

## Fotodetectores (PIN,APD)

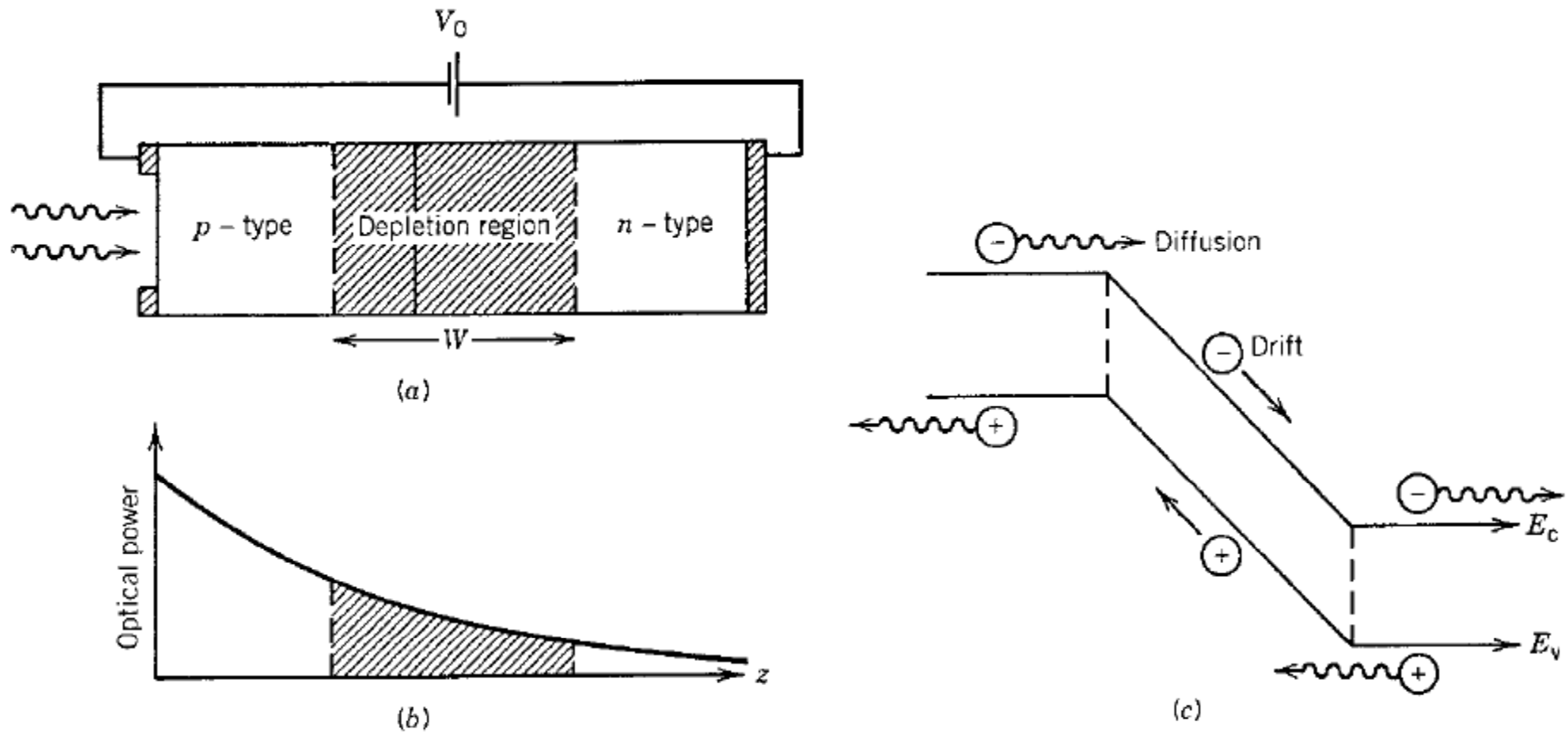
- 1- Procesos básicos
- 2- Fotodiodo p-n (PD)
- 3- Fotodiodo PIN
- 4- Fotodiodo APD

Prof. Miguel A. Muriel

## 1- Procesos básicos

- 1) Generación: Los fotones absorbidos generan portadores libres
- 2) Transporte: Un campo eléctrico aplicado fuerza el movimiento de estos portadores, resultando una corriente que genera una tensión en una impedancia de carga
- 3) Amplificación interna: Para campos eléctricos aplicados intensos, se produce ionización por impacto, generando nuevos portadores libres

## 2- Fotodiodo p-n (PD) (Polarización inversa)



(a) A  $p-n$  photodiode under reverse bias; (b) variation of optical power inside the photodiode; (c) energy-band diagram showing carrier movement through drift and diffusion.

