



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

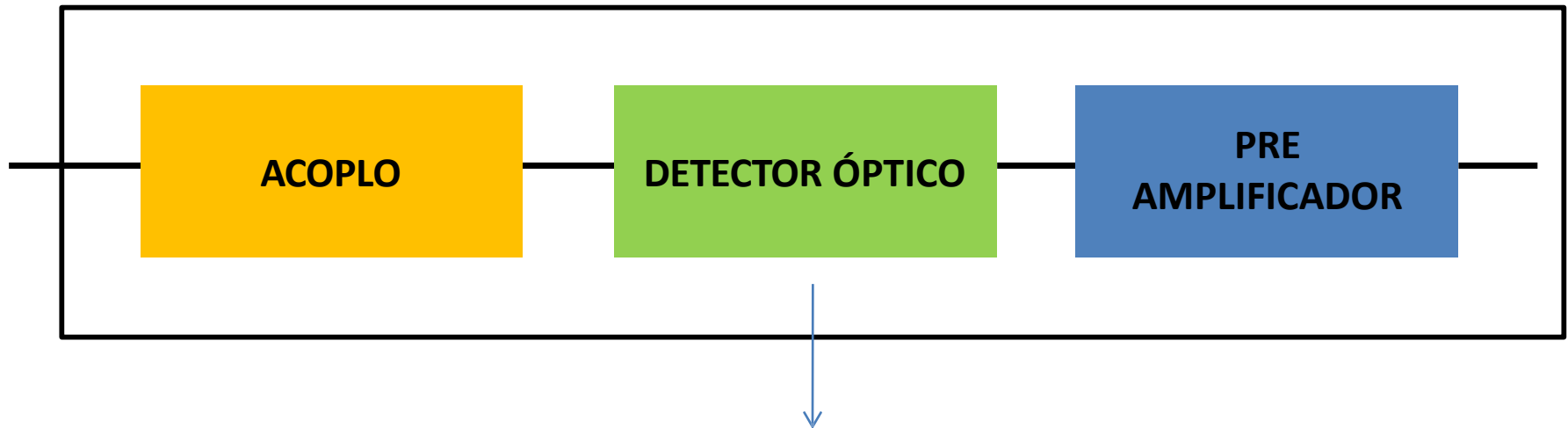
TEMA 10

RECEPTORES OPTICOS EN TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS

FOTONICA

Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación

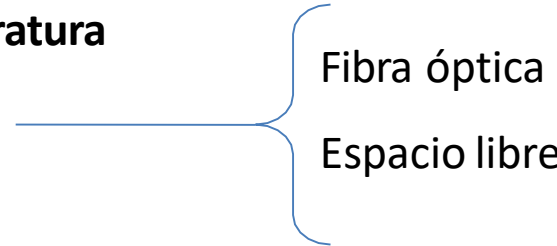
1.-INTRODUCCIÓN



Objetivo: Producir una señal eléctrica (corriente eléctrica) proporcional a la potencia promediada de la onda electromagnética

1.-INTRODUCCIÓN

Prestaciones de los detectores

- **Elevada responsividad (R)** → conversión óptica de $P-I$ a la λ de la luz incidente.
 - **Alta respuesta en frecuencia** → rápido
 - **Mínimo ruido posible**
 - **Insensible a los cambios de temperatura**
 - **Adecuado al canal de transmisión**
 - **Bajo coste**
 - **Larga duración**
- 

Fibra óptica
Espacio libre

1.-INTRODUCCIÓN

Tipos de Detectores

➤ **Detectores Térmicos o Piroeléctricos** (bolómetro)

- absorción de un fotón \rightarrow cambio de t^a \rightarrow cambio de resistividad
- lento \rightarrow no adecuado para comunicaciones ópticas



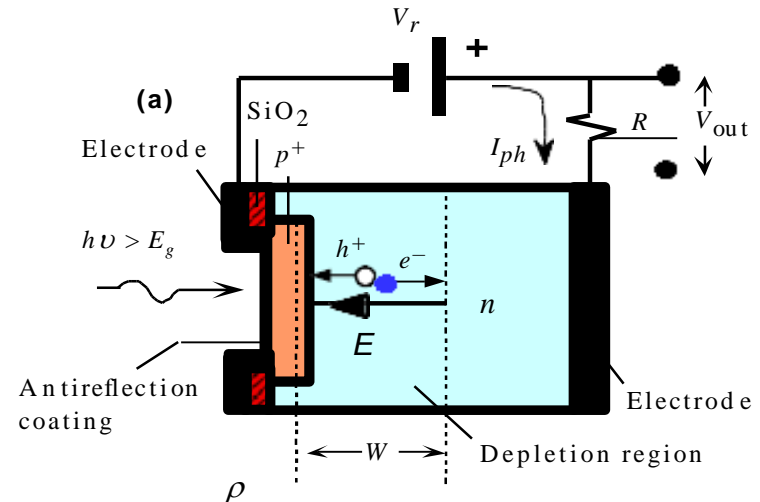
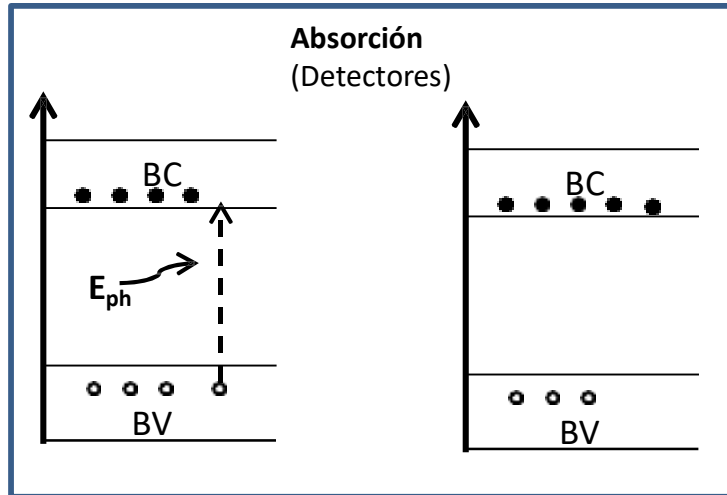
➤ **Fotodetectores**

- Tubos fotomultiplicadores (dispositivo de vacío, lento pero muy sensible)
- Fotodiodos
 - **Diodo PIN**
 - **Fotodiodo de avalancha**
- Fototransistores
- Dispositivos fotoconductivos



2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Estructura Simplificada de un Fotodiodo Típico de Unión pn

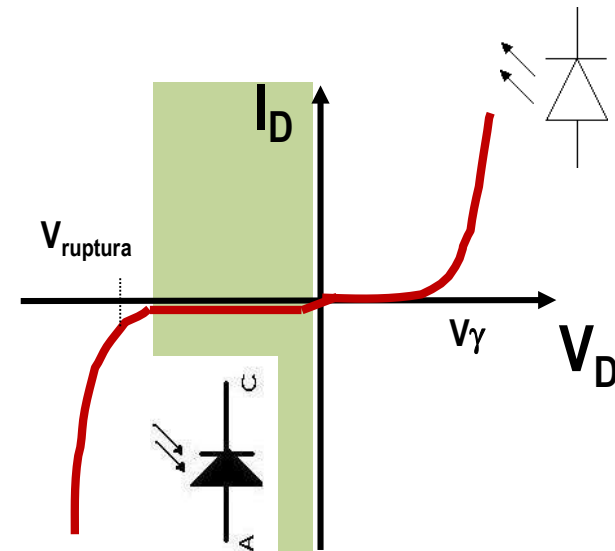
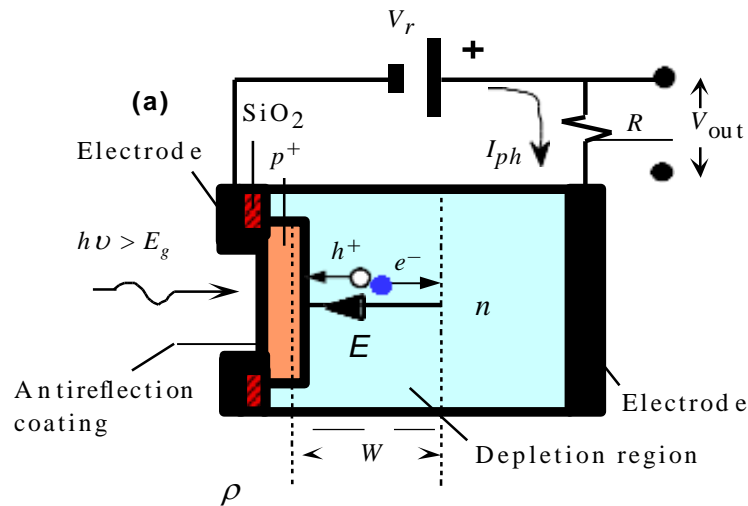


Los electrones y huecos generados son atraídos hacia los electrodos formando una corriente de deriva → **FOTOCORRIENTE**

También pueden darse recombinaciones fuera de la zona de depleción que originen una corriente: corriente de difusión (baja respuesta temporal).

