$$

De forma análoga en la banda de valencia tenemos:

$$m_h^* = \text{Masa efectiva del hueco}$$

B.4.3. Propiedades ópticas de los semiconductores.

La luz es una onda electromagnética que se propaga en un medio:

$$E = E_o \cdot e^{\left\{-\frac{\alpha}{2}z\right\}} \cdot e^{\left\{i\omega\left(\frac{n_r}{c}t\right)\right\}}$$

α = Coeficiente de absorción del medio.

Si $\alpha \neq 0$, el flujo fotónico P ($\propto E^*E$) cae exponencialmente:

$$P(z) = P(0) \cdot e^{-\alpha z}$$

Absorción debida a:

- Absorción por parte de impurezas del material.
- Absorción intrabanda (de electrones de la banda de conducción).
- **Transición de banda a banda.**

Tanto el proceso de absorción como el de emisión (proceso inverso) han de cumplir los principios de conservación de la energía y del momento.

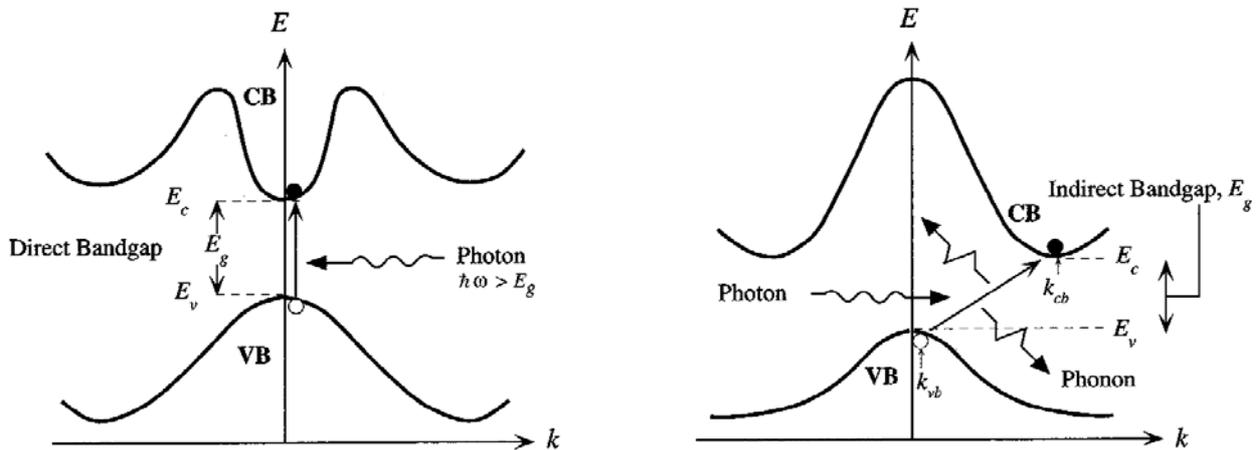
i) Conservación de la energía:

$$\text{Absorción: } E_f = E_i + \hbar\omega$$

$$\text{Emisión: } E_f = E_i - \hbar\omega$$

B.4.4. Absorción óptica en un semiconductor

- detección de luz \Rightarrow generación par electrón-hueco al incidir un fotón



- Semiconductores de gap directo:

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{\pi e^2 \hbar}{2 n_r c m_0^2 \varepsilon_0} \frac{|p_{cv}|^2}{\hbar \omega} \frac{\sqrt{2} \sqrt{(m_r^*)^3} \sqrt{\hbar\omega - E_g}}{\pi^2 \hbar^3} \cong 3 \cdot 10^6 \sqrt{\left(\frac{m_r^*}{m_0}\right)^3} \frac{\sqrt{\hbar\omega - E_g}}{\hbar\omega} \left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$$

$\delta = 1/\alpha \Rightarrow$ Profundidad de penetración

- Semiconductores de gap indirecto:

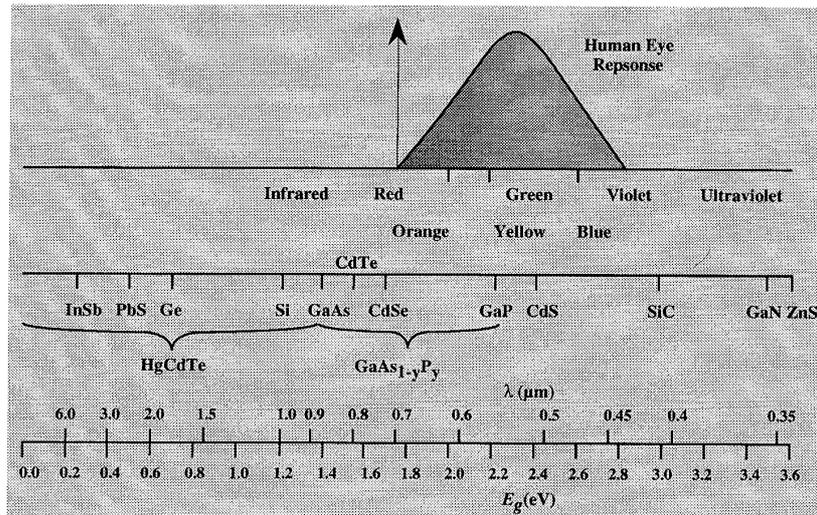
Probabilidad de absorción menor pues requiere de la participación de un tercero: un fonón.

$$\hbar k_{CB} - \hbar k_{VB} = \text{Momento del fonón} = \hbar K$$

$\hbar \cdot \nu = E_g \pm \hbar \cdot \upsilon$; $\upsilon =$ frecuencia de las vibraciones de la estructura cristalina

Longitud de onda de corte para la absorción:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g [eV]} [\mu m]$$



Para la detección de una señal óptica se debe absorber la luz. La luz absorbida depende del grosor del semiconductor:

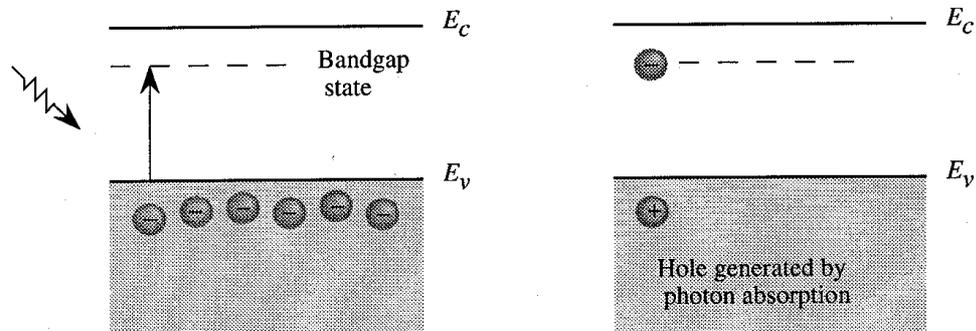
fracción de luz absorbida $1 - e^{-\alpha L}$

Absorción fuerte: $L > \frac{1}{\alpha(\hbar\omega)}$

Los detectores se clasifican en:

- a) Intrínsecos. Generación de un par e - h producida mediante una transición de "banda a banda"

b) Extrínsecos: Se dopa el semiconductor con una determinada impureza creando estados energéticos intermedios dentro de la banda prohibida



Materiales más utilizados

InGaAs (Tunable E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent material for long haul communications (at 1.55 μm). • Can be lattice matched to InP.
AlGaSb (Tunable E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent optical properties. • Can be used for long haul communications. • Suffers from poor substrate availability, since it has to be grown on GaSb, whose technology is not matured.
InGaAsP (Tunable E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for both 1.55 μm and 1.3 μm applications for long haul applications. • Can be lattice matched to InP substrates.
HgCdTe (Tunable E_g)	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent material for long wavelength applications in night vision and thermal imaging. • Can be used for 1.55 μm and 1.3 μm, but the technology is not as advanced as the InP based technology.
Si ($E_g = 1.1 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Indirect material with small α near the bandedge. • Has high β_{imp}/α_{imp} ratio and can be used in high performance avalanche photodiodes for local area network (LAN) applications. • Not suitable for long haul communication at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ or 1.3 μm.
Ge ($E_g = 0.7 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Indirect material with small α near the bandedge. • Has high β_{imp}/α_{imp} ratio and can be used for avalanche photodiodes for both local area and long distance communications.
GaAs ($E_g = 1.43 \text{ eV}$)	<ul style="list-style-type: none"> • Direct gap material. • Not suitable for high quality avalanche detectors, since $\alpha_{imp} \approx \beta_{imp}$. • Not suited for long distance or LAN applications.

Cálculo de la velocidad de generación de pares e-h:

Potencia óptica incidente: $P_{op}(0)$

Potencia óptica por unidad de área en x:

$$\frac{P_{op}(x)}{A} = \frac{P_{op}(0)}{A} \cdot e^{-\alpha x} \quad \left(\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha x} \right)$$

Velocidad de generación e-h por unidad de volumen:

$$G_L = \frac{\alpha \cdot P_{op}(x)}{A \cdot \hbar \cdot \omega} = \alpha \cdot \Phi(x) = \alpha \cdot \Phi_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Donde $\Phi(x)$: es la densidad de flujo de fotones incidiendo en un punto x (unidad $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Eficiencia cuántica:

$$\eta_Q = \frac{\text{N}^\circ \text{ de pares e-h que dan lugar a la fotocorriente}}{\text{N}^\circ \text{ de fotones incidentes}} =$$
$$= \frac{I_L / e}{P_{op} / \hbar \omega} = \eta_{Q_e} \cdot \eta_{Q_i} = (1 - R) \cdot (1 - e^{-\alpha L}) \cdot \eta_{Q_i} < 1$$

- Depende de α a la λ de interés, de la estructura del dispositivo y coeficiente de reflexión (R) $\rightarrow \eta_{Q_e}$

Puede incrementarse reduciendo las reflexiones superficiales e incrementando la absorción.

