



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es



# “Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos”

## Módulo 3. Receptores

Autores: Salvador Vargas

Revisado: Juan Carlos Torres

Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF)

Dpto. de Tecnología Electrónica

Universidad CARLOS III de Madrid



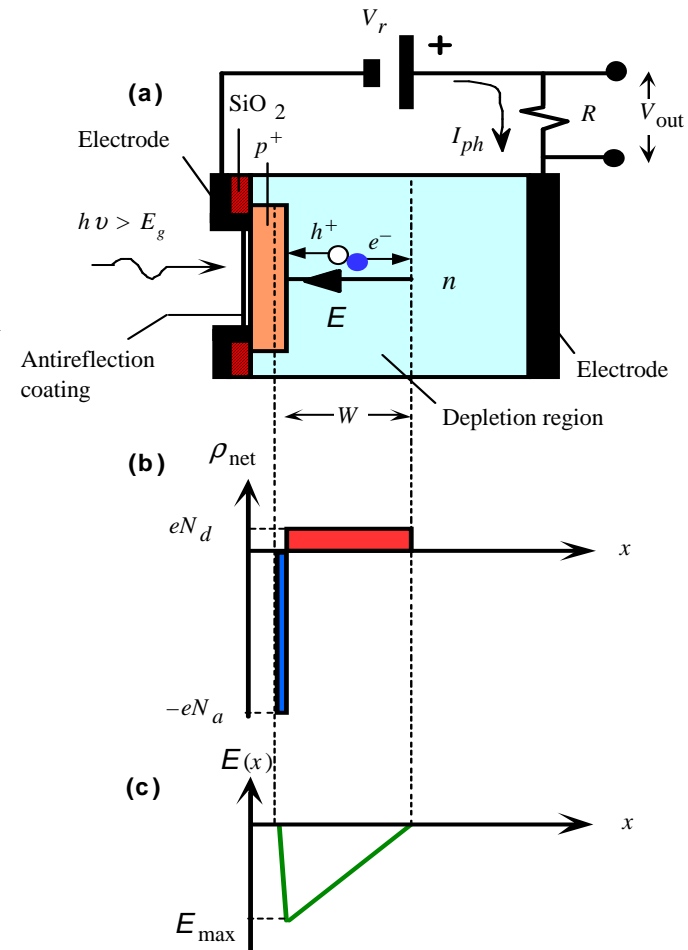
- **M3. Receptores**
  - Estructura de un fotodiodo de unión pn
  - Teorema de Ramo
  - Longitud de onda de Corte
  - Absorción de Fotones
  - Semiconductores de BP Directa e Indirecta
  - Eficiencia Cuántica y Responsividad
  - Fotodiodos pin
  - Fotodiodos de Avalancha
  - Fototransistores
  - Detectores Fotoconductivos
  - Ruido en Fotodetectores
  - Problemas

## Estructura Simplificada de un Fotodiodo Típico de Unión $pn$

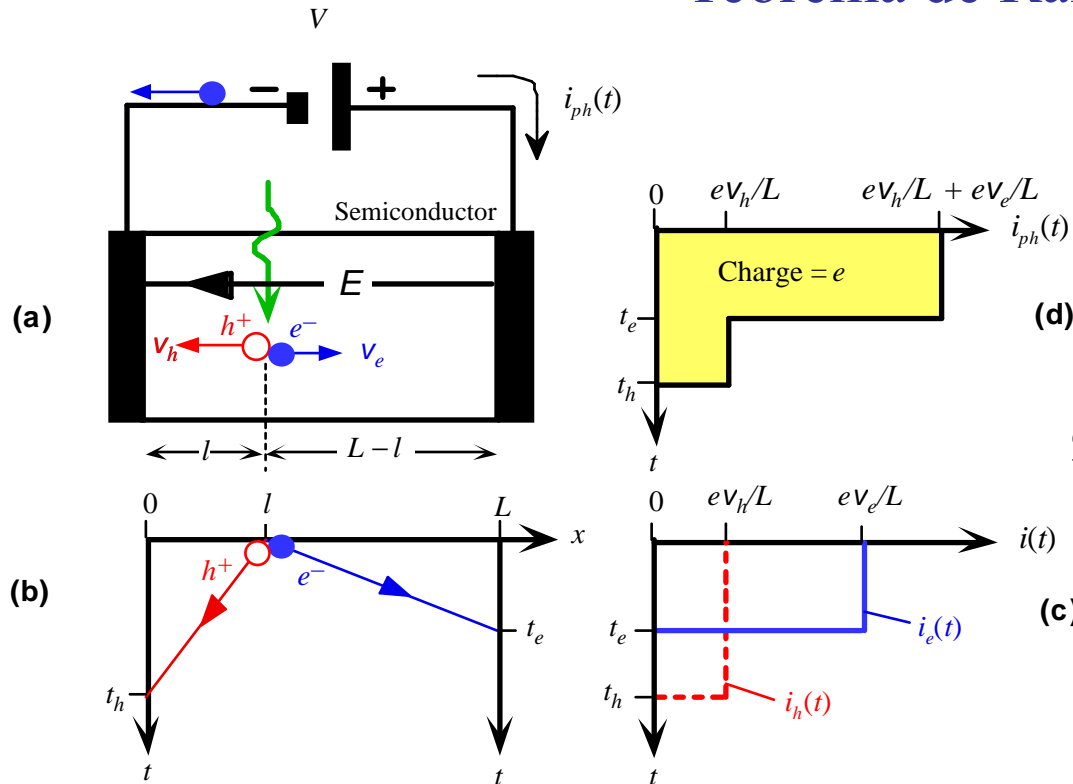
Cuando un fotón de energía mayor que  $E_g$  impacta en el fotodiodo se genera un par electrón hueco

Las zonas fuera de la región de deplexión son regiones neutras y solo tienen portadores mayoritarios. Se pueden tratar como extensiones resistivas de los electrodos.

- Diagrama esquemático de un fotodiodo de unión  $pn$ , en polarización inversa.
- Densidad de carga espacial neta a través del fotodiodo dentro de la región de deplexión.  $N_a$  y  $N_d$  son las concentraciones de donadores y aceptores en los lados  $p$  y  $n$ .
- Los campos en la región de deplexión.



## Teorema de Ramo



$$i_e(t) = \frac{eV_e}{L} \quad i_h(t) = \frac{eV_h}{L}$$

$$Q_{colectada} = \int_0^{t_e} i_e(t) dt + \int_0^{t_h} i_h(t) dt = e$$

a) Se genera un par electrón hueco en  $x=l$ . El electrón y el hueco se mueven en direcciones opuestas a diferentes velocidades  $V_h$  y  $V_e$ . b) El electrón llega en un tiempo  $t_e=(L-l)/v_e$ , y el hueco en un tiempo  $t_h=l/v_h$ . c) El electrón y el hueco generan una fotocorriente externa  $i_e(t)$  y  $i_h(t)$ . d) La fotocorriente total es la suma de  $i_e(t) + i_h(t)$ .