2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Estructura Simplificada de un Fotodiodo Típico de Unión pn

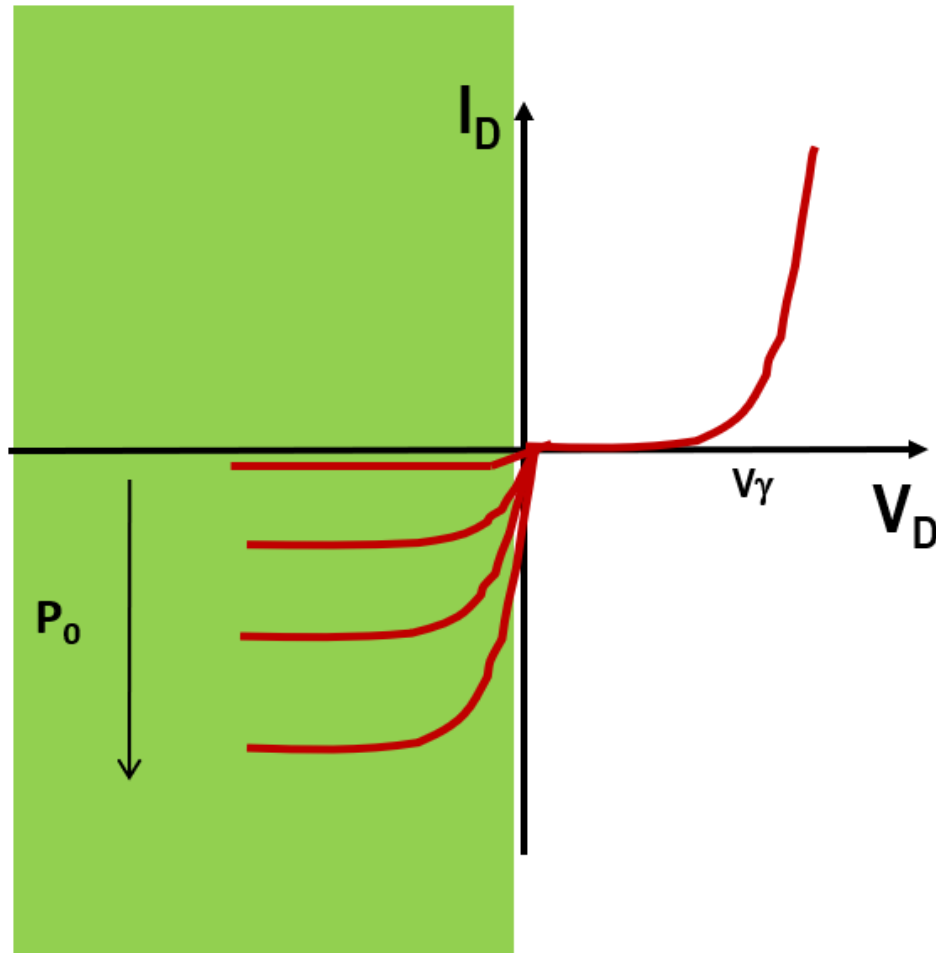


El fotodiodo se polariza en inversa

V controla la anchura de la Zona de Depleción

3.-FOTODIODOS PIN

Característica Electrónica (Curva I-V)



Corriente de oscuridad

2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

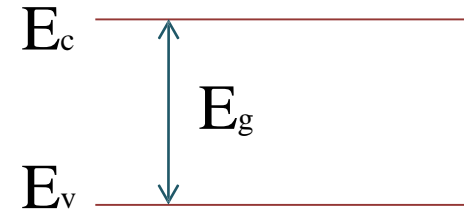
Longitud de onda de corte

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

$$E_g = E_c - E_v$$

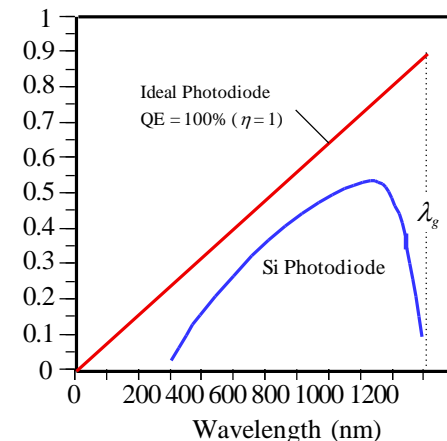
E_c = Energía de la banda de conducción

E_v = Energía de la banda de valencia



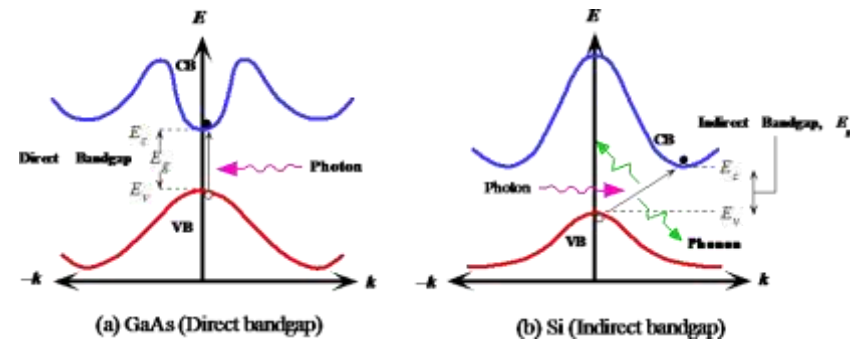
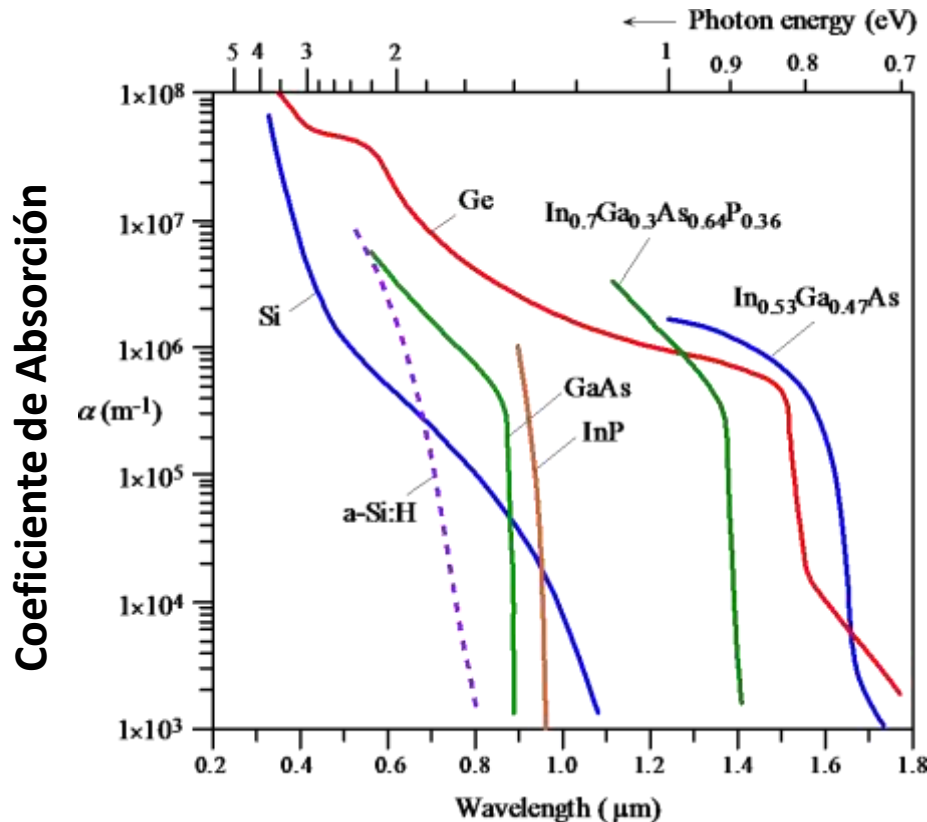
Se tendrá una **longitud de onda de corte superior para el fotodiodo** dada por:

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



2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Material es usados en Fotodetectores



- 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.

2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Principales Características de Materiales usados en Fotodetectores

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

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

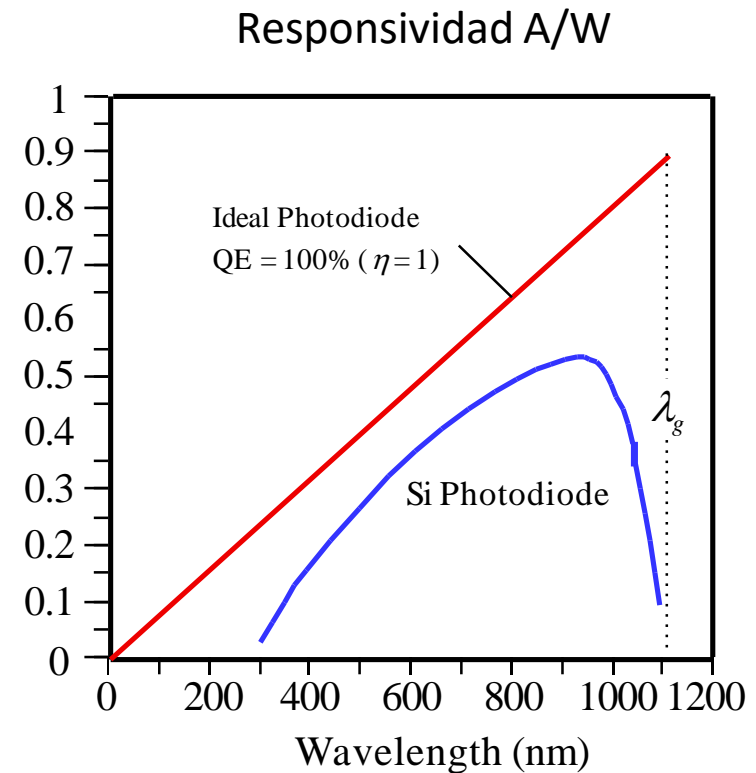
2.- FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Eficiencia Cuántica y Responsividad

Eficiencia Cuántica Externa

- la probabilidad de que un fotón incidente sea absorbido contribuyendo con un e^- a la fotocorriente

$$\eta = \frac{N^{\circ} \text{ electrones colectados/s}}{N^{\circ} \text{ fotones incidentes/s}}$$



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

2.-FUNDAMENTOS DE LOS FOTODIODOS

Eficiencia Cuántica y Responsividad

Responsividad

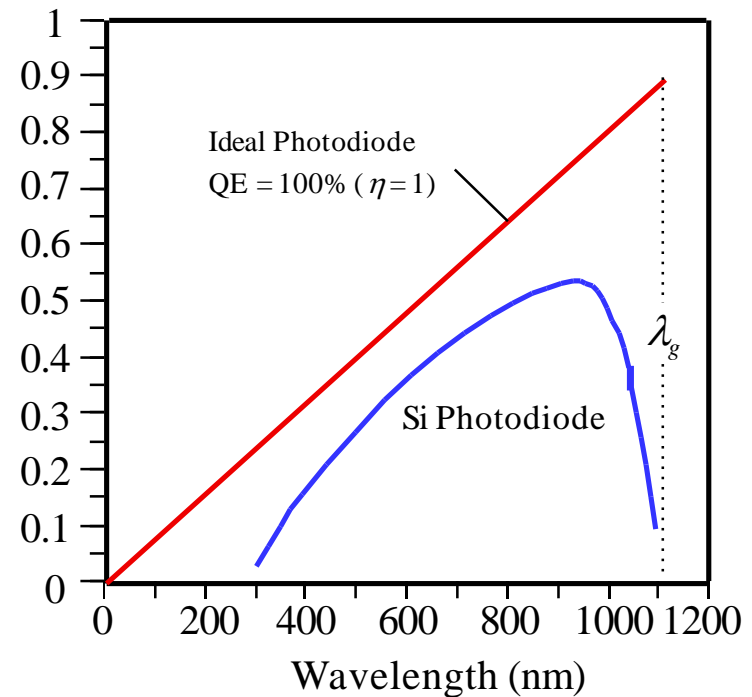
- relación entre la fotocorriente media y la potencia óptica