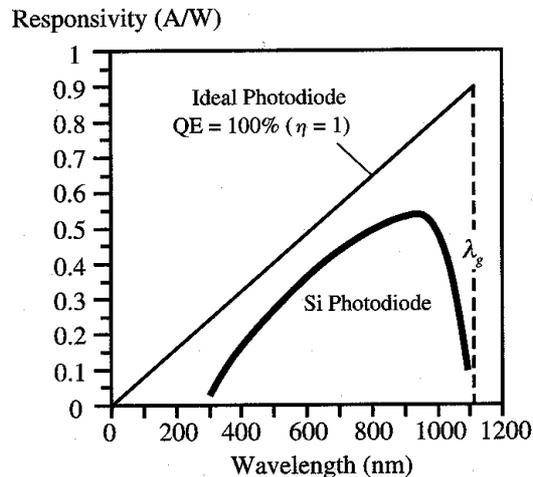
- No todos los fotones absorbidos dan lugar a pares e-h sino que algunos pueden ceder su energía de otras maneras $\rightarrow \eta_{Q_i}$

Responsividad del detector:

$$R_{ph} = \frac{\text{Corriente fotónica (A)}}{\text{Potencia óptica incidente (W)}} = \frac{I_L}{P_{op}}$$

$$R_{ph} = \eta_Q \cdot \frac{e}{\hbar\omega} = \eta_Q \cdot \frac{e\lambda}{hc} \quad [\text{A/W}]$$

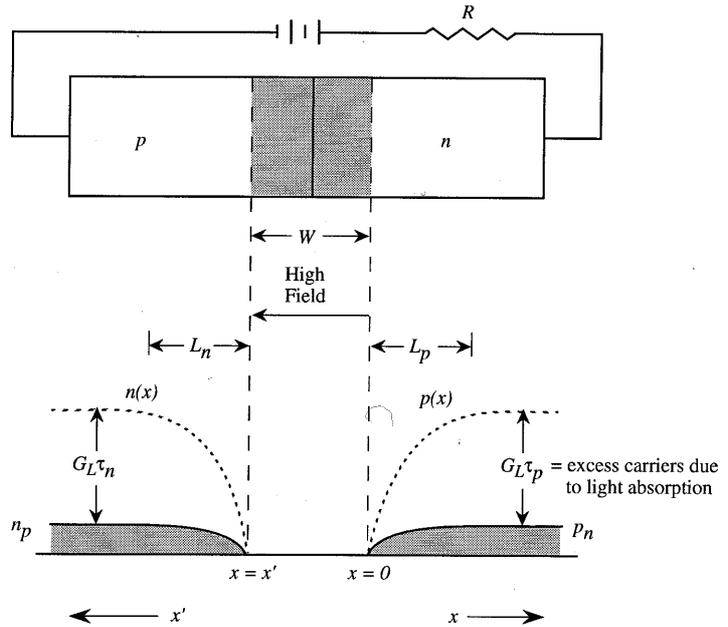
Tiene una gran dependencia de la longitud de onda de los fotones incidentes:



B.4.5. Corriente fotónica en un diodo p-n y en un diodo p-i-n

Se generan portadores en la zona de agotamiento y en las zonas neutras.

- Zona de agotamiento: $I_{L1} = -A \cdot e \cdot \int_0^{x'} G_L dx = -A \cdot e \cdot G_L \cdot W$ (fotocorriente espontánea)



Concentraciones de portadores:

- Zonas neutras:

Proviene de todos los portadores generados en la región del diodo ($W + L_p + L_n$).

Planteando la ecuación de continuidad para los huecos en exceso en región n:

$$D_p \frac{\partial^2 \delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\delta p_n}{\tau_p} + G_L = 0$$

⇓

$$\delta p_n(x) = G_L \cdot \tau_p \left[1 - e^{-\frac{x}{L_p}} \right]$$

Con $V=0$ o en polarización inversa ($V<0$), podemos suponer que $\delta p_n(x=0)$ es cero.

Por tanto:
$$I_{pL} = -A \cdot e \cdot D_p \cdot \left. \frac{d\delta p_n}{dx} \right|_{x=0} = -e \cdot G_L \cdot L_p \cdot A$$

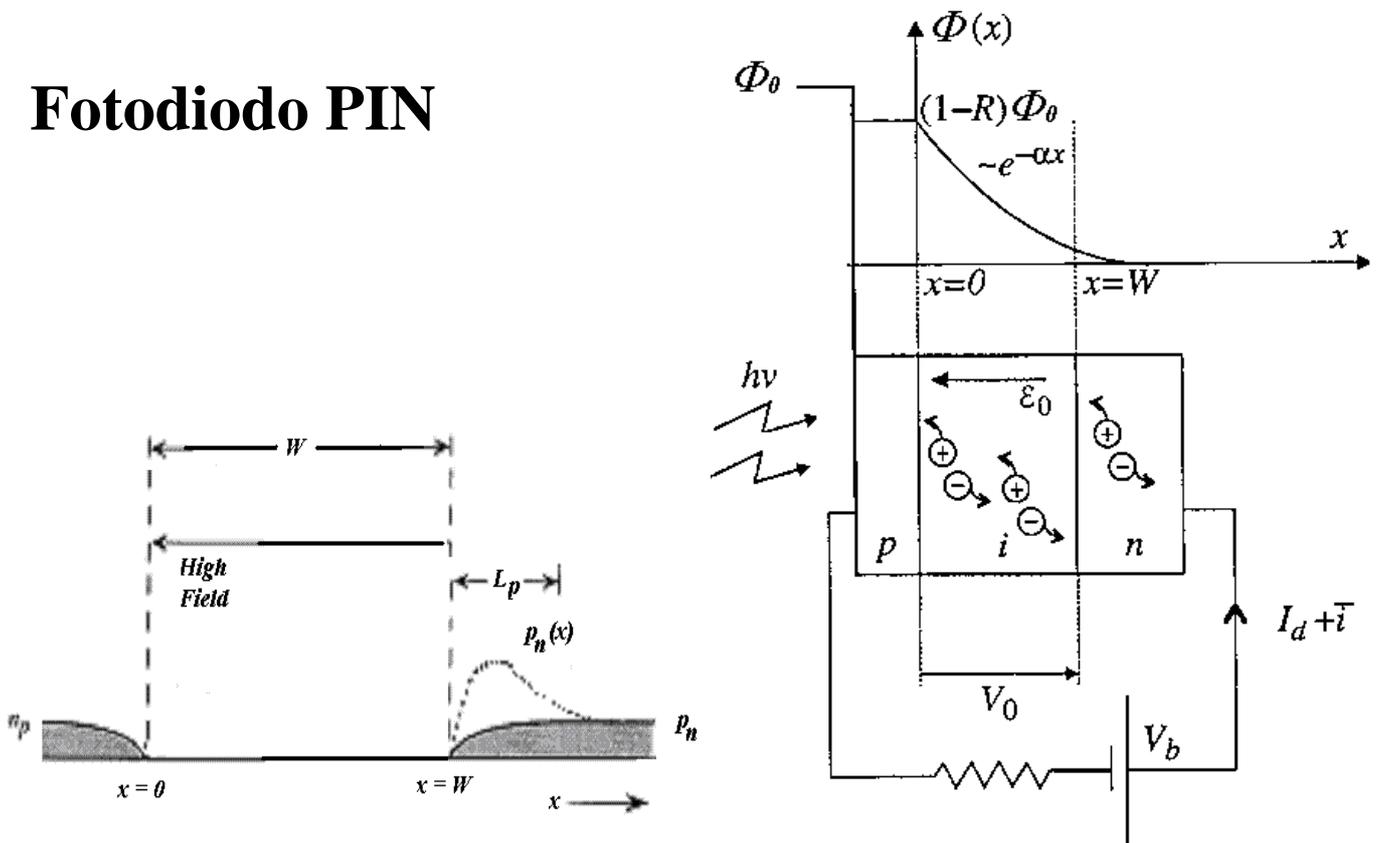
De forma análoga, para los electrones en la zona neutra tipo p:

$$I_{nL} = -e \cdot G_L \cdot L_n \cdot A$$

Corriente total debida a los portadores generados:

$$I_L = I_{nL} + I_{pL} + I_{L1} = -e \cdot G_L \cdot (L_p + L_n + W) \cdot A$$

Fotodiodo PIN



La corriente fotónica es debida fundamentalmente a la fotocorriente espontanea (respuesta rápida) :

$$I_L = -e \cdot A \cdot \int_0^W G_L(x) dx$$

$$\downarrow$$

$$I_L = -e \cdot A \cdot \Phi_0 \cdot (1-R) \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot W}]$$

• Zona neutra tipo n:

Planteando la ecuación de continuidad para los huecos en exceso en región n:

$$D_p \frac{\partial^2 p_n(x)}{\partial x^2} - \frac{p_n(x) - p_n}{\tau_p} + G_L(x) = 0$$

⇓

$$p_n(x) = p_n - \left[p_n + C e^{-\alpha W} \right] e^{\frac{W-x}{L_p}} + C e^{-\alpha x} \quad \text{con } C = \frac{\Phi_0 \alpha L_p^2}{D_p (1 - \alpha^2 L_p^2)}$$

Por tanto (suponiendo $R = 0$):

$$I_{pL} = -AeD_p \left. \frac{\partial p_n(x)}{\partial x} \right|_{x=W} = -Ae\Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha W} - Ae p_n \frac{D_p}{L_p}$$

Corriente total debida a los portadores generados

(supondremos que la zona p es muy estrecha y no hay absorción de fotones y $R = 0$):

$$I_L = I_{pL} + I_{L1} = -Ae\Phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right) - Ae p_n \frac{D_p}{L_p}$$

Eficiencia cuántica (se han introducido a posteriori η_{Qi} y R para mayor generalidad):

$$\eta_Q = \eta_{Qi} \cdot \eta_{Qe} = \frac{I_L / e}{A\Phi_0} = \eta_{Qi} \cdot (1 - R) \cdot \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)$$

B.4.5.1 Selección del material y respuesta en frecuencia del detector P-I-N

- el material depende de la λ a detectar.
- para λ grandes (siempre que no se requieran altas velocidades) \Rightarrow Si, Ge u otros compuestos.
- para alta velocidad y grandes distancias \Rightarrow gap directo (InGaAs).
- visión nocturna \Rightarrow gap muy estrecho. Alta corriente de oscuridad por lo que hay que refrigerar para disminuirla.

