

FOTODIODOS

Fundamentos, características, tecnología y aplicaciones



POSIBILIDADES DE LA LUZ

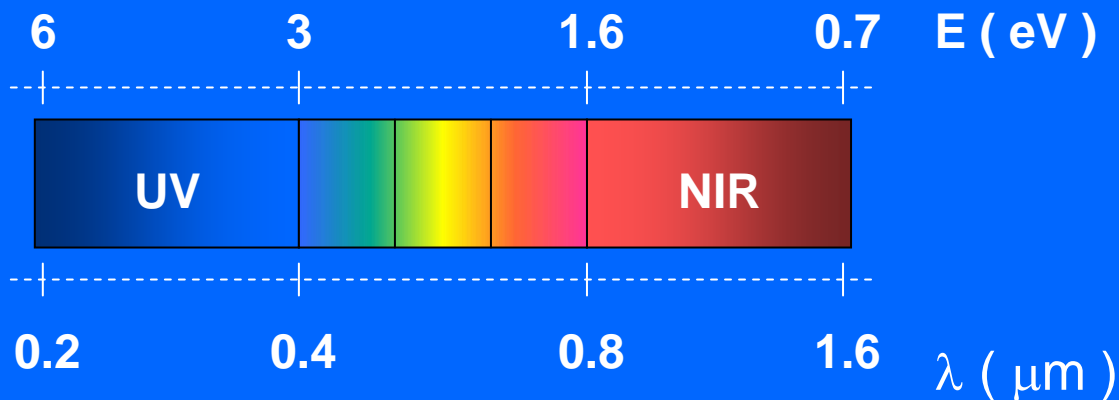
Rapidez ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Detección a distancia

Posibilidad de enfoque ($\approx \mu\text{m}$)

Visibilidad (0.4- 0.78 μm)

Variedad de λ



$$C_0 = \lambda_0 \cdot \nu$$

$$h\nu = 1.24 / \lambda (\mu\text{m})$$

NECESIDAD DE DETECTORES

- **Receptores:** FO, control remoto
- **Sensores:** presencia, composición
- **Lectores:** CD - DVD
- **Monitores:** control de láseres
- **Cámaras:** vídeo, visión nocturna

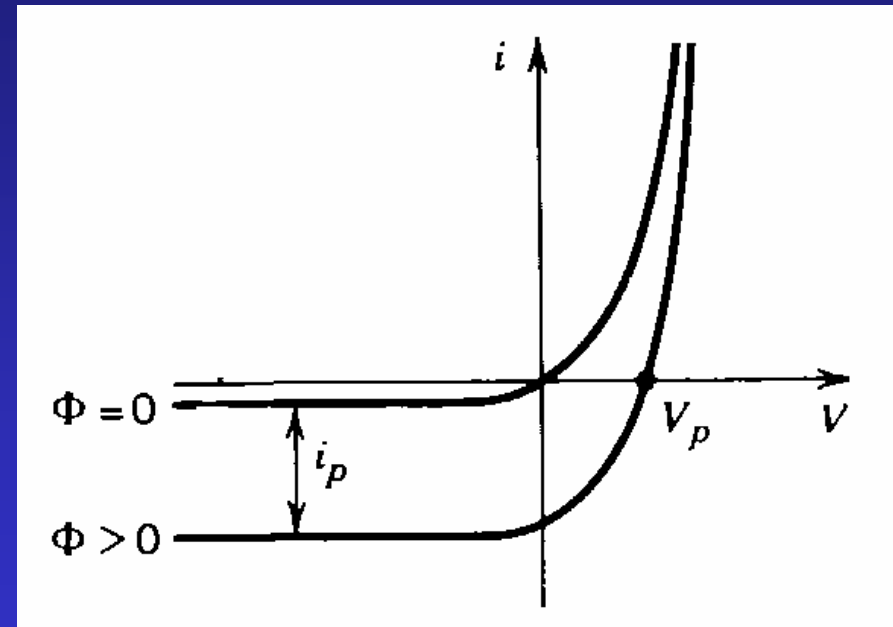
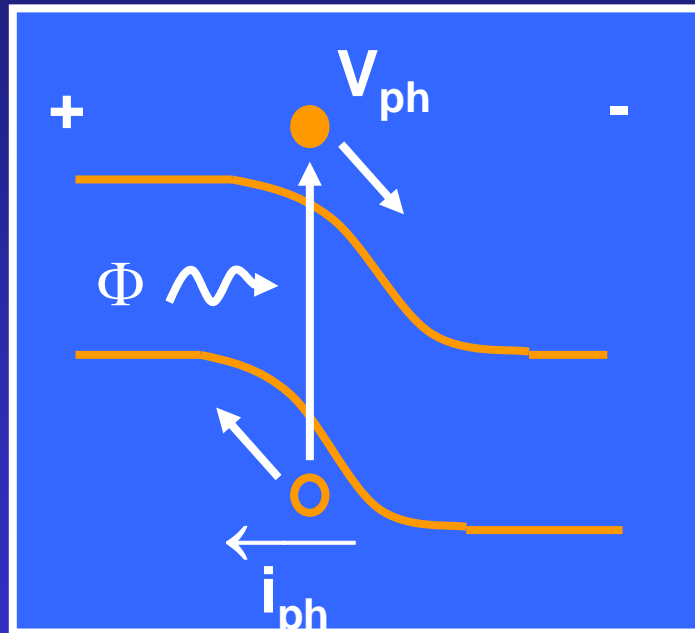


•¿POR QUÉ SEMICONDUCTORES?

Semiconductores : $E_g \sim 0.1 - 3 \text{ eV}$

Luz (visible - M IR) : $h \nu \sim 0.1 - 3 \text{ eV!}$

•¿POR QUÉ DIODOS?



Como batería...

Células fotovoltaicas

$$i \cdot v < 0$$

Como detector: $\Phi \Rightarrow i_{ph}$

Fotodiodos

Guión

Principio de funcionamiento

Características

Eficiencia y respuesta espectral

Características eléctricas

Respuesta en frecuencia

Tecnología

Dispositivos específicos

Fotodiodos Schottky

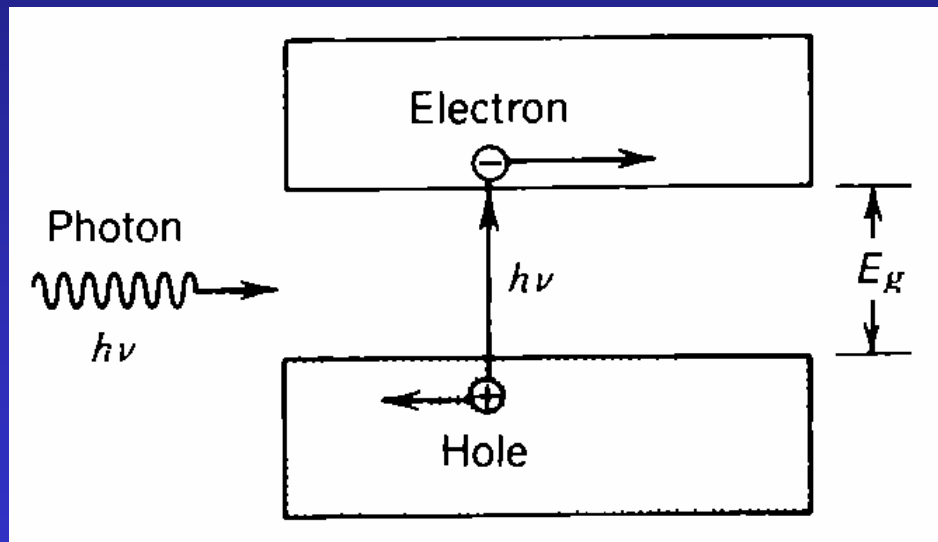
Fotodiodos de avalancha

Aplicaciones

Principio de funcionamiento

Absorción banda a banda
Fotocorriente en uniones PN
Estructuras de fotodiodos

Absorción banda a banda



Fotogeneración
de portadores

$$\Delta n \Rightarrow \Delta \sigma$$

Otros procesos de
absorción:

excitónica,
por impurezas
intrabanda, fonones ...

Atenuación de la luz

$$d\phi/dx = -\alpha\phi \Rightarrow \phi(x) = \phi(0) \cdot \exp(-\alpha x)$$

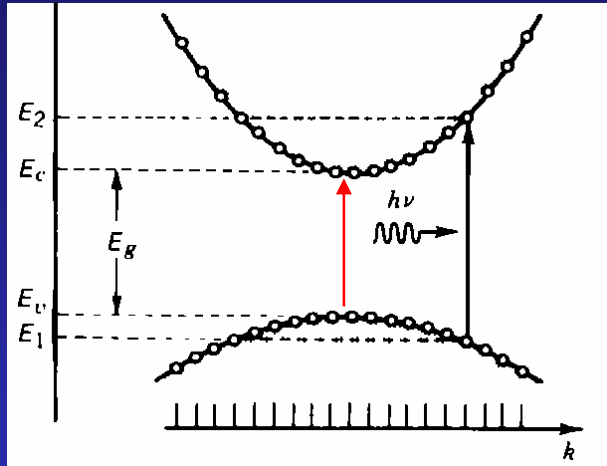
α = coef. de absorción

$1/\alpha$ = long. de penetración

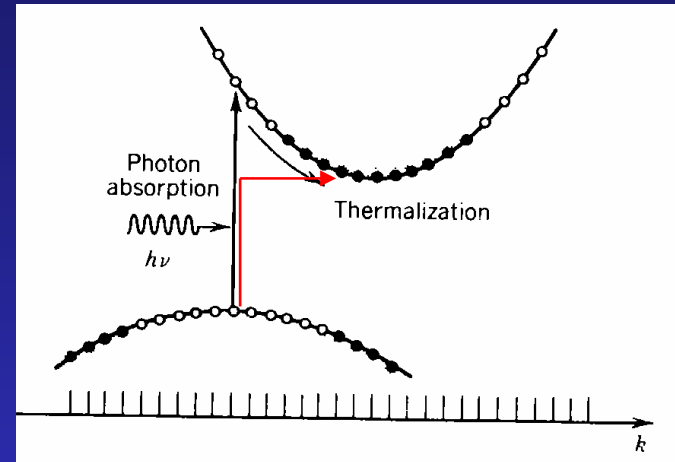
Coeficiente de absorción (α)

conservación de E + conservación de k

semicond. directos



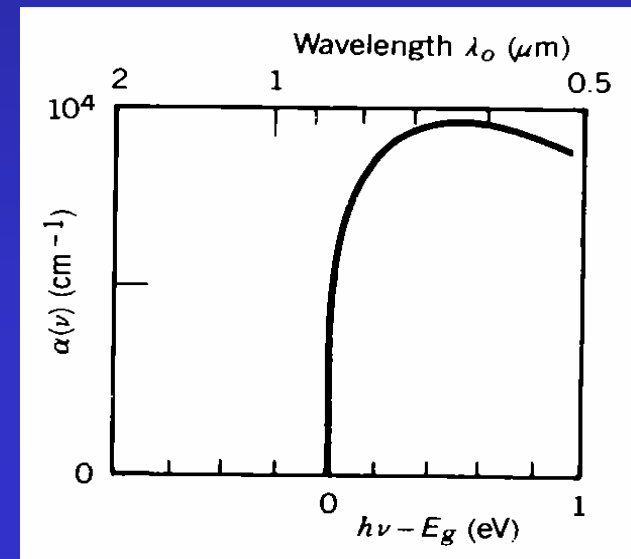
semicond. indirectos



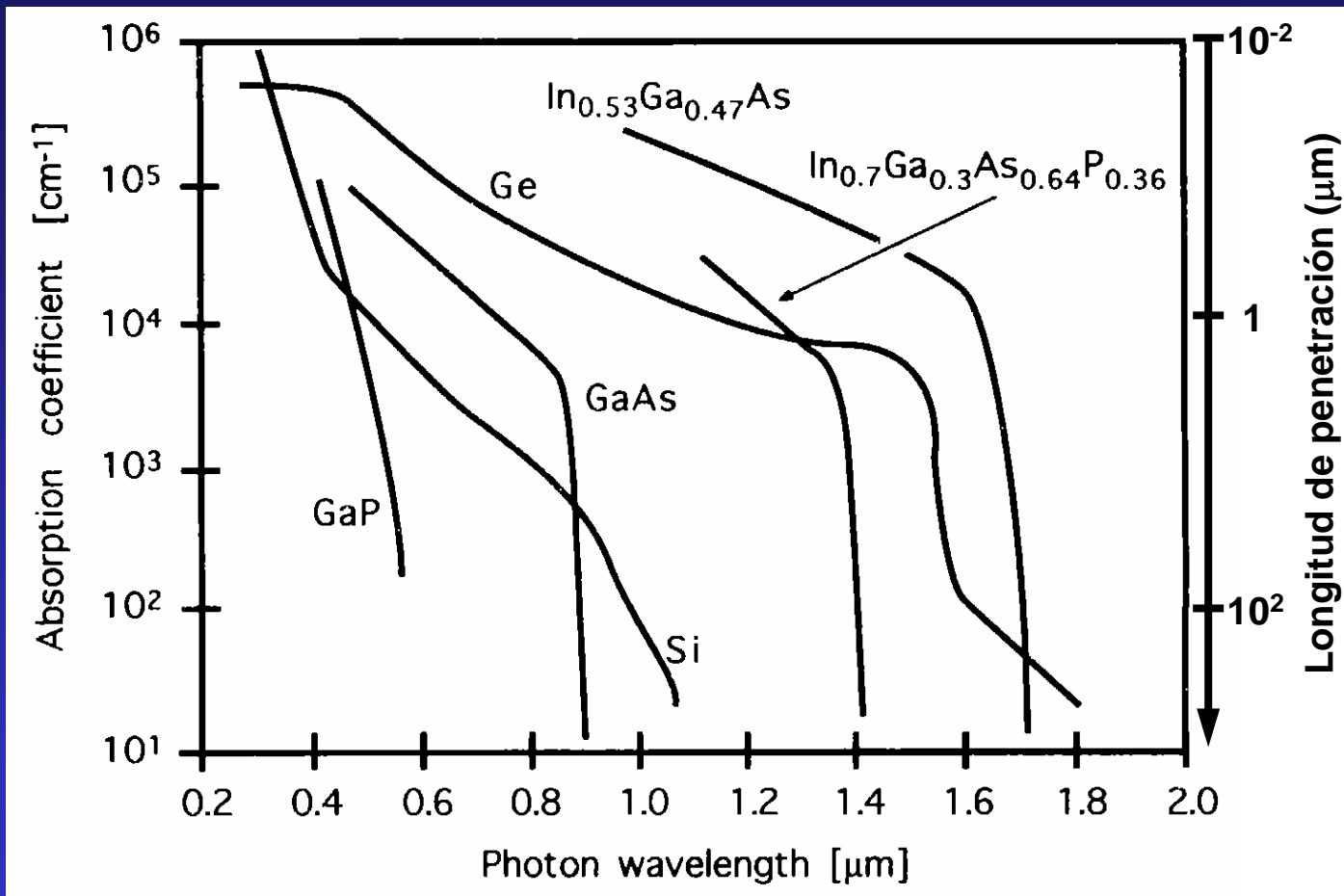
$$r_{ab}(\nu) \propto \phi_{\nu} \cdot \rho(\nu) \cdot \underbrace{f_{\nu}(E_1) \cdot [1 - f_c(E_2)]}_{1}$$

$\alpha(h\nu)$
semicond.
directos

$$\alpha = \frac{cte}{\tau_r} \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{(h\nu)^2}$$



Coeficiente de absorción



Semic. directos: borde de absorción abrupto

Semic. indirectos: variación gradual de $1/\alpha(\lambda)$

Importantes: Silicio y GaInAs (con $a=a(\text{InP})$)

Fotogeneración en una unión PN

$$P_{opt}(1-R)$$



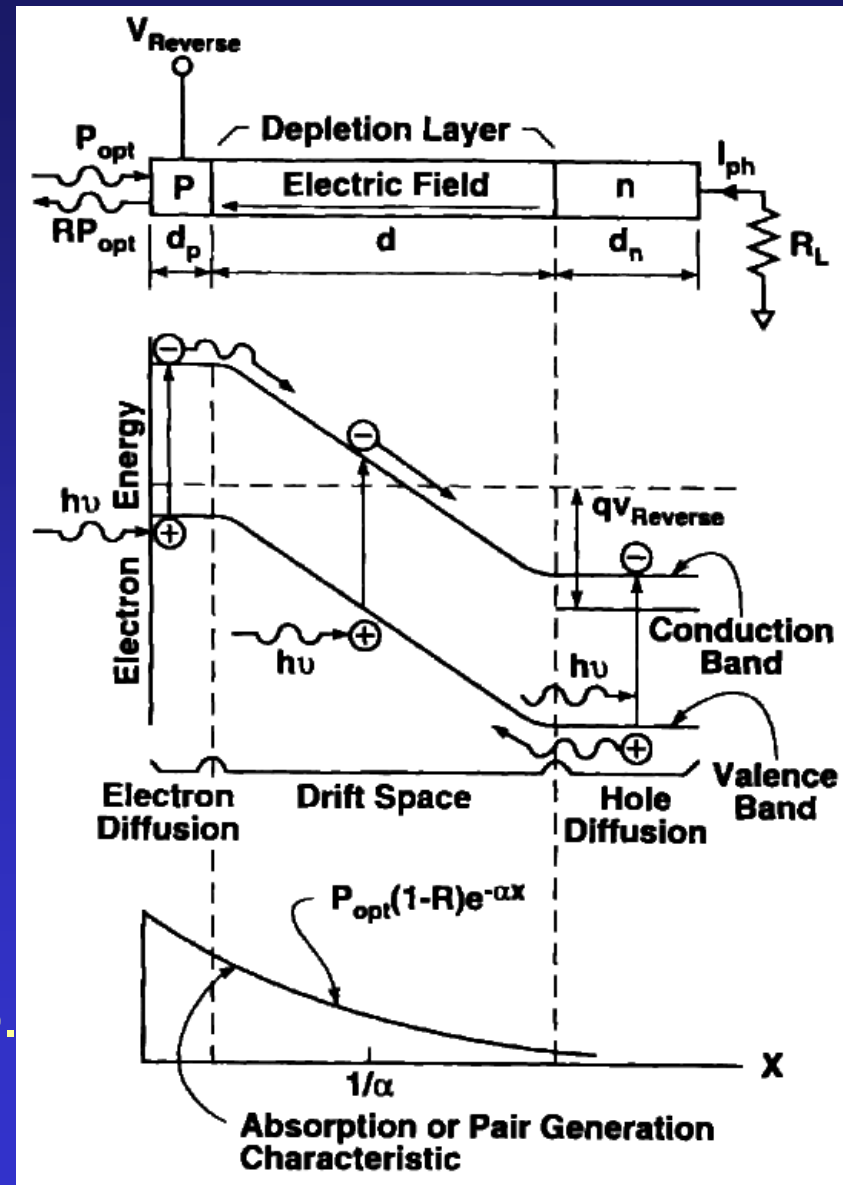
$$P(x) = P_{opt}(1-R)e^{-\alpha x}$$



$$G(x) = \alpha \cdot P(x) / A$$

$x \begin{cases} Z_{CE}: G \rightarrow \text{arrastre} \\ n: G \rightarrow \text{difusión} \rightarrow \text{arrastre} \\ p: G \rightarrow \text{difusión} \begin{cases} \rightarrow \text{arrastre} \\ \rightarrow \text{recomb.} \end{cases} \end{cases}$

