

EL FOTODIODO DE AVALANCHA (APD)

•PARA UNA OPERACIÓN CONFIABLE, TODOS LOS DETECTORES REQUIEREN DE CIERTA CORRIENTE MÍNIMA:

•**LA EXIGENCIA DE NECESIDAD DE UNA CORRIENTE MÍNIMA,**

•SE CONVIERTE EN UNA EXIGENCIA DE NECESIDAD DE POTENCIA MÍNIMA, DADA POR:

$$P_{in} = \frac{I_p}{R}$$

•SE PREFIERE EL USO DE DETECTORES CON UN ELEVADO FACTOR DE FOTOSENSIBILIDAD “R”.

•**DEBIDO A QUE REQUIEREN MENOR POTENCIA ÓPTICA.**

•EN LOS FOTODIODOS PIN EL FACTOR DE FOTOSENSIBILIDAD ESTÁ LIMITADO POR:

$$R = \frac{\eta q}{h\nu}$$

•ALCANZA UN VALOR MÁXIMO PARA:

$$\eta = 1 \text{ con } R = \frac{q}{h\nu}$$

•EL FOTODIODO DE AVALANCHA PRESENTA UN ALTO VALOR DE “R”.

•ESTÁN DISEÑADOS PARA GENERAR UNA GANANCIA INTERNA DE CORRIENTE.

•LOS FOTODIODOS DE AVALANCHA SE USAN SI LA POTENCIA RESERVADA PARA EL RECEPTOR ESTÁ LIMITADA.

IONIZACIÓN IMPACT

•ES EL FENÓMENO FÍSICO EN EL QUE SE FUNDAMENTA LA GANANCIA DE CORRIENTE INTERNA.

•BAJO DETERMINADAS CONDICIONES, UN ELECTRÓN ACELERADO ADQUIERE SUFICIENTE ENERGÍA PARA GENERAR UN NUEVO PAR ELECTRÓN-HUECO.

•EN EL MODELO DE BANDAS, EL ELECTRÓN ENERGIZADO ENTREGA UNA PARTE DE SU ENERGÍA CINÉTICA A OTRO ELECTRÓN EN LA BANDA DE VALENCIA, EL CUÁL APARECE EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN DEJANDO UN HUECO EN LA BANDA DE VALENCIA.

EL RESULTADO NETO DE LA IONIZACIÓN IMPACT

- UN **ELECTRÓN PRIMARIO** SÓLO, GENERADO POR MEDIO DE LA ABSORCIÓN DE UN FOTÓN **GENERA MUCHOS ELECTRONES Y HUECOS SECUNDARIOS**.
- LOS CUALES CONTRIBUYEN EN SU TOTALIDAD A **INTENSIFICAR LA CORRIENTE DEL FOTODIODO**.
- DE LA MISMA MANERA UN **HUECO PRIMARIO** PUEDE GENERAR TAMBIÉN **PARES ELECTRÓN-HUECO SECUNDARIOS**, QUE CONTRIBUYEN CON LA CORRIENTE DEL FOTODIODO.