Por cada fotón incidente que genere un par electrón hueco y se colecta un solo electrón de carga



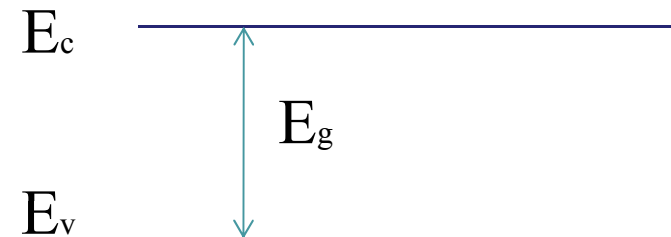
## Longitud de onda de Corte

El proceso de creación de pares electrones hueco, requiere fotones con energía igual a  $E_g$  (energía de la banda prohibida)

$$E_g = E_c - E_v$$

$E_c =$  Energía de la banda de conducción

$E_v =$  Energía de la banda de valencia



Se tendrá una longitud de onda de corte superior para el fotodiodo dada por:

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)}$$

## Absorción de Fotones

Los fotones incidentes serán absorbidos a medida que avanzan por el material semiconductor, y la potencia óptica absorbida que es proporcional al número de fotones vendrá dada por:

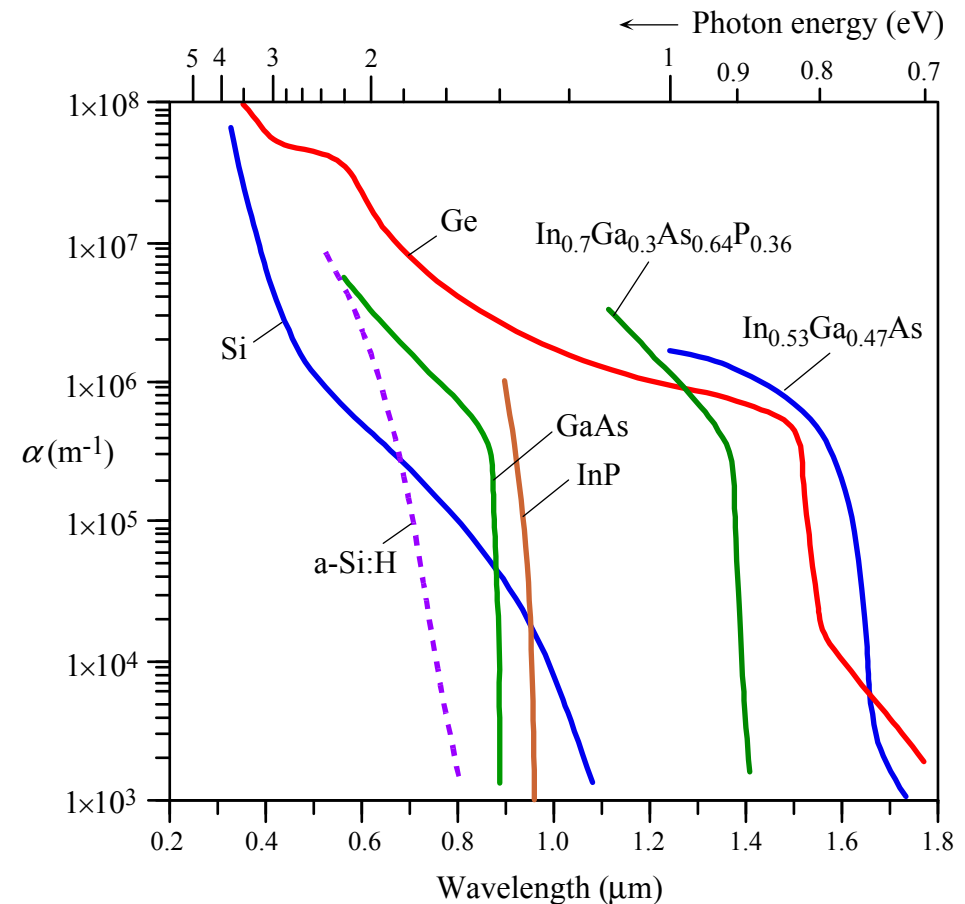
$$P_{abs} = P_{inc} (1 - R) [1 - e^{-\alpha d}]$$

$$P_{inc} = \text{Potencia Incidente}$$

$$R = \text{Reflectancia}$$

$$\alpha = \text{coeficiente de absorción}$$

$$d = \text{ancho de la región de absorción}$$



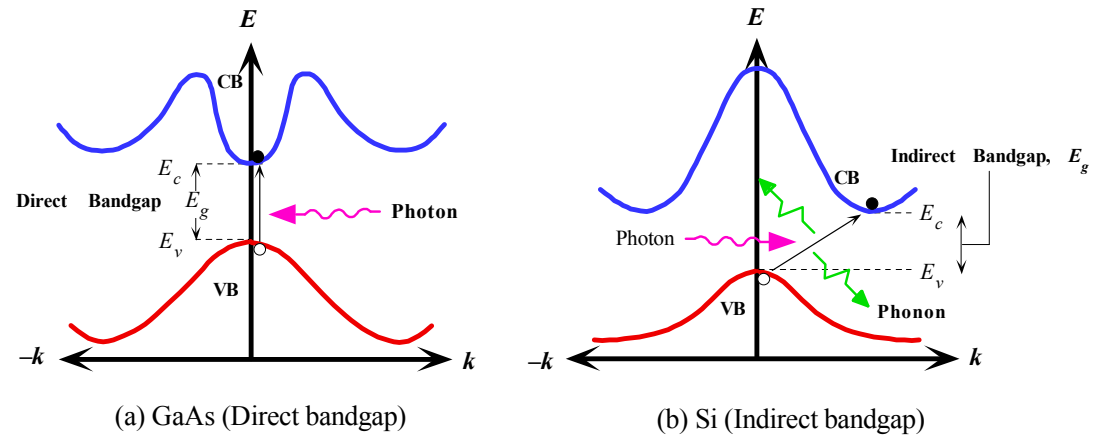
Coeficiente de Absorción ( $\alpha$ ) vs la longitud de onda ( $\lambda$ ) para varios semiconductores

## Absorción de Fotones

- En los semiconductores de banda prohibida (BP) directa, tales como GaAs, InP, ... la transición del electrón de la BC a la BV se da sin que haya un cambio en el vector  $k$  (o el momento del cristal  $h/\lambda$ ).
- En los semiconductores de BP indirecta, tales como el Si y el Ge, la absorción de un fotón de energía cercana a  $E_g$ , requiere la emisión o absorción de vibraciones reticulares llamadas **fonones**.

Esto es debido a que en la absorción, el electrón experimenta un cambio en su momento el cual debe de ser balanceado con la emisión de fonones.

- Debido a que la interacción de un fotón con los electrones de la banda de valencia, en los semiconductores de BP indirecta, necesitan un tercer factor, vibraciones reticulares, la probabilidad de absorción de fotones no es tan alta.