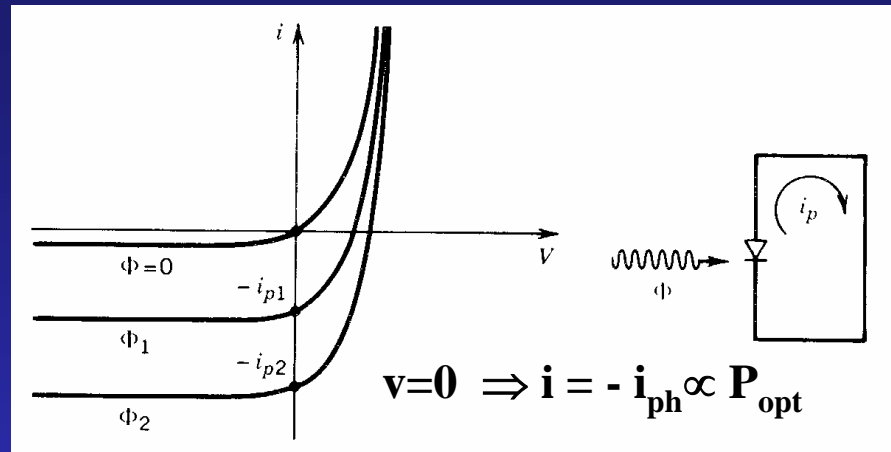
$$I(V; \Phi) = I(V; 0) - I_{ph}$$



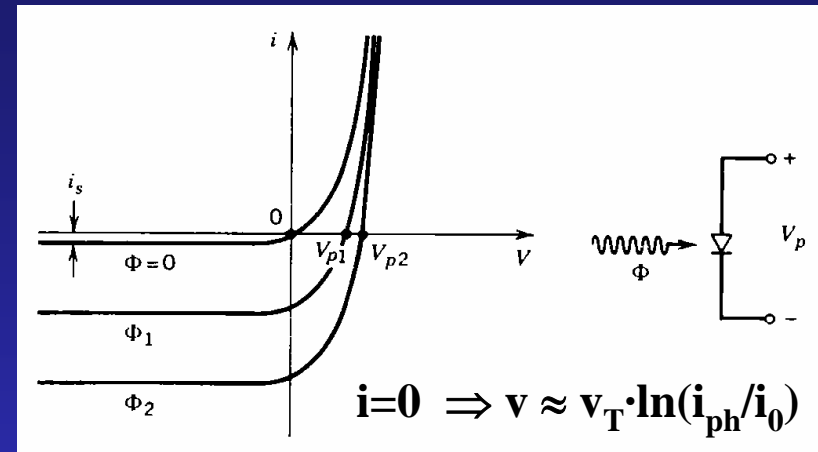
Características I(V)

$$i = i_0(\exp(V/nV_T)-1) - i_{ph}$$

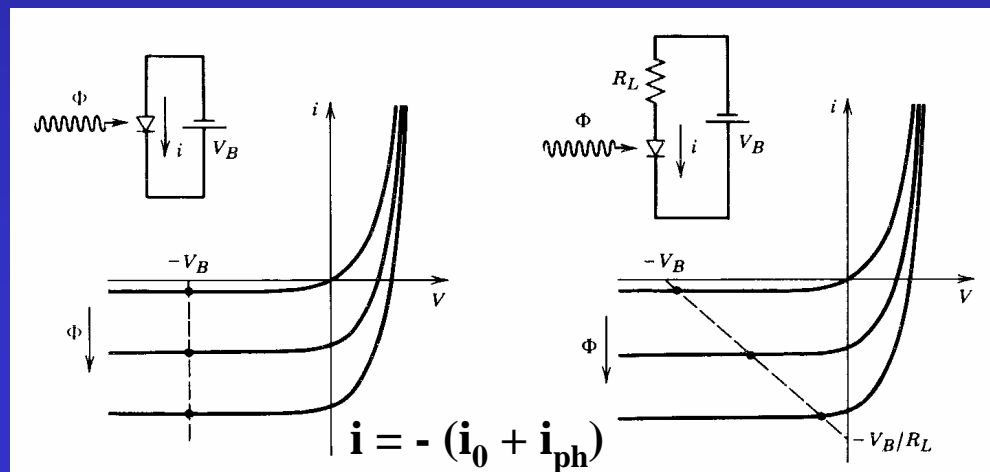
Modo Fotoconductorivo



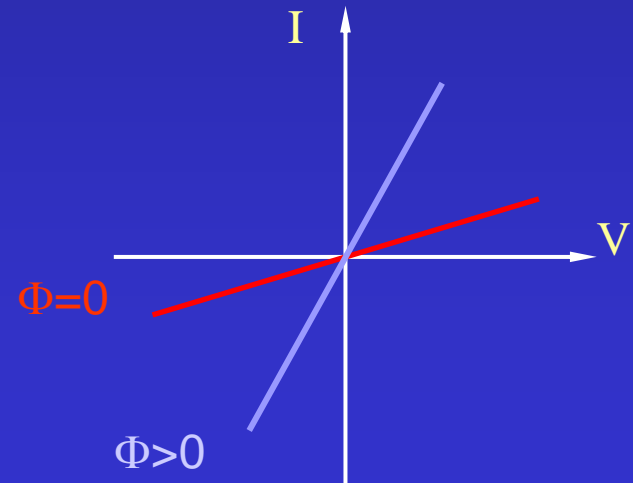
Modo Fotovoltaico



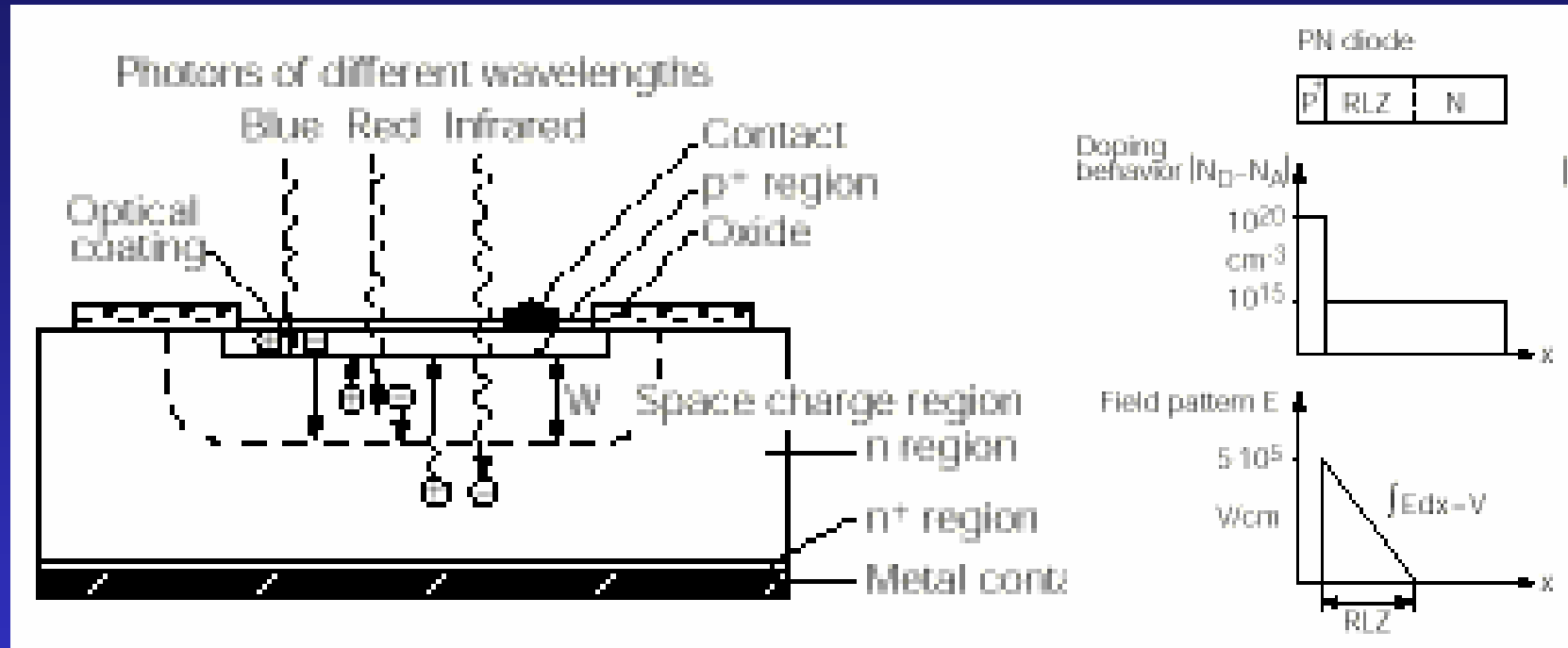
Polarización inversa



Fotoconductor

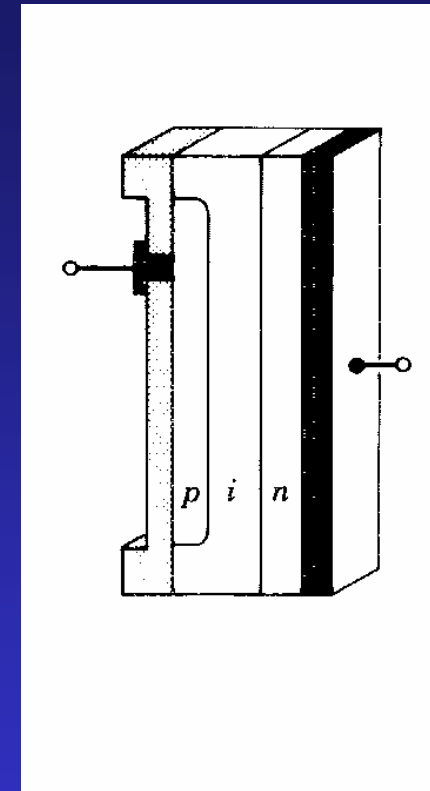
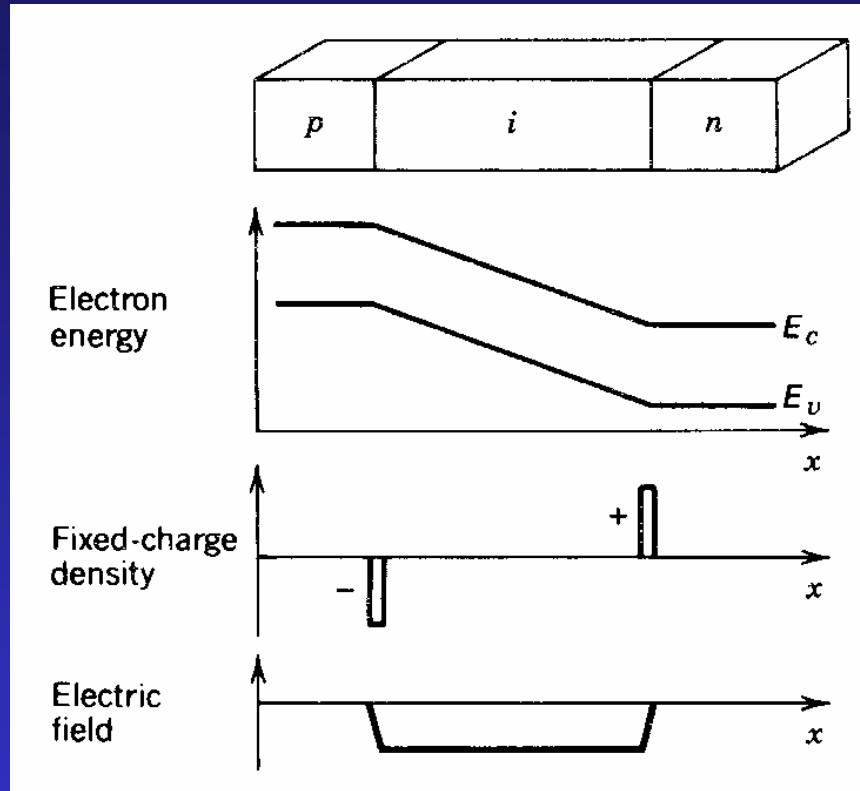


Estructura de fotodiodo PN



- Estructura p⁺-n-n⁺
- Difusión desde la zona n
- $W(V_R)$ ($y \propto \rho^{1/2}$)

Estructura de fotodiodo PIN



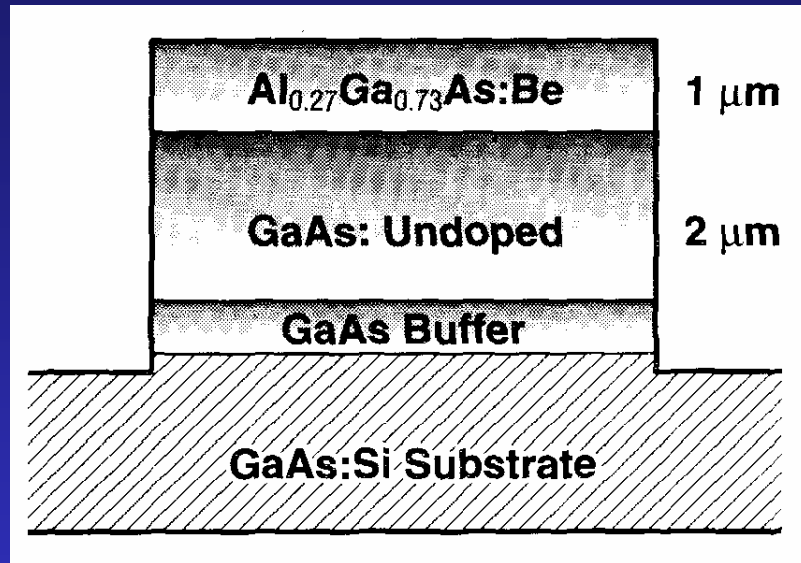
(+) alta eficiencia

(+) predominio del arrastre \Rightarrow rapidez

(-) $\uparrow I_d$

Fotodiodos de heterounión

AlGaAs/GaAs

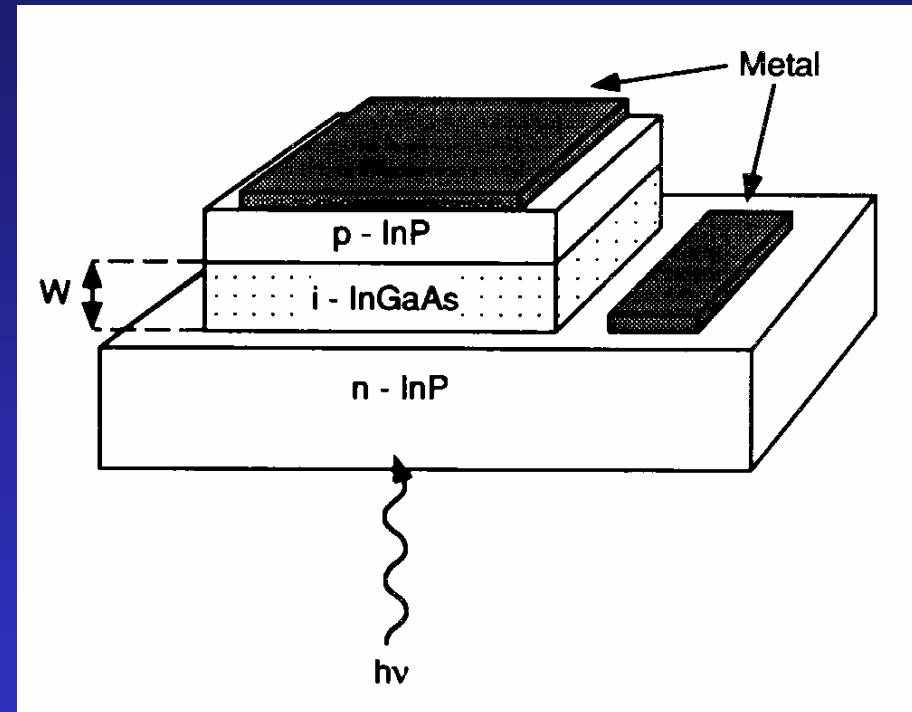


(+) $\alpha \ll$ fuera de la ZCE

(+) sólo arrastre \Rightarrow rapidez

(+) no recomb. superficial

GaInAs/InP



(+) (iluminación por detrás)