Una vez elegido el material debemos:

- Minimizar la reflexión en la superficie
- Maximizar la absorción en la zona de agotamiento
- Minimizar la recombinación de portadores en la z. de a.
- Minimizar el tiempo de tránsito

Tiempo de respuesta :

- depende de R_s y C_D (circuito equivalente):

$$C_D = \frac{\varepsilon \cdot A}{W} \quad \Rightarrow \text{reducir } A$$

- caso óptimo: el único límite es el tiempo de tránsito

$$t_{tr} = \frac{W}{V_{sat}}$$

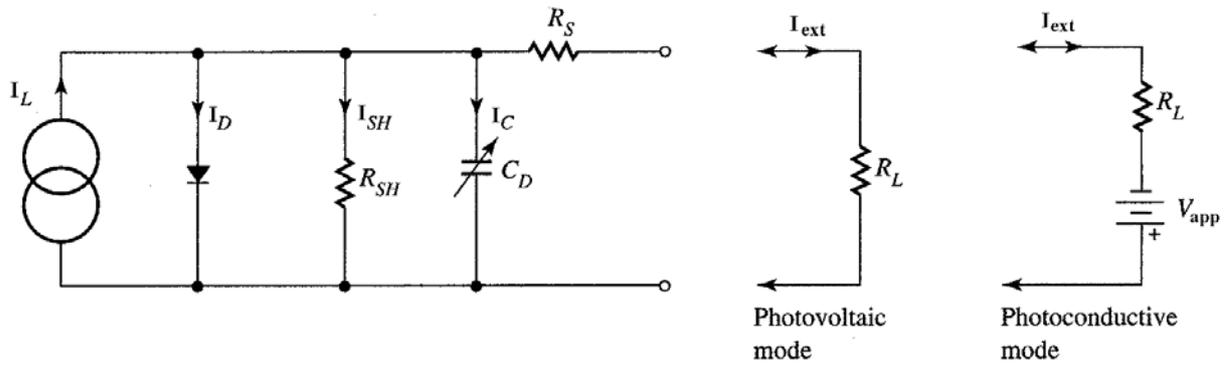
La corriente total tiene dos aportaciones:

- 1) corriente por el fotodiodo en ausencia de luz
- 2) corriente fotónica (generada por la luz)

$$I_{DL} = I_0 \cdot \left[e^{\frac{e \cdot (V + R_s \cdot I_{DL})}{n \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right] - I_L$$

2 modos de funcionamiento:

- Modo fotoconductor (en polarización inversa) \Rightarrow diodo fotodetector
- Modo fotovoltaico: sólo con carga ($V_{app}=0$) \Rightarrow célula solar



$R_{SH} = 10^7$ a $10^{12}\Omega$, depende de T

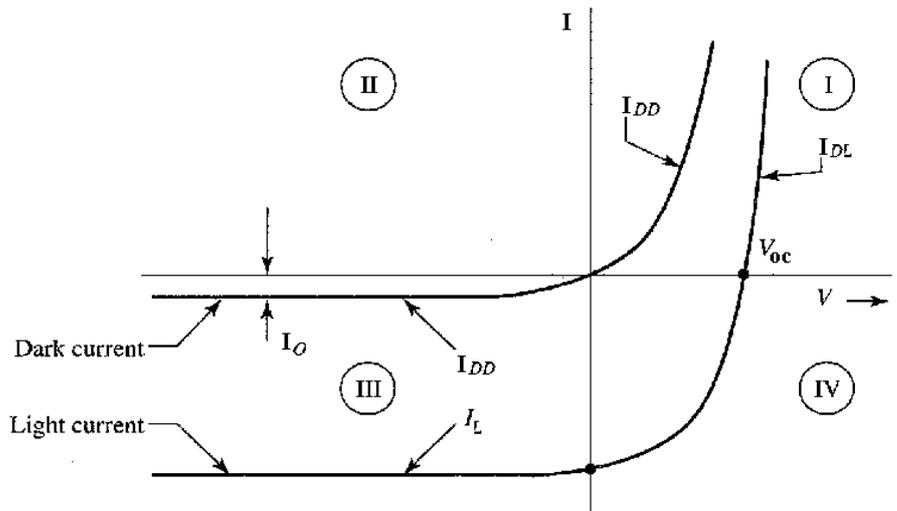
$$C_D = \frac{\epsilon \cdot A}{W}$$

Cuanto mayor es la tensión inversa mayor es la anchura de la z. de a. y menor es C_D .

$R_S =$ de 5 a 10Ω .

• En oscuridad:

$$I_{DD} = I_0 \cdot \left[e^{\frac{e \cdot (V + R_S \cdot I)}{n \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right]$$



• Corriente fotónica en presencia de radiación:

Variación lineal

$$I_L = R_{ph} (A/W) \cdot P_{op} (W) = \eta_Q \cdot \frac{e}{\hbar\omega} \cdot P_{op} (W) = \eta_Q \cdot \frac{e \cdot \lambda}{hc} \cdot E \cdot A$$

• Corriente total en presencia de radiación:

$$I_{DL} = I_{DD} - I_L$$

- En circuito abierto ($I_{DL}=0$):

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \left[\frac{I_L + I_o}{I_o} \right] \cong \frac{n \cdot k_B \cdot T}{e} \cdot \ln \left[\frac{I_L}{I_o} \right] \Rightarrow \text{Respuesta logarítmica}$$

Tiempo de respuesta

Dos aportaciones: a) Tiempo de tránsito: $t_D \geq \frac{W}{v_{sat}}$

b) Tiempo de respuesta debido a C_D

$$\tau_{RC} = (R_S + R_L) \cdot C_D \approx R_L \cdot C_D$$

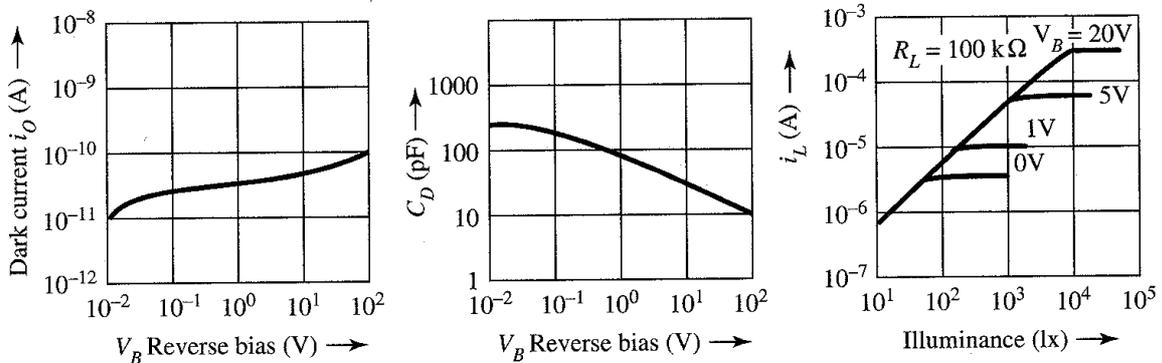
$$t_{RC} = 2,19 \cdot R_L \cdot C_D$$

Tiempo total de respuesta = $t_D + t_{RC}$

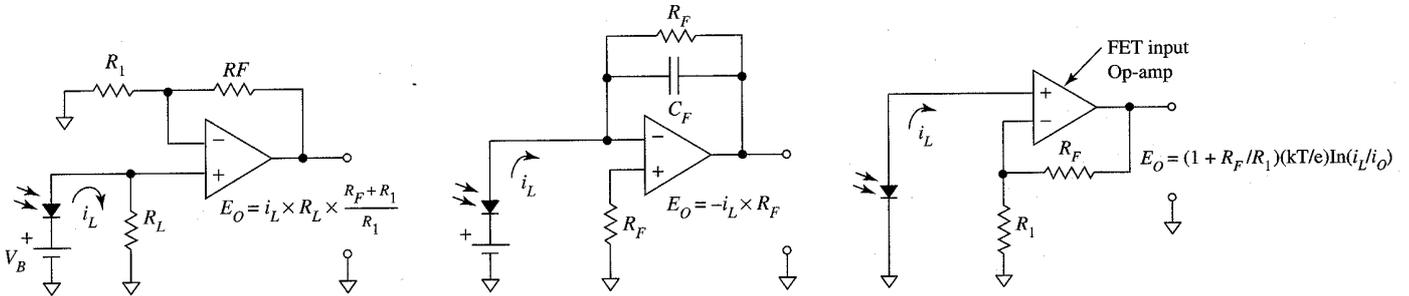
Ancho de banda

$$BW_{FD} = \frac{0,35}{\sqrt{t_D^2 + t_{RC}^2}}$$

Dependencia de distintos parámetros con la tensión inversa:



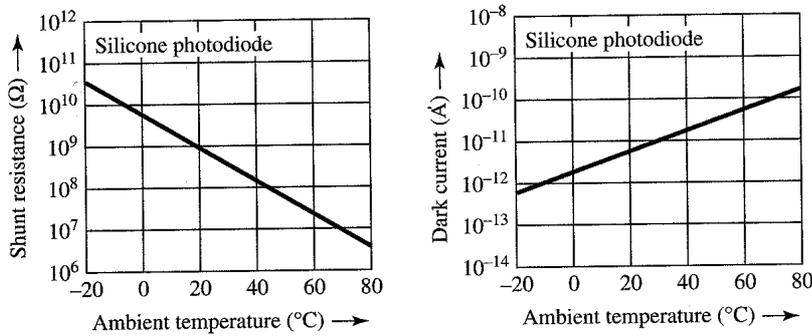
Circuitos prácticos de polarización:



Hay que tener en cuenta que:

- 1) El ruido producido por el fotodiodo en su zona lineal (ruido shot y térmico) es amplificado.
- 2) La capacidad C_D influye sobre la respuesta en frecuencia.
- 3) Si se requiere respuesta logarítmica, el amplificador debe tener una impedancia de entrada muy grande.

Dependencia con la temperatura:



B.4.5.2 La célula solar

Dispositivo generador de energía.

Parámetros: Tensión en circuito abierto y corriente en cortocircuito

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right)$$

$$I = I_{sc} = I_L$$

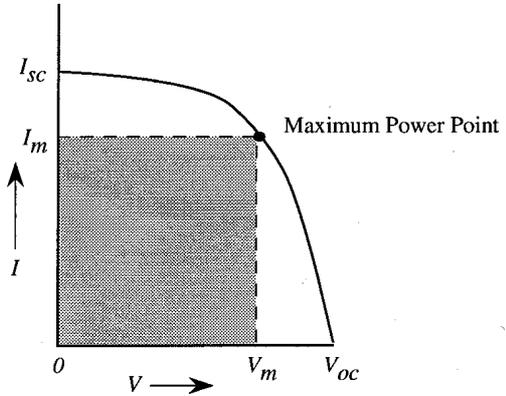
Potencia de la célula solar: $P = I \times V = I_L \cdot V - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e \cdot V}{n \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right) \cdot V$

Rendimiento conversión:

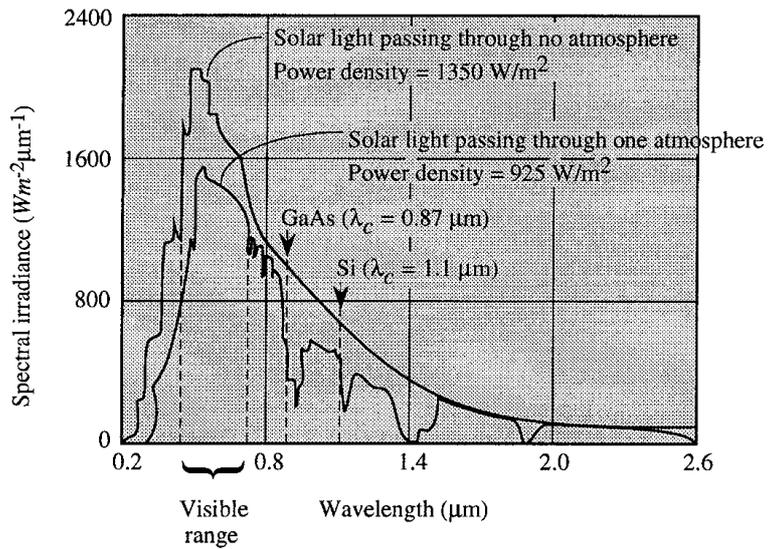
$$\eta_{conv} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}}$$

Factor de forma:

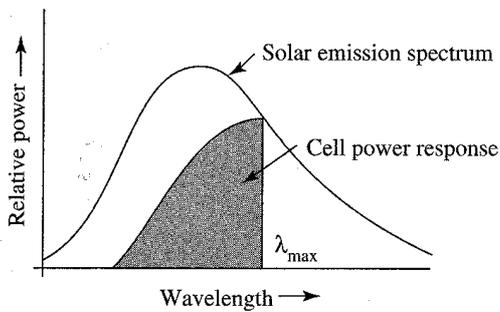
$$F_f = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$



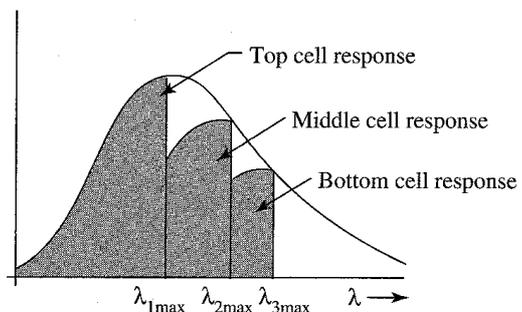
Espectro de radiación solar:



Células multicapa para mejorar el rendimiento:

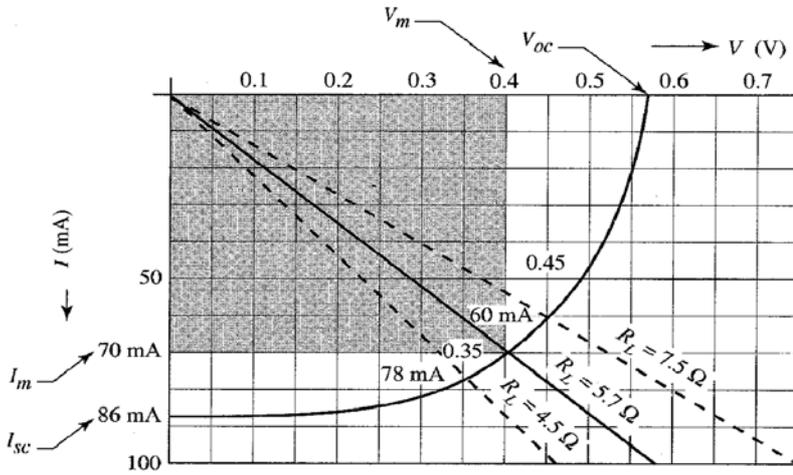


(a) Response of a single layer solar cell



(b) Response of a three-layer solar cell

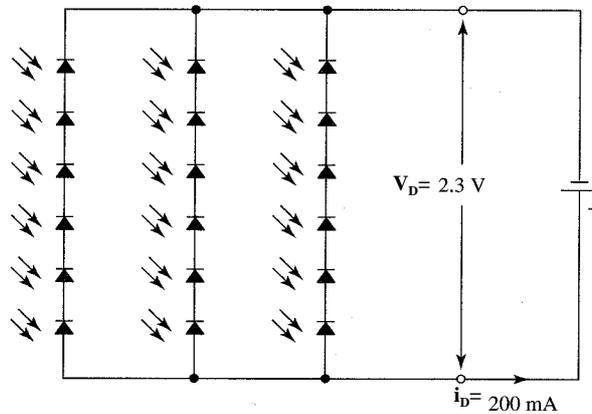
Curva característica y carga óptima:



R_L (Ω)	V_o (V)	I_o (mA)	P_o (mW)
4.5	0.35	78	27.3
5.7	0.40	70	28.0
7.5	0.45	60	27.0

$$R_{Lopt} = R_S = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$$

Panel solar:

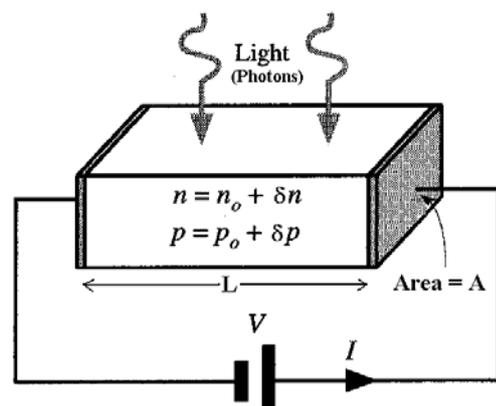


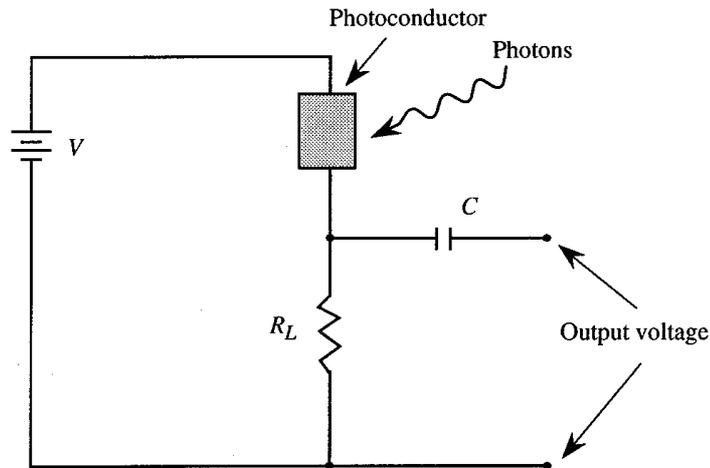
$$n_p = \text{int} \left(\frac{i_D}{i_L} \right)$$

$$n_s = \text{int} \left(\frac{V_D}{V_L} \right)$$

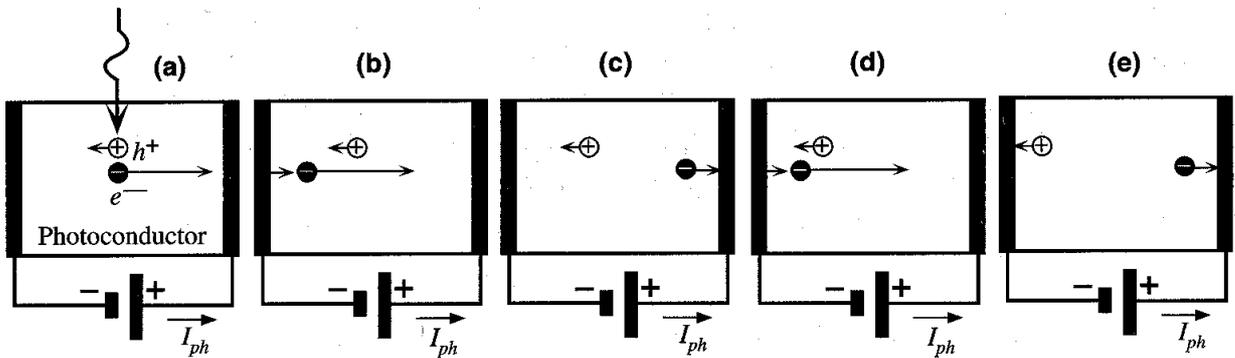
B.4.6. El fotoconductor o fotoresistencia

- detector de un solo semiconductor.
- tiene ganancia.
- se conserva el producto ganancia-ancho de banda





¿Porqué tiene ganancia?



La señal óptica provoca un incremento en la conductividad del material llamado **fotoconductividad**:

$$\Delta\sigma = e \delta p (\mu_n + \mu_p) = e \delta n (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$$

En el estado estacionario la velocidad a la que se recombina el exceso de portadores es igual a la velocidad de generación (luminosa):

$$R_e = \frac{\delta n}{\tau} = G_L$$

La fotocorriente será:

$$I_L = J_L A = \Delta\sigma \cdot E \cdot A = e \cdot \delta p \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot A \cdot E = e G_L \tau \cdot (\mu_n + \mu_p) A E$$

• La ganancia fotoconducativa:

$$G = \frac{\text{Velocidad de flujo de electrones en el circuito externo}}{\text{Velocidad de generación de electrones por absorción luminosa}} = \frac{\tau \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E}{L} = \frac{\tau}{t_{tr,e}} \cdot \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n}\right)$$

• La fotocorriente I_L por tanto puede escribirse:

$$I_L = G \cdot I_{Lp}$$

con $I_{Lp} = e \cdot G_L \cdot A \cdot L \Rightarrow$ Fotocorriente primaria ($G=1$)

Ganancia grande \Rightarrow tiempo de recombinación grande y tiempo de tránsito corto.

Pero si el tiempo de recombinación es grande \Rightarrow Dispositivo más lento

El producto ganancia - ancho de banda permanece constante.

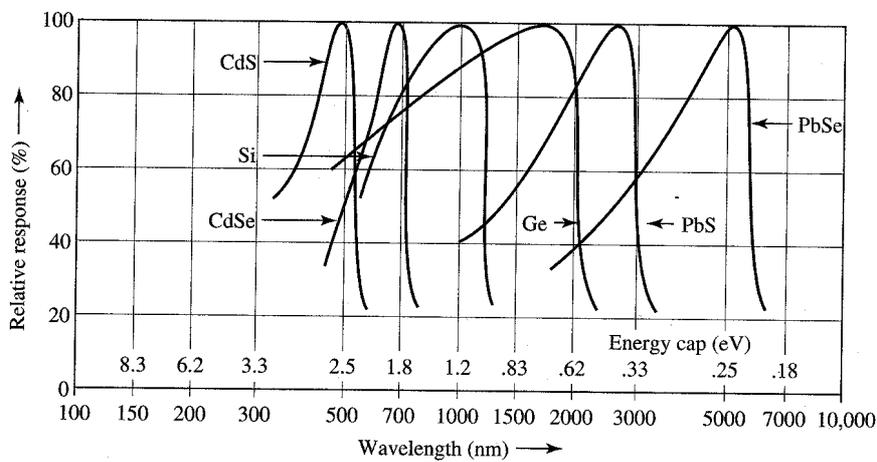
• **Inconvenientes:**

- 1) Gran corriente de oscuridad.
- 2) Peor relación señal-ruido que los fotodiodos p-n o p-i-n.