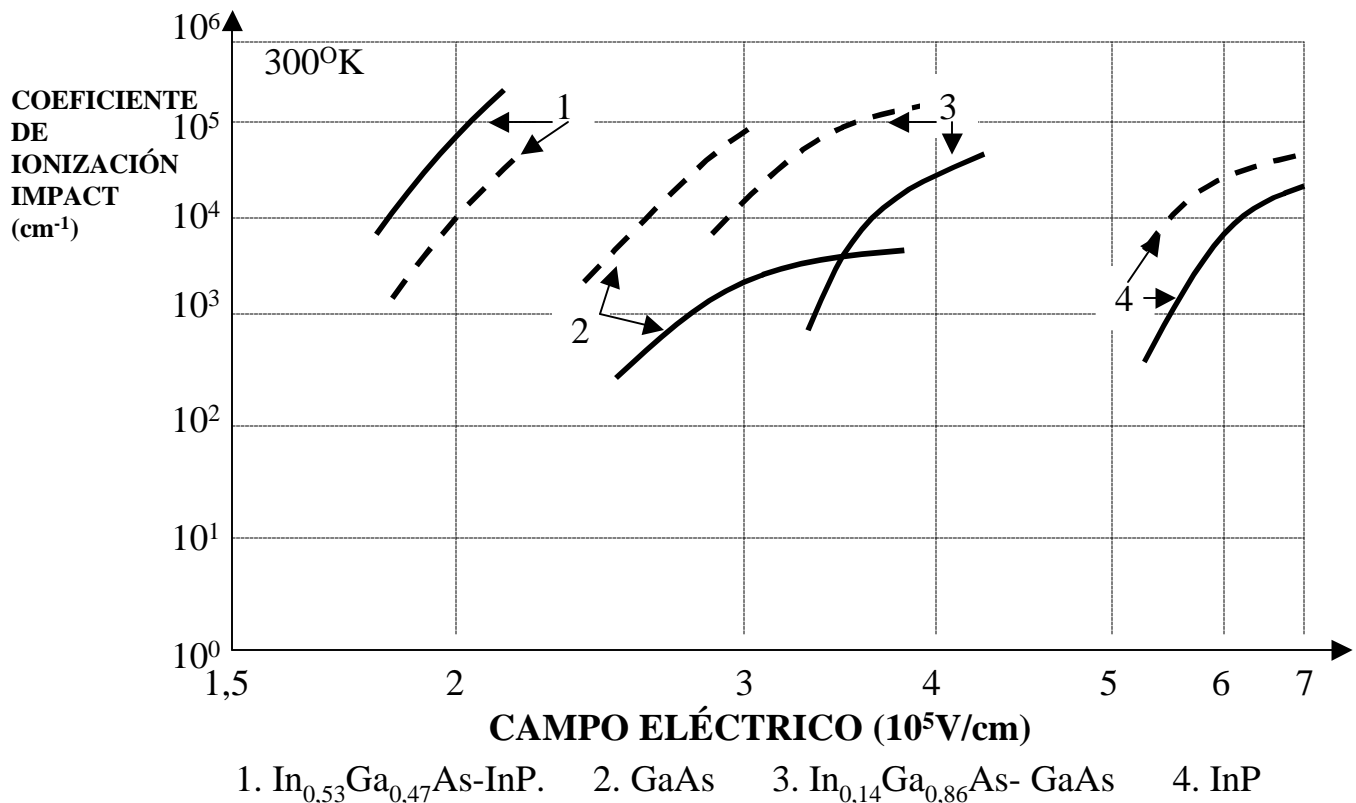
LA VELOCIDAD DE GENERACIÓN

- ESTÁ CONTROLADA POR DOS PARÁMETROS DENOMINADOS: **COEFICIENTES DE IONIZACIÓN IMPACT:**

α_e = para los electrones

α_h = para los huecos.

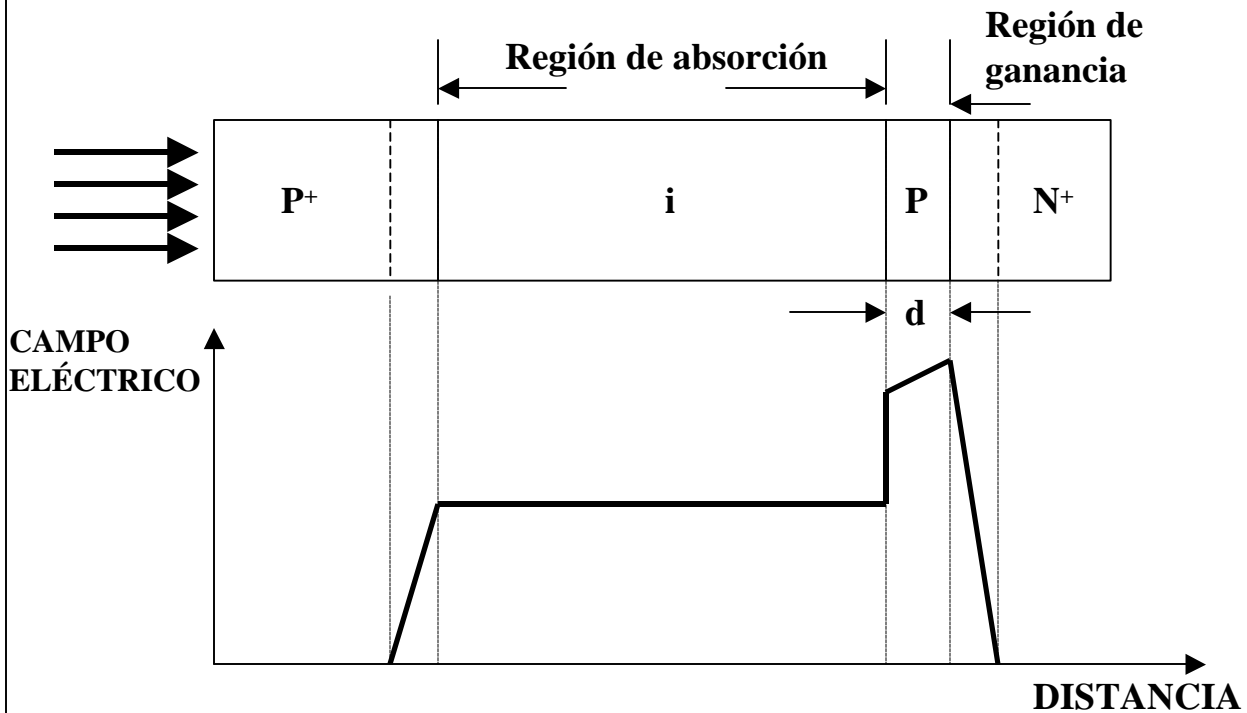
- LOS VALORES DE α_e Y α_h DEPENDE DE:
 - DEL MATERIAL SEMICONDUCTOR.
 - DEL CAMPO ELÉCTRICO QUE ACELERA A ELECTRONES Y HUECOS.