OJO: ajuste parámetros de red

Principio de funcionamiento

Características

Eficiencia y respuesta espectral

Características eléctricas

Respuesta en frecuencia

Tecnología

Dispositivos específicos

Aplicaciones

- *Análisis de la eficiencia*
- *Optimización*
- *Ejemplos*

Eficiencia cuántica y sensibilidad

Eficiencia cuántica (η)

$\eta = n^{\circ}$ de pares e-h generados / n° fotones incidentes

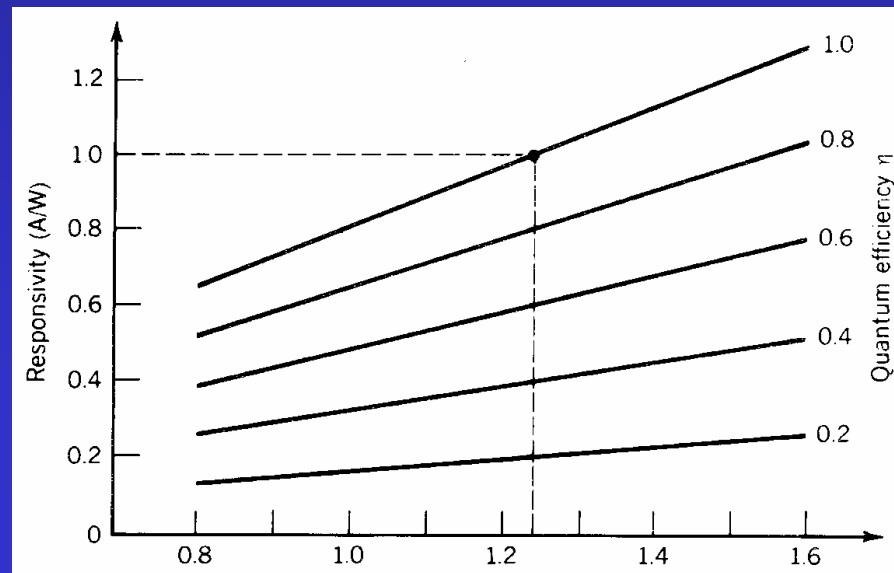
$$\eta \approx (1 - R) \cdot [1 - \exp(-\alpha d)] \cdot \zeta$$

Sensibilidad o “responsividad”

$\mathfrak{R} = \text{fotocorriente} / \text{potencia óptica}$

$$i_{\text{ph}} = e \cdot \eta \cdot (P/h\nu)$$

$$\Rightarrow \mathfrak{R} = \eta \cdot \lambda_0 (\mu\text{m}) / 1.24$$



Análisis de la eficiencia cuántica

$$\mathbf{J_{ph} = J_{dif} + J_{arr}}$$

difusión en la zona n

$$\mathbf{D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G(x) = 0}$$

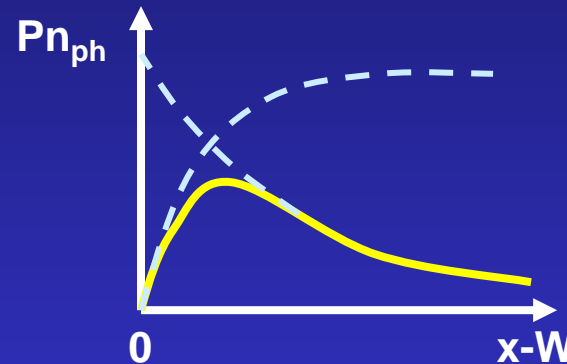
$$\mathbf{p_{n_{ph}} = C_1 e^{-\alpha x} \left(1 - e^{-\frac{W-x}{L_p}} \right)}$$

$$\mathbf{C_1 \equiv \left(\frac{\Phi_0}{D_p} \right) \frac{\alpha L_p^2}{1 - \alpha^2 L_p^2}}$$

$$\mathbf{J_{dif} = q\Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha W}}$$

arrastre en la ZCE

$$\mathbf{J_{arr} = -q \int_0^W G(x) dx}$$



$$\mathbf{J_{ph} = q\Phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)}$$

$$\mathbf{\eta = \frac{J_{tot}/q}{P_{opt}/Ah\nu} = (1 - R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_p} \right)}$$

Análisis de la eficiencia cuántica (II)

• Para un P⁺IN⁺ con $L_p \ll \frac{1}{\alpha}$

$$\eta = (1 - R)(1 - e^{-\alpha W})$$

• Para un P⁺N con $W \ll \frac{1}{\alpha}$

$$\eta = (1 - R) \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p}$$

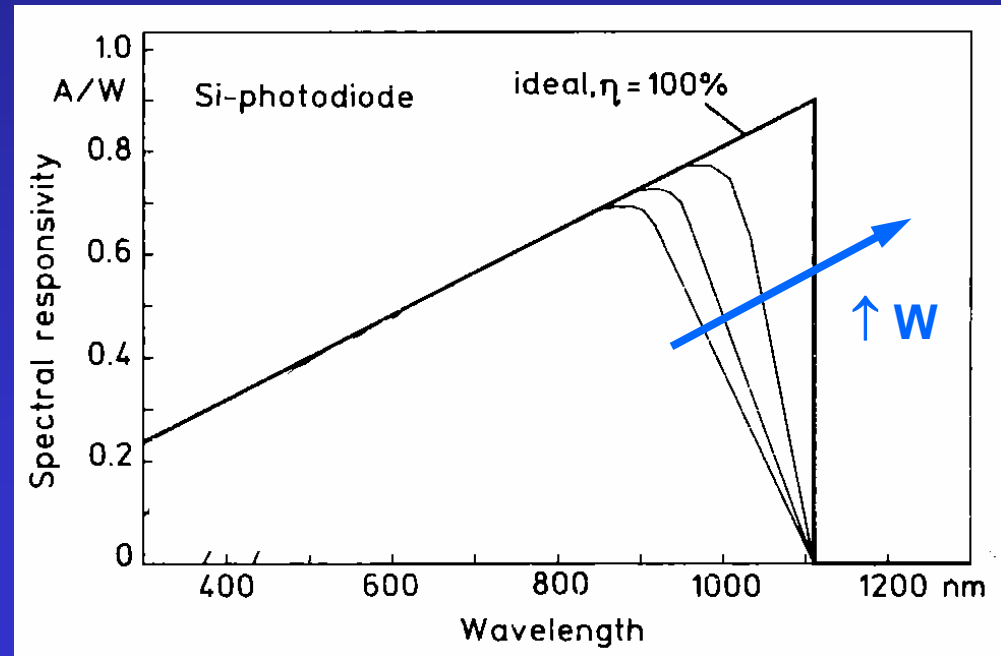
Optimización de η para λ largas (PIN)

$$(1 - e^{-\alpha W}) > 85\% \Rightarrow W > 2\alpha$$

PD de silicio:

	$\lambda(\mu\text{m})$	$W_{\text{min}}(\mu\text{m})$
rojo	$0.66\mu\text{m}$	$\Rightarrow 5\mu\text{m}$
IRED	$0.9\mu\text{m}$	$\Rightarrow 40\mu\text{m}$
YAG	$1.064\mu\text{m}$	$\Rightarrow 2000\mu\text{m}$

• W (y ρ) $\rightarrow V_R$



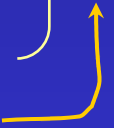
Optimización de η : capas antirreflectantes

* Reflectividad:

- $\eta \propto 1-R$
- perturbación del emisor

* Intercara semiconductor-aire:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \approx 31 \% \Rightarrow \eta < 70\%$$

$n(\text{Si}) = 3.5$ 

\Rightarrow Necesidad de capas antirreflectantes

Capas antirreflectantes

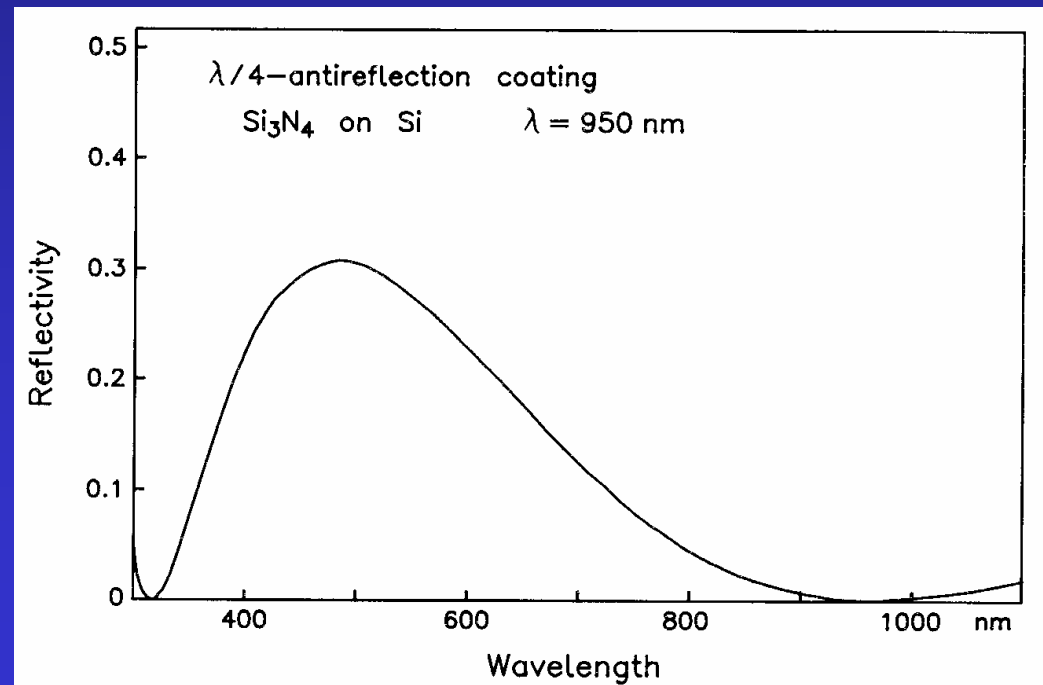
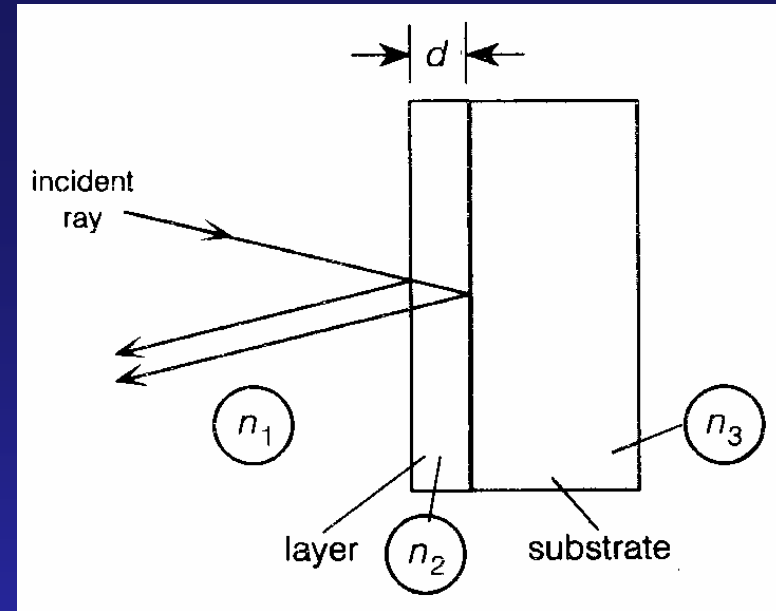
* Interferencia destructiva:

$$n_2 d_2 = m \lambda / 4$$

* Óptimo para:

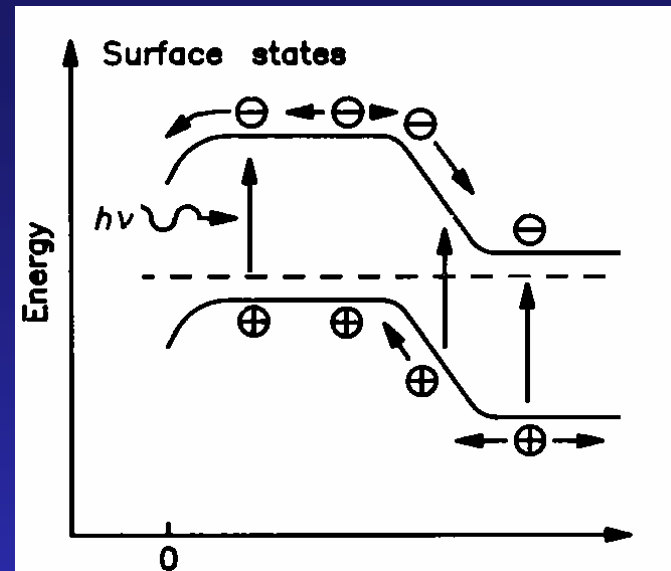
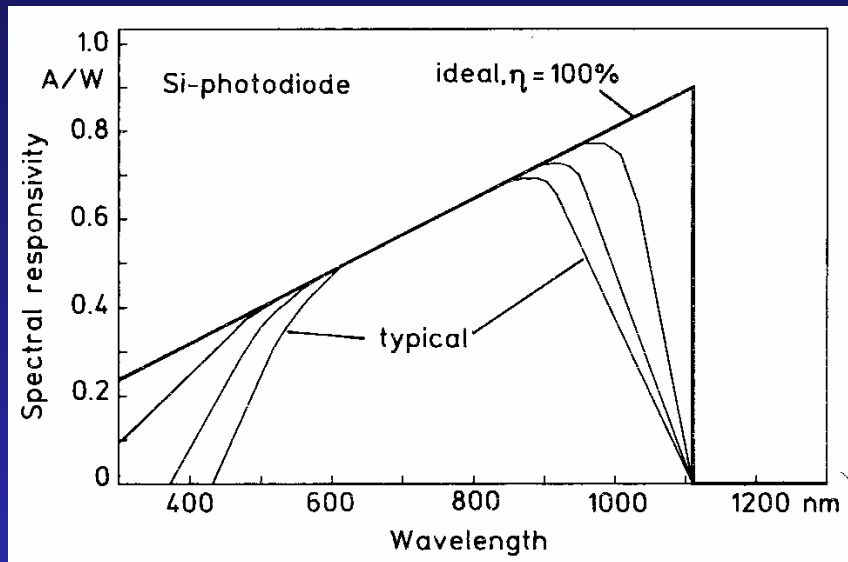
$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$$

- d adecuado a λ
- Silicio \boxtimes Si_3N_4
($n_2 = 1.95$)



Optimización para λ cortas

PD de silicio

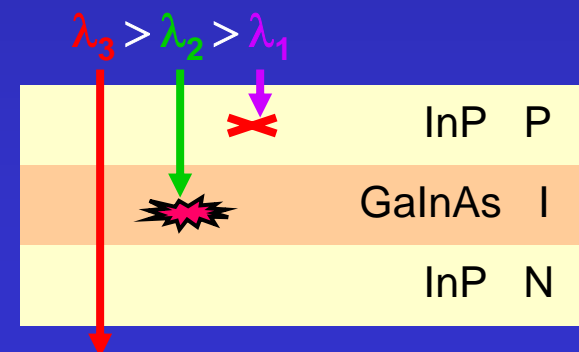
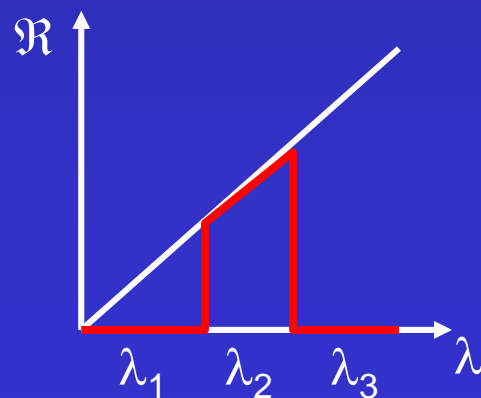


$\downarrow \lambda \Rightarrow \uparrow \alpha \Rightarrow$ absorción cerca de la superficie

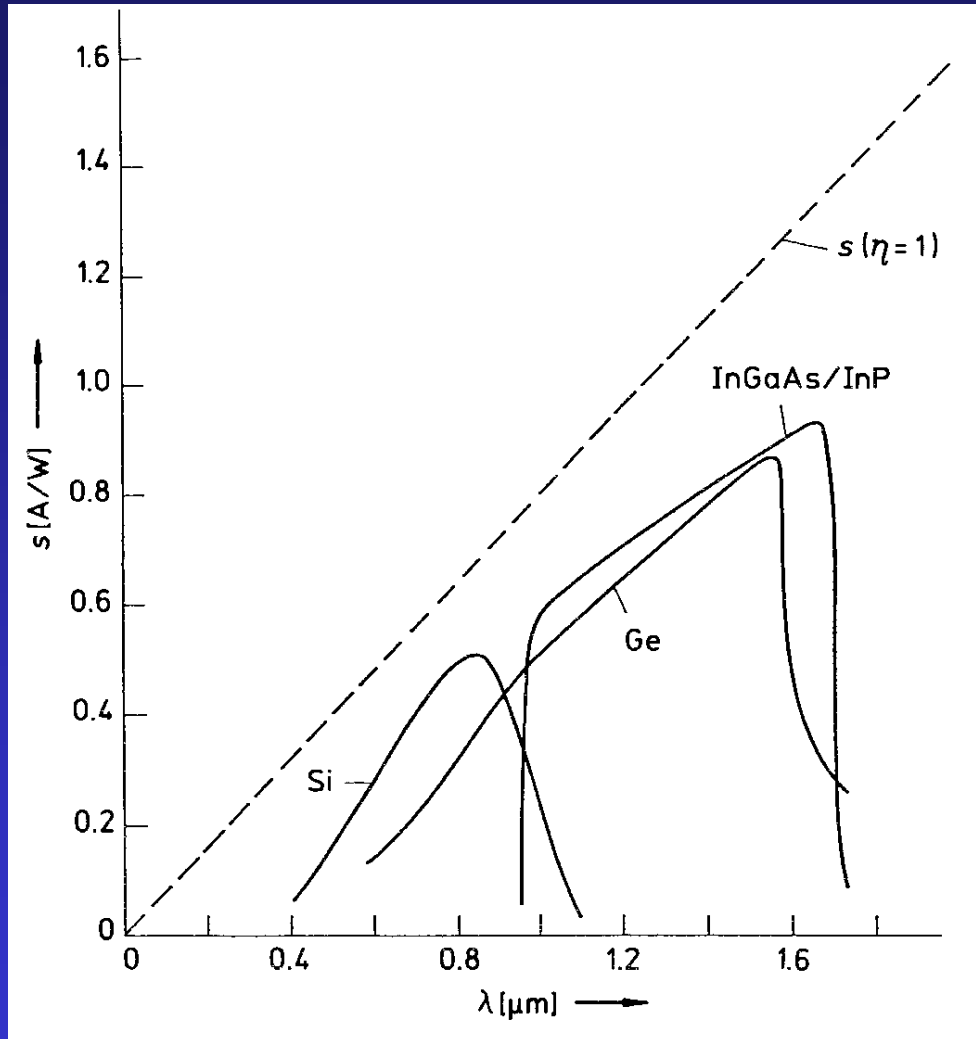
$1/\alpha$ (UV) $<$ 100 nm \Rightarrow recombinación no radiativa $\Rightarrow \eta \propto \exp(-\alpha x_p)$

Solución: N_A creciente hacia la superficie (\Rightarrow barrera de difusión)

PD de GaInAs/InP



Ejemplos de respuesta espectral



- $\mathcal{R} \propto \eta \cdot \lambda$
- directos vs. indirectos
- límites λ cortas
- λ de interés:
 - visible: 0.4-0.78 μm
 - GaAs-IRED: $\approx 0.9 \mu\text{m}$
 - Nd:YAG: 1.064 μm
 - FO: 1.3, 1.55 μm → **GalnAs**
 - IR térmico: 3 - 5 , 8 -14 μm
 - otros: InAs, HgCdTe ...