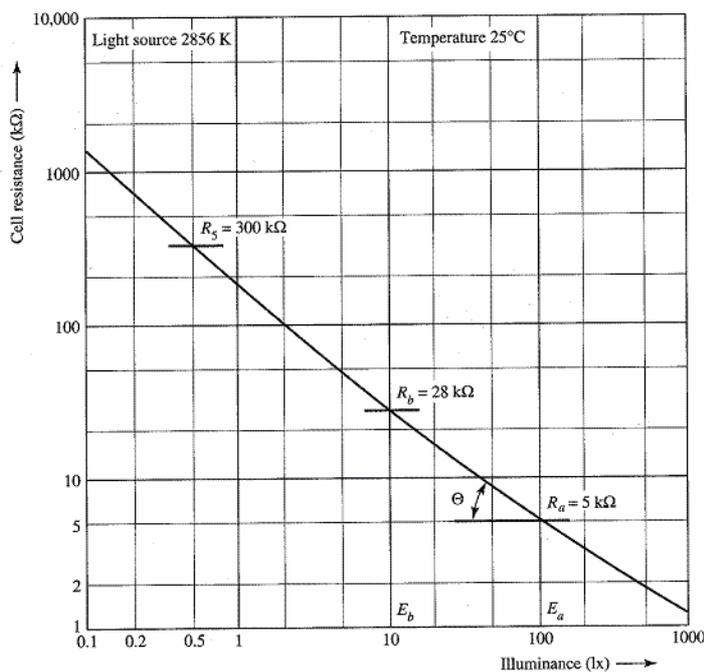
B.4.6.1 Caracterización eléctrica de fotoconductores

Respuesta espectral:
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g [eV]} [\mu m]$$

Material	Gap de energía (eV)	λ_c (nm)
PbSe	0,23	5390
PbS	0,42	2590
Ge	0,67	1850
Si	1,12	1110
CdSe	1,80	690
CdS	2,40	520



Relación resistencia- iluminación:

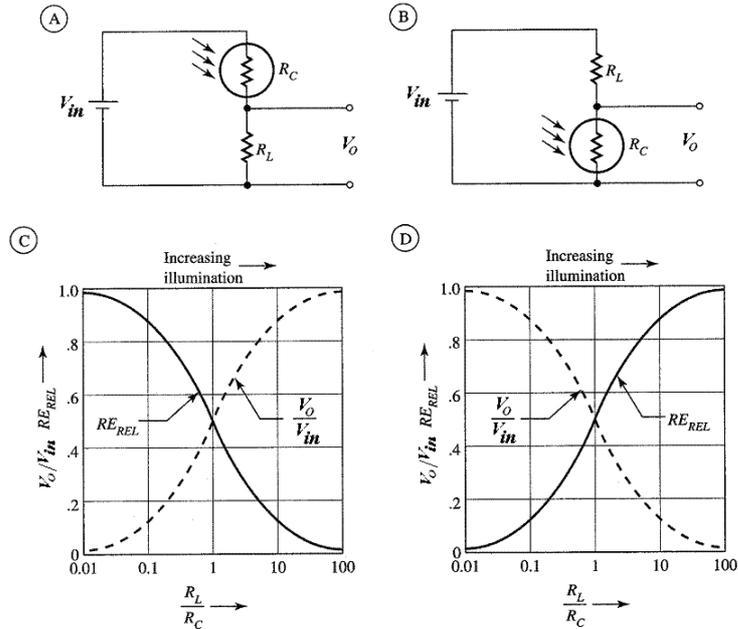


$$R_a = R_b \left(\frac{E_a}{E_b} \right)^{-\alpha}$$

$$\alpha = \tan \theta = \frac{(\log R_a - \log R_b)}{(\log E_a - \log E_b)} = \frac{|\log(R_a / R_b)|}{|\log(E_a / E_b)|}$$

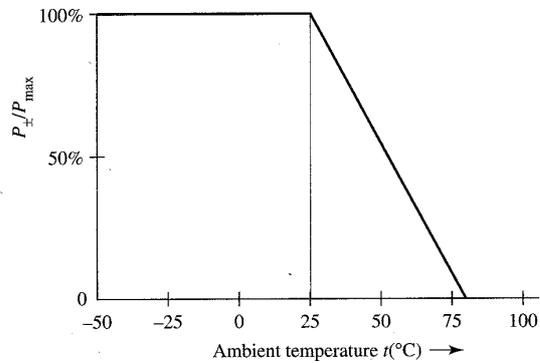
Responsividad relativa y su valor aprox.: $RE_R = \frac{\Delta R}{R} \frac{E}{\Delta E} \cong -\alpha$
 (valores pequeños de $\Delta R/R$ y $\Delta E/E$)

La responsividad varía al añadir una carga y la fuente de tensión

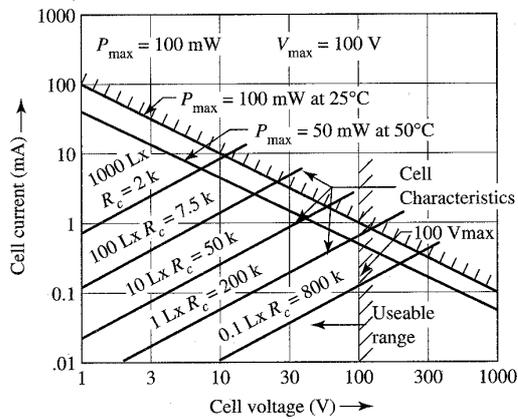


Limitaciones:

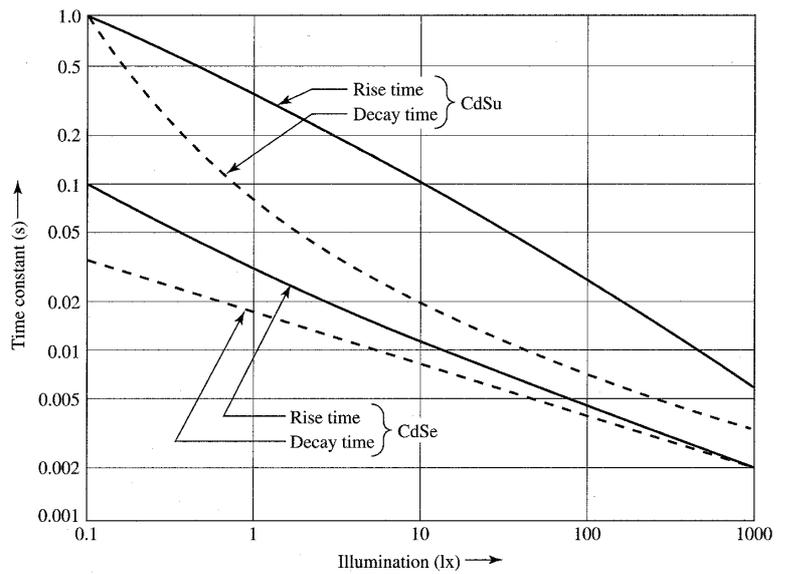
- tensión
- corriente
- potencia



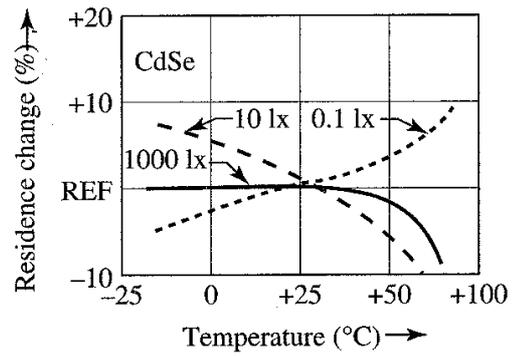
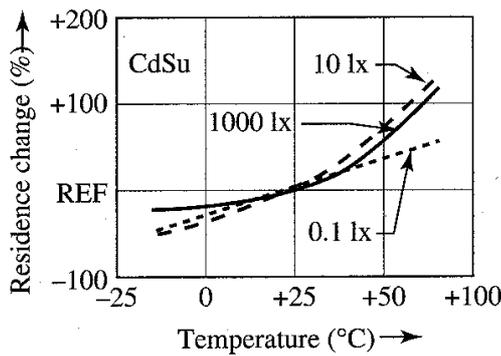
(a) Typical dissipation rating



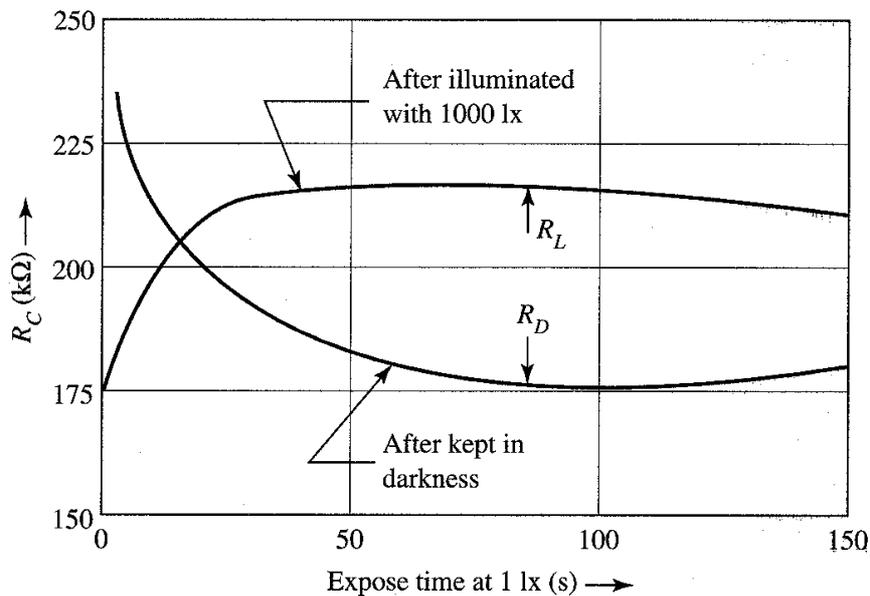
- Grandes tolerancias en los **tiempos de subida y bajada**, que dependen del material semiconductor y fuertemente de la iluminación. Son además muy grandes.



Efectos de temperatura:

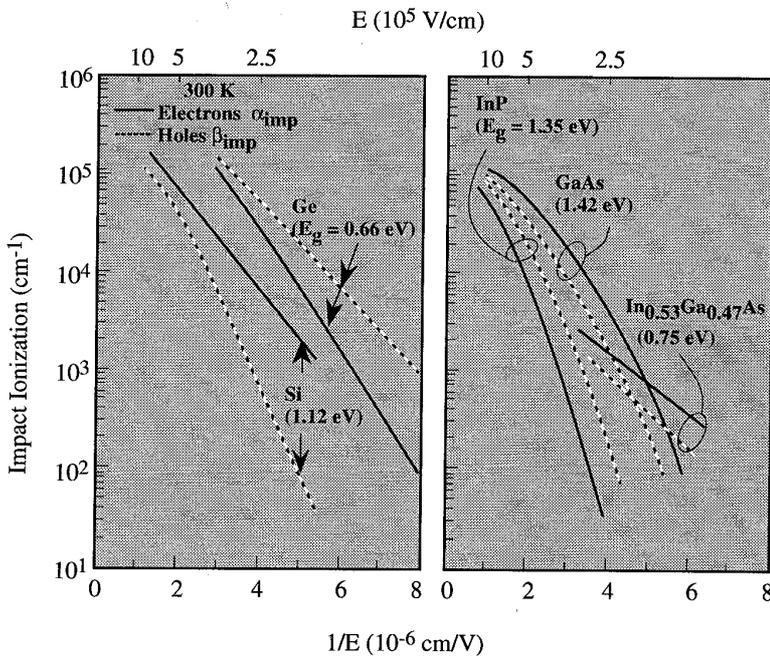


Efectos de memoria:



B.4.8. El fotodetector de avalancha

Detector de alta ganancia gracias al efecto de avalancha.



α_{imp} y β_{imp} = Coeficientes de ionización por impacto de electrones y huecos.