(1)

En la capa de depleción → Campo eléctrico fuerte →

→ arrastre (drift) de portadores → velocidad de arrastre ( $v_d$ ) →  $\tau_{tr} = \frac{w}{v_d}$

→  $I_{drift}$

Típicamente,  $w \sim 10\mu\text{m}$ ,  $v_d \sim 10^5 \text{ m/s}$  (velocidad de saturación)

→  $\tau_{tr} \sim 100 \text{ ps}$  →  $\Delta f \sim 1 \text{ GHz}$ .

$w \uparrow \begin{cases} \alpha w \uparrow \rightarrow \mathfrak{R} \uparrow \\ \tau_{tr} \uparrow \rightarrow \Delta f \downarrow \end{cases} \rightarrow \mathfrak{R} \Delta f \sim \text{Cte} \rightarrow$

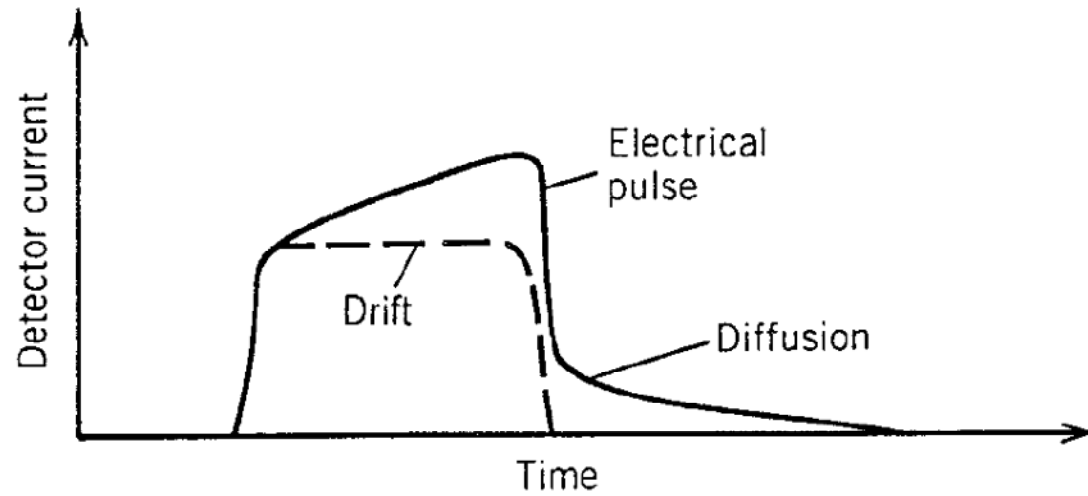
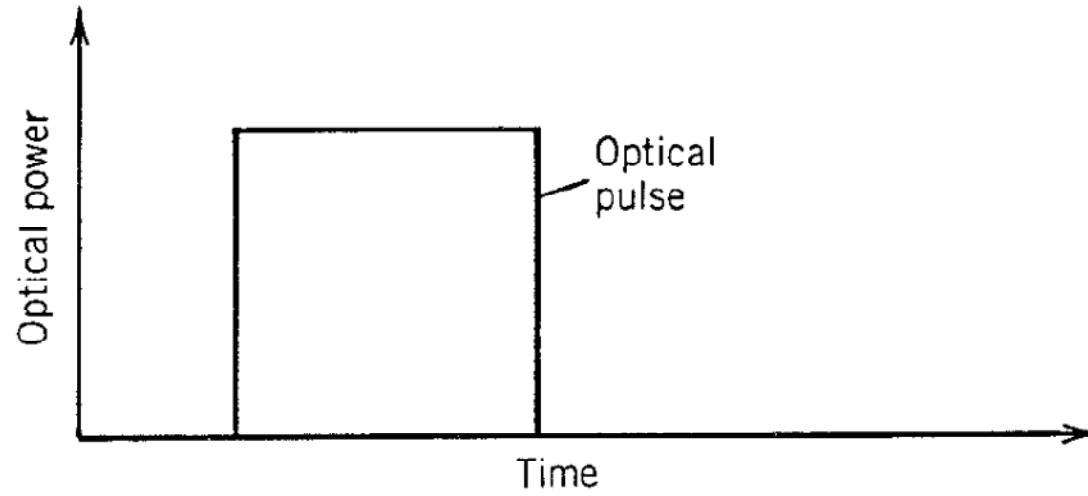
→ (Compromiso Sensibilidad-Ancho de Banda)

