

Fotodiodos: PN, PIN, APD

El fotodiodo de juntura PN

El fotodiodo se construye a partir del contacto de dos materiales semiconductores dopados con impurezas para generar un material con portadores de carga negativa (tipo n), y carga positiva (tipo p). Al ponerlos en contacto se genera un reordenamiento de las cargas generando una cara de cargas positivas y otra de cargas negativas, la zona del medio entre ellas se denomina la zona de depleción con una capacidad de juntura C_j (Figura 1). Al incidir la luz en el fotodiodo, los pares hueco-electrón generados debido a la excitación de las moléculas por fotones de energía mayor a la energía del *bandgap* del material, se genera una fotocorriente de intensidad:

$$I_L = R_\lambda P_\lambda \quad [1]$$

Donde I_L es la fotocorriente, R_λ la respuesta del fotodiodo en [A/W] y P_λ la potencia óptica incidente en [W].

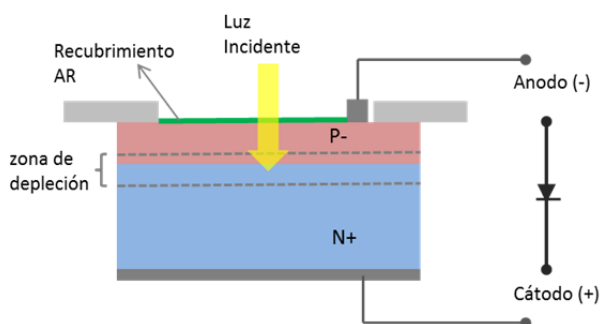


Figura 1. Esquema del fotodiodo semiconductor.

Linealidad

La linealidad de la respuesta del fotodiodo dada por la relación [1] está asegurada en primera instancia por la capacidad del material en generar los pares de hueco-electrón que se generan en la zona de depleción. Esta depende de cada fotodiodo, y para uno de silicio vale típicamente:

$$I = \frac{5 \times 10^{-5}}{R} W/mm^2 \quad [2]$$

Donde I es la irradiancia, y R la respuesta del material. Cabe destacar que un láser de 1 mW, con un ancho de cintura de haz de 0.5 mm supera ampliamente este valor (hasta más de 100 veces).

En segunda instancia la linealidad va a estar determinada por el circuito conversor de corriente a tensión que utilizemos (Figura 2).

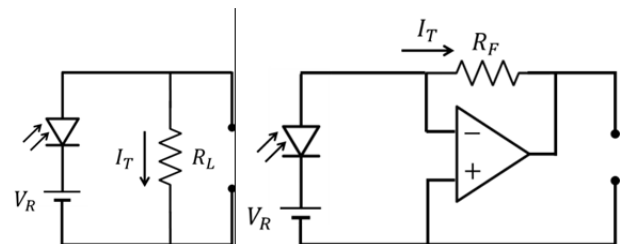


Figura 2. Circuitos de conversión de corriente a tensión. El primero utiliza una resistencia de carga, y el segundo un opamp (amplificador de transimpedancia).

En este caso la linealidad en la tensión estará asegurada siempre y cuando la potencia sea menor a la potencia de saturación (P_{SAT}):

$$P_{SAT} = \frac{V_R + V_{bi}}{(R_L + R_S) R_\lambda} \quad [3]$$

Donde V_R es la tensión en inversa, V_{bi} la caída de tensión en la juntura (0.2-0.3 V), R_L la resistencia de carga, y R_S la resistencia de la juntura ($\approx 5 \Omega$). Es decir que podemos aumentar el rango dinámico del sensor aumentando la tensión en inversa, o

reduciendo la resistencia de carga (este es el caso de circuito que utiliza el opamp).

Ancho de banda

El ancho de banda está determinado por los tiempos de respuesta característicos del fotodiodo:

$$t = \sqrt{t_{drift}^2 + t_{difusión}^2 + t_{RC}^2} \quad [4]$$

Donde t_{drift} es el tiempo de viaje del par hueco electrón en la zona de depleción, $t_{difusión}$ el tiempo de viaje por fuera de la zona de depleción, y t_{RC} es el tiempo de carga del circuito $R_L C_j$, siendo R_L la resistencia de carga y C_j la capacidad de la juntura PN. Esta última además depende de la tensión de inversa. Esto se debe a que cuando se aumenta la tensión de inversa se aumenta el ancho de la zona de depleción reduciendo la capacidad del fotodiodo.

$$C_j = \frac{A \epsilon_0 \epsilon_{mat}}{W_d} \quad [5]$$

$$W_d = \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_{mat} \mu \rho (V_R + V_{bi})} \quad [6]$$

Donde A es el área del fotodiodo, ϵ_{mat} la permitividad del material; y W_d el ancho de la zona de depleción, μ el factor movilidad de los e^- , ρ la resistividad.

Ruido

La primera fuente de ruido es de tipo térmico debido a la agitación térmica de los portadores de carga en los conductores (ruido de Johnson-Nyquist) y es de distribución gaussiana siguiendo la relación:

$$I_{Rh} = \sqrt{\frac{4KT B_w}{R_{sh}}} \quad [7]$$

Donde T es la temperatura, B_w es el ancho de banda y R_{sh} la resistencia de *shunt* del fotodiodo (típicamente $> 10 \text{ M}\Omega$).

La segunda fuente de ruido es el ruido de disparo (*shot noise*) asociado a la medición de la corriente y a las pequeñas fluctuaciones de ésta debido a la naturaleza discreta de los portadores de carga (e^-). El ruido de disparo está asociado tanto a la fotocorriente como a la corriente de oscuridad:

$$I_s = \sqrt{2q B_w (I_L + I_{DC})} \quad [8]$$

Si bien la distribución del ruido de disparo es poissoniana, para los niveles de señal medibles por el fotodiodo, la distribución puede aproximarse a una gaussiana.