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

$$\eta = \frac{P_o / hf}{I_d / e} \Rightarrow$$

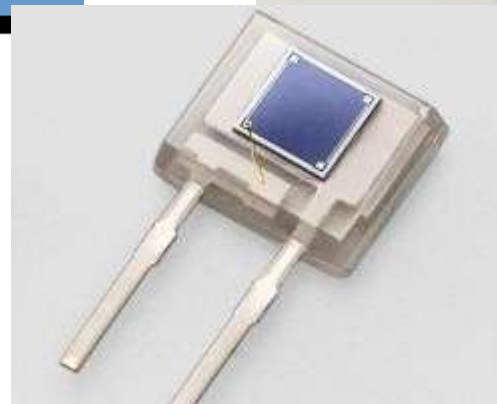
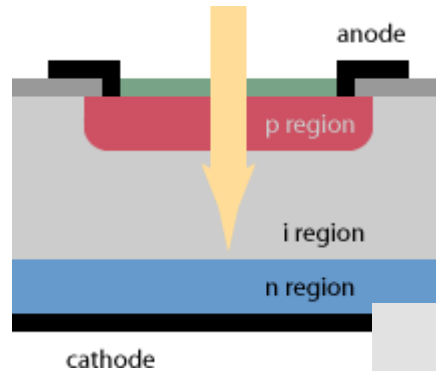
$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc}$$

Responsividad A/W



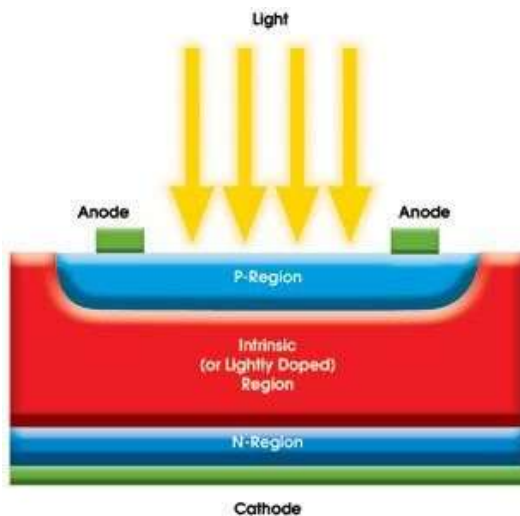
Responsividad (R) vs λ para un fotodiodo ideal con una eficiencia cuántica externa del 100% $\eta = 1$, y para un típico fotodiodo comercial

3.-FOTODIODOS PIN



3.-FOTODIODOS PIN

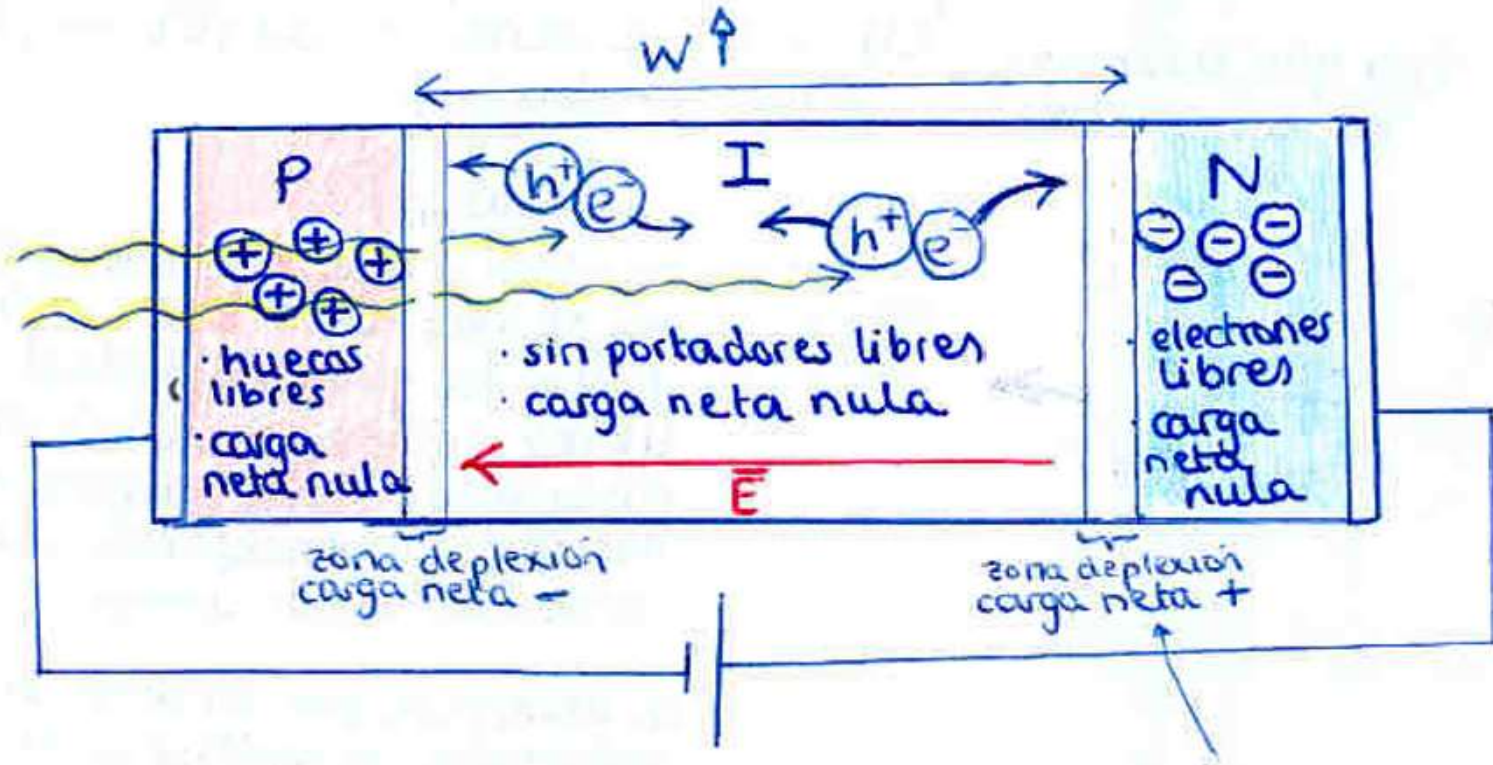
Estructura



- Los fotodiodos *pin* se refieren a dispositivos semiconductores que tienen una estructura *p-intrínseca-n*. La capa intrínseca no está dopada ó mucho menos que las capas *p* y *n*.
- La nueva capa
 - Ayuda a aumentar la zona de deplexión.
 - Disminuye las corrientes de difusión.

luego mejora la respuesta del fotodiodo.

3.-FOTODIODOS PIN

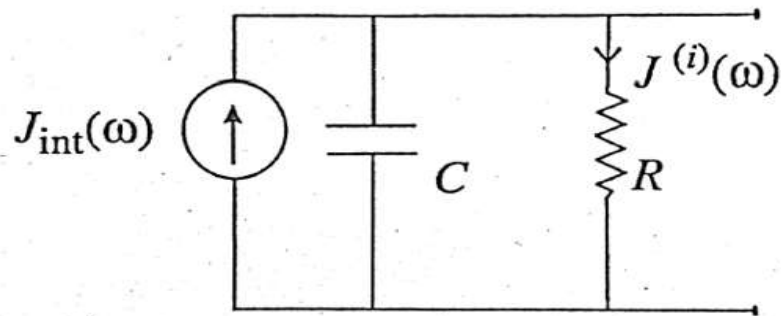


- Zona de absorción $\sim 10 \mu\text{m}$ e independiente de V
- Fotocorriente proporcional a la potencia óptica recibida

3.-FOTODIODOS PIN

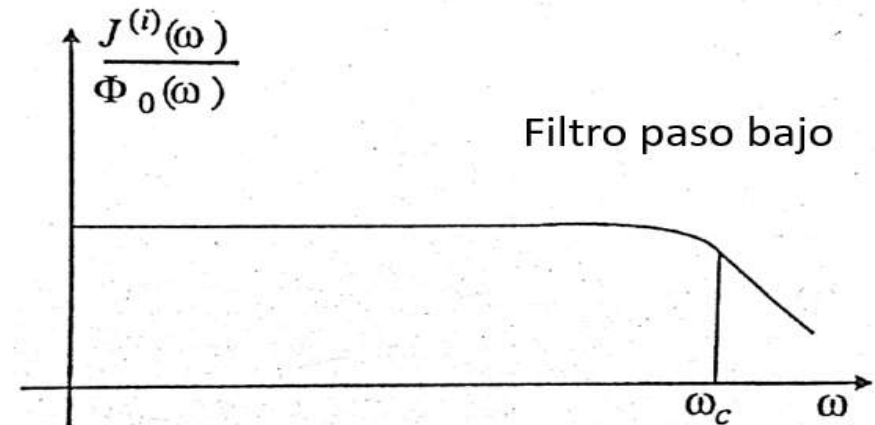
Respuesta en frecuencia del fotodetector