Fuera de la capa de depleción → Difusión de portadores generados

→  $I_{diffusion}$

La difusión es muy lenta  $\sim 1 \text{ ns}/\mu\text{m}$

Se soluciona aumentando la capa de depleción y reduciendo las p y n → pin



Response of a  $p-n$  photodiode to a rectangular optical pulse when both drift and diffusion contribute to the detector current. (1)

### 3- Fotodiodo PIN

Los pares electrón-hueco que no se generan en la zona de carga de espacio, no son acelerados por el fuerte campo eléctrico allí existente, y se suelen recombinar otra vez antes de alcanzar los terminales del fotodiodo.

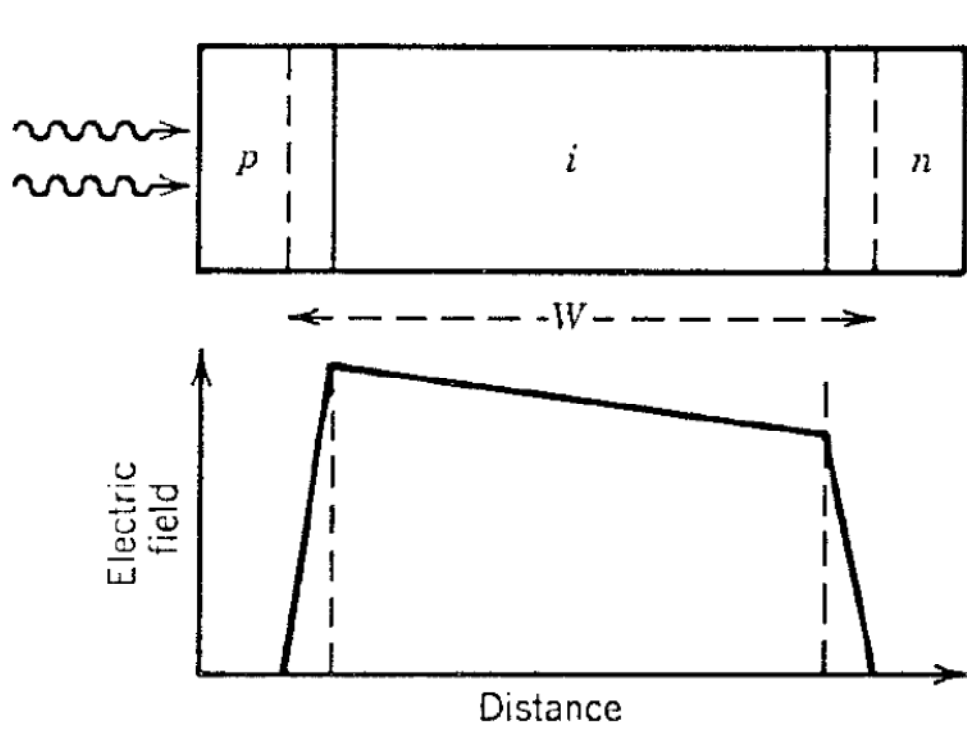
Solución → Fotodiodo con una gran zona de carga de espacio →