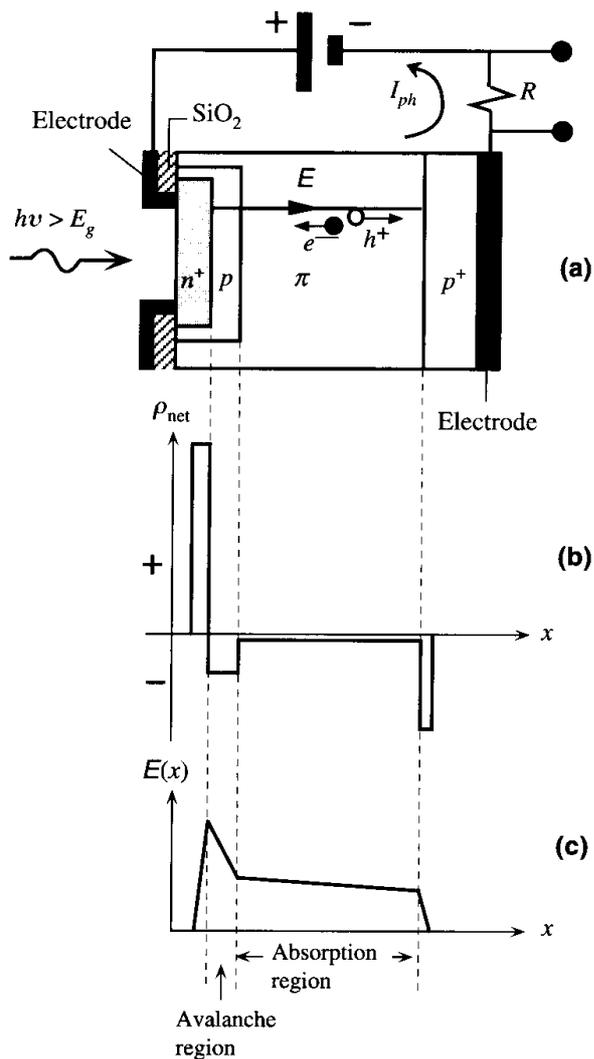
El nº de ionizaciones por impacto en una distancia x :

$$N(x) = e^{\alpha_{imp} \cdot x}$$

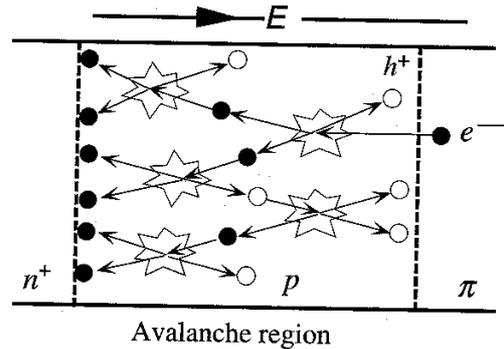
- tiene mucho ruido (el proceso multiplicativo es estadístico)
- detecta señales muy débiles debido a su gran ganancia.
- velocidad de respuesta reducida.
- necesita altas tensiones de polarización y temperatura estable.

B.4.8.1 Diseño de un APD

gap directo \Rightarrow z. de absorción y avalancha pueden ser la misma
 gap indirecto (Si) \Rightarrow z. de absorción y multiplicación deben ser diferentes



APD de Si



- Las capas n^+ y p son muy estrechas para reducir la absorción en dichas regiones de forma que la absorción ocurre fundamentalmente en la capa π más gruesa donde E es uniforme.
- La avalancha se produce al llegar los electrones fotogenerados a la zona p donde E es grande.

La ionización por impacto se restringe al portador con mayor coeficiente de ionización por impacto (electrón para Si) con lo que se minimiza el ruido estadístico del proceso de multiplicación.

Multiplicación de portadores:

$$M = \frac{\text{Fotocorriente total}}{\text{Fotocorriente primaria}} = \frac{I_{ph}}{I_{pho}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r - I \cdot R}{V_{br}} \right)^n}$$

La ganancia depende de la tensión inversa V_r y fuertemente de la temperatura (V_{br} y n)

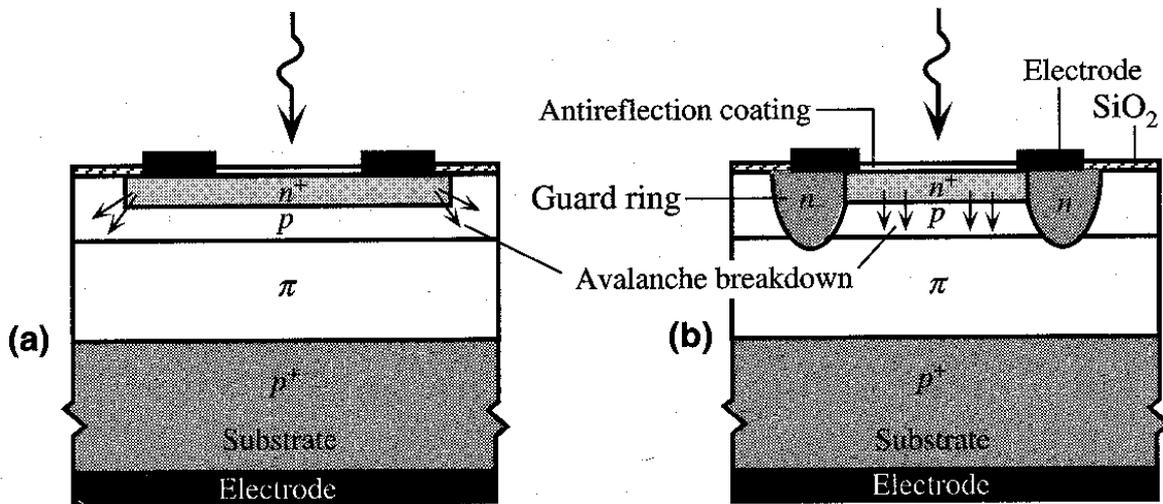
Tiempo de respuesta:

Mayor que el de un fotodiodo p-i-n (pero no requiere amplificación). Tres causas:

- 1) Tiempo que tarda el electrón fotogenerado en cruzar desde la región de absorción hasta la de multiplicación.
- 2) Tiempo que tarda el proceso de avalancha en producirse y generar pares e-h.
- 3) Tiempo que tarda el último hueco producido en el proceso de avalancha en llegar hasta la región π .

Problema: el campo en las zonas laterales de la unión n^+p alcanza su valor de ruptura por avalancha antes de que se alcance en las regiones de la unión n^+p que están situadas bajo el área iluminada.

Solución: Empleo de unas guardas laterales tipo n.



SAM APD:

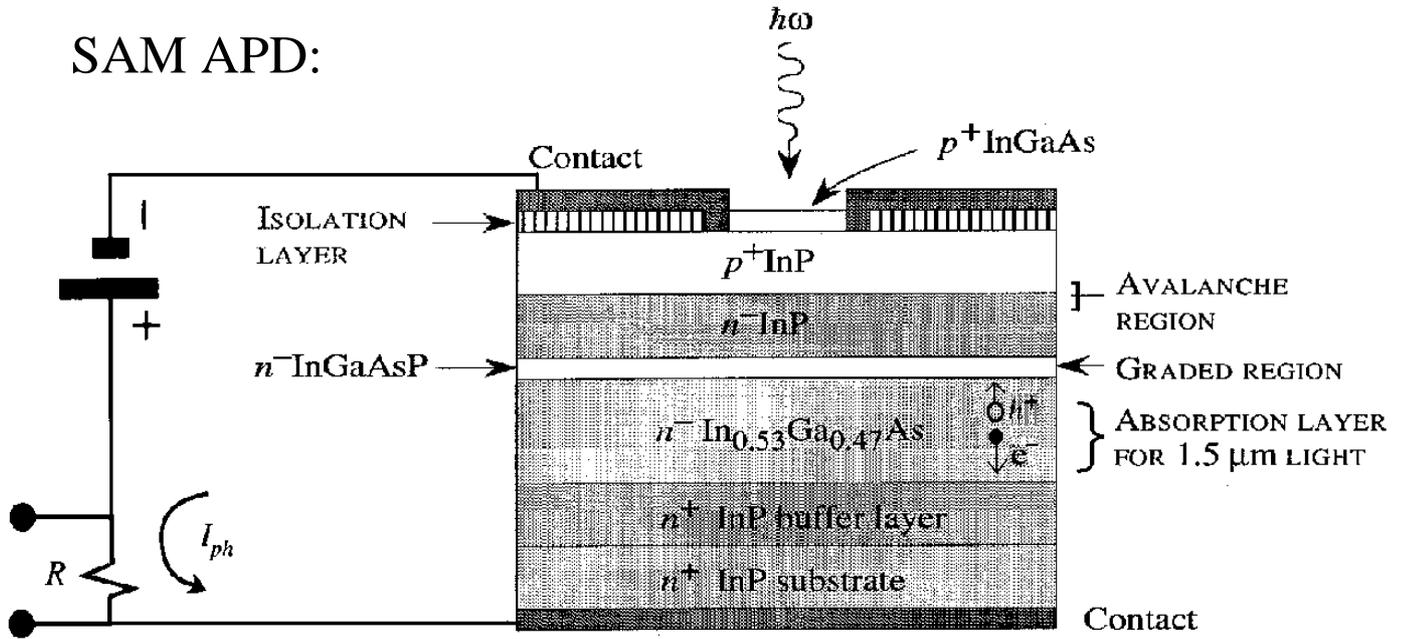
Son APDs en que la separación entre la zona de absorción y la de multiplicación se hace mediante utilización de materiales de gap estrecho o de gap más ancho.

a) Como la energía del fotón es menor que la anchura de la banda prohibida del semiconductor de mayor gap, la absorción se produce en el de menor gap.

b) El campo eléctrico es máximo en la unión p⁺-n constituida con el material de mayor gap ==> Multiplicación.

El campo eléctrico en el semiconductor de menor gap es pequeño pues sino habría una corriente de pérdidas por efecto túnel entre bandas.