Características eléctricas

- *Parámetros relevantes*
- *Circuito equivalente*
- *Relación señal-ruido*

Parámetros relevantes

Corriente en oscuridad (I_d)

$$I_d = I_{d-GR} + I_{d-dif} + I_{d-surf}$$

$$I_d \propto A \cdot \exp(-E_g / K_B T)$$

$$\Delta T = 25^\circ C \Rightarrow I_d(Si) \times 10$$

$$I_d(Si) \ll I_d(Ge)$$

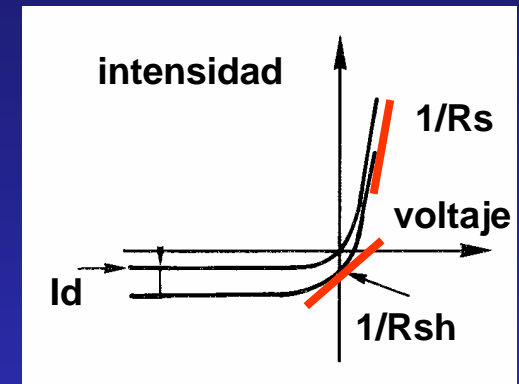
$$R_{sh} = (dI/dV)^{-1}$$

$$R_{sh} \approx n K_B T / q I_d$$

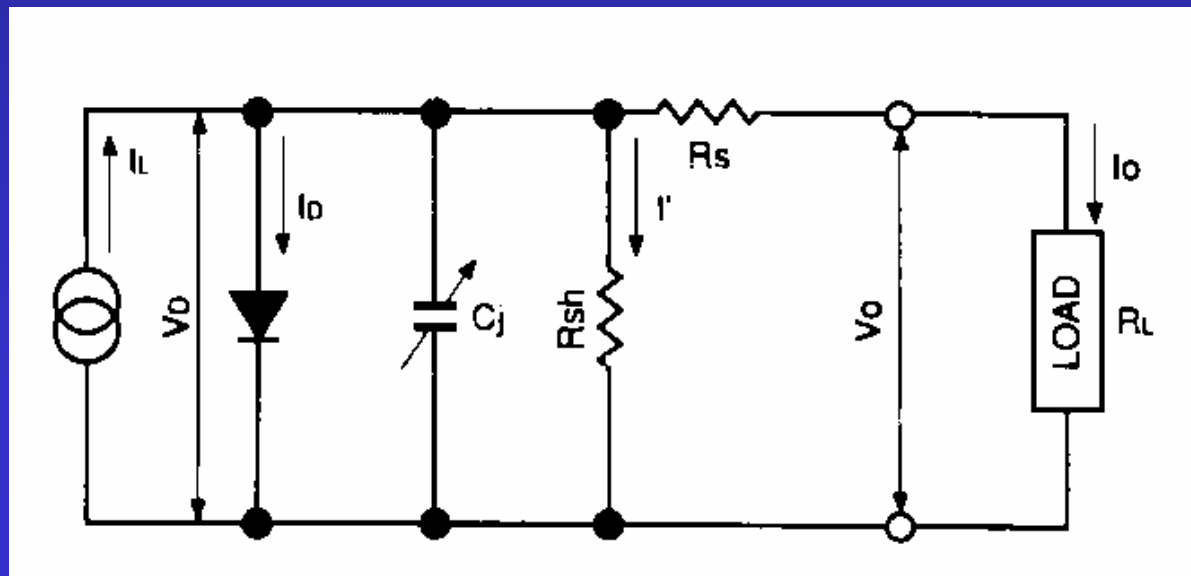
$$C_j \propto A \cdot [(V_R + 0.5)\rho]^{-1/2}$$

R_{serie} y R_{sh} parásitas

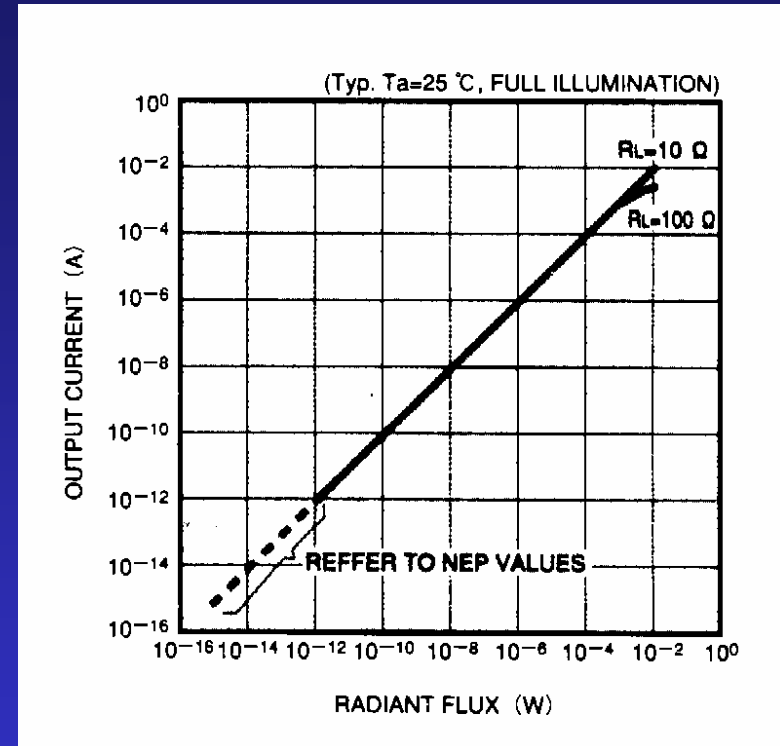
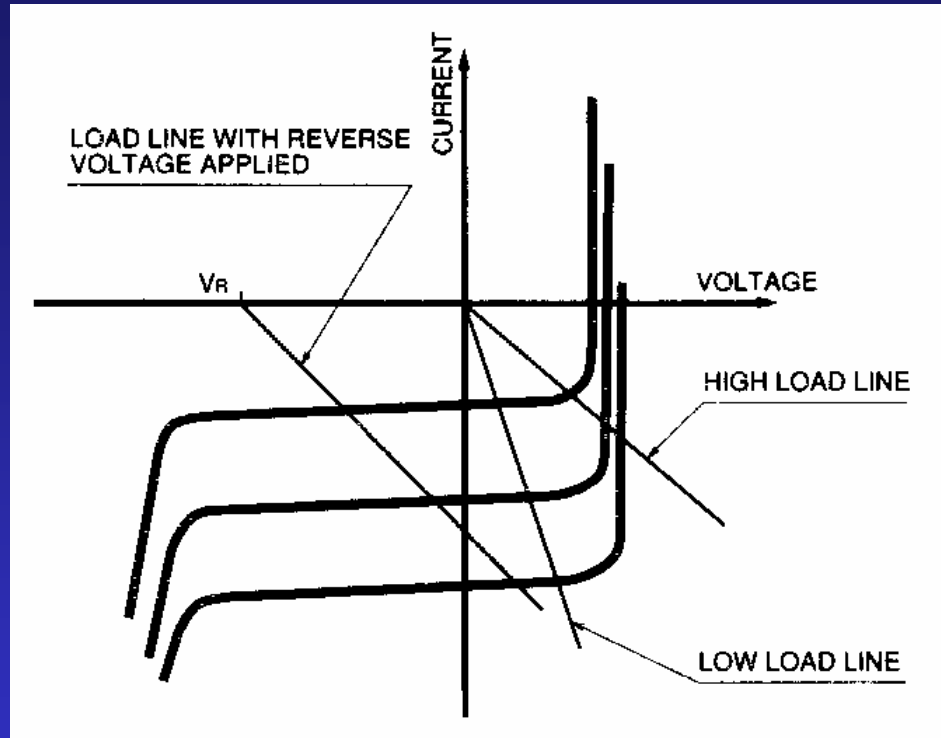
$$R_L \text{ (típ.)} = 50 \Omega - 1 \text{ K}\Omega$$



Circuito equivalente



Análisis del circuito equivalente: Linealidad

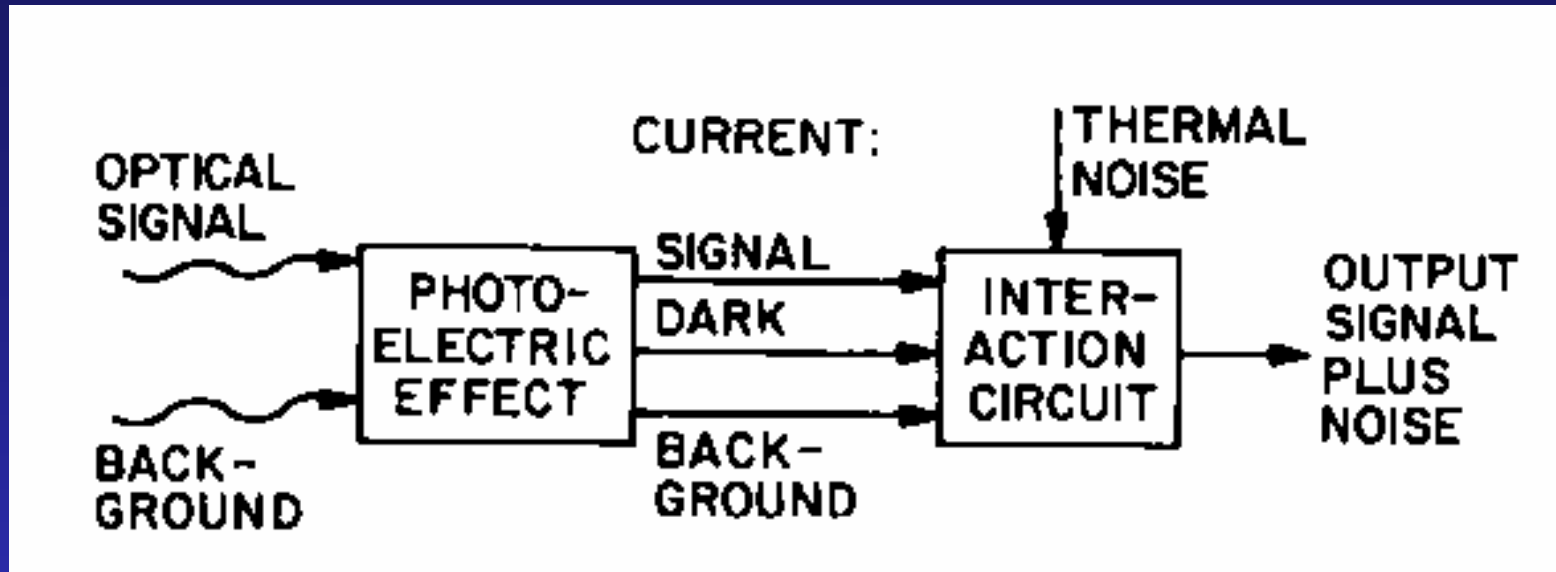


Para $I_{ph} \cdot R_{eq} < V_F + V_R \Rightarrow I_o \approx I_{ph} = \mathcal{R} \cdot P_{opt} \Rightarrow$ lineal

Para $I_{ph} \cdot R_{eq} \approx V_F + V_R \Rightarrow$ saturación de la linealidad

$$V_{oc} \approx (K_B T/q) \cdot \ln(I_{ph}/I_s)$$

Relación señal-ruido

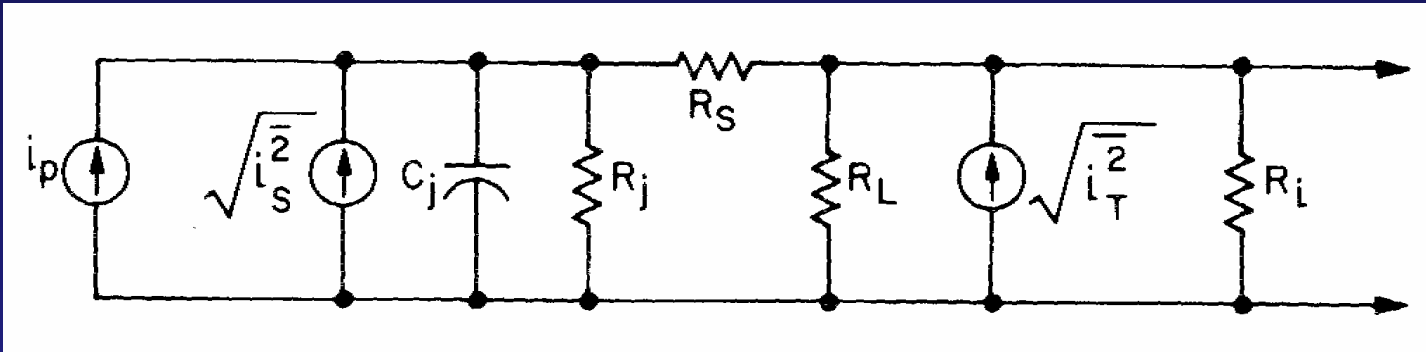


Ruido “shot” : fotogeneración + fondo + oscuridad

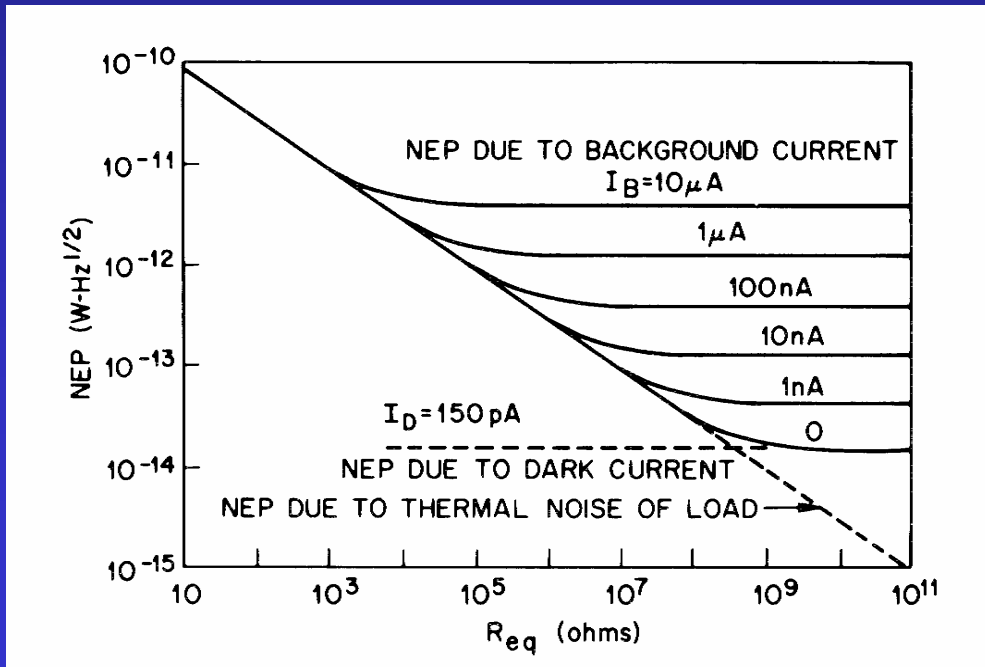
$$i_N^2 = 2q \cdot I \cdot \Delta f$$

Ruido térmico : $i_N^2 = (4kT/R_{eq}) \cdot \Delta f$

Relación señal ruido: $SNR_i = I_{ph} / i_N$



$$NEP(\lambda, f, \Delta f) = \frac{i_n(D)}{R(\lambda)} \frac{\text{Watts}}{\sqrt{\text{Hz}}} \quad (1)$$