→ Insertar una capa intrínseca I entre las capas de tipo P y N →

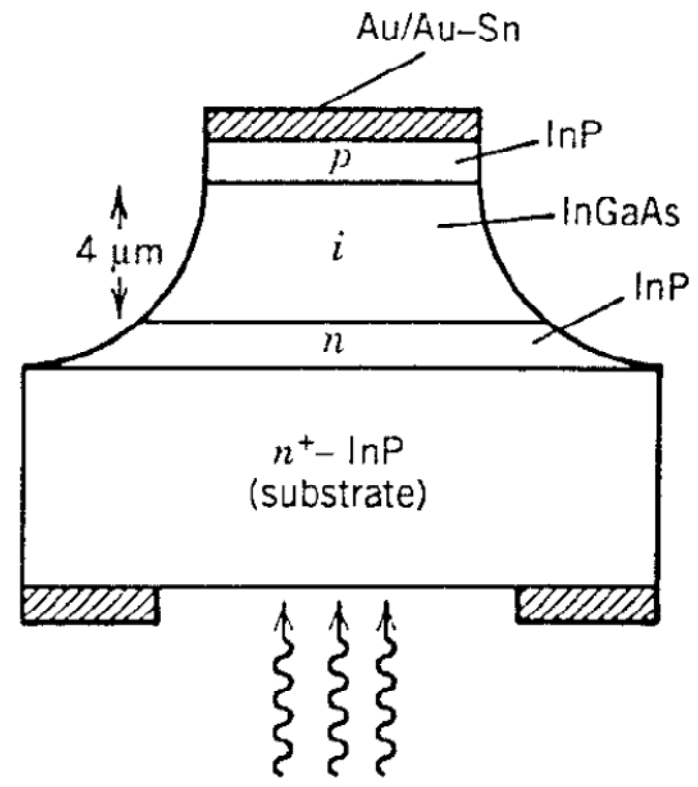
→ Reducir la anchura de las capas de tipo P y N, y aumentar su  $E_g$  →

→  $E_g > h\nu$  → Sin absorción en las capas de tipo P y N

Además otra ventaja adicional →  $C_p$  será muy pequeña



(a)



(b)