- a) La absorción de fotones en un semiconductor de banda prohibida directa.  
 ) La absorción de fotones en un semiconductor de banda prohibida indirecta  
 (VB, banda de valencia,; CB, banda de conducción)



## Semiconductores de BP Directa e Indirecta

Energía de la BP, longitud de onda de corte y tipo de semiconductor

Semiconductor	$E_g$ (eV)	$\lambda_g$ ( $\mu\text{m}$ )	Tipo
InP	1.35	0.91	Directo
GaAs <sub>0.88</sub> Sb <sub>0.12</sub>	1.15	1.08	Directo
Si	1.12	1.11	Indirecto
In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As <sub>0.64</sub> P <sub>0.36</sub>	0.89	1.4	Directo
In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As	0.75	1.65	Directo
Ge	0.66	1.87	Indirecto
InAs	0.35	3.5	Directo
InSb	0.18	7	Directo



## Eficiencia Cuántica y Responsividad

### Eficiencia Cuántica Externa

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} = \frac{\text{electrones colectados}}{\text{fotones incidentes}}$$

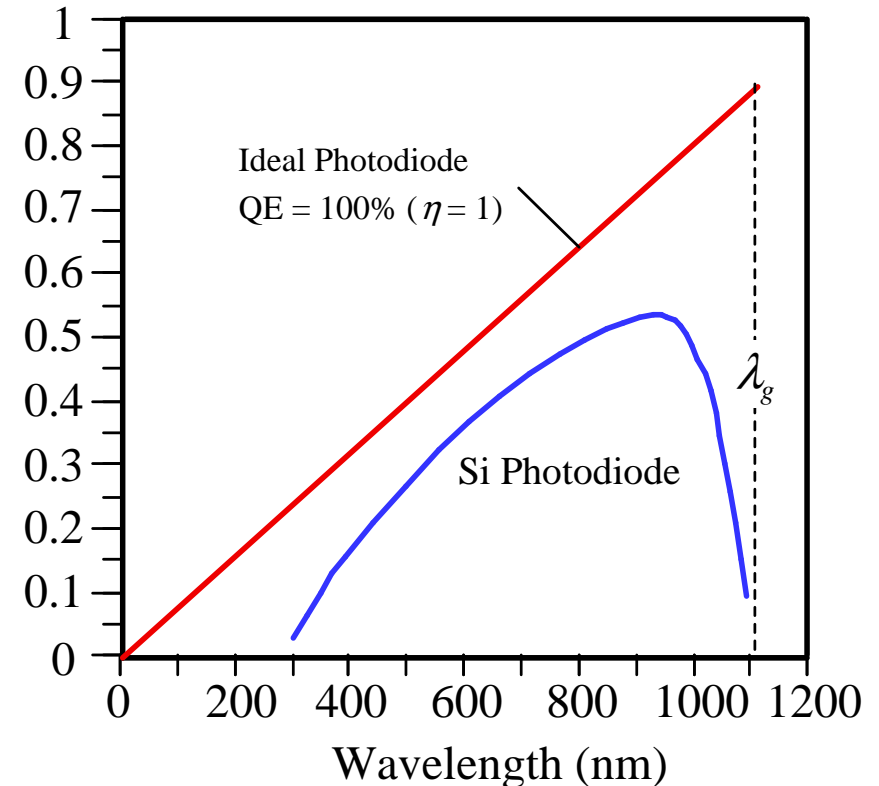
### Responsividad

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{\text{Fotocorriente de salida}}{\text{Potencia Incidente}} \text{ (A/W)}$$

$$R = \frac{e \cdot r_e}{P_o} = \frac{e \cdot \eta \cdot r_p}{P_o} = \frac{e \cdot \eta \cdot P_o / hf}{P_o} = \frac{e \cdot \eta}{hf}$$

$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc}$$

### Responsividad A/W



Responsividad (R) vs  $\lambda$  para un fotodiodo ideal con una eficiencia cuántica externa del 100%  $\eta = 1$ , y para un típico fotodiodo comercial



### Fotodiodos pin

Los fotodiodos de unión *pn* tienen ciertas desventajas:

1. La capacitancia de la unión o de la región de depleción, no es lo suficientemente pequeña para permitir la fotodetección a altas frecuencias de modulación
2. La región de depleción es de unos pocos micrómetros, lo que significa que altas longitudes de onda donde la profundidad de penetración es mayor, la mayoría de la energía sería absorbida fuera de la región de depleción, siendo baja la  $\eta$  a estas longitudes de onda.

Estos problemas se reducen notablemente con los fotodiodos *pin*

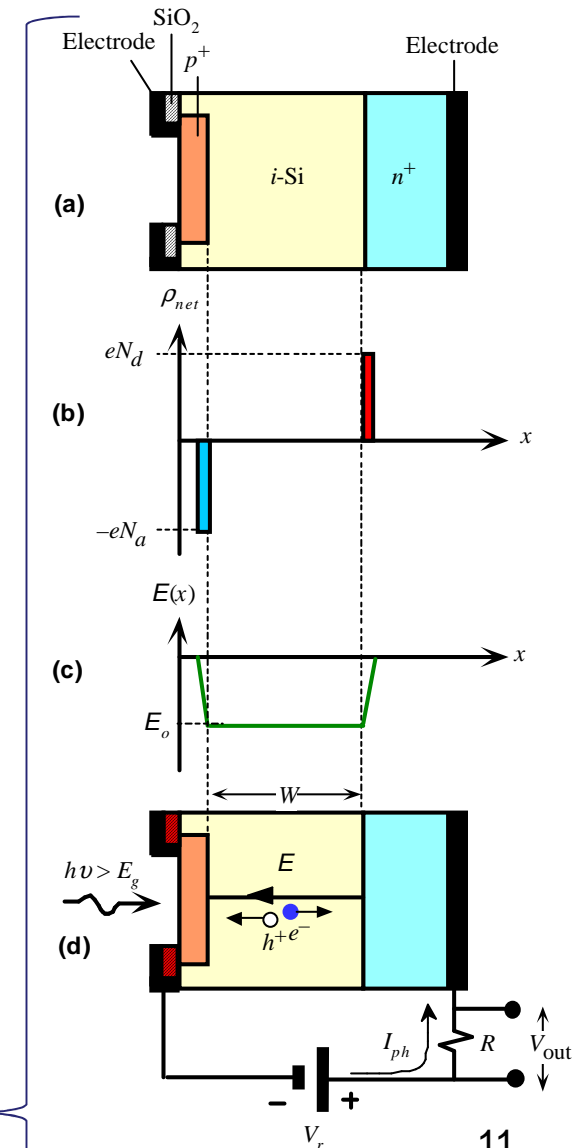
## Fotodiodos pin

Los fotodiodos *pin* se refieren a dispositivos semiconductores que tienen una estructura *p-intrínseca-n*. Como se aprecia en la figura a). La capa intrínseca está mucho menos dopada que las capas *p* y *n*.

Cuando se forma la estructura, los hoyos se difunden de la región *p* y los electrones de la región *n*, dentro de la capa de silicio intrínseca, donde se recombinan y desaparecen. Esto deja unas estrechas capas de iones cargados positivamente y negativamente en los lados *p* y *n* respectivamente, figura b).

Ambas capas están separadas por una distancia  $W$ , entre las cuales se forma un campo eléctrico constante (figura c)), diferente al fotodiodo *pn*, donde éste era variable.