Optimizar SNR:

- ↑ R_{eq}: ↑ R_L ↑ R_{sh}
- ↓ I_d: ↓ T
- ↓ Δf : detección síncrona

Respuesta en frecuencia

- *Fenomenología*
- *Casos en que domina RC*
- *Casos en que domina τ -trans.*
- *Optimización*

Respuesta temporal y respuesta en frecuencia

tiempo de carga
 $\tau = R_L C$

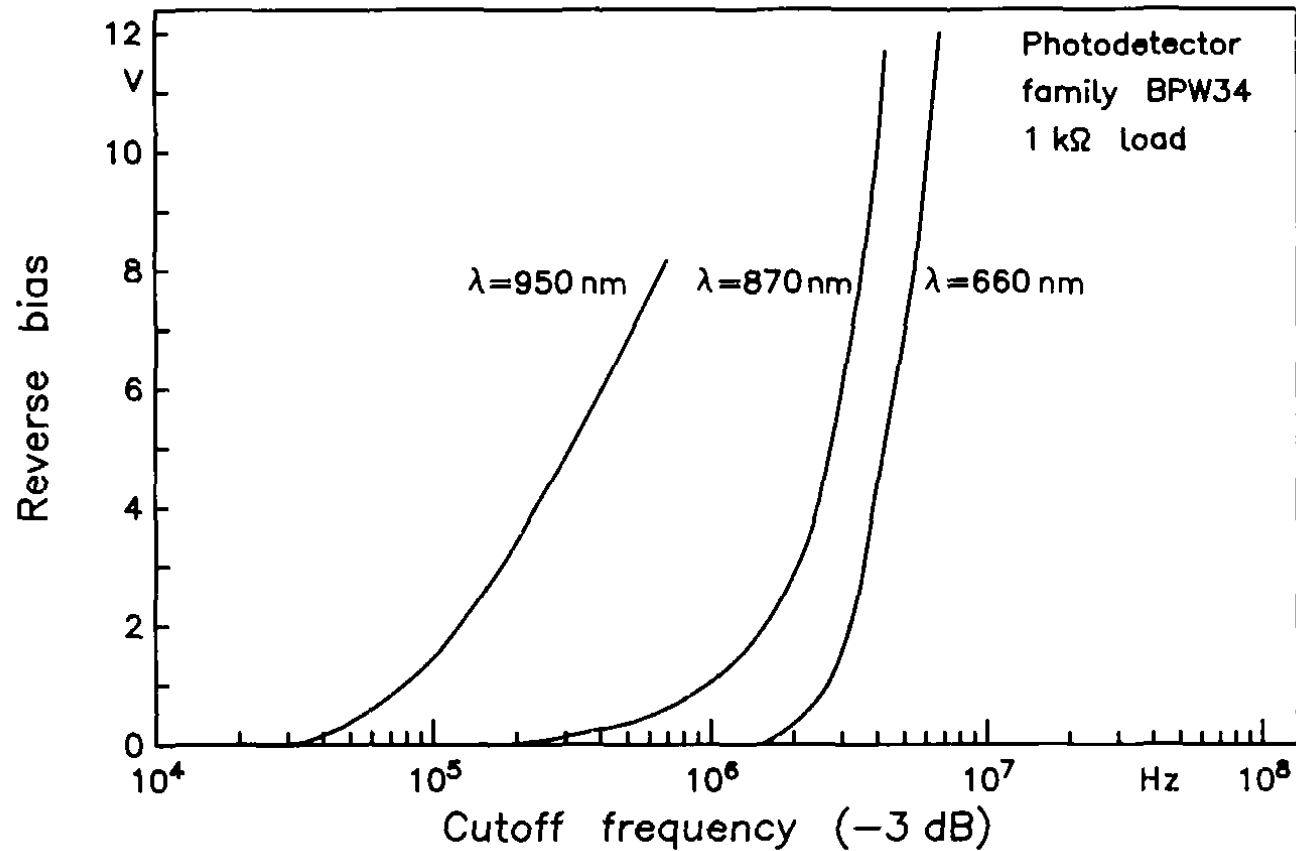
tiempo de tránsito
 $\tau = W/v$

componente
de difusión

tiempo de subida (t_r): 10% \rightarrow 90% (= 2.2 τ)

$$\mathfrak{R}(f_{3dB}) = \mathfrak{R}(100\text{KHz})/\sqrt{2} \quad f_{3dB} = 0.35/t_r$$

Competencia con la difusión



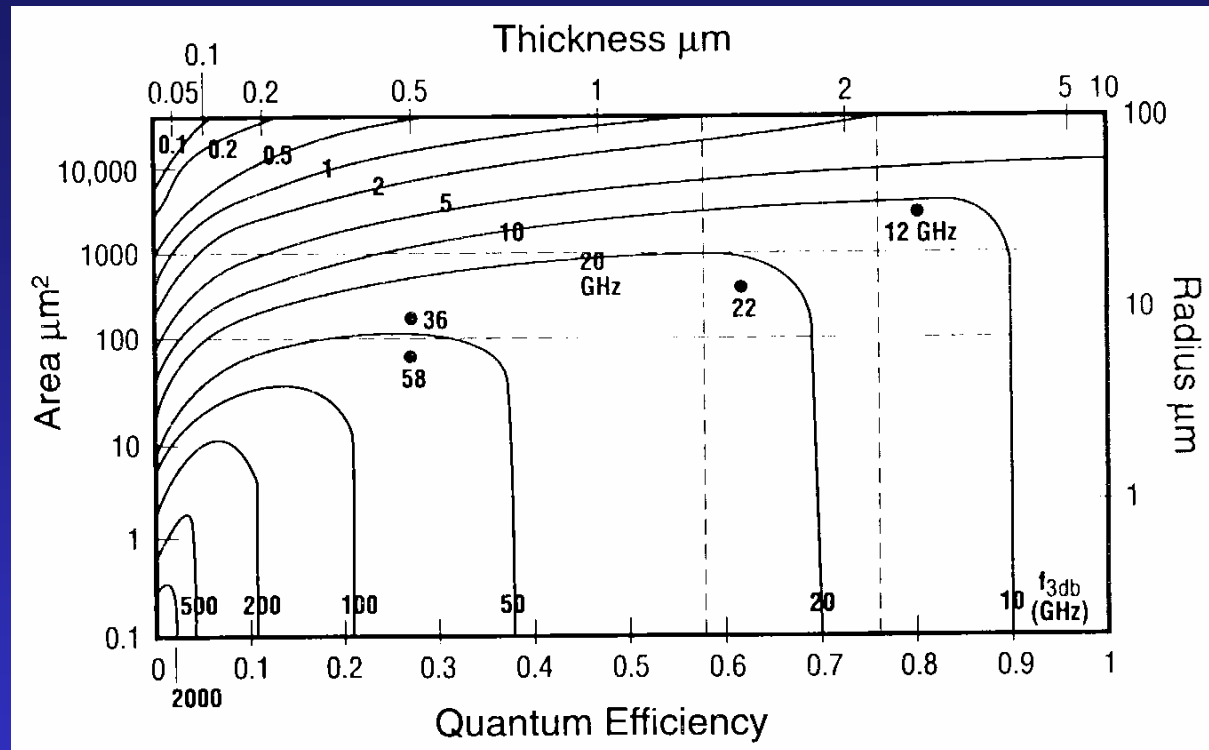
$\uparrow \lambda \Rightarrow \uparrow 1/\alpha \Rightarrow \uparrow$ difusión

$\uparrow V_R \Rightarrow \uparrow W \cdot \alpha \Rightarrow \downarrow$ difusión

$\uparrow R_L \Rightarrow$ domina RC

$\downarrow R_L \Rightarrow$ domina difusión

Optimización de f_{3dB}



$$\eta^* = 1 - \exp(-\alpha W)$$

$$W < 0.35 \cdot v / f_{3dB}$$

$$A_{\max} \text{ para } W / v \approx 2R_L C$$

$$A < 0.16 \cdot W / (\epsilon \cdot R_L \cdot f_{3dB})$$

Principio de funcionamiento

Características

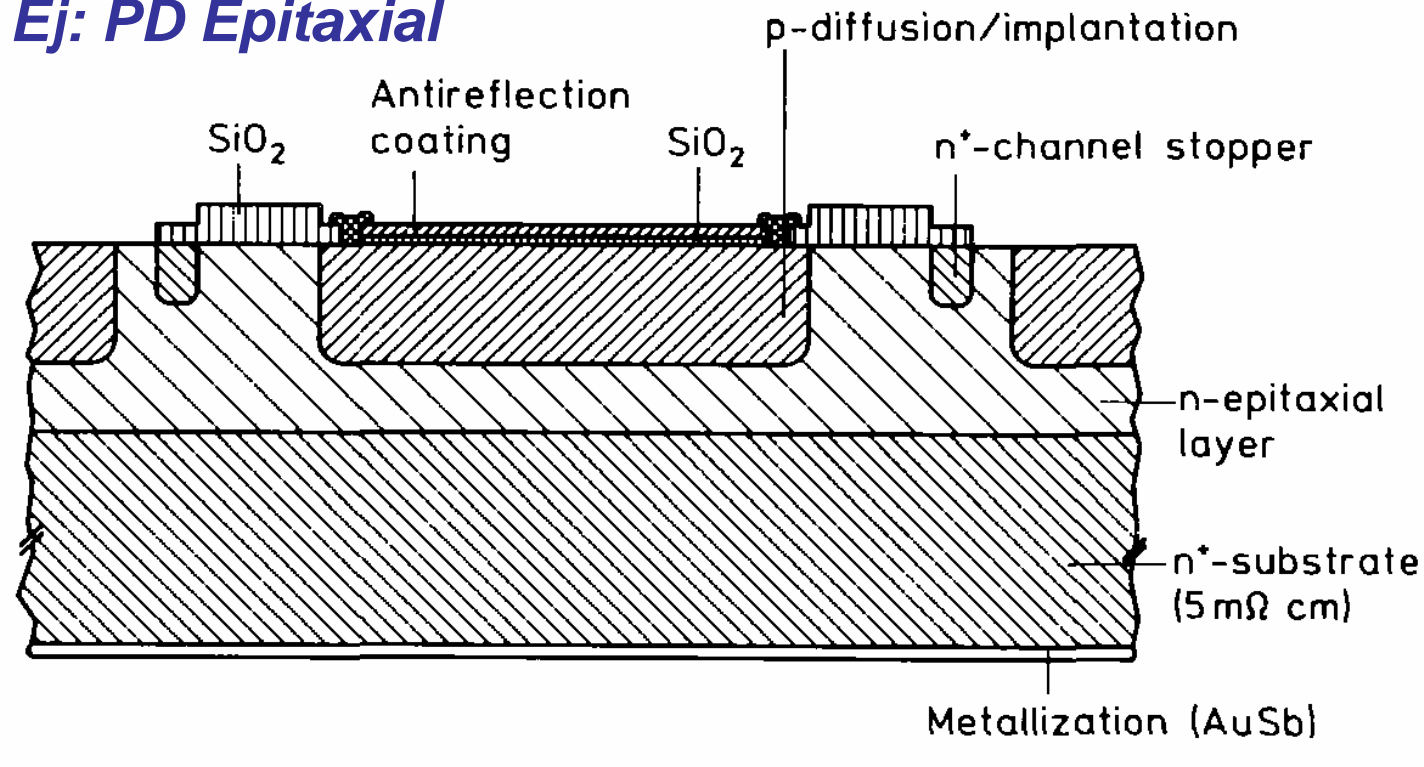
Tecnología

Dispositivos específicos

Aplicaciones

Fabricación de PD de silicio

Ej: PD Epitaxial

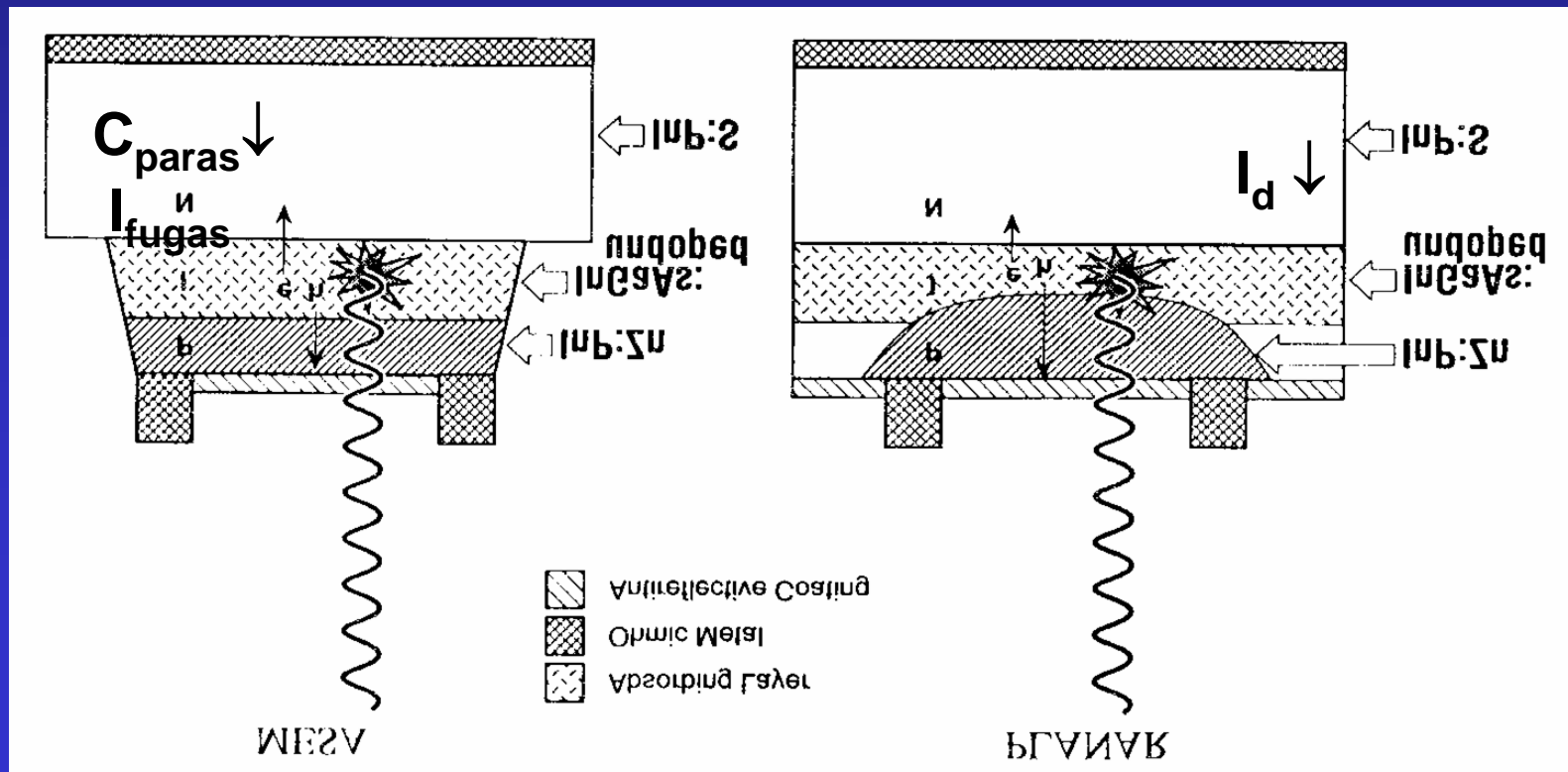


- (Anillo de guarda p⁺)
- “Stopper” n⁺
- **Dopado p del área activa**
- Capa pasiv. y antireflectante
- Contacto frontal (Al)
- Contacto posterior

Fabricación de PD de GaInAs

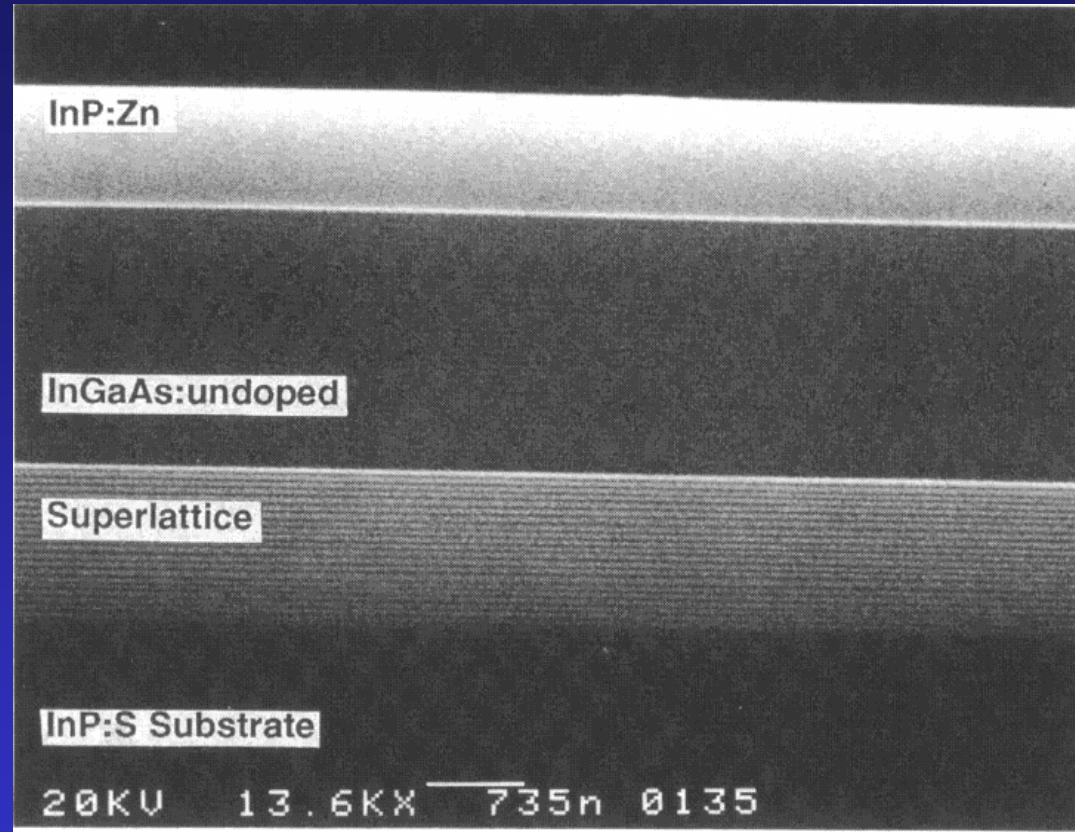
- Poca dependencia $f_{3dB}(\lambda)$
- $\eta \approx 1$ para $0.92 < \lambda < 1.65 \mu\text{m}$
- Interesantes: 1.3 y $1.55 \mu\text{m}$
- $\tau(\text{RC}) = \tau_{\text{trans}}$ y $\tau_{\text{dif}} = 0$