Modelo Equivalente



- J_{int} fuente de corriente creada por los fotones.
- R resistencia que ven los portadores de corriente.
- C capacidad parásita del detector

$$C = \epsilon_i \frac{S}{W}$$

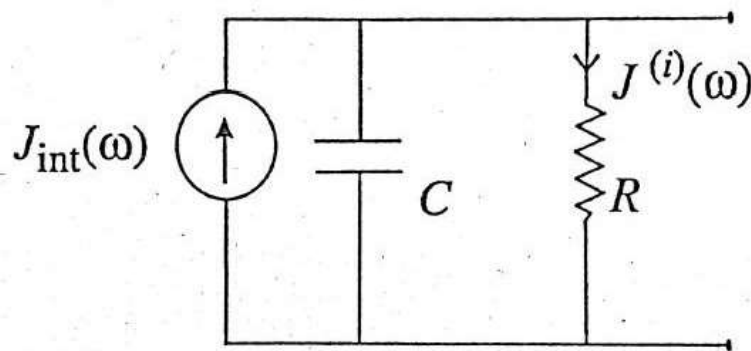


- Dispositivo de 1^{er} orden
- $f_c = 1/(2\pi RC)$

3.-FOTODIODOS PIN

Respuesta en frecuencia del fotodetector

Modelo Equivalente

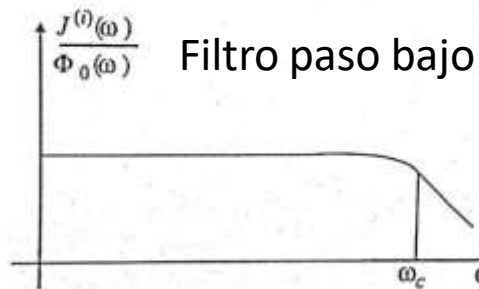


Dispositivo de 1^{er} orden

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

donde

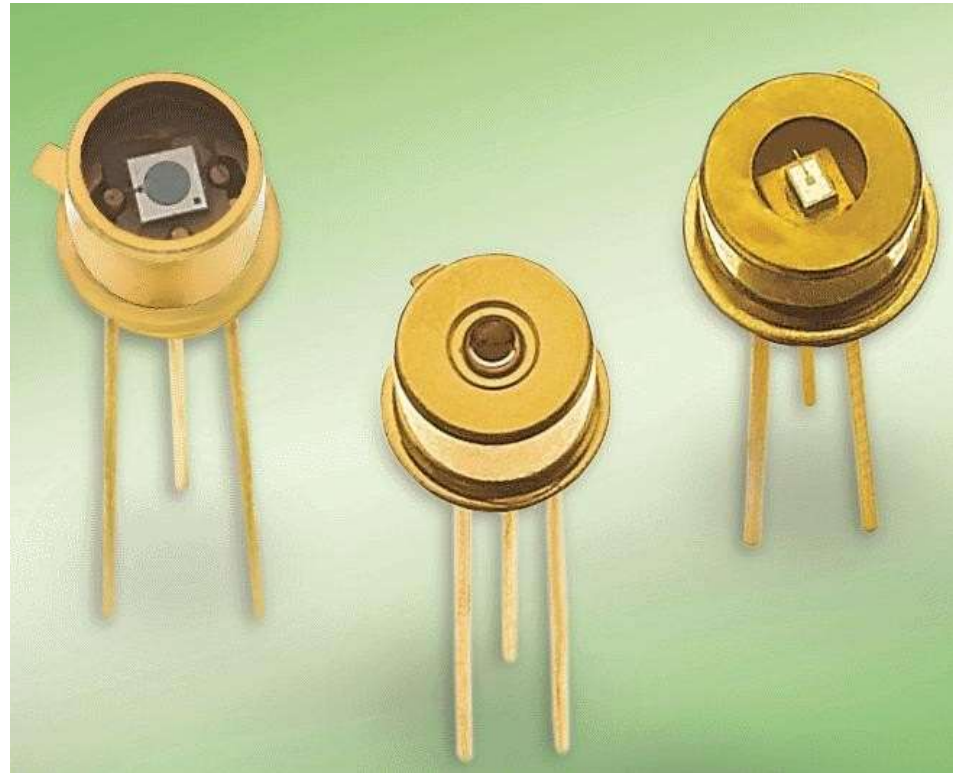
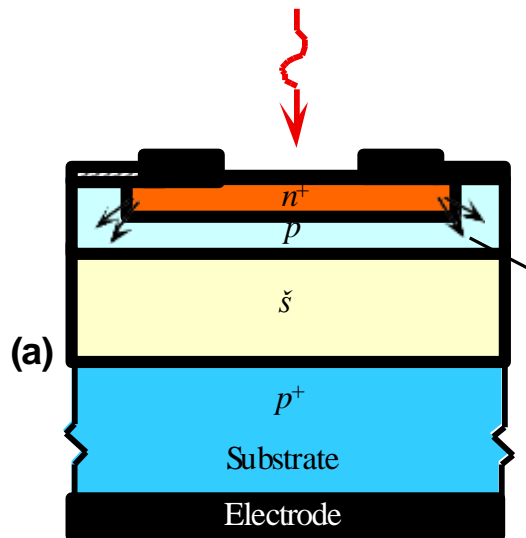
$$C = \epsilon_i \frac{S}{W}$$



- ϵ es fijo (material)
- disminuir $A \rightarrow$ menos luz incidente
- aumentar $W \rightarrow$ aumentan recombinación y los *tiempos de tránsito*

Típicamente $\rightarrow f_c \sim 100\text{MHz} - (1-2)\text{GHz}$ o incluso llegando a 20 GHz

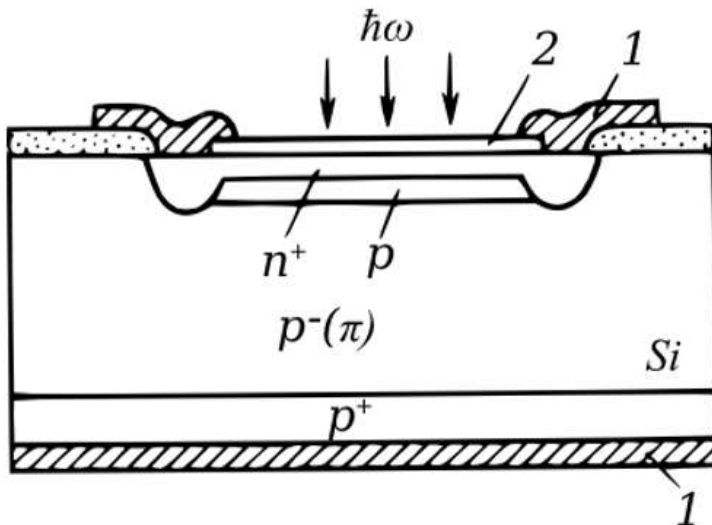
4.-FOTODIODO DE AVALANCHA



4.-FOTODIODO 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.

Estructura



El lado n es delgado y se ilumina a través de la ventana.

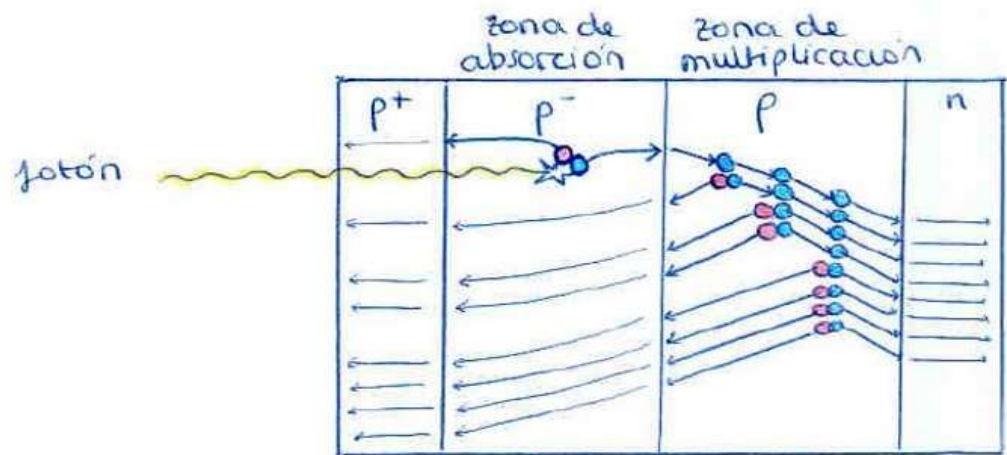
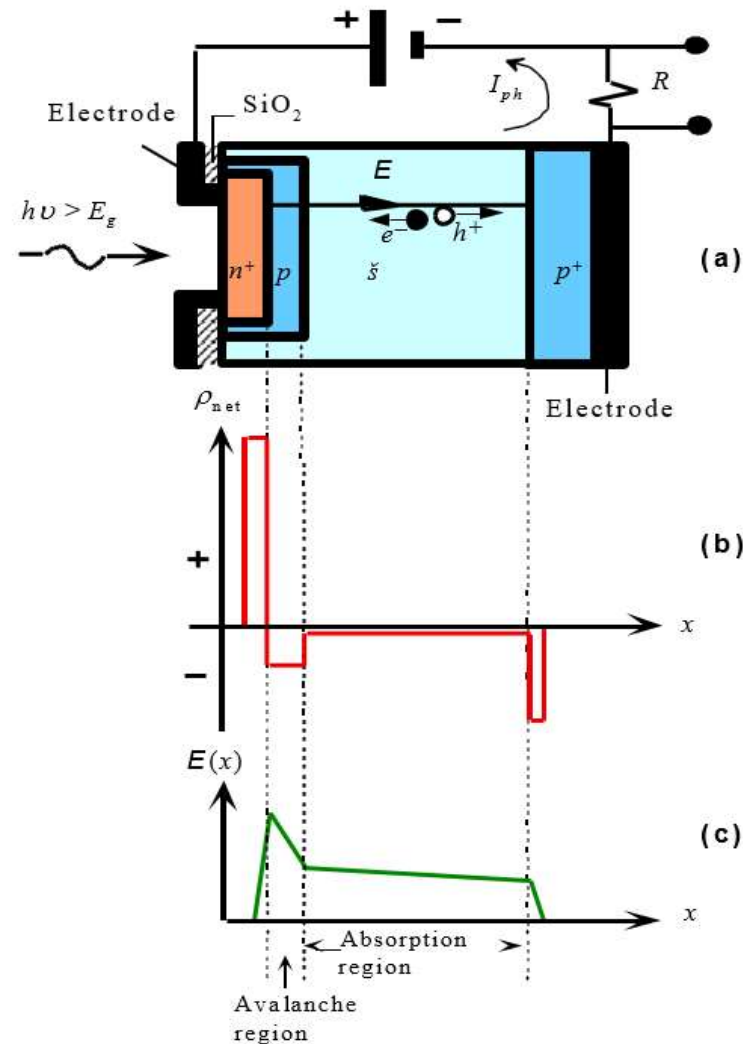
Hay **3 capas p de diferentes niveles de dopaje**, para modificar adecuadamente la distribución de campo a lo largo del fotodiodo. La primera es una capa p , la segunda π es una capa p , casi intrínseca y la última la p^+ está altamente dopada.