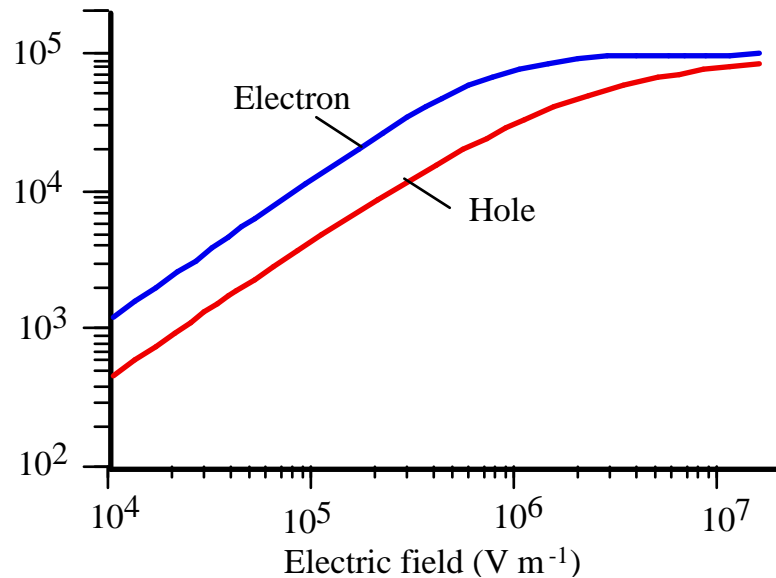
La absorción de fotones ocurre dentro de la capa intrínseca de Si, lo cual aumenta  $\eta$ .



a) Esquemático de la estructura idealizada de un fotodiodo *pin* ideal. b) Densidad de carga espacial neta, a través del fotodiodo. c) Campo a través del diodo. d) El fotodiodo *pin* se polariza inversamente.

## Fotodiodos pin

Drift velocity (m s<sup>-1</sup>)



Velocidad de deriva vs campo eléctrico, para huecos y electrones en el Si

La capacitancia de depleción viene dada por:

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{W}$$

A = Area transversal del fotodiodo

W = Ancho de la región de depleción

El tiempo de respuesta ( $t_{der}$ ) del fotodiodo está determinado por el tiempo de tránsito, de los portadores generados, a través de la región W.

Para portadores generados en el filo de la capa intrínseca este viene dado por:

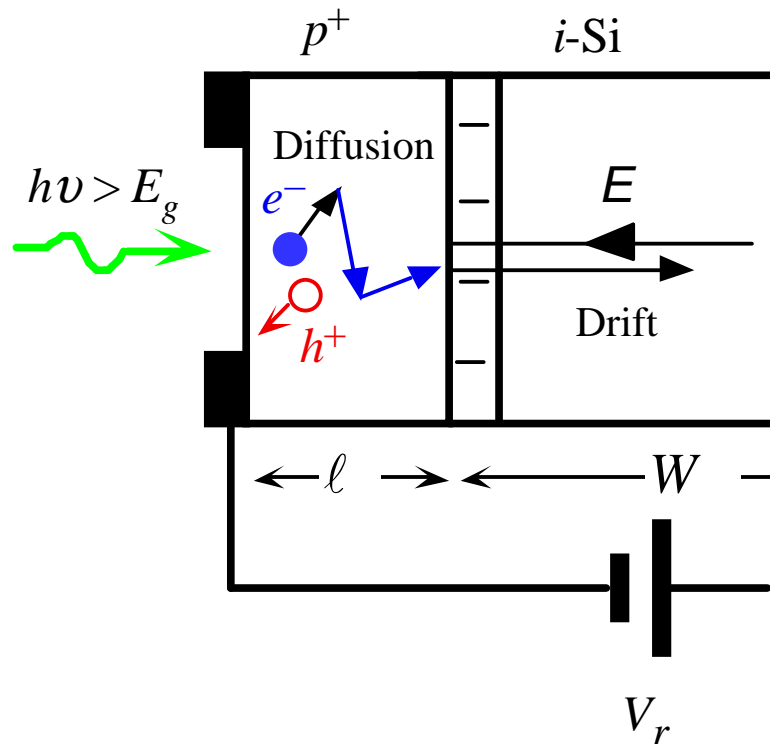
$$t_{der} = \frac{W}{V_{der}}$$

$V_{der}$  = velocidad de deriva

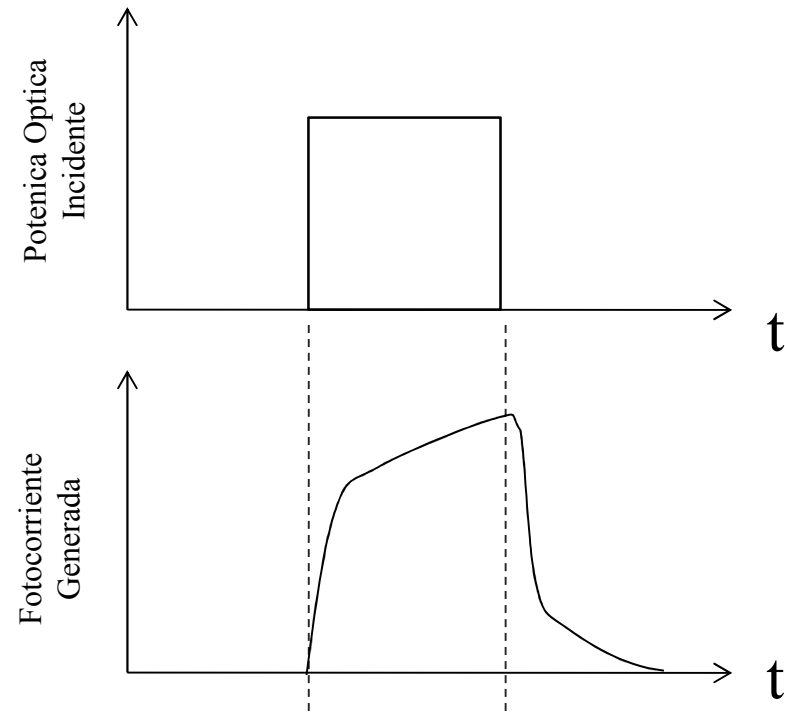
Una forma de disminuir  $t_{der}$  es aumentar la  $V_{der}$ , aumentando el campo eléctrico externo, sin embargo, para grandes valores de E, las velocidades de deriva tanto de electrones como de huecos se saturan.

## Fotodiodos pin

Fotodiodo pin polarizado en inversa, iluminado con un fotón de longitud de onda corta (esto significa que se absorbe muy cerca de la superficie).