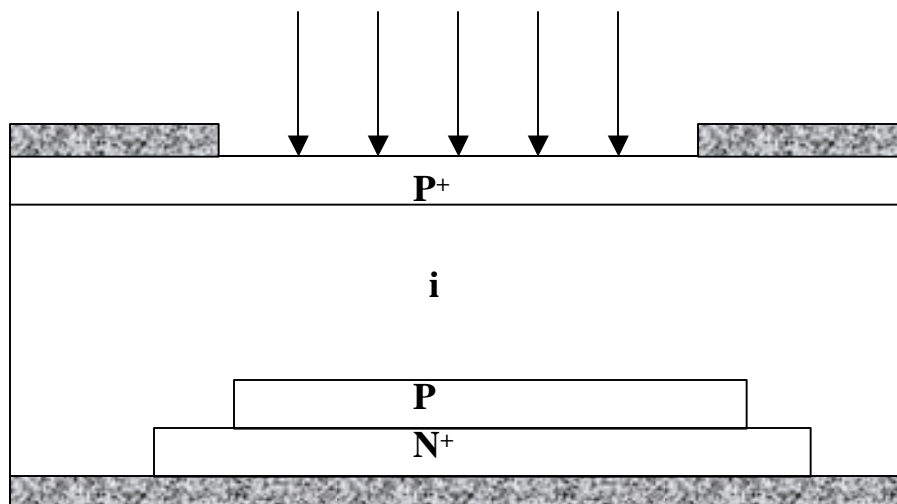
DIFERENCIA ENTRE EL DIODO DE AVALANCHA Y EL FOTODIODO PIN

- SE AGREGA UNA **CAPA ADICIONAL**
- EN ESTA CAPA SE GENERAN LOS PARES ELECTRÓN-HUECO SECUNDARIOS POR EFECTO DE LA IONIZACIÓN IMPACT.

ESTRUCTURA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA



FOTODIODO DE AVALANCHA DE SILICIO



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL FOTODIODO DE AVALANCHA

• EN LA CAPA INTERMEDIA TIPO “P” SITUADAS ENTRE LAS REGIONES TIPO “I” Y TIPO N⁺ EXISTE UN CAMPO ELÉCTRICO MUY INTENSO.

• ESTA CAPA INTERMEDIA SE DENOMINA: **REGIÓN DE GANANCIA O CAPA DE MULTIPLICACIÓN**, DONDE SE GENERA PARES ELECTRÓN-HUECO A TRAVÉS DE LA **IONIZACIÓN IMPACT**.

• LA REGIÓN “I” ACTUA COMO ZONA VACIAMIENTO.

• AQUÍ SON ABSORBIDOS LA MAYOR PARTE DE LOS FOTONES INCIDENTES GENERANDO PARES ELECTRON-HUECOS PRIMARIOS.

• GENERANDO PARES ELECTRÓN-HUECO SECUNDARIOS.