4.-FOTODIODO DE AVALANCHA

Proceso de Avalancha

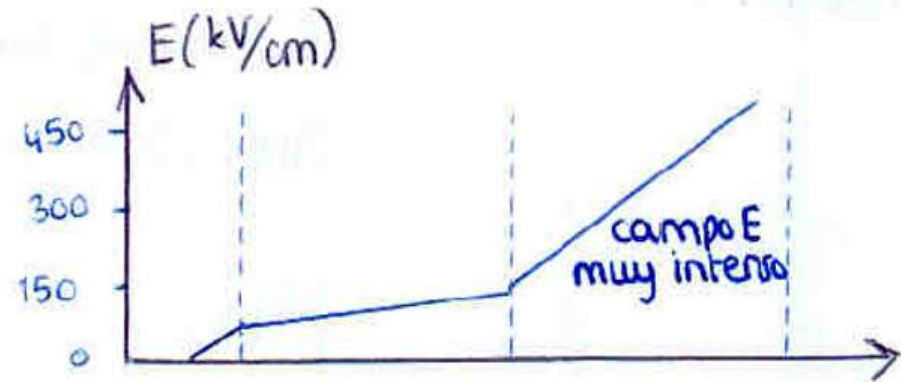
La distribución de las 3 capas p produce **un aumento considerable del campo eléctrico estático en la zona de multiplicación.**

Por efecto de este campo, **los electrones se aceleran adquiriendo suficiente energía para producir nuevos pares electrón-hueco.**

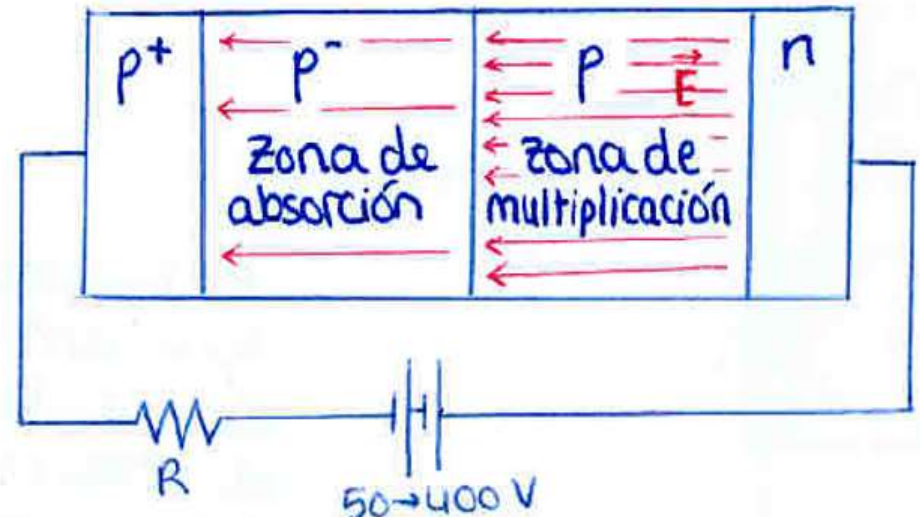


4.-FOTODIODO DE AVALANCHA

- Zona intermedia dividida en dos con distinto dopaje.
- Campos eléctricos estáticos muy altos
- Tensiones muy elevadas (50-400 V)

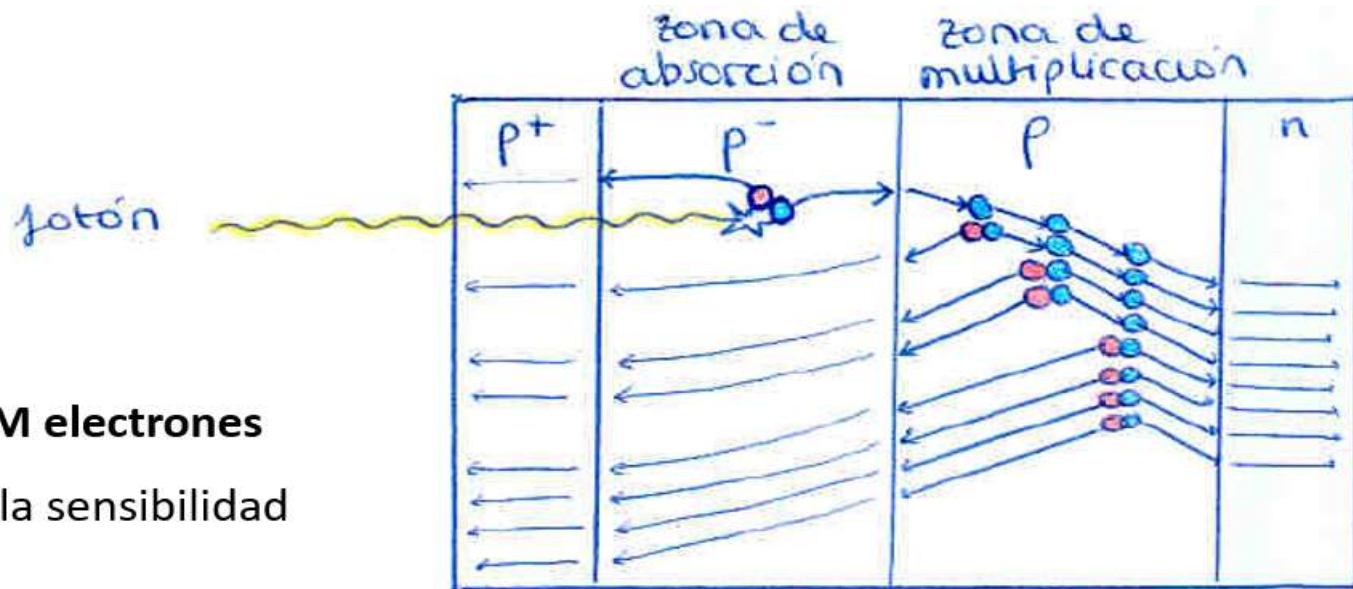


LUZ 



Ejemplo: FD de GaAs típico

4.-FOTODIODO DE AVALANCHA



1 fotón → M electrones

aumento de la sensibilidad

Diodo PIN	APD
<p>1 fotón → 1 e⁻ ($\eta=1$, usual $\eta<1$)</p> $I_{PD} = \frac{e\eta}{h\nu} P$	<p>1 fotón → M e⁻ ($\eta=1$, usual $\eta<1$)</p> $I_{PD} = \overline{M} \frac{e\eta}{h\nu} P$

4.-FOTODIODO DE AVALANCHA

Características

- Proceso de multiplicación es **ALEATORIO**

$$M = \overline{M} + \Delta M$$

Ganancia Interna
(20-60)

Ruido

- Caso ideal $I_{PD} = R_{APD} P = \overline{M} \frac{e\eta}{h\nu} P = \overline{M} R_{PIN} P$

- Respuesta en frecuencia \rightarrow RC (como diodo PIN) $\rightarrow f_c \sim 1\text{GHz}$

4.-FOTODIODO DE AVALANCHA

Ventajas

- Aumenta la responsividad respecto a un diodo PIN
- 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.

Inconvenientes

- Mayor complejidad y precio
- Necesidad de altas tensiones en inversa
- Estabilización de la temperatura (dependencia de la ganancia)

4.-FOTODIODO DE AVALANCHA

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

Photodiodo	$\lambda_{\text{range}}(\text{nm})$	$\lambda_{\text{peak}}(\text{nm})$	R_a $\lambda_{\text{peak}}(\text{A/W})$	Ganancia	$t_r(\text{ns})$	I_{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 μ A
Ge APD	700-1700	1500-1600	4-14	10-20	0.1	1-10 μ 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

5.-RUIDO EN DETECTORES

Hay 3 tipos principales de ruido en un fotodetector:

a) Ruido cuántico o de impacto de la fotocorriente generada

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

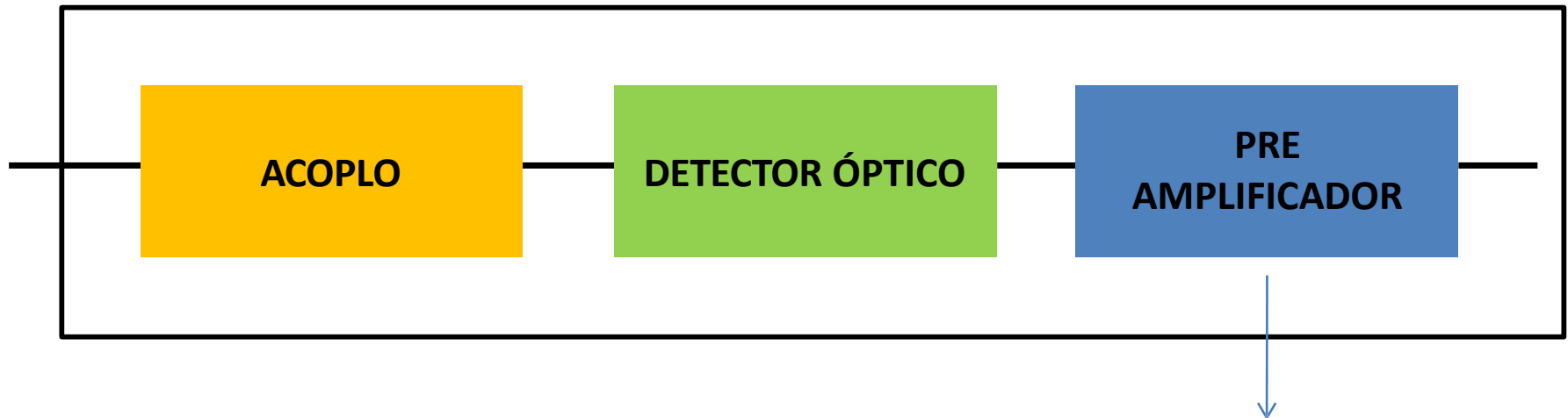
Debido a los pares electrón hueco que son generados térmicamente en la unión pn del fotodiodo. En un APD estos son multiplicados por el mecanismo de avalancha.