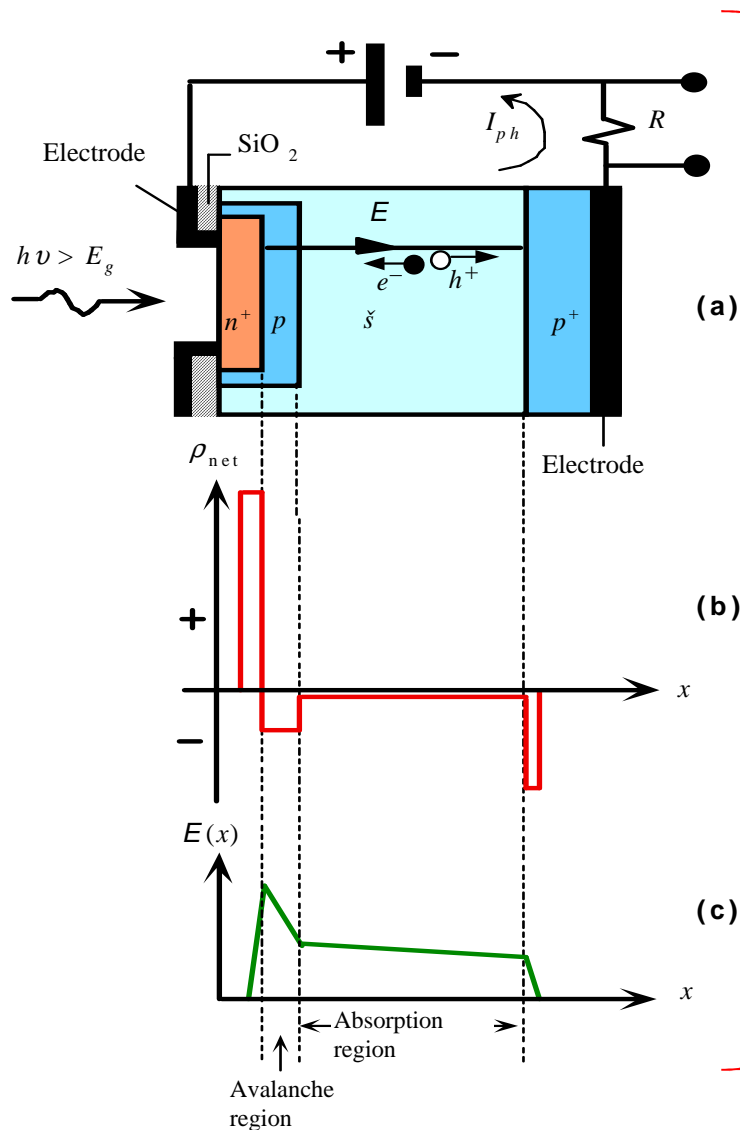


El electrón fotogenerado tiende a difundirse a la región de depleción, cuando llega al borde es barrido dentro de esta y trasladado (debido al campo eléctrico) al otro lado de la misma.



El proceso de difusión, inherentemente lento, distorsiona la respuesta temporal del fotodiodo, como se aprecia en las figuras de arriba.

## Fotodiodos de Avalancha



Los fotodiodos de avalancha (APD) son ampliamente usados en comunicaciones debido a su alta velocidad y ganancia interna, que multiplica internamente la fotocorriente generada.

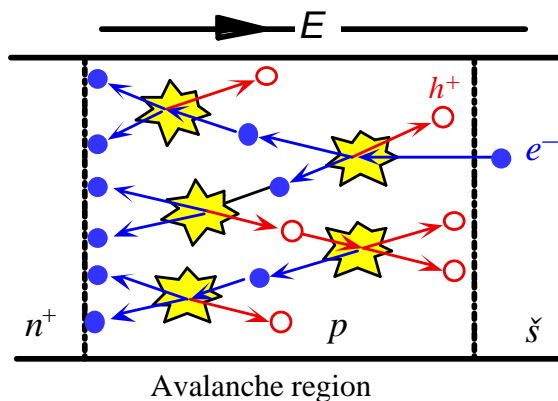
El lado  $n$  es delgado y se ilumina a través de la ventana. Hay 3 capas  $p$  de diferentes niveles de dopaje, para modificar adecuadamente la distribución de campo a lo largo del fotodiodo. La primera es una capa  $p$ , la segunda  $\pi$  es una capa  $p$ , casi intrínseca y la última la  $p^+$  está altamente dopada.

El diodo se polariza en inversa para incrementar los campos en las regiones de depleción y ampliarla a través de la capa intrínseca.

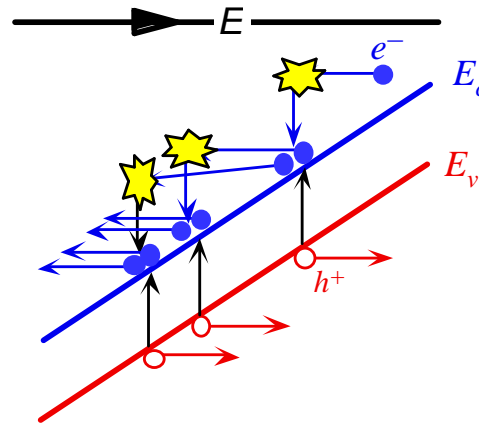
a) Ilustración de la estructura de un fotodiodo de avalancha (APD) polarizado para ganancia de avalancha. b) Densidad de espacio de carga neta a lo largo del diodo y la identificación de las regiones de absorción y multiplicación.

## Fotodiodos de Avalancha

Esquemático del proceso de ionización por impacto



(a)



(b)

a) Vista esquemática del proceso de ionización por impacto, liberando pares electrón hueco (PEH) y la resultante multiplicación por avalancha. b) Impacto de un electrón energético en la banda de conducción, transfiere la energía cinética del electrón a un electrón de valencia y de este modo lo excita a la banda de conducción.

La absorción de fotones ocurre principalmente en la capa  $\pi$ .

Los electrones fotogenerados al llegar a la región de avalancha se aceleran y adquieren suficiente energía cinética (mas grande que  $E_g$ ) para ionizar por impacto alguno de los enlaces covalentes,

y liberar PEH como se muestra en la figura. Estos electrones generados a su vez, pueden adquirir suficiente energía para generar mas electrones por impacto, provocando una avalancha del proceso de ionización por impacto.



## Fotodiodos de Avalancha

Características:

- El fotodiodo de avalancha posee un mecanismo de ganancia interna de modo que un solo fotón absorbido genera un gran número de pares electrón hueco. Debido al proceso de multiplicación por avalancha.
- Esta multiplicación es causa de que la eficiencia cuántica, sea mucho mayor que 1.

Factor de multiplicación

$$M = \frac{\text{Fotocorriente multiplicada}}{\text{Fotocorriente antes de la multiplicación}}$$

Responsividad del APD

$$R_{APD} = \frac{\eta e}{hf} M = R M$$

$R$  = responsividad del fotodiodo antes del proceso de multiplicación por avalancha.



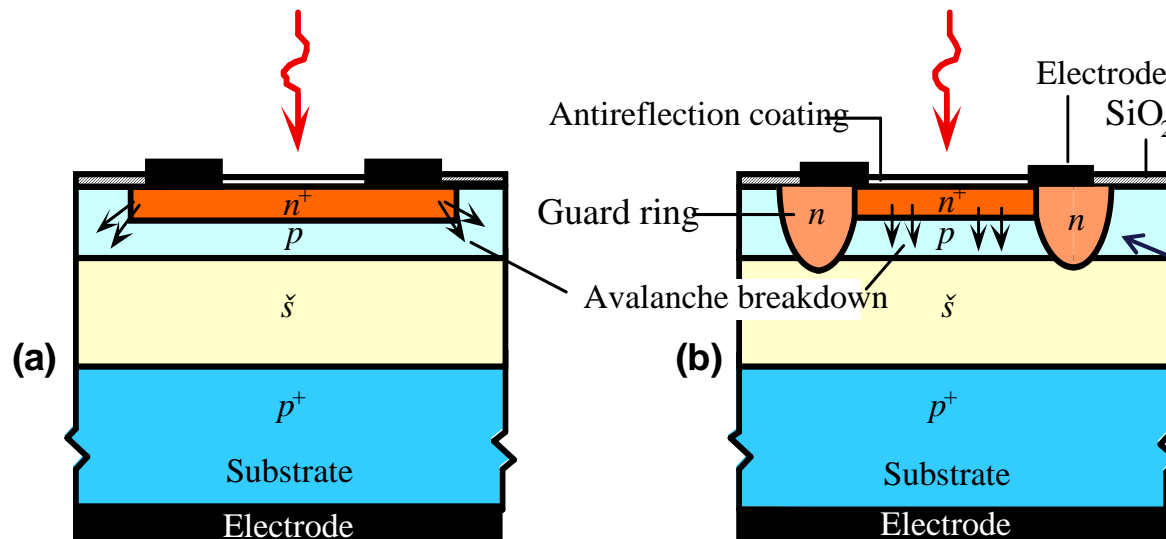
## Fotodiodos de Avalancha

La velocidad de respuesta de un APD, es menor a la de un pin, pero si consideramos la respuesta temporal del circuito amplificador del pin (no necesaria en el APD), su velocidad es mayor.