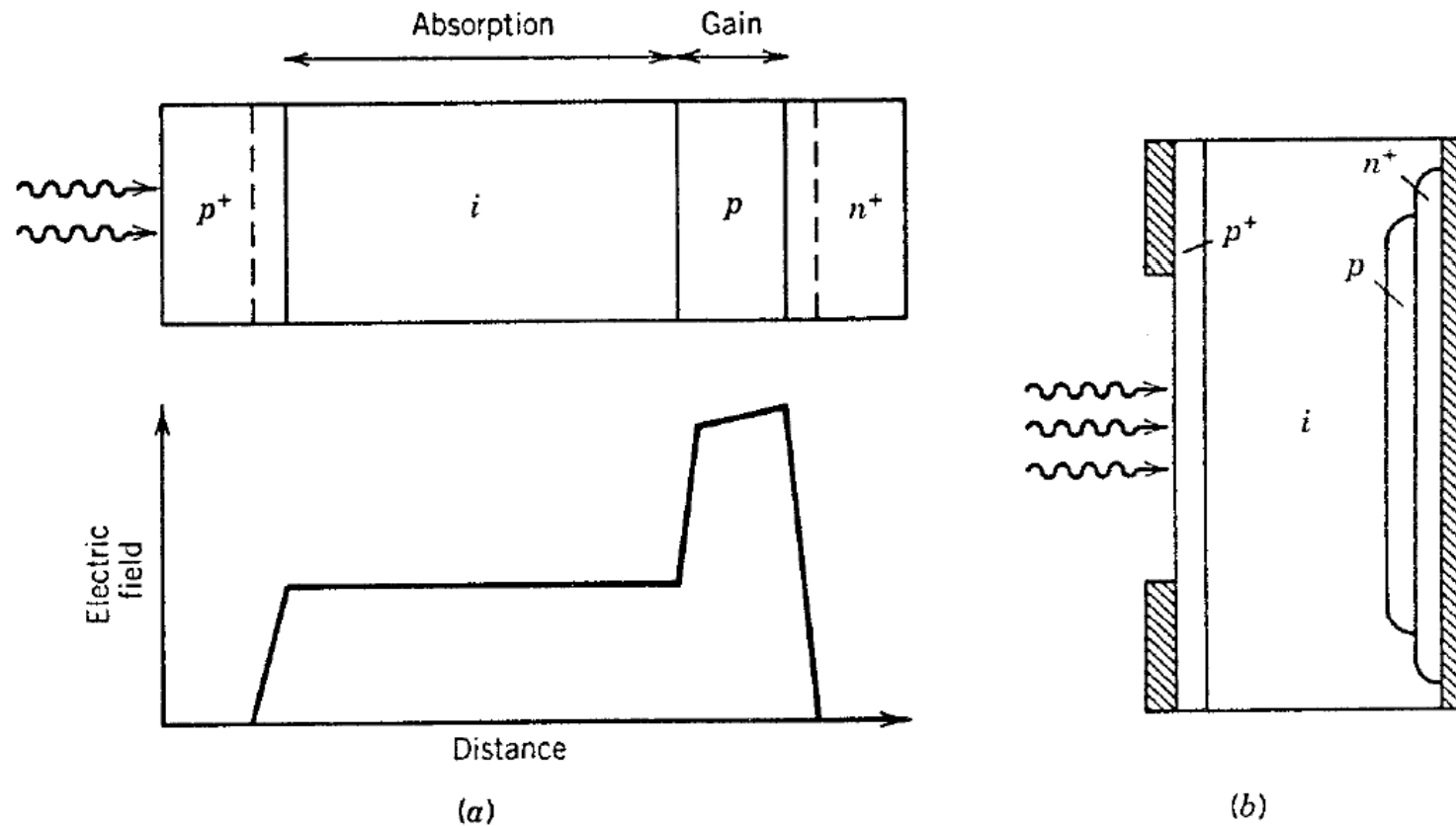
(a) A  $p-i-n$  photodiode together with the electric-field distribution under reverse bias; (b) design of an InGaAs  $p-i-n$  photodiode. (1)

## Characteristics of common $p-i-n$ photodiodes

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	$\lambda$	$\mu\text{m}$	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	$R$	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Quantum