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

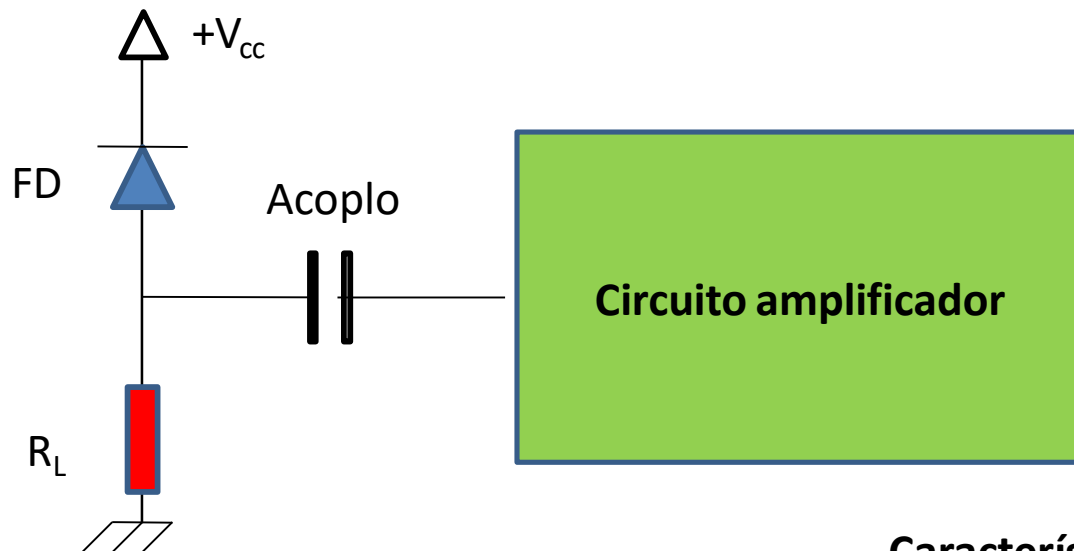
6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN



Objetivo: Amplificar la señal y convertirla en tensión (normalmente)
para su adecuado uso posteriormente

6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Concepto de Diseño



Características principales

1. Circuito sencillo
2. Ganancia alta
3. Induzca poco ruido
4. Gran ancho de banda (BW)

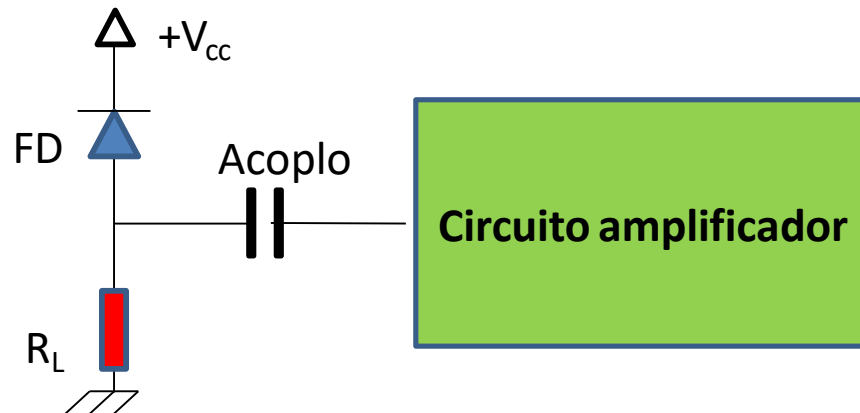
6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Concepto de Diseño

1. Polarización

Compromiso en la polarización entre R_L e I_{PD}

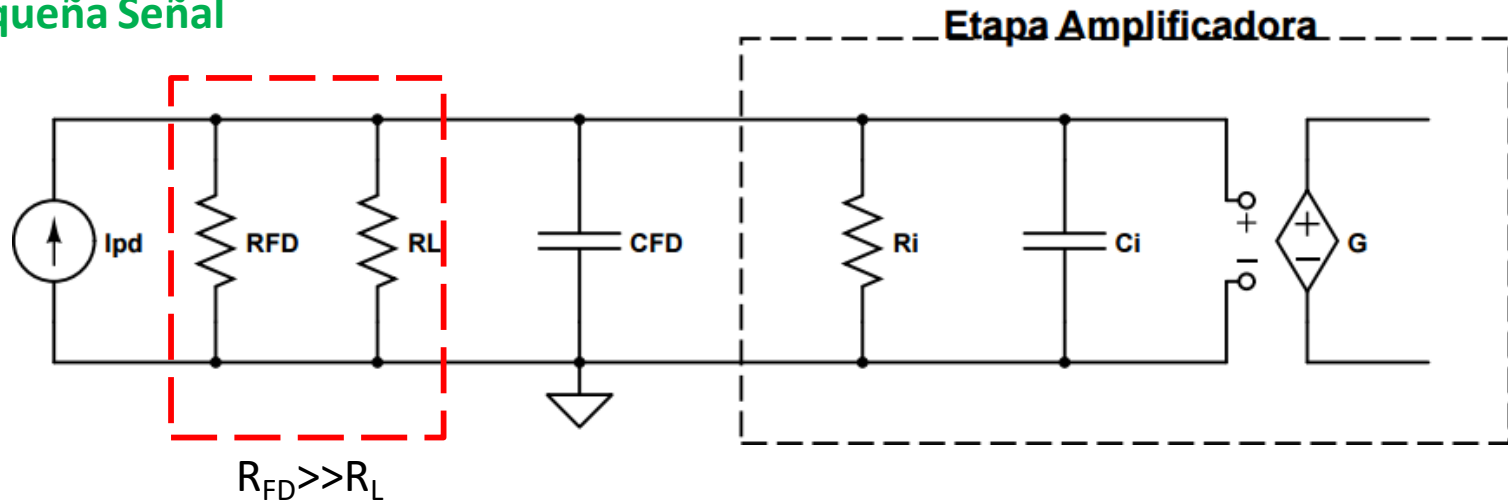
$$I_{FD} = \frac{V_{CC} - V_D}{R_L}$$



8.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Concepto de Diseño

2. Pequeña Señal



Necesitamos:

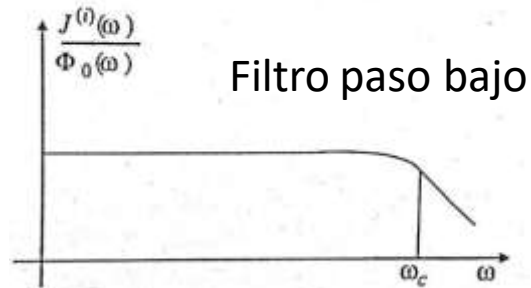
FD	Etapa Preamplificadora
$I_{FD} = R \cdot P_{opt} \uparrow$	G_A alta
$R_{FD} \rightarrow \infty$	R_{iA} alta $\rightarrow R_{tot} \sim R_L$
$C_{FD} \rightarrow$ fijado (~ 1 pF)	C_{iA} baja

6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Concepto de Diseño

3. Respuesta en Frecuencia

Sistema de primer orden



$$f_C = \frac{1}{2\pi \cdot R_{Total} \cdot C_{Total}}$$

$$R_{Total} = R_{iA} \parallel R_L \approx R_L$$

$$C_{Total} = C_{iA} + C_{FD} \approx C_{FD}$$

$$f_C = \frac{1}{2\pi R_L \cdot C_{FD}} \approx 3.6 \text{GHz} (R_L = 50\Omega; C_{FD} = 1 \text{pF})$$

R_L debe ser baja para garantizar la polarización y aumentar el BW

6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas preamplificadoras de alta impedancia de entrada

Mayor **R** → menor ruido térmico y mejo acoplo de señal
→ empeora el BW

➤ FET → mayor Z_{IN} y alta velocidad

➤ No necesario C_{acoplo}

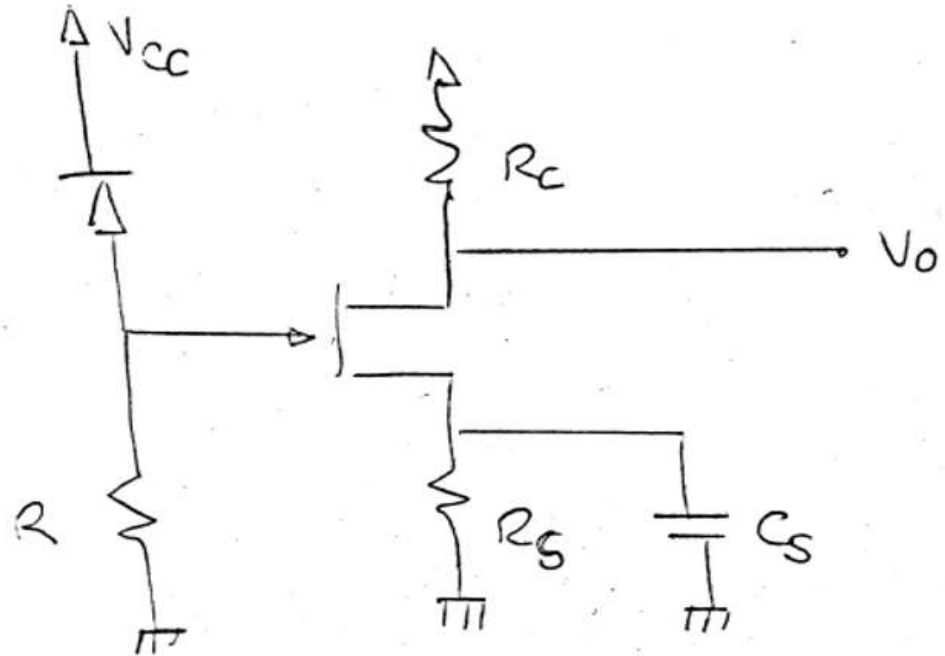
$$Z_{IN} \approx R_L$$

$$C_{TOTAL} = C_{FD} + C_{GS} + C_{GD}(1 + g_m R_D)$$

$$G_A = \frac{V_O}{I_{FD}} = -g_m R_D R_L$$



Efecto Miller → si alta ganancia , bajo ancho de banda



6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas preamplificadoras de alta impedancia de entrada

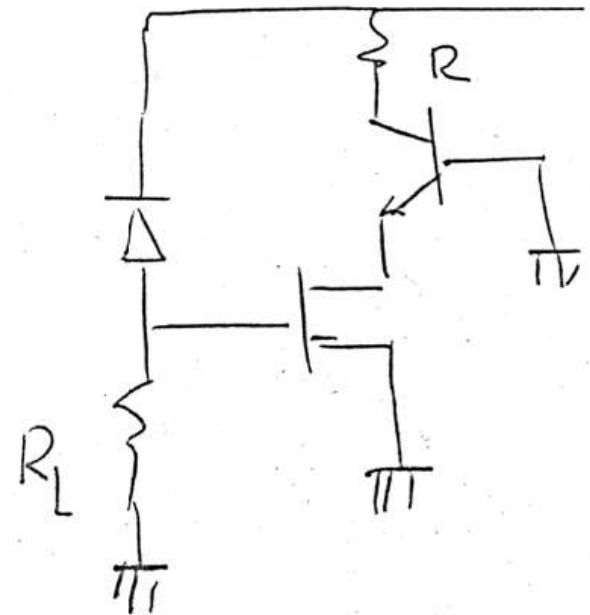
Solución al Efecto Miller → **CONFIGURACIÓN DE CASCODO**