Estructuras

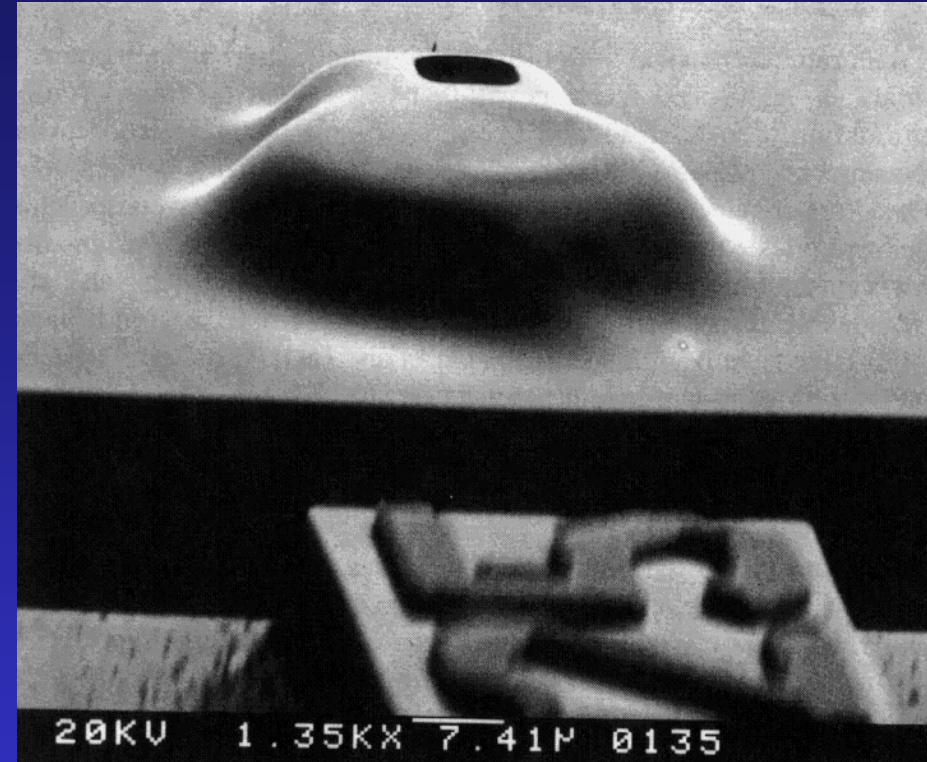
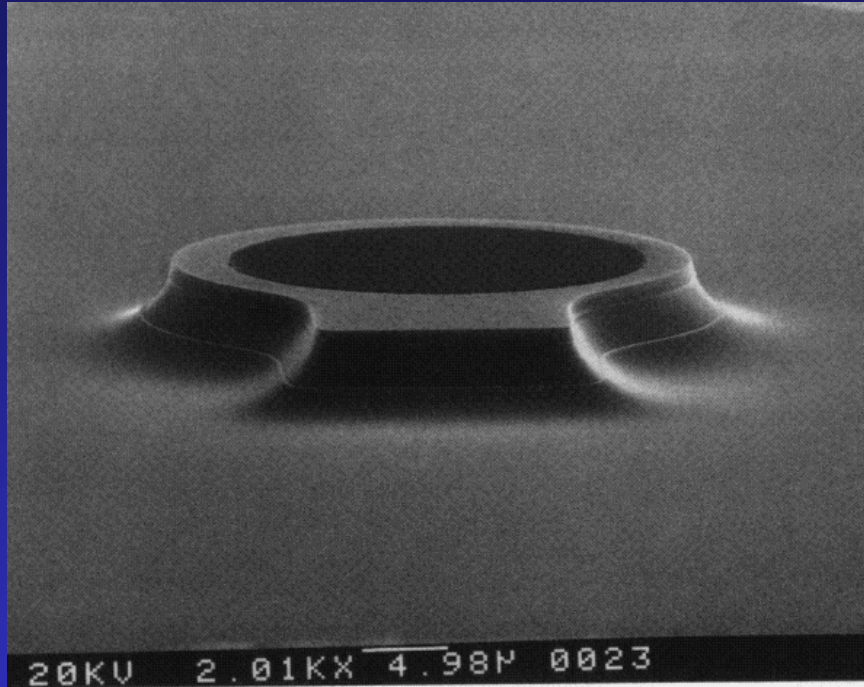


Estructuras tipo mesa

- Substrato n^+
- Epitaxia
 - “buffer layer”: SL
 - capa activa: GaInAs
 - capa recubridora p^+
- Adelgazar substrato
- Contactos:
Ni/AuGe/Au y Ti/Pt/Au
- Capa antirreflectante



Estructuras tipo mesa (cont.)



- Ataque húmedo y limpieza óxidos
- Pasivación: polyimida

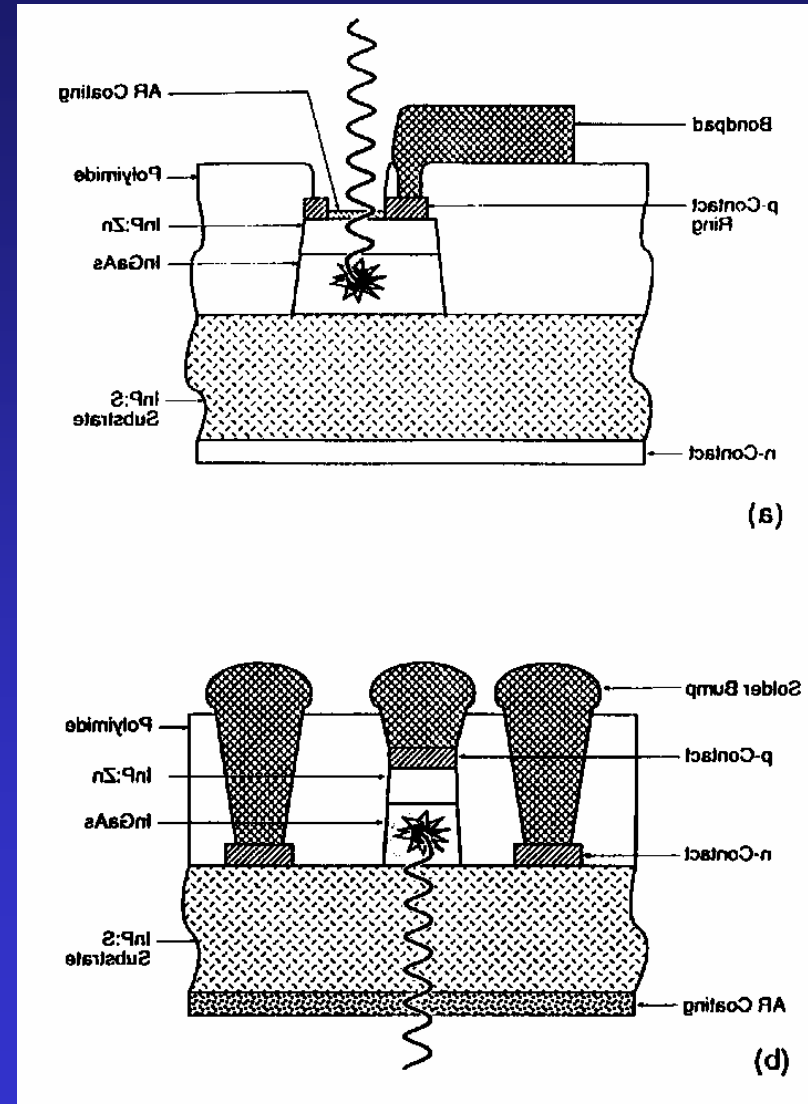
- Vía de contacto (RIE)

Tecnología de hibridación

- Deposición y grabado de los pads de soldadura
- Contacto

Tecnología flip-chip:

- ↓ C y L parásitas
- iluminación por detrás
- ↑ area libre



Principio de funcionamiento

Características

Tecnología

Dispositivos específicos

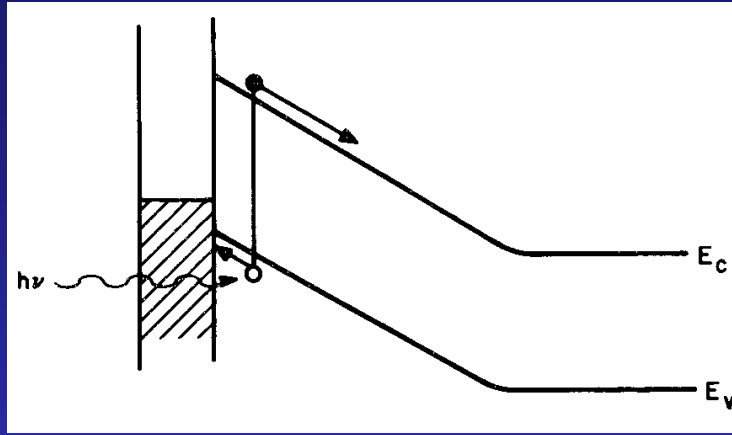
Fotodiodos Schottky

Fotodiodos de avalancha

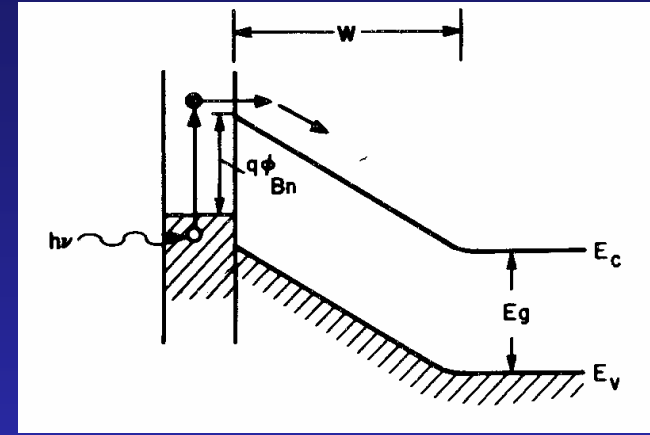
Otros tipos de fotodiodos

Aplicaciones

PD Schottky: principio de funcionamiento



generación banda a banda
 $h\nu > E_g$



Fotoemisión de electrones
 $h\nu > q\phi_b$ (\Rightarrow MIR)

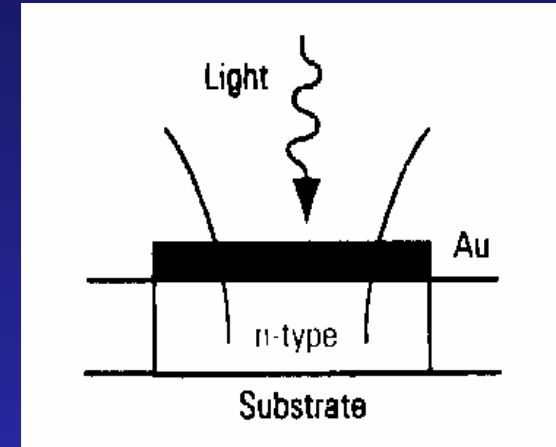
Alta velocidad (¡ record mundial ! : 60 GHz)

$\uparrow I_d \Rightarrow \uparrow$ ruido

PD Schottky: estructuras

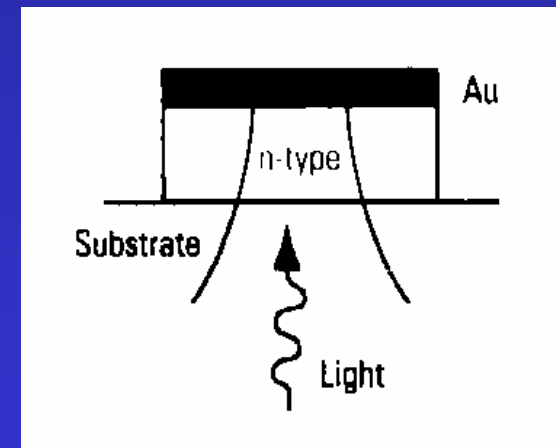
Iluminación por delante:

- No pérdidas por recombinación en la superficie
 $\Rightarrow \eta(\lambda) \propto T(\lambda)$
- Capas AR/metal/semiconductor



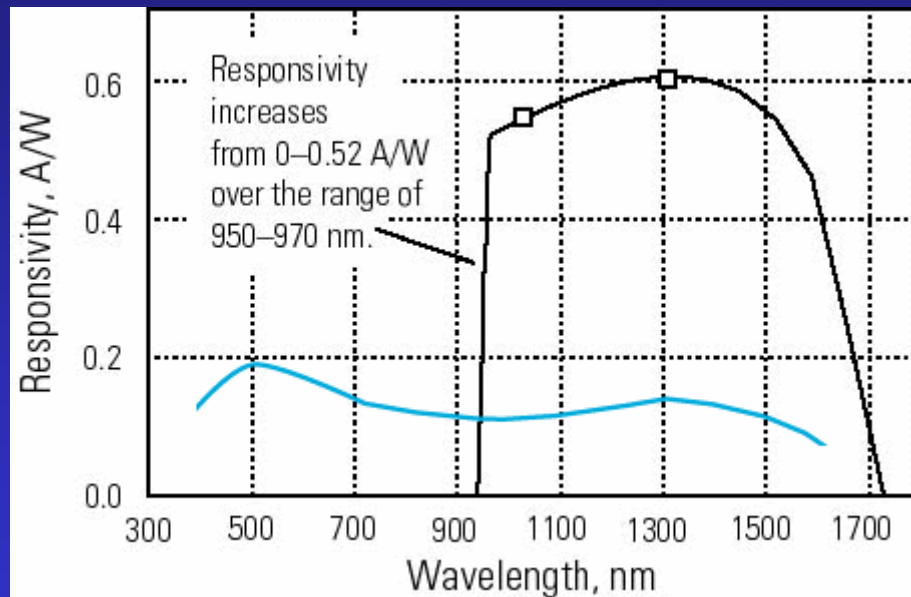
Iluminación por detrás (GaInAs /InP):