Una desventaja de esta configuración de APD, es que el campo en los extremos de la unión  $n^+p$  alcanza la ruptura de avalancha antes que el resto de las regiones  $n^+p$ .

Idealmente la ruptura de avalancha debe ocurrir uniformemente en la región iluminada,

para amplificar la fotocorriente primaria en vez de la corriente de oscuridad.



Se evita con fotodiodos APD con un anillo de guarda alrededor de la región  $n^+$

a) Estructura de un fotodiodo de Si sin anillo de guarda. b) Una ilustración esquemática de la estructura de un diodo de Si APD práctico.

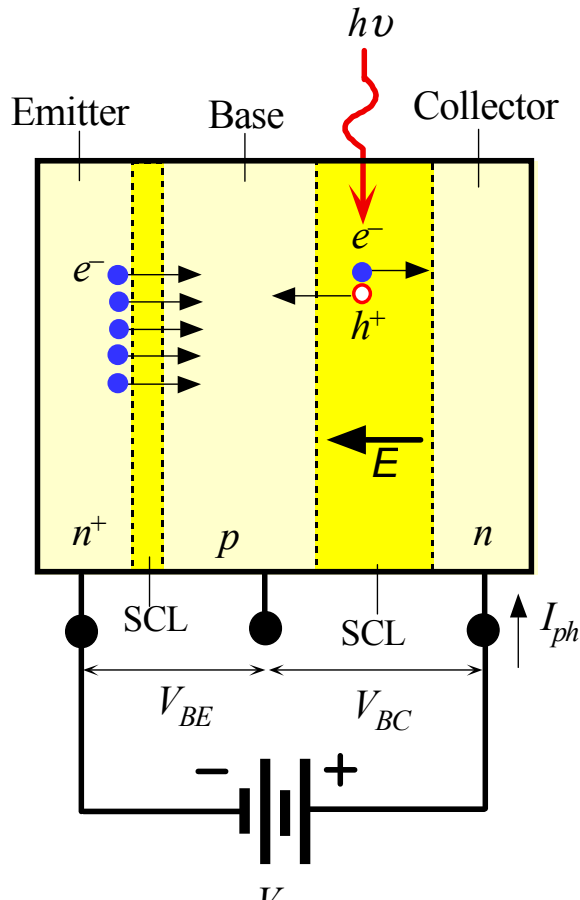


## Fotodiodos de Avalancha

Características típicas de algunos diodos *pn*, *pin* y *APD*.

Photodiodo	$\lambda_{\text{range}}$ (nm)	$\lambda_{\text{peak}}$ (nm)	R a $\lambda_{\text{peak}}$ (A/W)	Ganancia	$t_r$ (ns)	$I_{\text{dark}}$
Si pn junction	200-1100	600-900	0.5-0.6	<1	0.5	0.01-0.1nA
Si pin	300-1100	800-900	0.5-0.6	<1	0.03-0.05	0.01-0.1nA
Si APD	400-1100	830-900	40-130	10-100	0.1	1-10nA
Ge pn junction	700-1800	1500-1600	0.4-0.7	<1	0.05	0.1-1 $\mu$ A
Ge APD	700-1700	1500-1600	4-14	10-20	0.1	1-10 $\mu$ A
InGaAs-InP pin	800-1700	1500-1600	0.7-0.9	<1	0.03-0.1	0.1-10nA
InGaAs-InP APD	800-1700	1500-1600	7-18	10-20	0.07-0.1	10-100nA

## Fototransistores



El principio de operación del fototransistor. SCL es la capa espacial de carga, o la región de depleción. La fotocorriente primaria actúa como una corriente de base y da lugar a un gran aumento en la fotocorriente del circuito del colector emisor.

Es un transistor de unión bipolar, que opera como un fotodetector, con una ganancia en fotocorriente.

$$I_{ph} \approx \beta I_{pho}$$

*I<sub>ph</sub>* fotocorriente en el circuito externo

*I<sub>pho</sub>* fotocorriente primaria generada

El fotón genera un par electrón hueco, en la región de depleción entre la base y el colector. Esto disminuye la resistencia de BC, aumentando el Vbe.

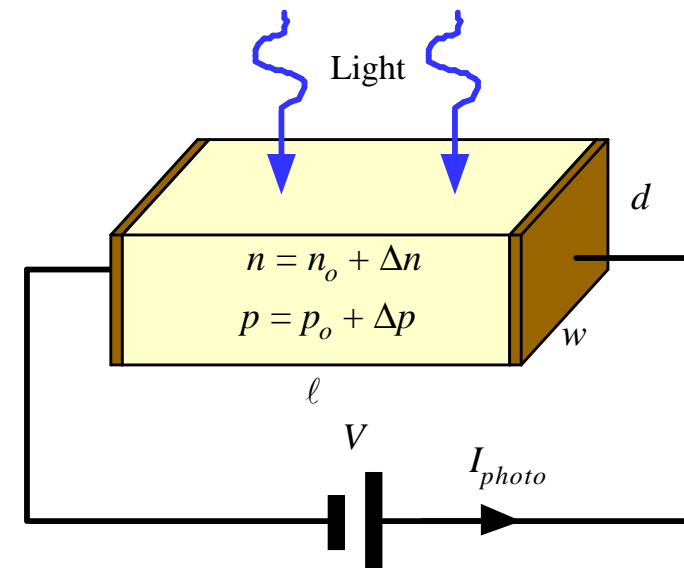
Aumentando Vbe, se incrementa la fotocorriente generada por un factor de  $\beta$  como en un BJT.

## Detectores Fotoconductivos

Los detectores fotoconductivos tienden dos electrodos unidos a un material semiconductor con una eficiencia cuántica y un coeficiente de absorción dado, sobre las longitudes de onda de interés.

Cuando inciden fotones con energía mayor a la  $E_g$ , estos son absorbidos y se generan pares electrón hueco.

Esto resulta en un incremento en la conductividad del semiconductor, y de esta manera un incremento en corriente externa lo cual constituye una fotocorriente.