- $R_D \rightarrow$ TRT en base común
- Ganancia permanece igual

$$C_{TOTAL} = C_{FD} + C_{GS} + C_{GD}(1 + g_m \frac{1}{g_m}) = C_{FD} + C_{GS} + 2C_{GD}$$

NOTAS:

- CC para adaptar la salida
- Alternativa 2ª etapa de baja Z_{IN}

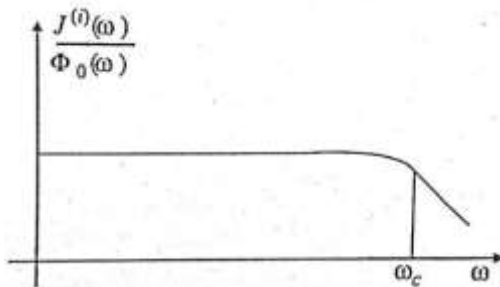


6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

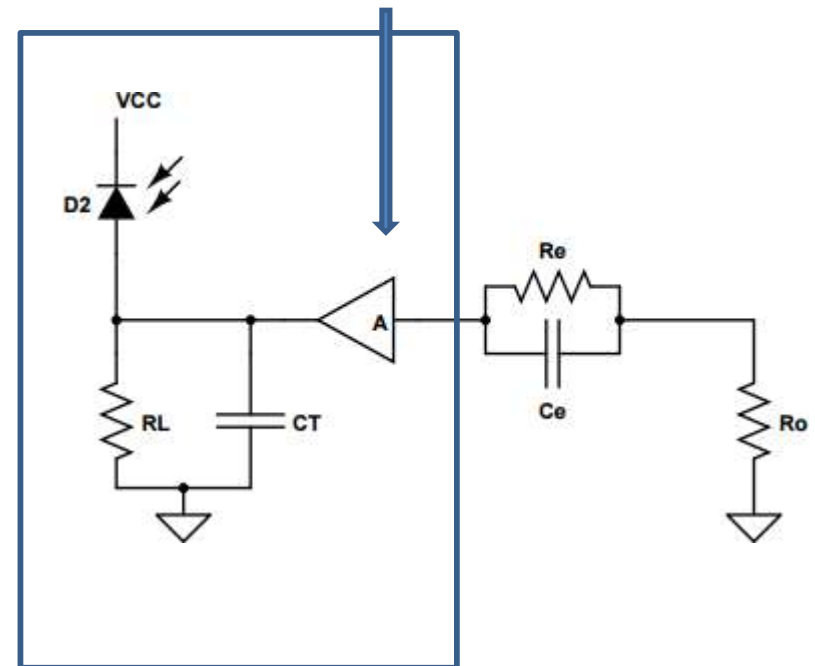
Etapas Ecualizadoras

¿Cómo podemos mejorar el ancho de banda?

$$\frac{V_{OA}}{I_{FD}} = \frac{A \cdot R_L}{1 + sR_L C_T}$$



Error en el sentido de la
Ganancia del Amplificador



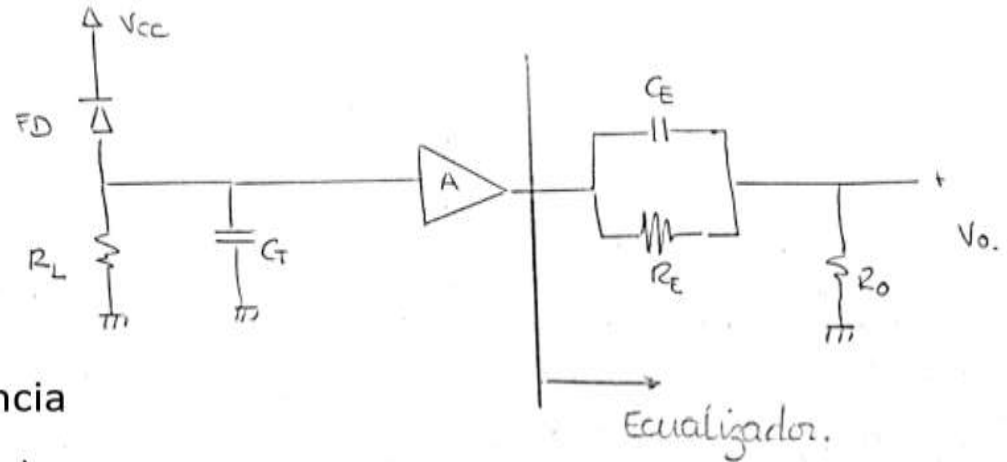
6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas 1

$$\frac{V_i}{I_{FD}} = \frac{R_L}{1 + sC_T R_L}$$

$R_L \uparrow$ menos ruido , mayor ganancia

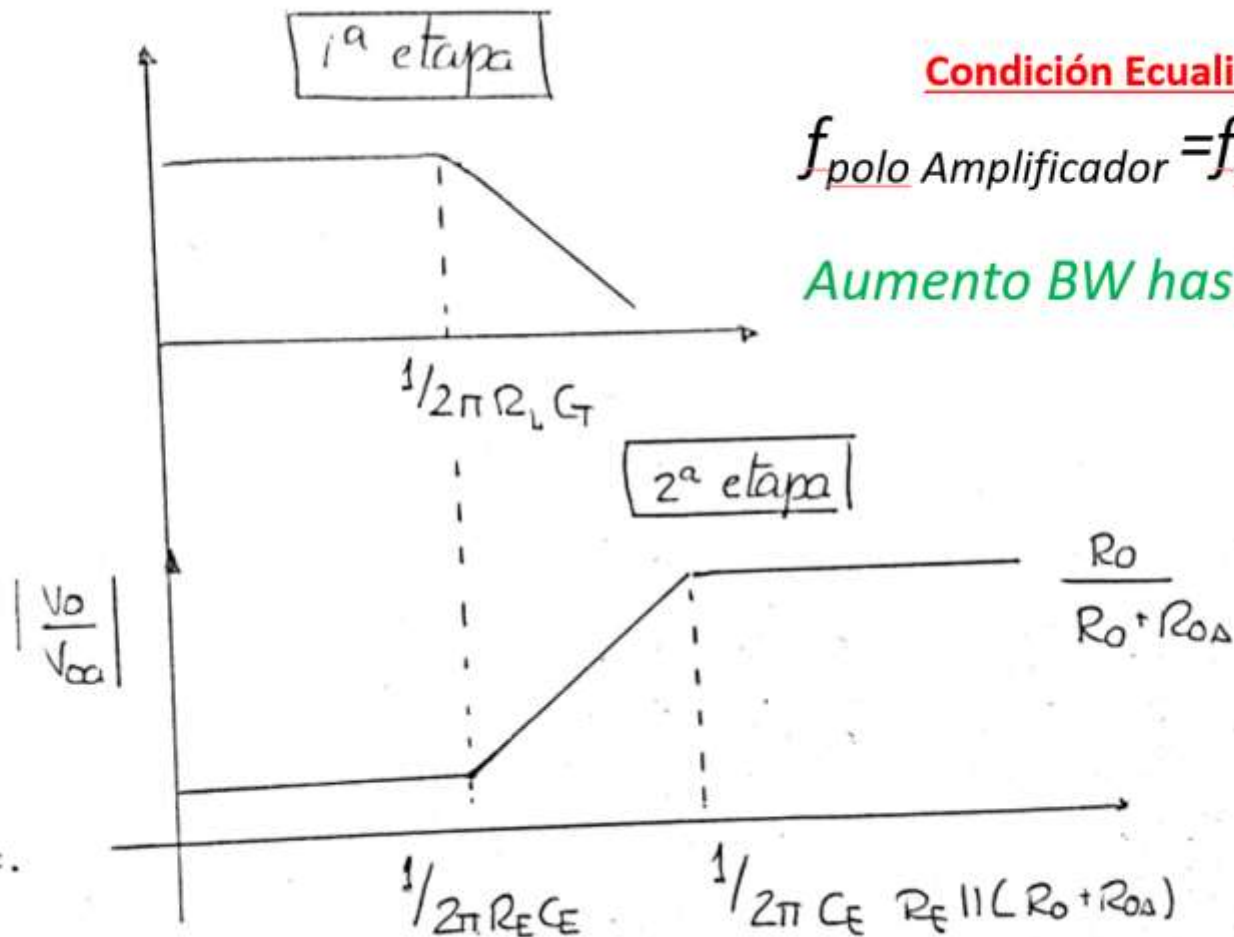
$R_L \downarrow$ mayor ancho de banda (BW)



Etapas 2

$$\frac{V_o}{V_{oA}} = \frac{R_o}{R_o + R_{oA} + R_E} \frac{1 + sC_E R_E}{1 + sC_E [R_E || (R_o + R_{oA})]}$$

6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN



Condición Ecualizador

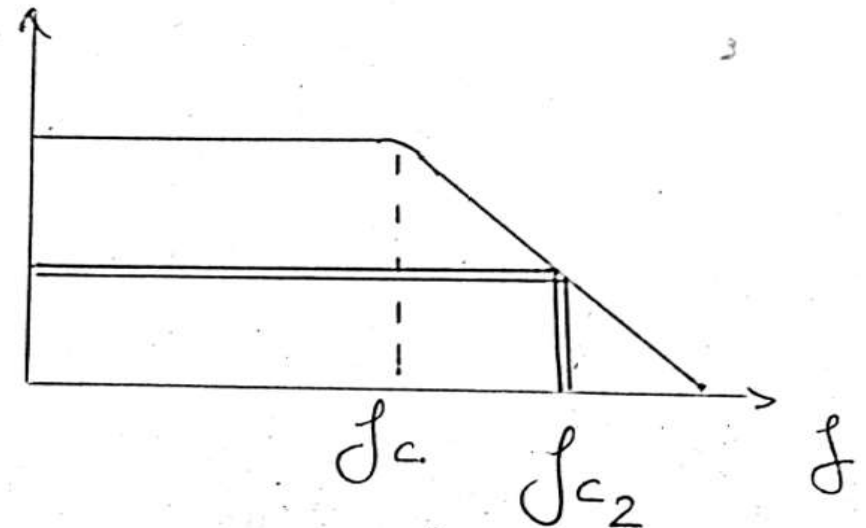
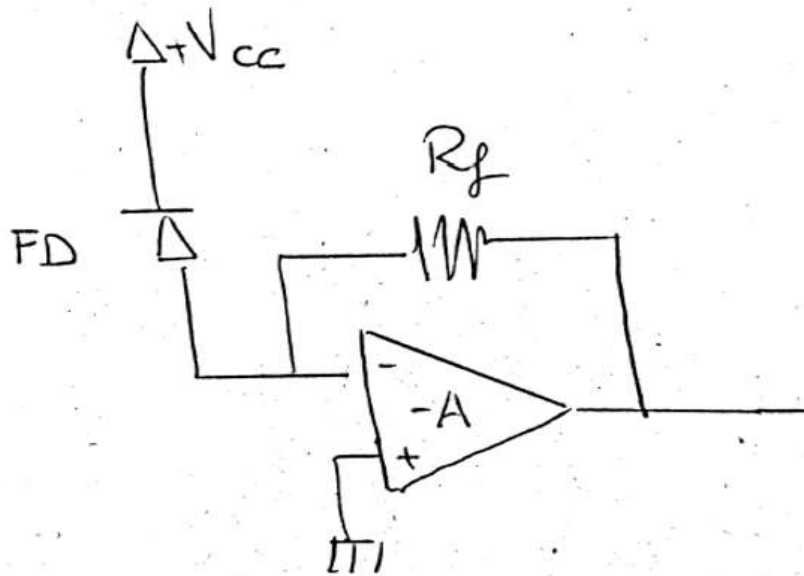
$$f_{\text{polo Amplificador}} = f_{\text{cero ecualiz}}$$