efficiency	$\eta$	%	75–90	50–55	60–70
Dark current	$I_d$	nA	1–10	50–500	1–20
Rise time	$T_r$	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Bandwidth	$\Delta f$	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	$V_b$	V	50–100	6–10	5–6

(1)

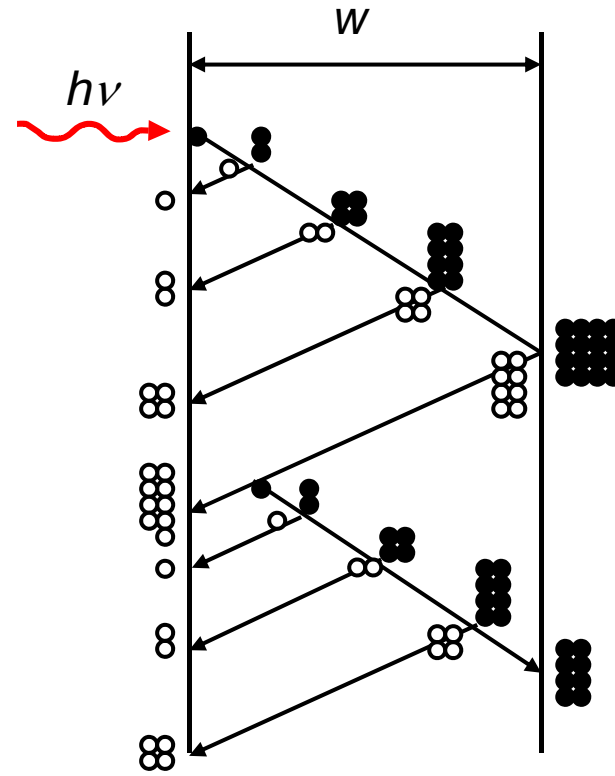
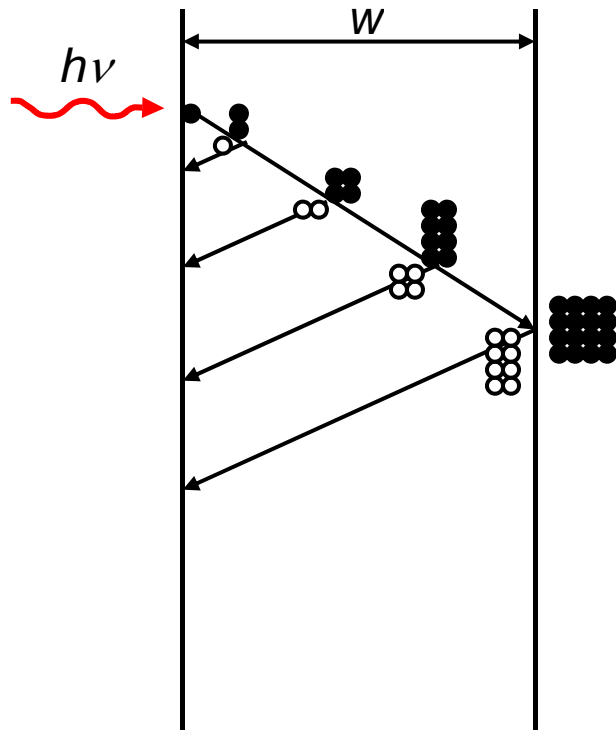
## 4- Fotodiodo APD (Avalanche Photo-Diode)