SAM APD:



Specification of Common Photodiodes

Diode Type	Planar Photodiode					Pin Diode	Schottky Diode	Avalanche Diode	Unit
	Si	Ge	GaAsP	InAs	InSb				
Spectral range	190–1100	700–2000	300–760	500–4500	500–5500	300–1100	190–760	400–1000	nm
Peak response	560–960	1500–1800	640–710	3500	5300	800–960	440–710	800	nm
Relative responsivity	0.3–0.6	1.0	0.3–0.4	10 [†]	200 [†]	0.5–0.6	0.12–0.72	40–100 ^{††}	A/W
Rise time	0.1–1.0	0.05	0.5–10	0.5	1.0	0.002–0.02	1–30	0.3 × 10 ⁻³ – 9 × 10 ⁻³	μs
Junction capacitance	20–5000	5–20	2000–6000	10,000	10,000	1–100	0.7–12,000	8–95	pF at 0 V bias
NEP	0.5–2 × 10 ⁻¹⁵	0.5–10 ⁻¹²	1–5 × 10 ⁻¹⁵	—	—	—	8–10 ⁻¹¹	1 × 10 ⁻¹⁴ –	—
D*	0.3–3 × 10 ¹²	5–8 × 10 ⁻¹⁰	0.2–1.10 ⁻¹²	1–3 × 10 ⁹	5–8 × 10 ⁻¹⁰	—	8 × 10 ⁻¹⁵	—	—
						0.5 × 10 ¹⁵	5 × 10 ¹³	—	—
Application	A, B, C, D, E	E	B, I, F	C	—	D, A	F, B	D, A, B	—

A—general radiometry

B—photometry

C—solar cells

D—communication, fiber-optics

E—infrared sensing

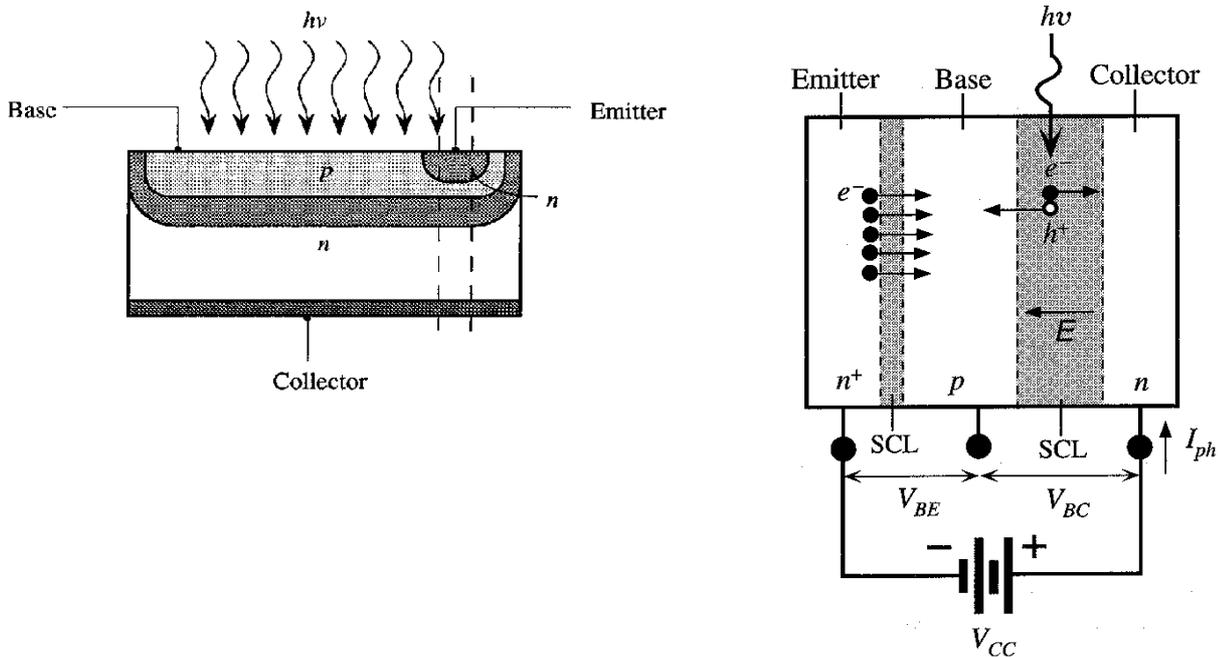
F—ultraviolet sensing

†—photovoltaic (V cm²/W)

††—gain

B.4.9. El fototransistor

Tiene ganancia como el APD pero mucho menos ruido.

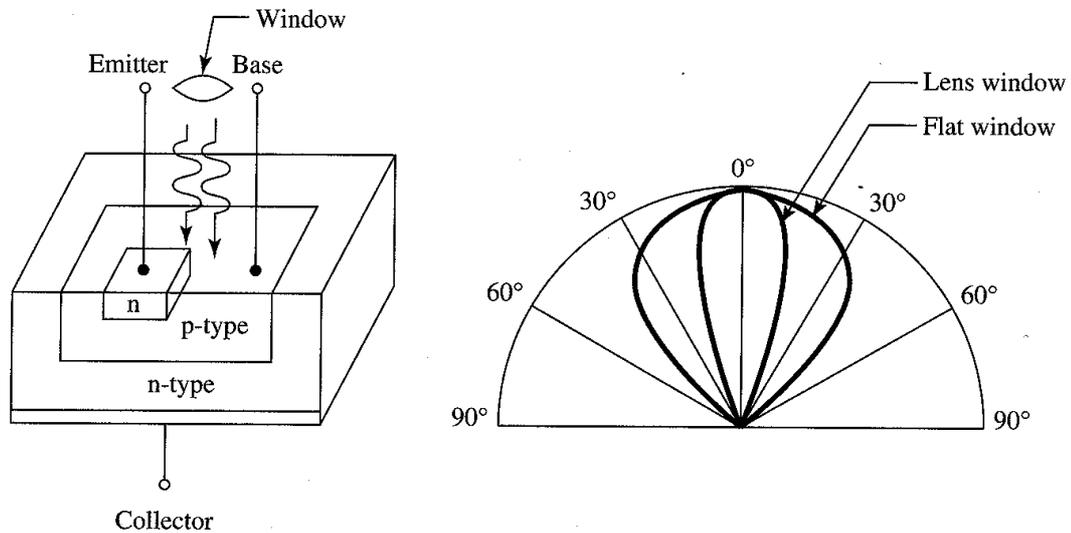


Cuando el hueco fotogenerado entra en la zona neutra de base arrastrado por el campo eléctrico constituye la corriente de base y provoca la inyección de gran cantidad de electrones desde el emisor (efecto transistor).

La fotocorriente primaria I_{pho} generada por el fotón absorbido es amplificada como si fuese la corriente de base:

$$I_C = I_{ph} \approx \beta \cdot I_{pho}$$

Construcción del fototransistor:

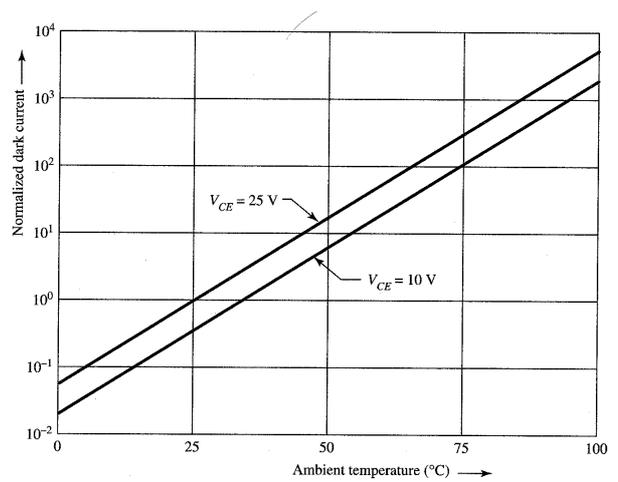
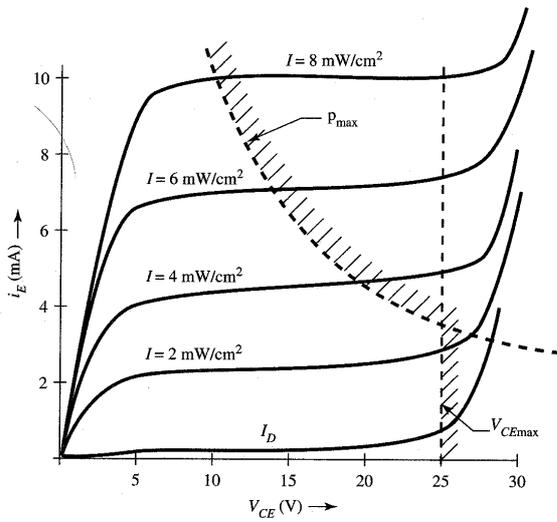


Ventajas:

- 1) Alta ganancia.
- 2) Bajo nivel de ruido.

Inconvenientes:

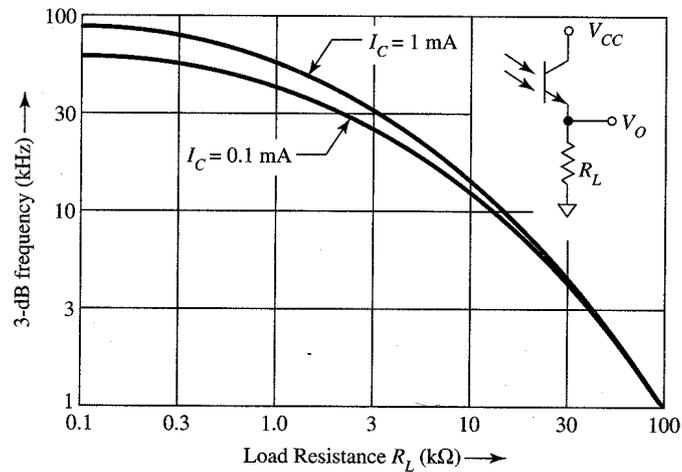
- 1) Tiempo de respuesta mayor que el del fotodiodo por C_{BC}
- 2) Menor linealidad debido principalmente a la no linealidad de β con la corriente de colector.
- 3) Alta tolerancia de su responsividad (del -50% al +100%) que varía con el nivel de radiación y la temperatura.

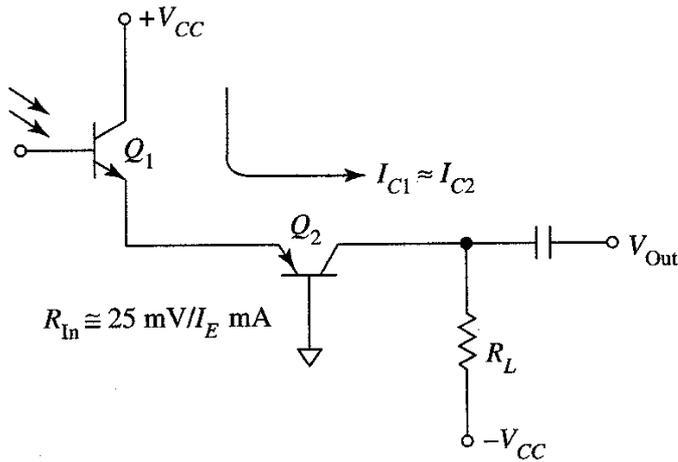


Tiempo de respuesta:

Debido a la capacidad de la unión t_r y t_f y, por tanto el ancho de banda del dispositivo, dependen de R_L .

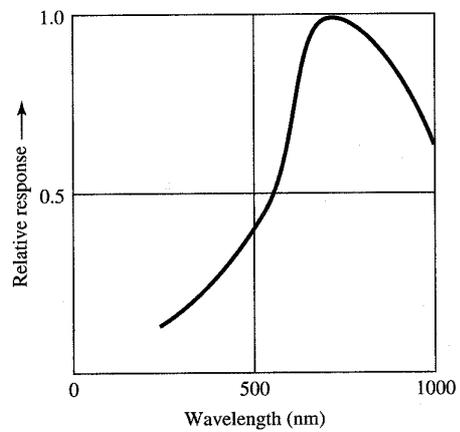
Cuanto mayor es R_L menor es el ancho de banda.