• SE PRODUCE UNA GANANCIA DE CORRIENTE

CÁLCULO DE LA GANANCIA DE CORRIENTE PARA FOTODIODOS DE AVALANCHA.

• SE PARTE DE DOS ECUACIONES QUE CONTROLAN EL FLUJO DE CORRIENTE DENTRO DE LA REGIÓN DE MULTIPLICACIÓN.

$$\frac{di_e}{dx} = \alpha_e i_e + \alpha_h i_h; \quad -\frac{di_h}{dx} = \alpha_e i_e + \alpha_h i_h$$

• i_e = CORRIENTE DE ELECTRONES.

• i_h = CORRIENTE DE HUECOS.

• EL SIGNO NEGATIVO SIGNIFICA QUE LAS CORRIENTES DE HUECOS TIENEN UNA **DIRECCIÓN OPUESTA A LAS CORRIENTES DE ELECTRONES**.

LA CORRIENTE TOTAL

• SE MANTIENE CONSTANTE EN CADA PUNTO DENTRO DE LA REGIÓN DE MULTIPLICACIÓN: $I = i_e(x) + i_h(x)$

• SUSTITUYENDO i_h POR $I - i_e$ SE OBTIENE: $\frac{di_e}{dx} = (\alpha_e - \alpha_h)i_e + \alpha_h I$

• PARA UN CAMPO ELÉCTRICO NO UNIFORME EN LA REGIÓN DE GANANCIA:

• α_e y α_h SE HACEN DEPENDIENTES DE “x”.

ANÁLISIS PARA EL CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

•CONDICIONES:

- SE SIMPLIFICA EL CÁLCULO.
- α_e y α_h SE TRATAN COMO CONSTANTES.
- SE ASUME COMO VÁLIDO: $\alpha_e > \alpha_h$

•EL PROCESO DE LA AVALANCHA:

- SE INICIA CON LOS ELECTRONES QUE PENETRAN EN LA REGIÓN DE GANANCIA DE:

•ESPESOR “d”.

•PARA $x=0$.

•CONDICIÓN: SE CONSIDERA QUE SÓLO ELECTRONES ATRAVIESAN LA SUPERFICIE DE FRONTERA PARA ENTRAR EN LA REGIÓN N⁺:

•POR LO TANTO: $i_h(d) = 0$

•LA CONDICIÓN DE FRONTERA PARA $x=d$. $i_e(d) = I$

•EL FACTOR DE MULTIPLICACIÓN “M”

- SE DEFINE COMO:

$$M = \frac{i_e(d)}{i_e(0)} \text{ dada por : } M = \frac{1 - k_A}{e^{-(1-k_A)\alpha_e d} - k_A} \text{ con } k_A = \frac{\alpha_h}{\alpha_e}$$

LA GANANCIA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA

- DEPENDE DIRÉCTAMENTE DE LA RELACIÓN: k_A DE LOS COEFICIENTES DE IONIZACIÓN.

•SI $\alpha_h = 0 \rightarrow k_A = \frac{\alpha_h}{\alpha_e} = 0$

•SIGNIFICA QUE SÓLO ELECTRONES INTERVIENEN EN EL PROCESO DE AVALANCHA.

•LA GANANCIA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA SE INCREMENTA EXPONENCIALMENTE: $M = e^{\alpha_e d}$

LA RUPTURA POR AVALANCHA

- PARA LA CONDICIÓN: $\alpha_h = \alpha_e \Rightarrow k_A = 1$ y $M = \frac{1}{1 - \alpha_e d}$
- LA GANANCIA SE HACE INFINITA PARA: $\alpha_e d = 1$

•ESTA ES LA CONDICIÓN DE RUPTURA POR AVALANCHA.

EL RENDIMIENTO DEL FOTODIODO DE AVALANCHA

- UNA ELEVADA GANANCIA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA. SE LOGRA:
 - CON UNA REGIÓN DE GANANCIA MUY DELGADA: $d \rightarrow 0$
 - SI α_e Y α_h SE APROXIMAN: $\alpha_e \approx \alpha_h$
- EL RENDIMIENTO MEJORA PARA FOTODIODOS DE AVALANCHA DONDE: $\alpha_e \gg \alpha_h$ O $\alpha_h \gg \alpha_e$
 - CON LO CUÁL EL PROCESO DE AVALANCHA ES DOMINANTE SÓLO UN TIPO DE PORTADOR DE CARGA.
 - CON ESTA TÉCNICA MEJORA LA RELACIÓN SEÑAL-RUIDO DEL RECEPTOR.