(a) An APD together with the electric-field distribution inside various layers under reverse bias; (b) design of a silicon reach-through APD.

(1)

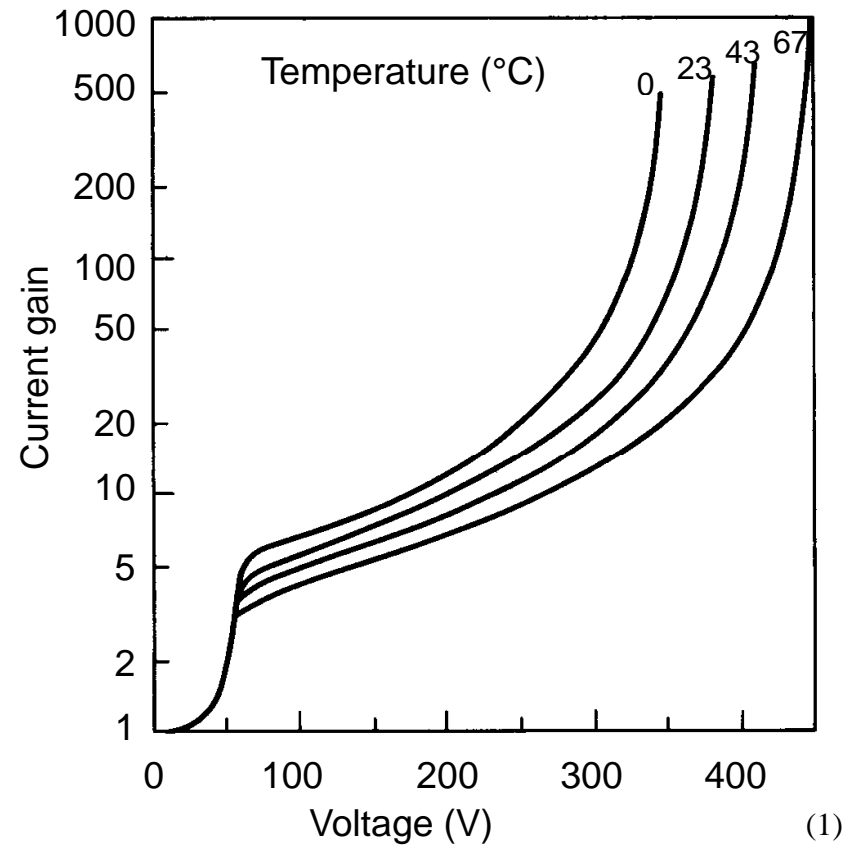
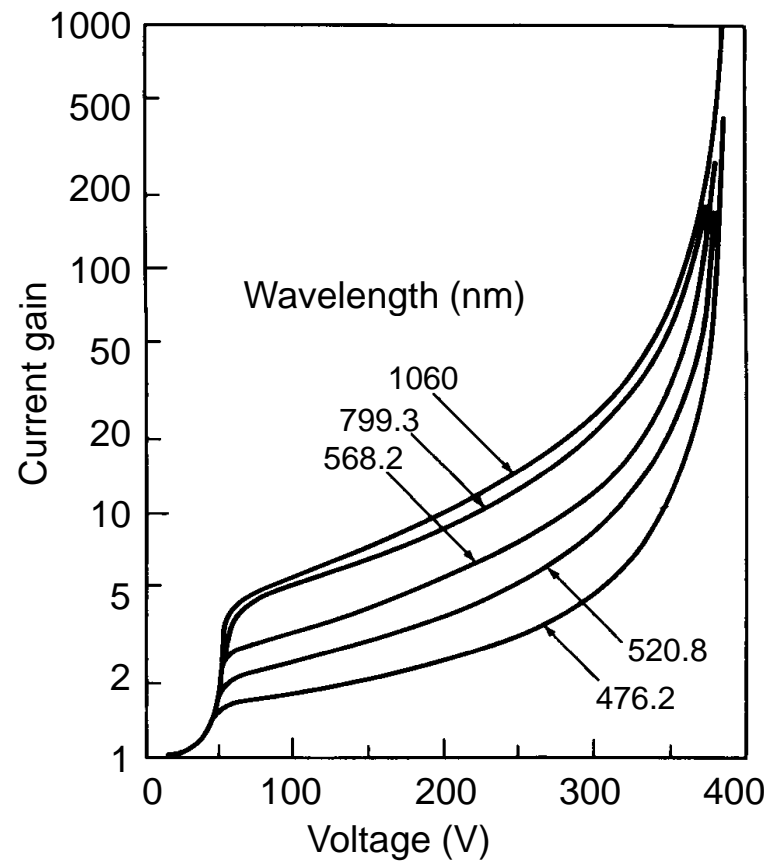
- Incrementan su responsividad por medio de ganancia interna ( $M$ )
- Un único fotón produce un par electrón-hueco, que acelerado mediante un campo eléctrico intenso genera otros nuevos pares a través de ionización por impacto



Ganancia del APD  $\rightarrow$  Multiplicación  $\rightarrow M$

$$I_{APD} = MI_{ph}$$

$$\mathcal{R}_{APD} = M\mathcal{R}$$



El tiempo de respuesta del APD depende de:

- Tiempo de tránsito de los portadores por la región de absorción.
- Tiempo empleado por los portadores en realizar el proceso de multiplicación por avalancha.
- Constante de tiempo RC (capacidad de la unión y resistencias internas y externas).

Ganancias pequeñas → el tiempo predominante es el de tránsito

Ganancias grandes → el tiempo predominante es el de multiplicación por avalancha.

Producto Ganancia-Ancho de Banda constante → factor de mérito

No se puede utilizar APDs de alta ganancia para sistemas de elevada tasa binaria.

## Characteristics of common APDs

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	$\lambda$	$\mu\text{m}$	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	$R_{\text{APD}}$	A/W	80–130	3–30	5–20
APD gain	$M$	—	100–500	50–200	10–40
$k$ -factor	$k_A$	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Dark current	$I_d$	nA	0.1–1	50–500	1–5
Rise time	$T_r$	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Bandwidth	$\Delta f$	GHz	0.2–1	0.4–0.7	1–10
Bias voltage	$V_b$	V	200–250	20–40	20–30

(1)

## PIN versus APD

### Ventajas del APD:

- Mejora la sensibilidad del receptor entre 5 y 15dB

### Inconvenientes del APD:

- Mas complejo de fabricar
- Ganancia aleatoria → ruido adicional
- Alta tensión de polarización
- Ganancia muy dependiente de la temperatura.
- Menores anchos de banda

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