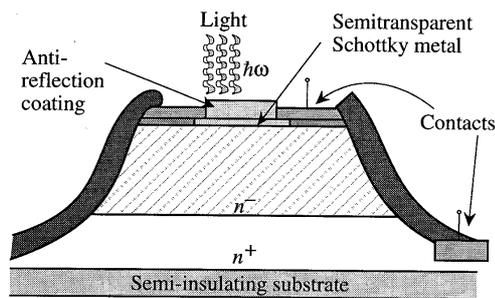


Circuito para funcionamiento a alta frecuencia

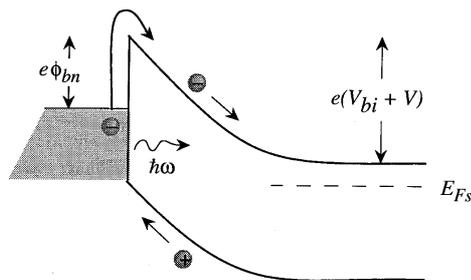
Respuesta espectral



B.4.10. Detectores metal-semiconductor



(a)



(b)

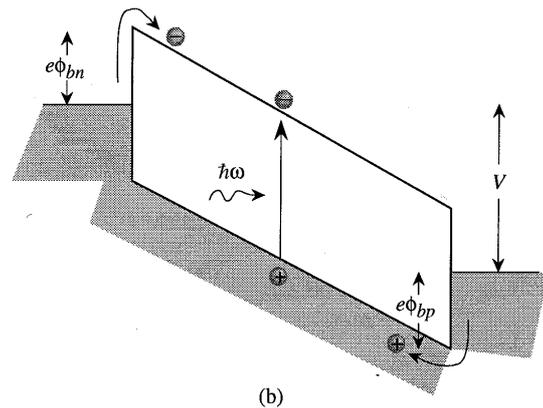
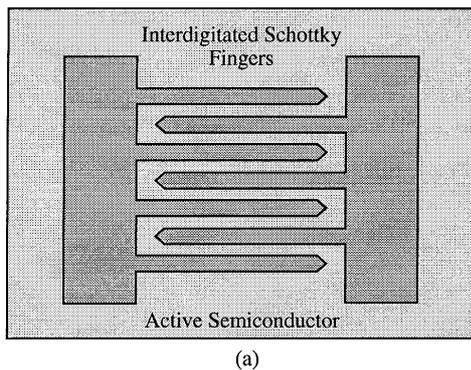
Puede responder de dos formas:

- i) $\hbar\omega > e\phi_{bn}$: el e^- salta la barrera de potencial
- ii) $\hbar\omega > E_g$: se generan pares e^-h^+

- La zona de agotamiento puede llegar a medir pocas micras por lo que funcionan a alta velocidad (hasta 150GHz)

Detector metal-semiconductor-metal (MSM):

Dos uniones metal-semiconductor cercanas la una a la otra.



- Estructura planar.
- A los contactos metálicos planos se les llama "dedos" (fingers).
- La distancia entre "dedos" es pequeña y al aplicar una tensión de polarización, toda la región entre "dedos" es zona de agotamiento.

Un fotón absorbido en la zona entre "dedos" crea un par e-h, portadores que son arrastrados en sentidos contrarios por el campo eléctrico, dando lugar a una corriente.

Corriente de oscuridad:

Si, en oscuridad, se aplica una tensión de polarización el resultado son las corrientes de saturación de electrones y huecos pues todo el semiconductor forma una zona de agotamiento:

$$J = A_n^* \cdot T^2 \cdot e^{-e \cdot \phi_{bn} / k_B \cdot T} + A_p^* \cdot T^2 \cdot e^{-e \cdot \phi_{bp} / k_B \cdot T}$$

Su valor es superior a la de los detectores p-i-n.

Ventajas:

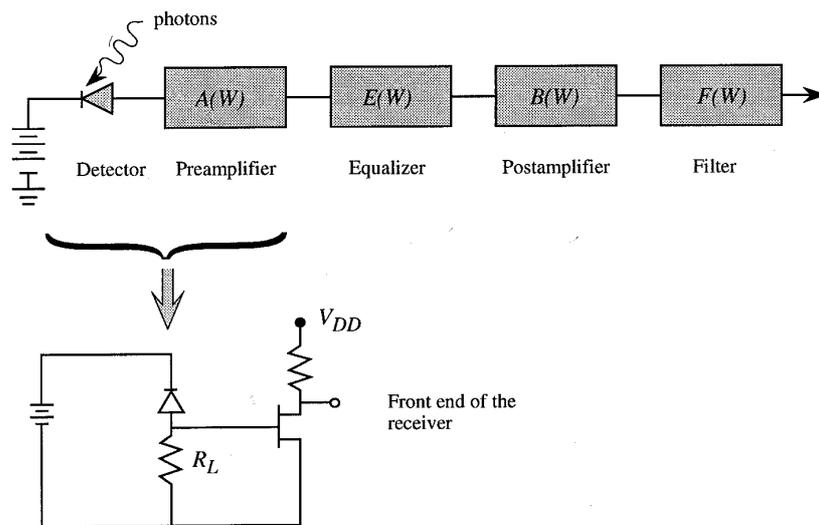
- Ganancia interna incluso para bajos valores de la tensión de polarización (en que por ejemplo la ionización por impacto no puede tener lugar).
- Baja capacidad parásita (estructura planar).

Inconvenientes:

- Baja responsividad.
- Mayor corriente de oscuridad que los detectores p-i-n.

B.4.11. El amplificador-receptor

a nivel de sistema de detección, debemos añadir un preamplificador, ecualizador, postamplificador y filtro.



Detectores más utilizados: p-i-n y APD

$f < 500\text{MHz} \Rightarrow$ el ruido predominante es el de la carga

$f > 500\text{MHz} \Rightarrow$ el ruido predominante es el del canal del transistor

B.4.12. Dispositivos de carga acoplada (CCD)

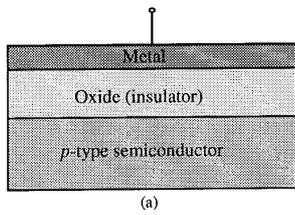
Matriz de detectores capaz de hasta 2 millones de pixels.

El elemento de la matriz es un condensador:

- o metal-aislante-semiconductor (MIS)
- o metal-oxido-semiconductor (MOS)

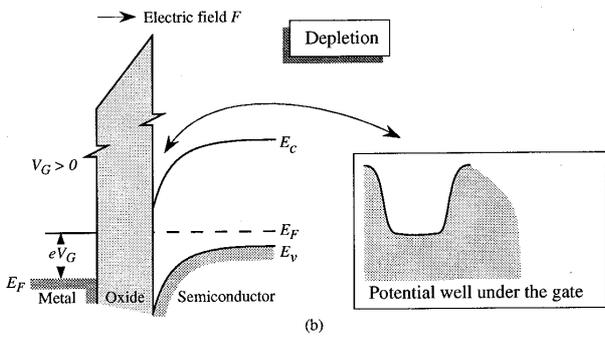
Al aplicarle una tensión directa se crea un pozo de potencial capaz de almacenar carga.

Al incidir la luz quedan atrapados los e generados.

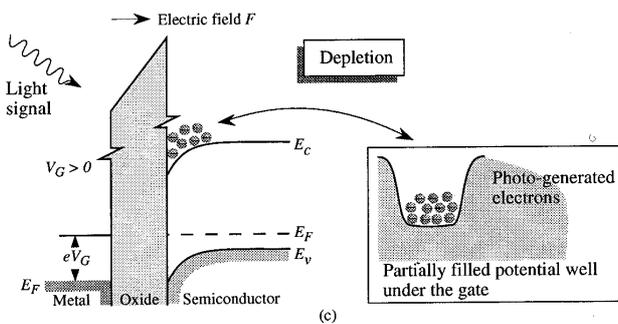


(a)

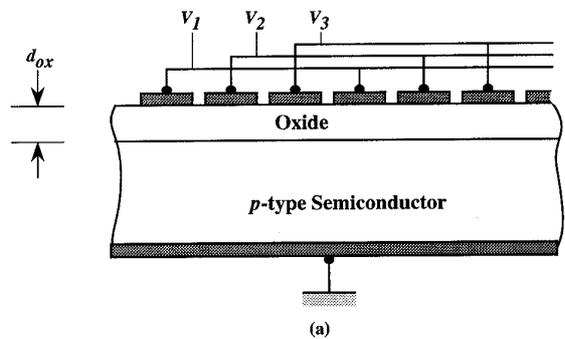
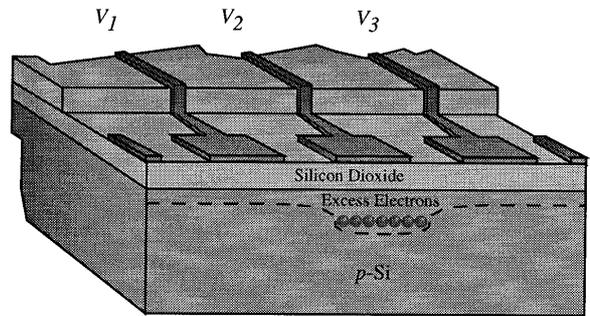
La carga almacenada es proporcional a la luz incidente.



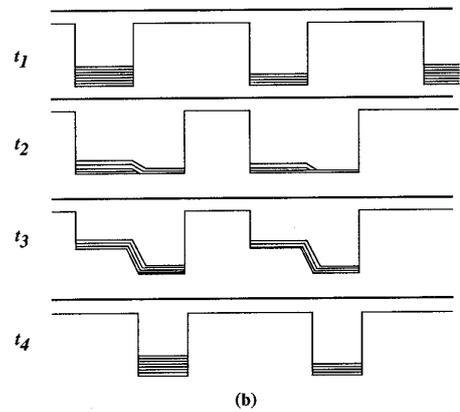
(b)



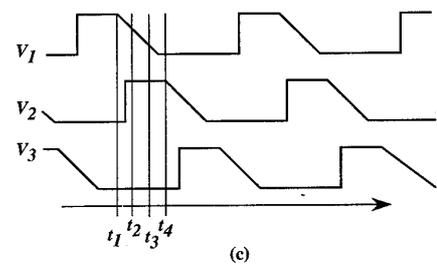
(c)



(a)



(b)



(c)

Aplicando una secuencia de tensiones adecuada se puede acceder a la información de la imagen.

B.4.13. Detectores avanzados

Hay que mejorar:

- i) capacidad de sintonizarlos
- ii) velocidad
- iii) integración

Capacidad de sintonizarlos: se utilizan materiales de diferentes gaps energéticos para detectar diferentes λ .

Velocidad: depende de la constante de tiempo RC y del tiempo de tránsito de los portadores.

Integración: se intentan integrar transistores como preamplificadores a los detectores