- capa metal gruesa $\Rightarrow \eta \times 2$
- $\Rightarrow \downarrow R_s$

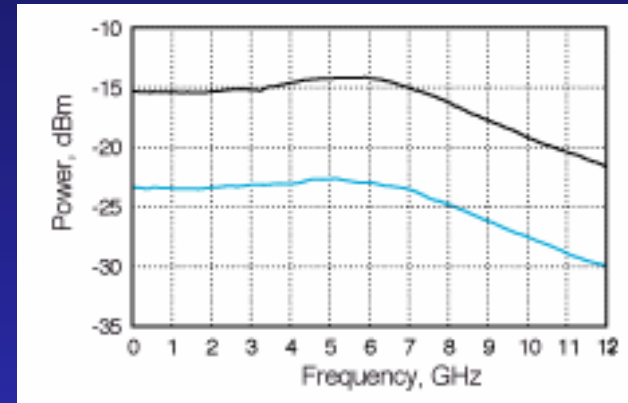


PD Schottky: características

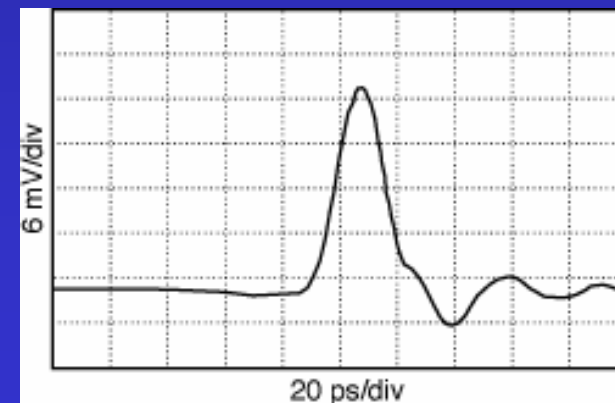
Respuesta espectral



Respuesta en frecuencia



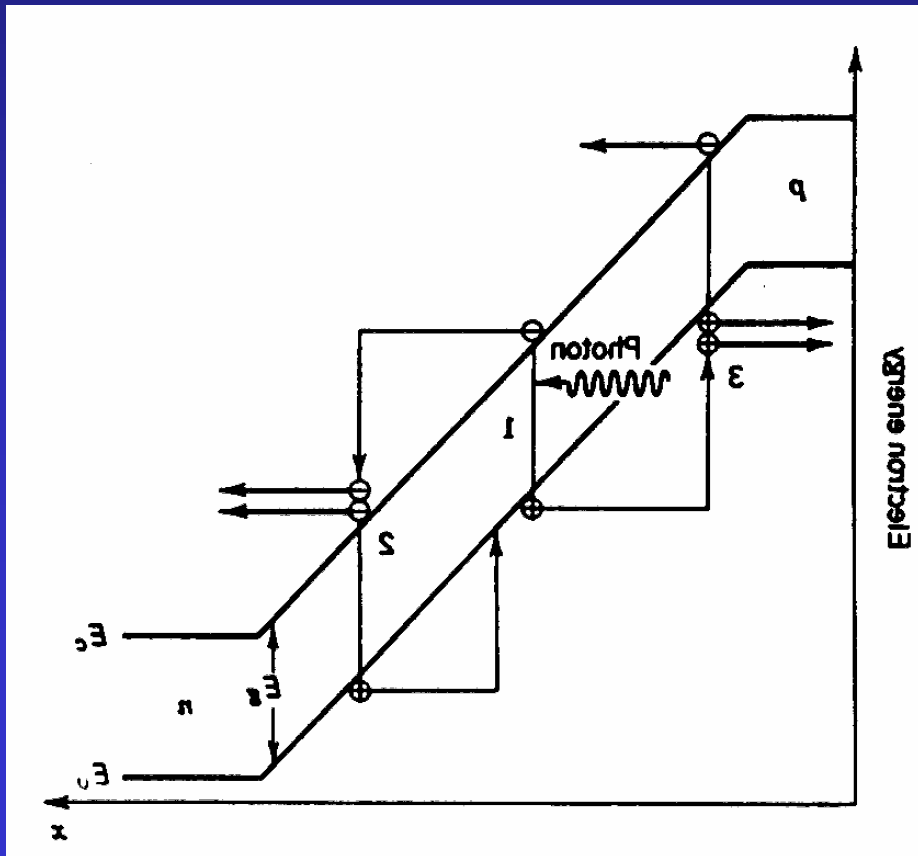
Respuesta temporal



Fotodiodos de avalancha

- Multiplicación por avalancha
- Estructuras
- Características

Multiplicación por avalancha



Coef. de ionización:

$$\alpha_e, \alpha_h, h = \alpha_e / \alpha_h$$

Conviene $h \gg 1$ o $h \ll 1$

Ganancia (G)

$$\text{para } h \ll 1 \quad G = \exp(-\alpha_e W)$$

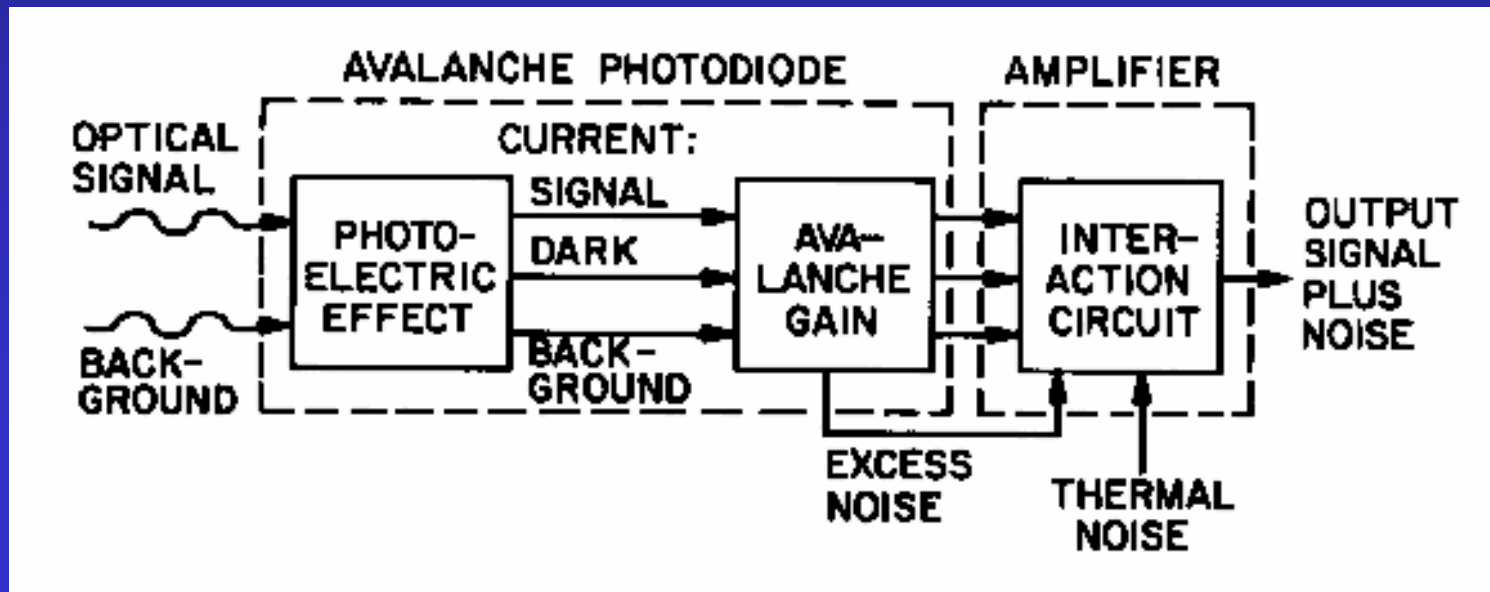
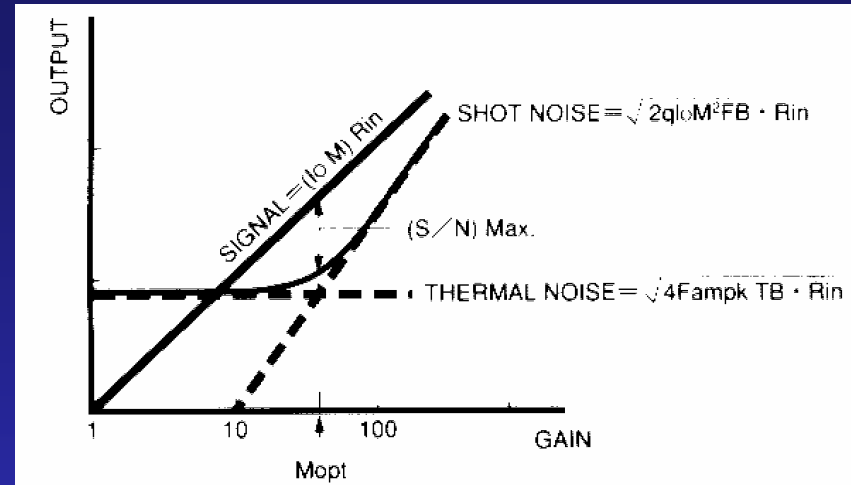
$$\alpha_e, \alpha_h (E)$$

Conveniencia de APD

señal: $I_{ph} = G \cdot I_{ph}(G=1)$

ruido: $i_N = G \cdot i_N(M=1) \cdot F^{1/2}$

⇒ mejora SNR
cuando domina el
ruido del circuito



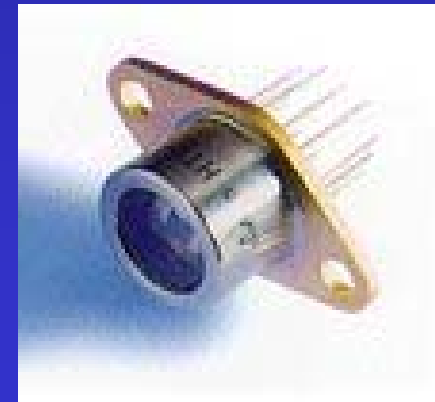
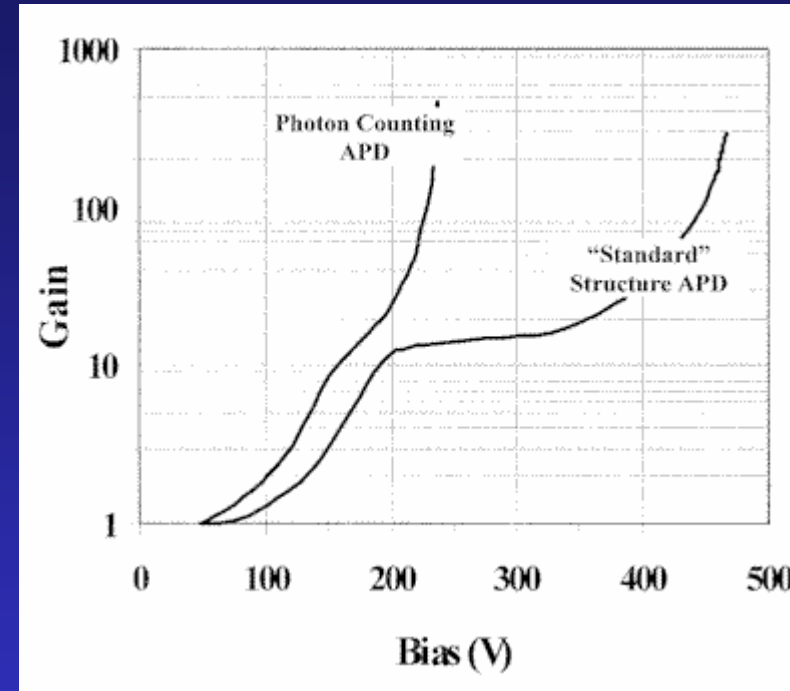
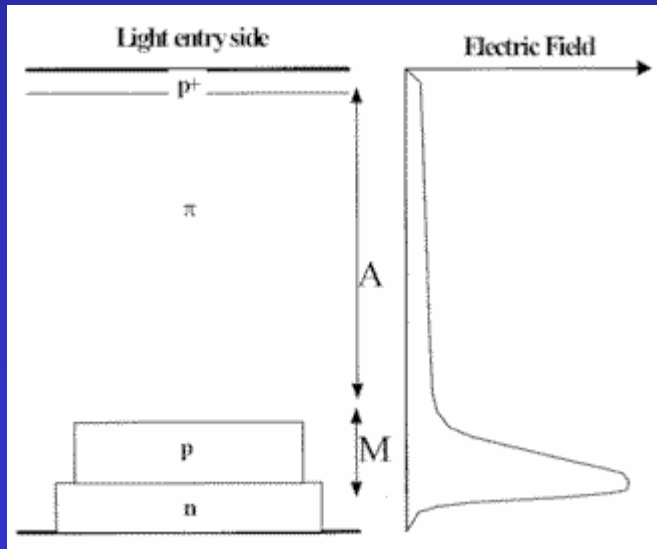
APDs de Silicio

$$\alpha_e \gg \alpha_h$$

$$G=100-1000$$

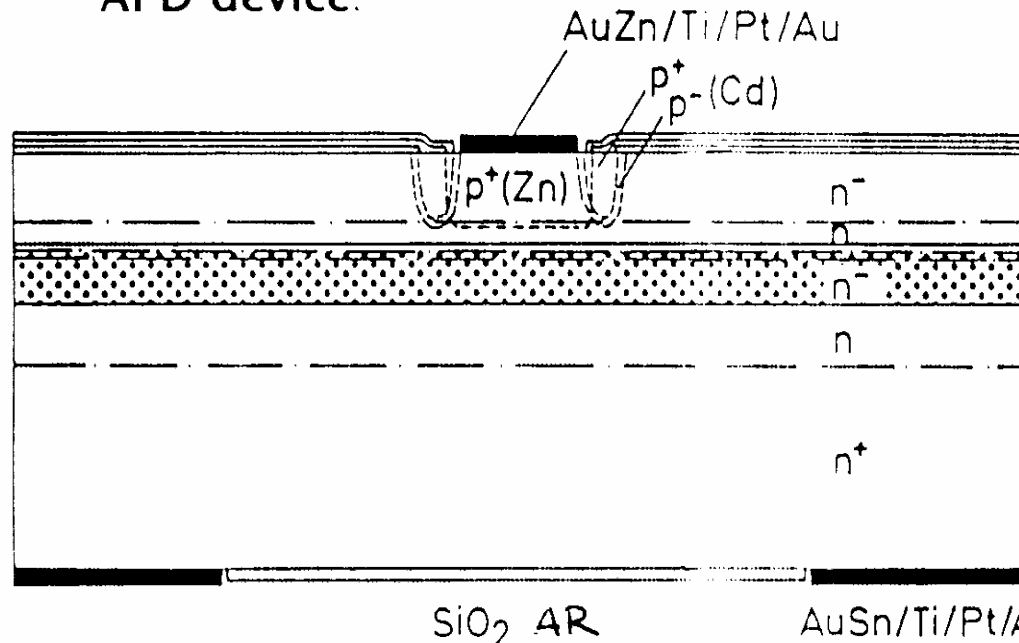
$$V_{op} \approx 100 \text{ volts}$$

Estructuras SAM
(*Multiplicación y
Absorción Separada*)



APDs de GaInAs

APD device.



$$I_{\text{dark}} < 6 \text{ nA}$$

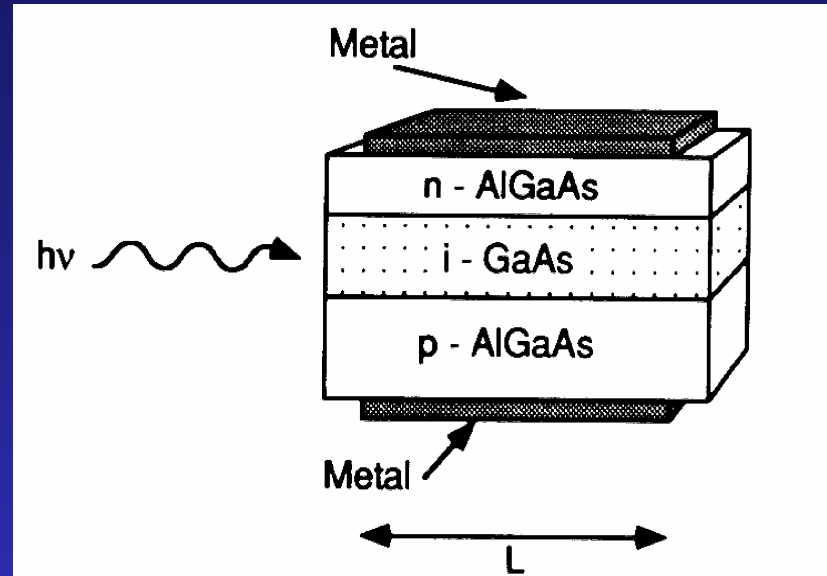
$$f_{3\text{dB}} = 7 \text{ GHz}$$

$$f \cdot G > 74 \text{ GHz}$$

- Guardring region
 - Multiplication region
 - Grading
 - Absorption region
 - Buffer layer
 - Substrate
- } InP
- } GaInAsP
- } GaInAs
- } InP

Otros dispositivos: Fotodiodos en guía de ondas

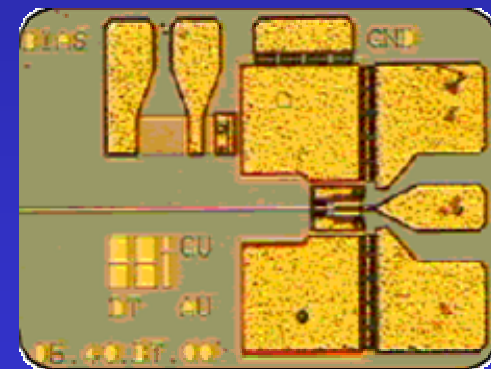
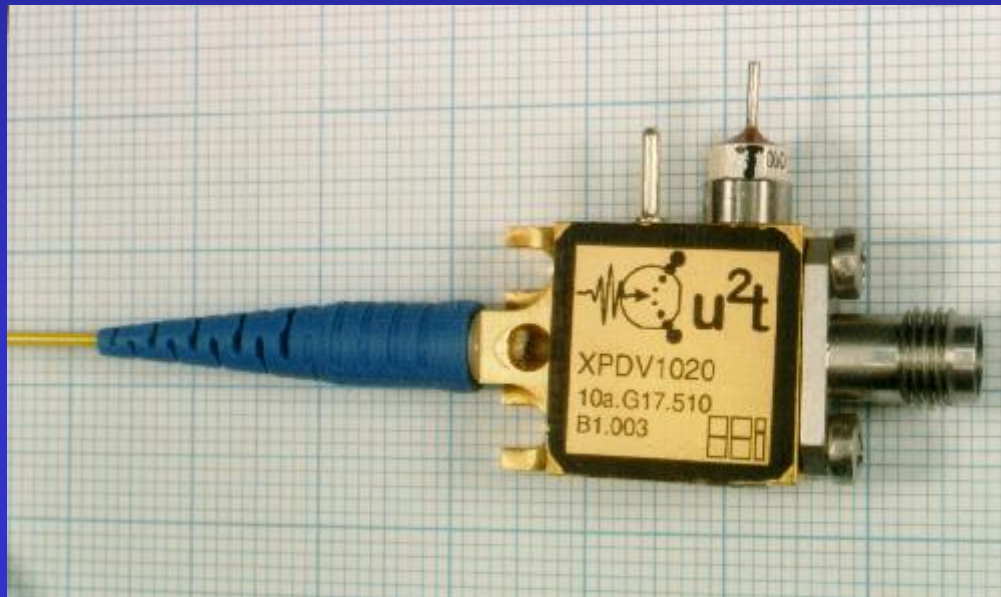
Estructura de guía
Iluminación lateral