EL FACTOR DE FOTOSENSIBILIDAD DL FOTODIODO DE AVALANCHA (APD)

- EL PROCESO DE AVALANCHA EN EL FOTODIODO DE AVALANCHA ES DE NATURALEZA RUIDOSO Y ALEATORIO.
 - POR LO QUE EL FACTOR DE GANANCIA FLUCTUA ALREDEDOR DE UN VALOR PROMEDIO.
 - EL VALOR M EN LA ECUACIÓN ANTERIOR SE REFIERE AL VALOR PROMEDIO.

EL ANCHO DE BANDA INTRÍNSECO DEL FOTODIODO DE AVALANCHA.

- DEPENDE DEL FACTOR DE MULTIPLICACIÓN “M”.
- EL TIEMPO DE TRÁNSITO EN FOTODIODOS DE AVALANCHA NO ESTÁ DETERMINADO POR: $\tau_{tr} = \frac{W}{v_d}$;
 - W =ANCHURA DE VACIAMIENTO
 - v_d =VELOCIDAD DE ARRASTRE.
- EL TIEMPO DE TRÁNSITO DEL FOTODIODO DE AVALANCHA SE INCREMENTA CONSIDERÁBLEMENTE.
 - DADO QUE LA GENERACIÓN Y ACUMULACIÓN DE PARES ELECTRÓN-HUECO SECUNDARIOS TOMA UN TIEMPO ADICIONAL.

LA GANANCIA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA PARA ALTAS FRECUENCIAS.

- LA GANANCIA DECRECE PARA ALTAS FRECUENCIAS.
 - DEBIDO AL INCREMENTO DEL TIEMPO DE TRÁNSITO.
 - POR LO TANTO EL INCREMENTO DE τ_{tr} LIMITA EL ANCHO DE BANDA.
 - POR LO TANTO, EL INCREMENTO DE τ_{tr} LIMITA EL ANCHO DE BANDA.
- LA DISMINUCIÓN $M(\omega)$ ESTÁ DADA POR:

$$M(\omega) = M_0 \left[1 + (\omega \tau_e M_0)^2 \right]^{-1/2}$$
- $M_0 = M(0)$ =GANANCIA EN BAJA FRECUENCIA.
- τ_e =TIEMPO DE TRÁNSITO EFECTIVO.
 - DEPENDE DE LA RELACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE IONIZACIÓN.

VALORES TÍPICOS

$$\alpha_h < \alpha_e \text{ y } \tau_e = C_A k_A \tau_{tr}; C_A \approx 1; \text{ asumiendo } \tau_{RC} \ll \tau_e$$

- EL ANCHO DE BANDA DEL FOTODIODO DE AVALANCHA ESTÁ DADO POR:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi \tau_e M_0}$$

- ESTA RELACIÓN MUESTRA EL INTERCAMBIO ENTRE LA GANANCIA DEL APD “M” Y EL ANCHO DE BANDA Δf (VELOCIDAD CONTRA DENSIBILIDAD).
- ESTO MUESTRA LA VENTAJA DEL USO DE MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA LOS CUALES: $k_A \ll 1$

**LA TABLA COMPARA LAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN
DEL Si, Ge e InGaAs EN FOTODIODOS DE AVALANCHA (APD)**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	Si	Ge	InGaAs
LONGITUD DE ONDA	λ	μm	0,4 - 1,1	0,8 - 1,8	1,0 - 1,7
FACTOR DE FOTOSENSIBILIDAD	R_{APD}	A/W	80 - 130	3 - 30	5 - 20
GANANCIA APD	M	—	100 - 500	50 - 200	10 - 40
FACTOR K	k_A	—	0,02 - 0,05	0,7 - 1,0	0,5 - 0,7
CORRIENTE DE OSCURIDAD	I_d	nA	0,1 - 1	50 - 500	1 - 5
TIEMPO DE ASCENSO	T_r	ns	0,1 - 2	0,5 - 0,8	0,1 - 0,5
ANCHO DE BANDA	Δf	GHz	0,2 - 1,0	0,4 - 0,7	1 - 3
TENSIÓN DE POLARIZACIÓN.	V_b	V	200 - 250	20 - 40	20 - 30