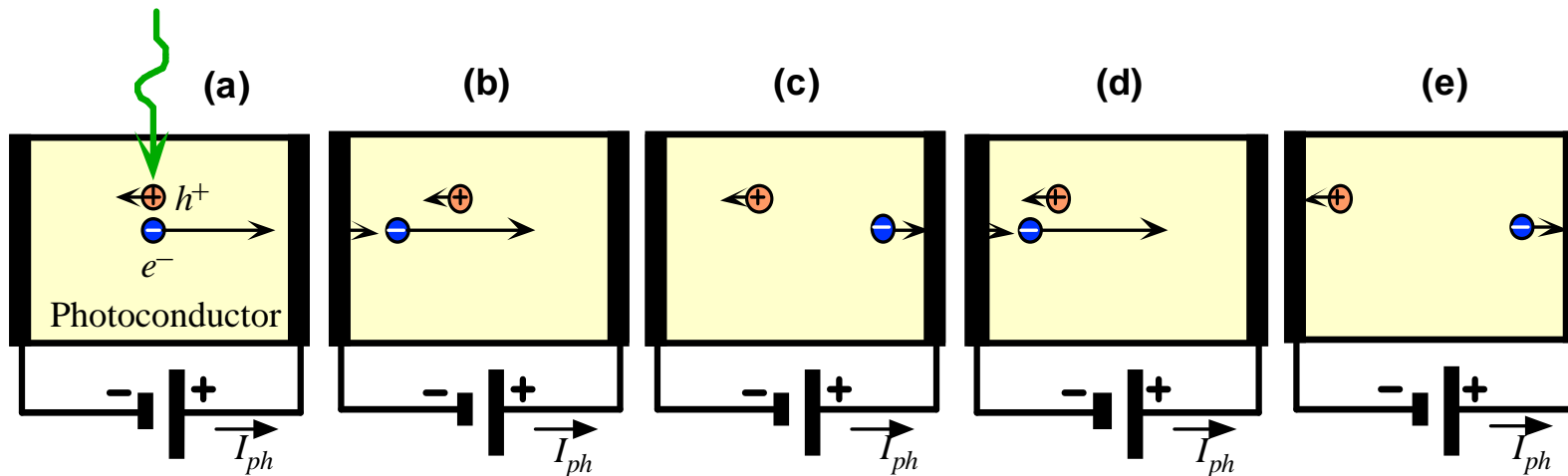
Un trozo de semiconductor de longitud  $l$ , de ancho  $w$  y profundidad  $d$  se ilumina con una luz de longitud  $\lambda$

## Detectores Fotoconductivos

Un fotoconductor con contactos óhmicos exhibe ganancia.

Cuando un fotón incide sobre el fotoconductor, se genera un par electrón hueco. Como los huecos tienen una velocidad de deriva menor que los electrones, muchos electrones rápidos entran y circulan por el fotoconductor, mientras el hueco está viajando por el fotoconductor.

Así un solo fotón absorbido generó un flujo de varios electrones lo que constituye una ganancia.





## Detectores Fotoconductivos

### Fotocorriente generada $I_g$

$$I_g = \eta \frac{P_{in} e}{h f} G = I_p G$$

$I_p$  = fotocorriente primaria generada

$G$  = ganancia

$$G = \frac{t_s}{t_f}$$

$t_s$  = tiempo de tránsito de portadores lentos

$t_f$  = tiempo de tránsito de portadores rápidos

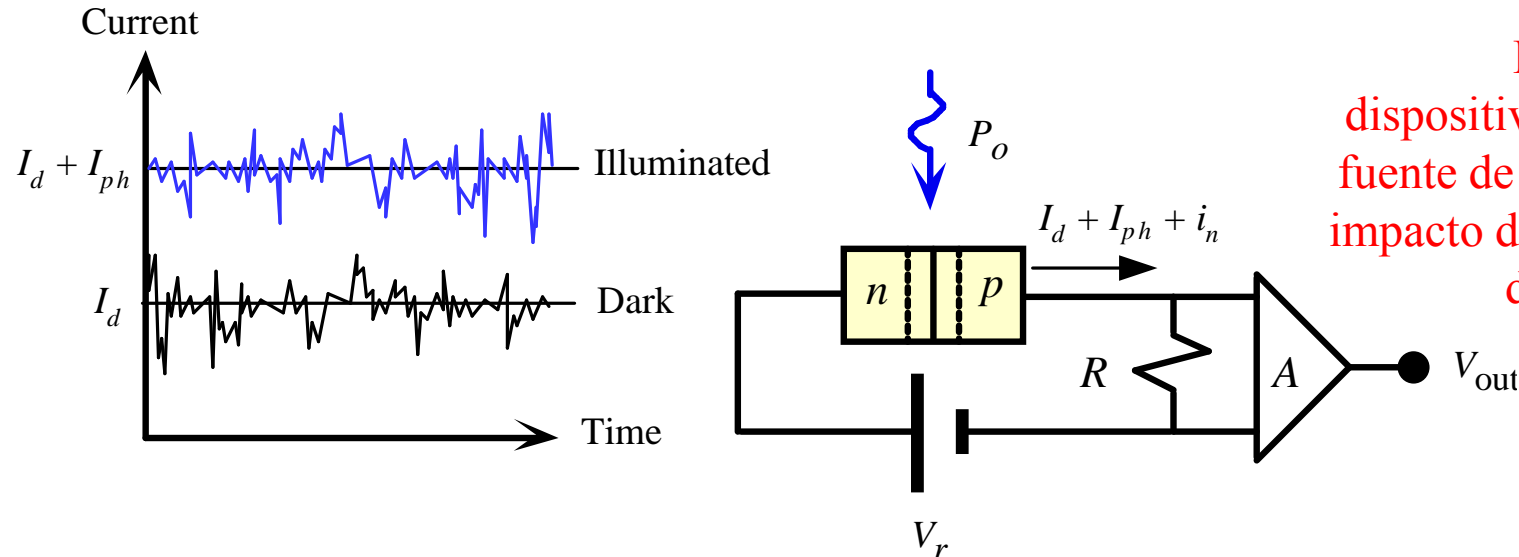
### Ruido en Fotodetectores

Hay 3 tipos principales de ruido en un fotodetector:

- a) Ruido cuántico o de impacto de la fotocorriente generada: este ruido se debe a la llegada aleatoria de fotones al fotodetector y de esta manera a la generación y colecta aleatoria de electrones.
- b) Ruido de impacto de la corriente de oscuridad: este es debido a los pares electrón hueco que son generados térmicamente en la unión pn del fotodiodo. En un APD estos son multiplicados por el mecanismo de avalancha.
- c) Ruido térmico o Johnson: se debe a las fluctuaciones aleatorias de la corriente, debido al movimiento aleatorio, inducido térmicamente, de los electrones dentro de un conductor.

Es una corriente inversa de fuga que existe a través del dispositivo cuando ninguna luz incide sobre el fotodetector

## Ruido en Fotodetectores



En las uniones pn y dispositivos pin, la principal fuente de error es el ruido de impacto debido a la corriente de oscuridad y a la fotocorriente.

Los valores cuadráticos medios de los ruidos de impacto de la fotocorriente y la corriente de oscuridad vienen dados respectivamente por:

$\Delta f$  ancho de banda

$I_{ph}$  e  $I_{obs}$  valores medios de la fotocorriente y la corriente de oscuridad

$M$  factor de multiplicación para fotodiodos de avalancha

$F(M)$  factor de ruido relacionado al proceso de avalancha (vale uno para fotodiodos pn y pin)

$$\langle \hat{i}_{im}^2(t) \rangle = 2eI_{ph} \Delta f M^2 F(M)$$

$$\langle \hat{i}_{obs}^2(t) \rangle = 2eI_{obs} \Delta f M^2 F(M)$$



## Ruido en Fotodetectores

También tenemos que considerar el ruido térmico en la resistencia  $R$  del amplificador. El valor cuadrático medio de esta corriente de ruido viene dado por:

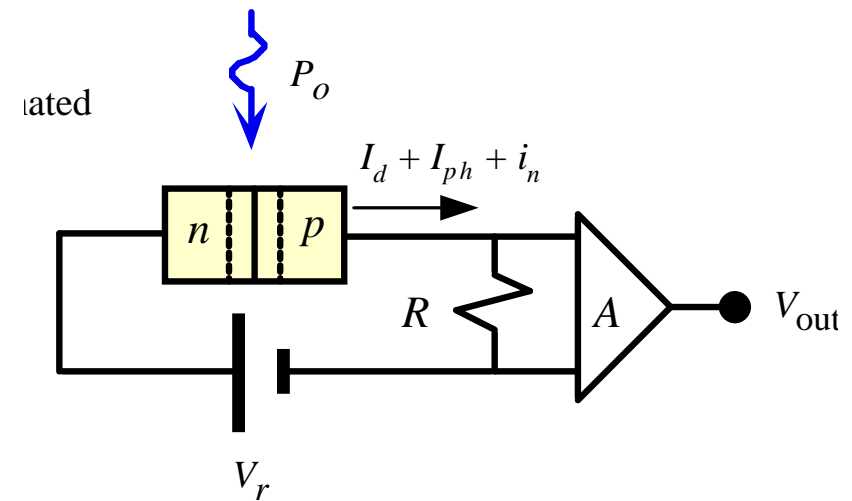
$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4kT}{R} \Delta f$$

Donde  $k$  es la constante de Boltzman  
 $T$  temperatura absoluta (Kelvin)

**La relación señal a ruido (S/N) en todo el detector vendría dada por:**

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle \hat{i}_{ph}^2 \rangle M^2}{2e(I_{ph} + I_{obs}) \Delta f M^2 F(M) + \frac{4kT \Delta f}{R} + \langle \hat{i}_{amp}^2 \rangle}$$

$\langle i_{ph}^2 \rangle e$   $\langle i_{amp}^2 \rangle$  son las corrientes cuadráticas medias, fotogenerada y de ruido en el amplificador respectivamente



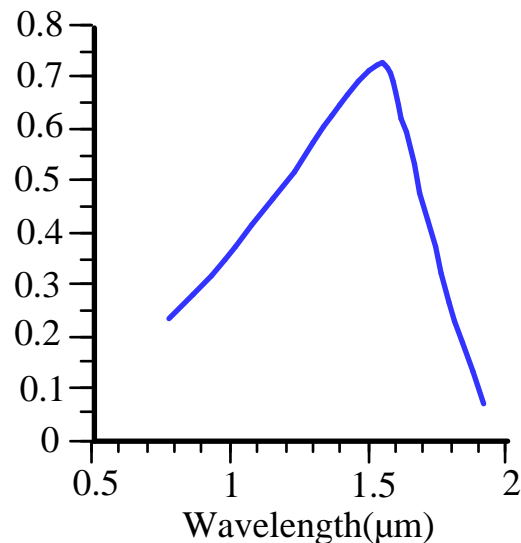
$$k \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$



## Problema 1

Considere un fotodiodo de unión pn de Ge, cuya responsividad se muestra en la figura. Su área fotosensitiva es de  $0.008\text{mm}^2$ . El mismo se utiliza bajo un voltaje en inversa de 10 voltios cuando la corriente de oscuridad es  $0.3\mu\text{A}$ , y la capacitancia de unión es de  $4\text{pF}$ . El tiempo de subida del fotodiodo es de  $0.5\text{ ns}$ .

Responsivity(A/W)



- Calcule la eficiencia cuántica 850, 1300 y 1550 nm.
- Cual es la intensidad de la luz a  $1.55\mu\text{m}$  que da una fotocorriente igual a la corriente de oscuridad

Responsividad de un fotodiodo de unión pn de Ge

## Problema 2

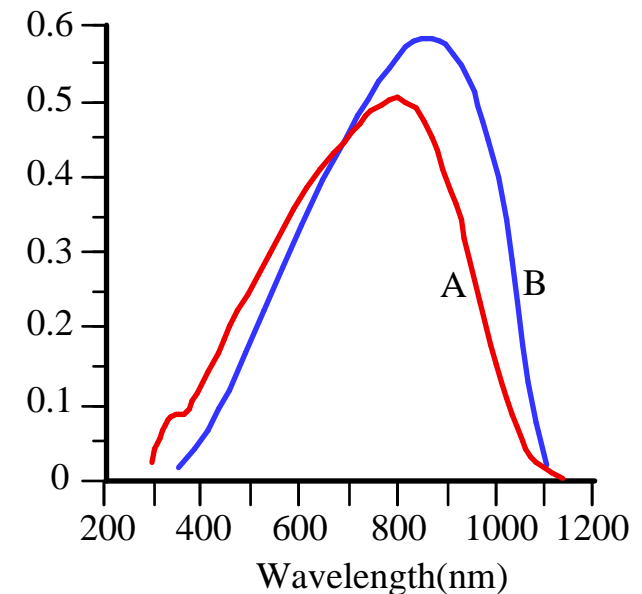
Considere dos fotodiodos pin de Si, tipo A y tipo B, ambos considerados rápidos.

El área fotosensitiva tiene 0.4 mm de diámetro.

Calcule:

- La fotocorriente generada cuando son iluminados con luz azul (450 nm), con una intensidad de  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Cuanto vale la eficiencia cuántica de cada dispositivo
- La fotocorriente generada cuando son iluminados con luz roja (700 nm), con una intensidad de  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Cuanto vale la eficiencia cuántica de cada dispositivo
- La fotocorriente generada cuando son iluminados con luz infrarroja (1000 nm), con una intensidad de  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Cuanto vale la eficiencia cuántica de cada dispositivo
- ¿ A qué conclusión llega ?

Responsivity(A/W)



Responsividad de dos fotodiodos pin de Si comerciales

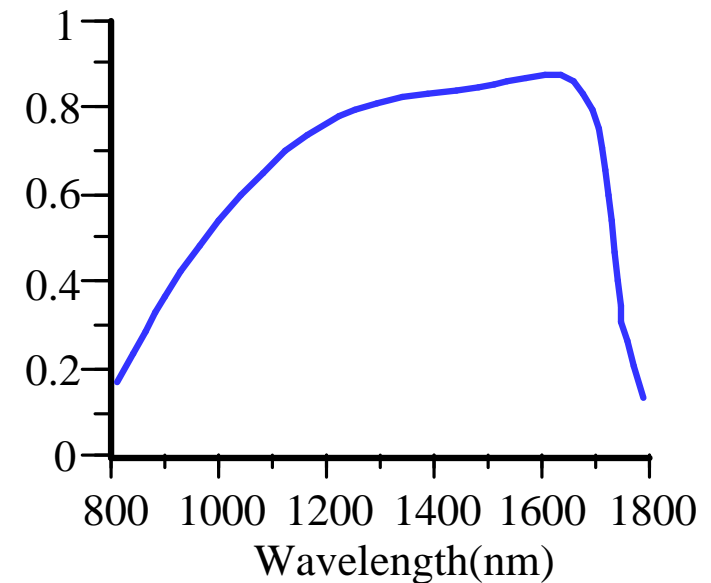


## Problema 3

Considere un diodo pin de InGaAs, cuya responsividad se muestra en la figura. Su corriente de oscuridad es de 5 nA.

- Qué potencia óptica a  $1.55 \mu\text{m}$ , dará una fotocorriente que es el doble de la corriente de oscuridad. Cuál es la eficiencia cuántica del fotodetector a  $1.55 \mu\text{m}$
- Cuál sería la fotocorriente si la potencia incidente en a) fuera a  $1.3 \mu\text{m}$ . Cuál es la eficiencia cuántica a esta longitud de onda de operación

Responsivity(A/W)



Responsividad de un diodo pin de  
InGaAs