Aumento BW hasta $f_{p \text{ ecualiz}}$

6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas de Transimpedancia

Amplificador de alta Z_{IN} + realimentación



Mayor **BW** → menor **G**

Compromiso

Realimentación paralelo-paralelo

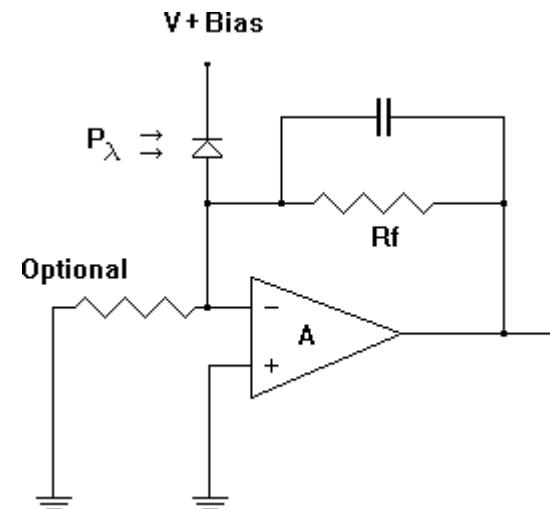
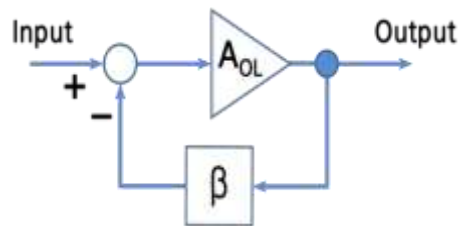
6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas de Transimpedancia

Amplificador de alta Z_{IN} + realimentación

Ganancia $G_A = -R_f$

Ancho de banda

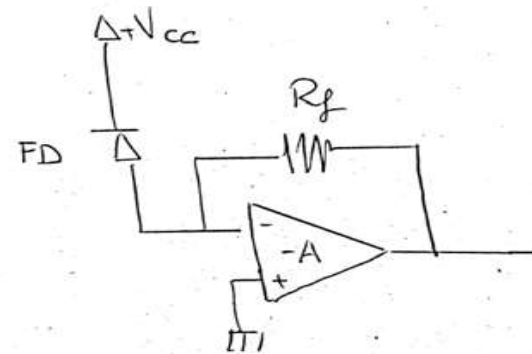


6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

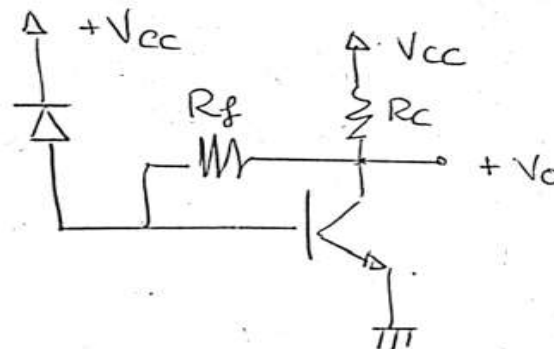
Etapas de Transimpedancia

Possible configuraciones:

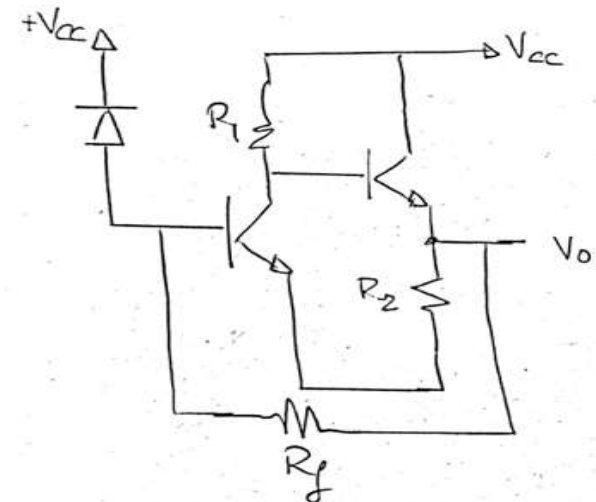
1. Con Amplificador Operacional
-sencillo pero ganancia limitada



2. Con un TRT



3. Emisor Común + Colector Común
-Efecto Miller



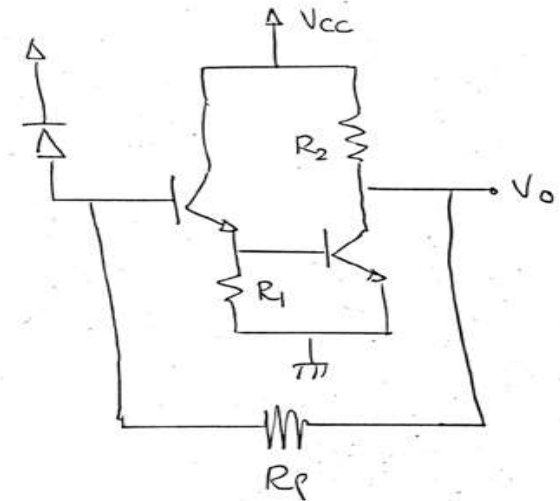
6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

Etapas de Transimpedancia

Possible configuraciones:

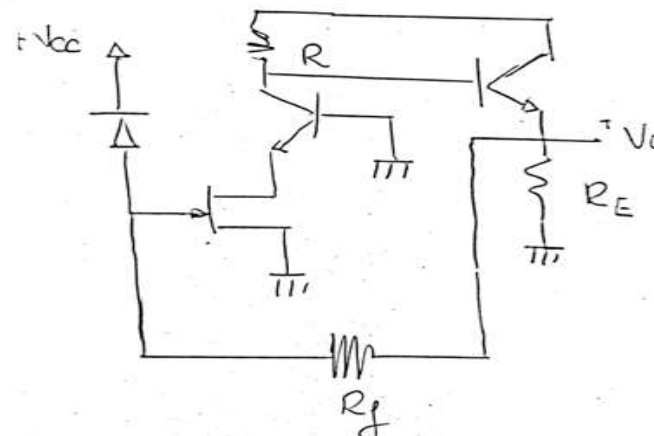
1. Colector Común + Emisor Común

- $Z_{IN}(CC) \uparrow$ pero mayor ruido ($Z_{IN} \downarrow$)
- no efecto Miller



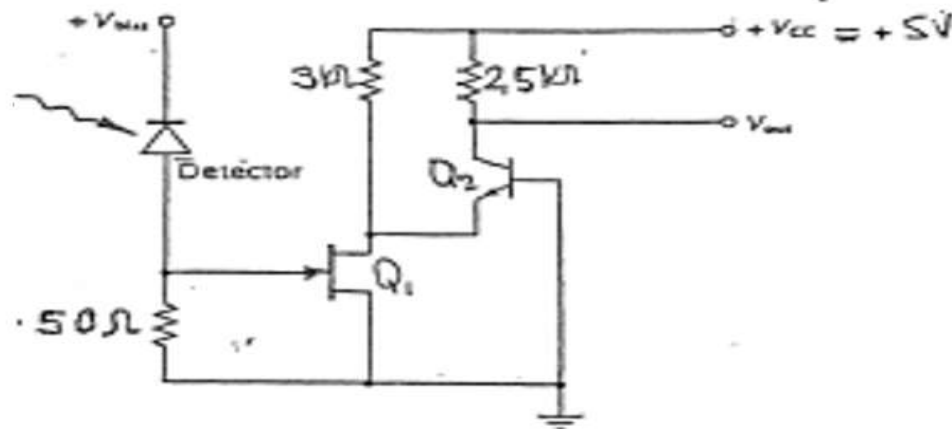
2. PIN+FET en conf. De Cascodo

- Alta ganancia si $R_f \uparrow$
- Buen BW
- Aún ruido alto



6.-ELECTRÓNICA DE RECEPCIÓN

1. a) Indique que tipo de etapa pre-amplificadora se utiliza en la figura 2 representando su esquema en pequeña señal.
b) Obtenga la expresión de V_{out}/V_{in} y calcule el valor de la tensión pico-pico de salida V_{out} de este circuito.
2. Obtenga el ancho de banda del circuito receptor de la figura 2.
3. Se quiere utilizar este receptor para un sistema de detección heterodino. Calcule el máximo rango de $\Delta\lambda$ permitido en el transmisor.



DATOS:

Transmisor: $V_{BEON} = 0.6 \text{ V}$ para todos los transistores

$$\beta_0 = 100$$

$$V_{DON} = 0.6 \text{ V}$$

Receptor: $g_{m1} = 10^{-2} \text{ mho}$

$$\beta_0 = 100$$

$$C_{gs} = 0.8 \text{ pF}$$

$$V_T = 25 \text{ mV}$$

$$V_{ZD} = 1.2 \text{ V}$$

$$I_{C2} = 1 \text{ mA}$$

$$V_T = 25 \text{ mV}$$

$$C_{gd} = 0.7 \text{ pF}$$