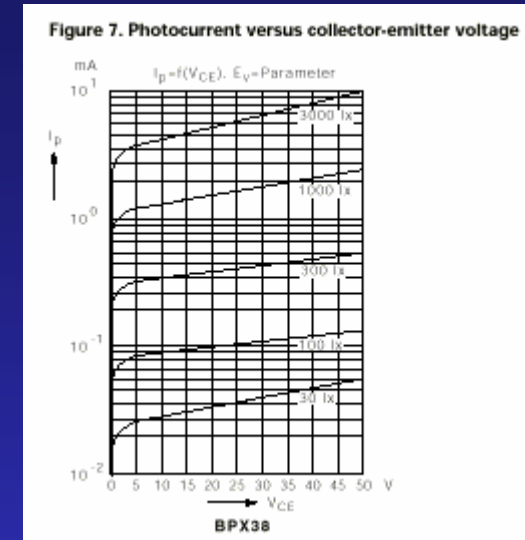
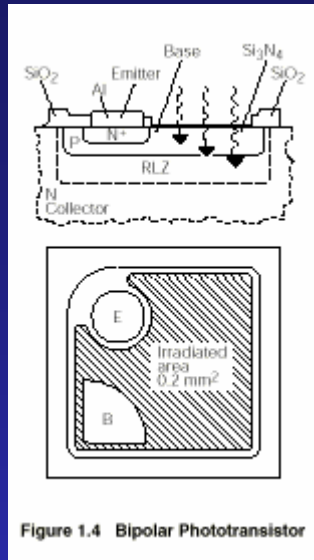
- + Integración con otros dispositivos
- + Disociación entre τ y η
 - posible mejora de $\eta \cdot f_{3dB}$
(para iluminación por superficie $\eta \cdot f_{3dB} < 20$ GHz)

Ejemplo de PD integrado en guía de onda

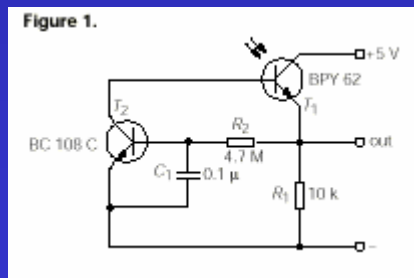
- Integración monolítica con guía de onda pasiva
- Acoplamiento de campo evanescente
- Optimización separada del acoplamiento fibra-chip
- $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ $f_{3\text{dB}}=45 \text{ GHz}$ $\mathcal{R}=0.22 \text{ A/W}$



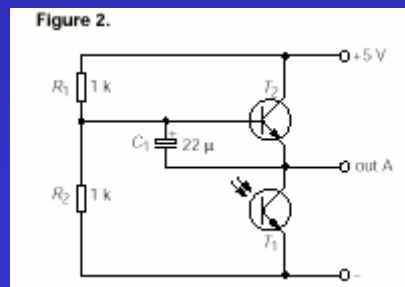
Otros dispositivos: Fototransistores



Circuitos para fototransistores con eliminación de dc



Con conexión de base



Sin conexión de base



Principio de funcionamiento

Características

Tecnología

Dispositivos específicos

Aplicaciones

Aplicaciones

Medición de luz

- Fotometría
- Espectrometría
- Control de láseres

Recepción o lectura de datos

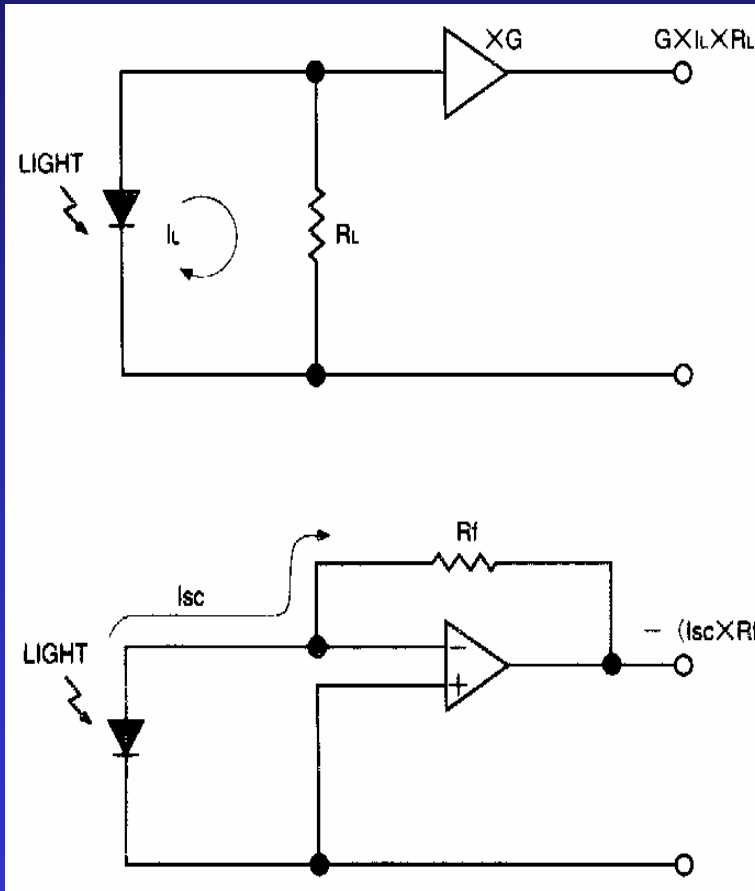
- Control remoto y comunicación IR
- Lectores de código de barras
- Lectores de CD y DVD
- Buses ópticos
- Redes locales
- Comunicación a larga distancia

Sensores

- Proximidad
- Composiciones
- Detección remota
- Interferométricos
- En guía de onda

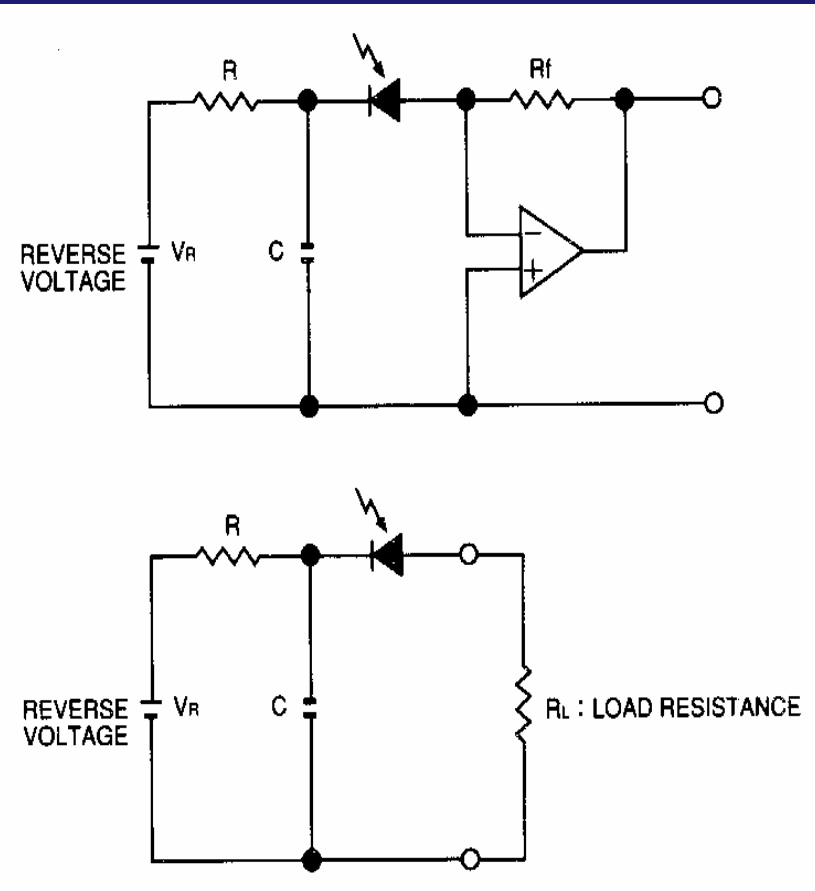
Circuitos básicos

Con resistencia de carga



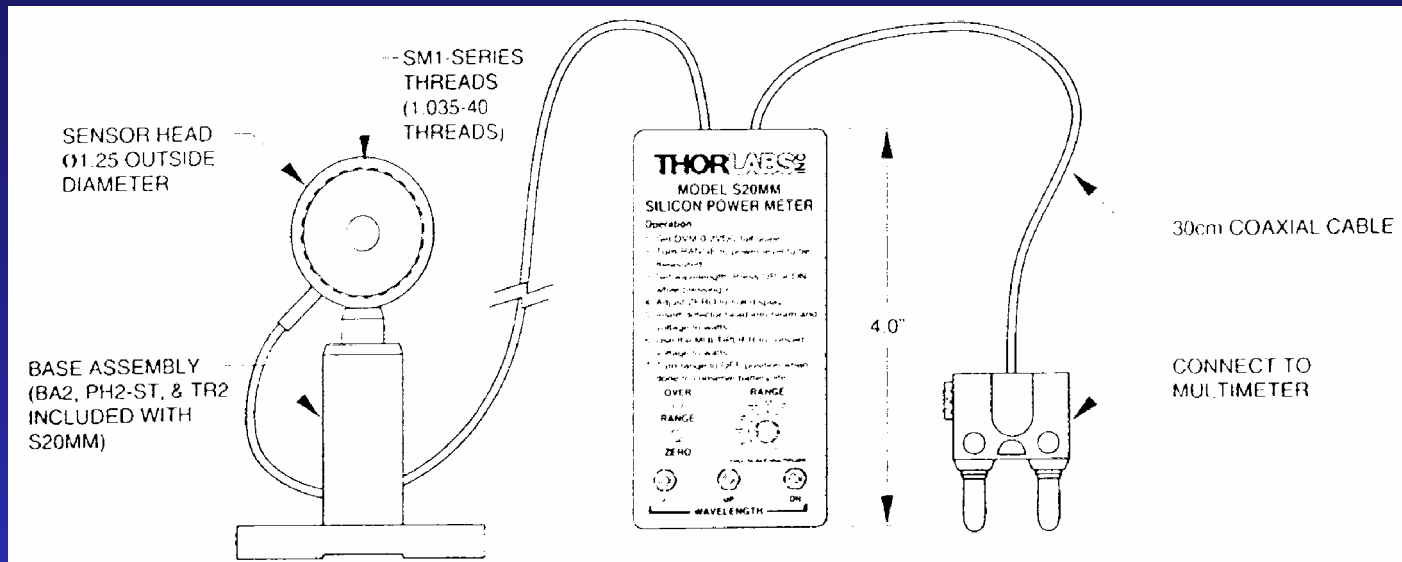
Con amplificador de transimpedancia

Con amplificador de transimpedancia en polarización inversa



Con resistencia de carga en polarización inversa

Medidor de potencia óptica

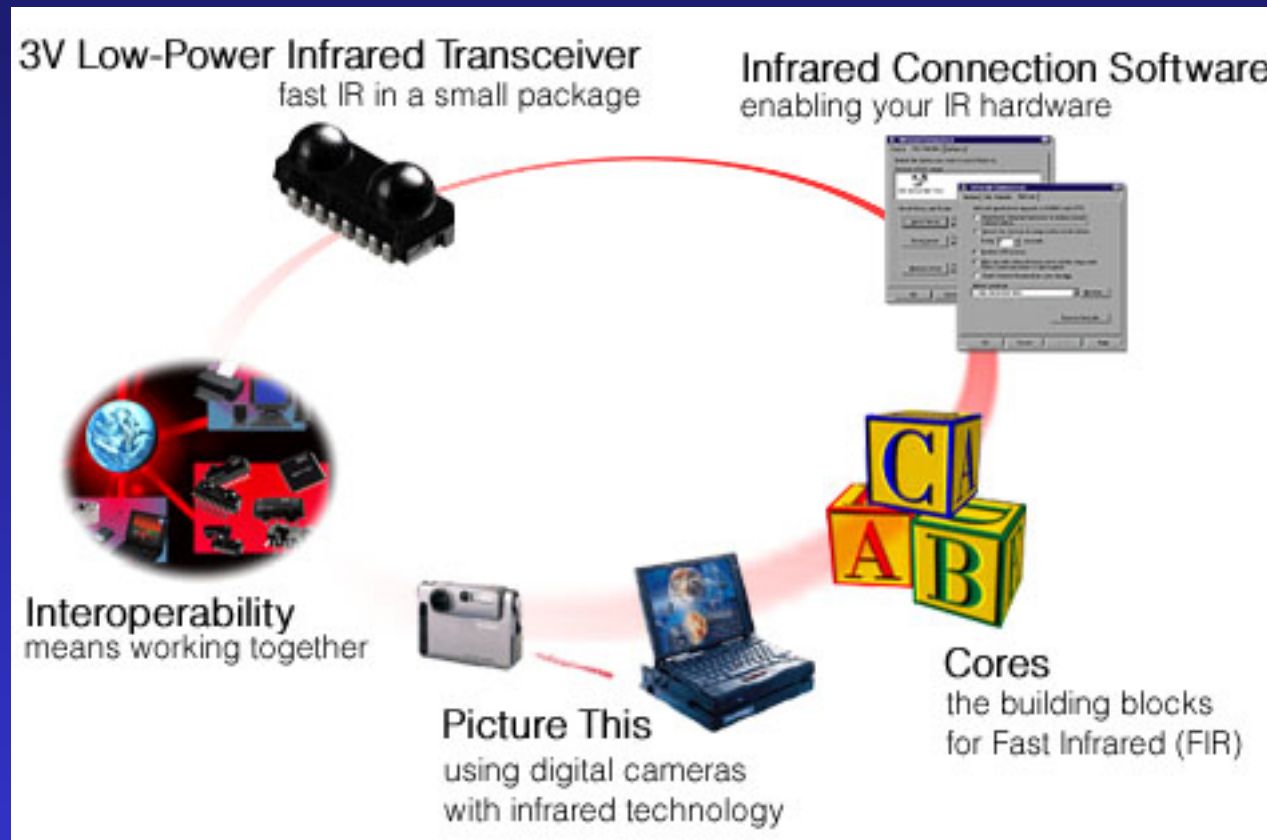


PD de silicio de gran área
400-1050 nm
Modo fotocorriente
Amplif. transimpedancia

Adaptación ganancia
Módulo inteligente
Corrección $\mathcal{R}(\lambda)$
Salida V/W

Comunicación IR

Protocolos IrDA

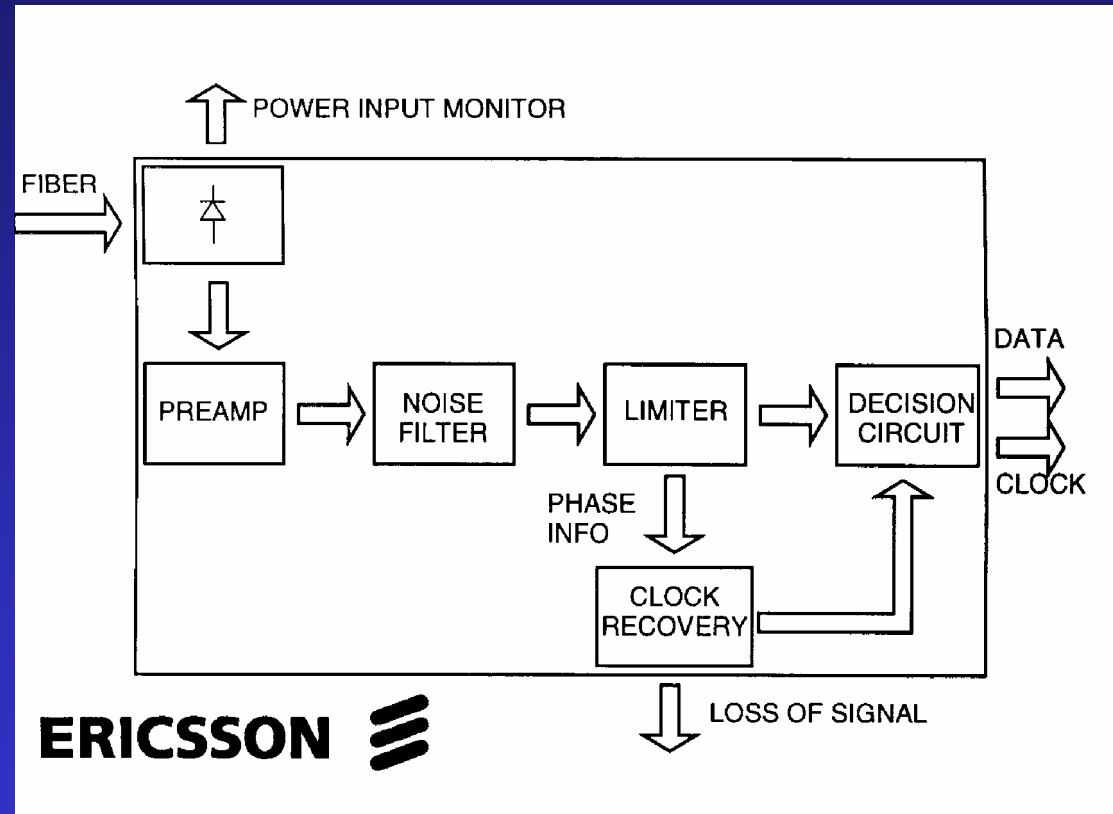


$$\lambda = 850 - 900 \text{ nm}$$
$$t_r(\text{max}) = 80 \text{ ns}$$

$$P_{\text{dens}} = 0.4 - 1250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$$
$$\text{BER} = 10^{-4}$$

Receptor para comunicación por fibra óptica

- PIN de GaInAs/InP
- IC Preamplificador de GaAs + Si-IC
- flip-chip
 - ↓ tamaño, ↓ consumo
 - ↑ fiabilidad
- Acoplo a fibra
- SONET OC-48
(2488.32 MHz)



Hemos visto ...

- **interacción luz-semiconductores y heteroestructuras**
- **análisis como dispositivo electrónico**
- **características como circuito**
- **respuestas en frecuencia: hasta ≈ 50 GHz**
- **tecnología Si y III - V's**
- **cómo mejorar velocidad y conseguir ganancia**
- **aplicaciones**