Se distingue también el ruido a baja frecuencia de tipo $1/f$, que es relevante a frecuencias menores a 100 Hz:

$$I_{1/f} \sim I \sqrt{\frac{B_w}{f}} \quad [9]$$

El ruido total estará dado entonces la suma de todas las fuentes de ruido, donde predominará el de mayor valor:

$$Total\ Noise = \sqrt{I_{Rh}^2 + I_s^2 + I_{1/f}^2} \quad [10]$$

Relación señal a ruido (SNR)

En caso que podamos despreciar el ruido térmico y el ruido de baja frecuencia, el ruido estará dado principalmente por el ruido estadístico, de manera que la SNR:

$$SNR = \frac{Signal}{Total\ Noise} \approx \frac{I_L}{Shot\ Noise} \sim \sqrt{I_L} \quad [11]$$

Es decir que la única manera de mejorar la SNR es aumentando la intensidad de luz detectada, puesto que cualquier amplificador utilizado a la salida del fotodiodo amplificará también el ruido.

Fotodiodo PIN

El segundo tipo de fotodiodo de interés es el PIN, el cual agrega una capa de material intrínseco fotosensible entre las junturas PN (Figura 3). Este diseño además de mejorar la respuesta del detector, ensancha la zona de depleción reduciendo la capacidad de juntura C_j . Permitiendo así un aumento del ancho de banda a mismos niveles de sensibilidad respecto a un fotodiodo de tipo PN.

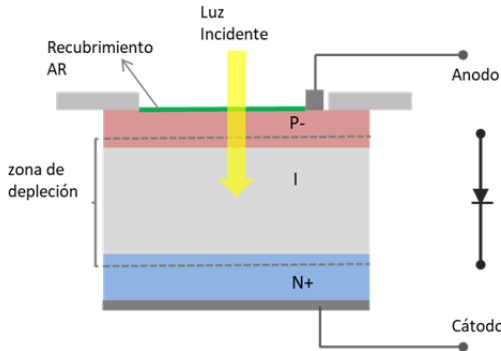


Figura 3. Esquema de fotodiodo PIN.

Fotodiodo de avalancha (APD)

El fotodiodo de avalancha trabaja con tensiones inversas cercanas al umbral de daño del fotodiodo. De esta forma se aumenta la intensidad del campo eléctrico en la zona de depleción, promoviendo que los pares huecos-electrón generados en la zona adquieran energías necesarias para generar nuevos portadores por efecto avalancha (Figura 4).

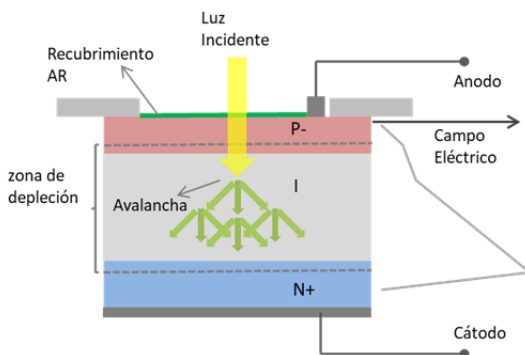


Figura 4. Esquema de fotodiodo de avalancha APD.

La fotocorriente entonces viene amplificada por un factor de ganancia M , que depende de la tensión inversa aplicada, siguiendo la relación:

$$I_L = R_\lambda P_\lambda M \quad [12]$$

Típicamente los factores de multiplicación M van de 10 para InGaAs hasta 500 para los fotodiodos de silicio. En el APD se distinguen dos contribuciones a la corriente oscura I_{DC} , una de superficie (I_{DS}) y otra de volumen (I_{DB}) que sufre también el fenómeno de avalancha de modo que:

$$I_{DC} = I_{DS} + I_{DB}M \quad [13]$$

Ruido en APD

Al igual que en el fotodiodo de tipo PN, se distinguen los ruidos de tipo térmico y ruido de disparo. El ruido térmico viene dado:

$$I_{RL} = \sqrt{\frac{4kTB_w}{R_L}} \quad [14]$$

Donde R_L es la resistencia de carga del circuito convertidor de tensión a corriente. El ruido de disparo está asociado a la corriente oscura (I_{SDC}) y a la fotocorriente (I_{SL}):

$$I_{SL} = \sqrt{2qR_\lambda P_\lambda M^2 B_w} \quad [15]$$

$$I_{SDC} = \sqrt{2q(I_{DS} + I_{DB}M^2F)B_w} \quad [16]$$

El factor F (*excess noise*) contempla el hecho que el factor de ganancia M no es igual para los huecos (α) y electrones (β). La relación entre F y M se simplifica típicamente con la siguiente relación:

$$F \approx 2 + kM \quad [17]$$

Donde $k = \alpha/\beta$.

Referencias

Las referencias vienen dadas por los principales fabricantes de fotodiodos: Hammamatsu, MellesGriot, PerkinElmer y OSI optoelectronics.

- **CVIMellesGriot.** Fundamentals of power_energy measurement.
- **Hammamatsu.** Characteristics and use of SI APD.
- **Hammamatsu.** Handbook si photodiode.
- **OSIoptoelectronics.** AN Optical Communication Photodiodes and Receivers
- **OSIoptoelectronics.** An Photodiode Parameters Characteristics.
- **PerkinElmer.** Avalanche Photodiodes Users Guide.
- **PerkinElmer.** Photodiodes.