Fotodiodos semiconductores: comparativa entre fotodiodos de juntura PN, PIN, APD

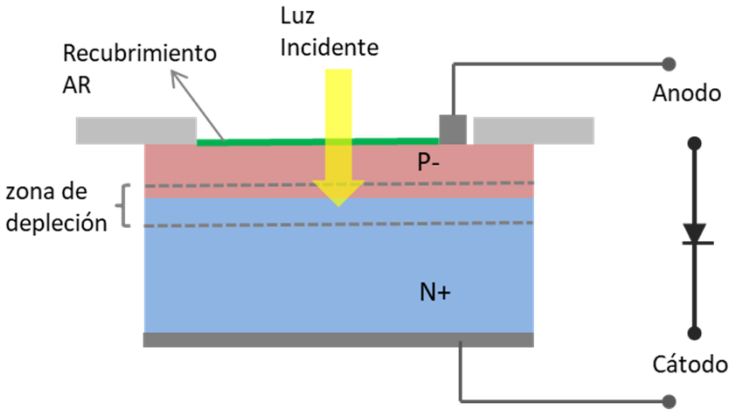
Marco Petriella

Resumen

- Motivaciones
- Fotodiodo de juntura PN
  - Circuito equivalente
  - Linealidad
  - Ruido
  - SNR
- Fotodiodo PIN
- Fotodiodo de avalancha APD
- Comparativa entre sensores

Construcción del fotodiodo

- Al poner en contacto dos materiales de tipo N (5 e- en la banda de valencia) y tipo P (3 e- en la banda de valencia), se observa un reordenamiento de cargas en la superficie de contacto por el fenómeno de **difusión**.
- La superficie de tipo N queda cargada positivamente, y la región P negativamente. Estas dos caras cargadas funcionan como un capacitor, con una capacidad de juntura característica (C_j). La zona del medio es llamada **zona de depleción**.
- Si los fotones incidentes son absorbidos por el material y tienen energía mayor a la energía del *bandgap* entre la banda de valencia y conducción, se genera un nuevo par **hueco-electrón** que contribuye a la **fotocorriente**.
- Debido a la excitación térmica en la zona de juntura se generan aleatoriamente pares de hueco-electrón que contribuyen a la **corriente oscura**.



Construcción del fotodiodo

- La fotocorriente I_L dependerá de manera lineal con la potencia óptica recibida ($\boldsymbol{P_\lambda}$) y la respuesta del sensor a una determinada longitud de onda ($\boldsymbol{R_\lambda}$).

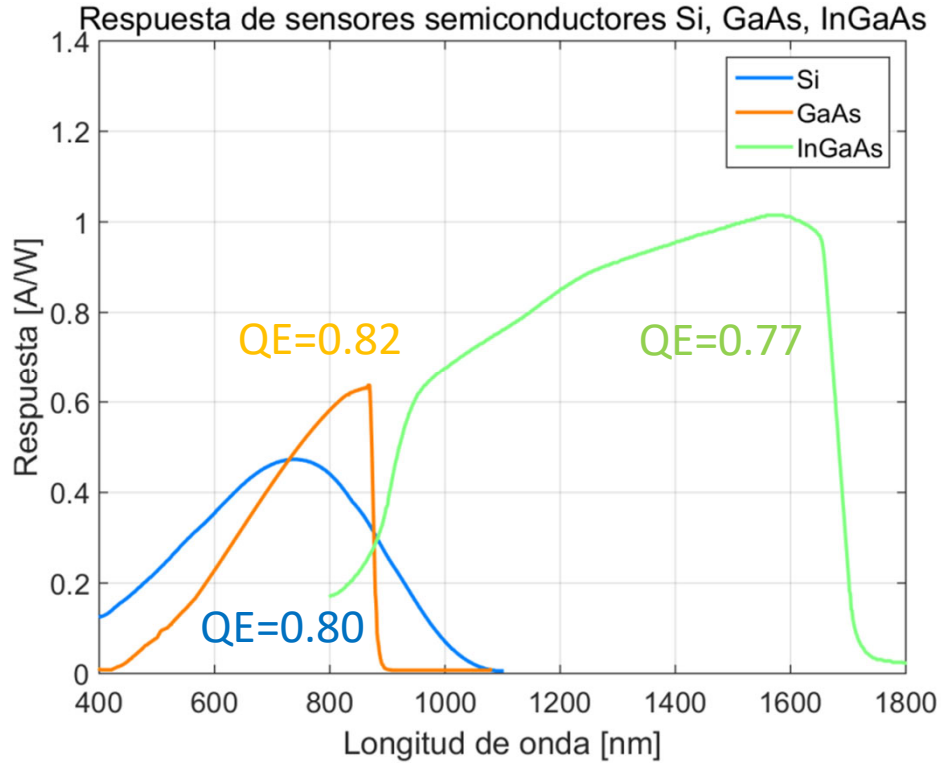
$$\boxed{I_L = R_\lambda P_\lambda}$$

- La respuesta en longitud de onda depende del *bandgap* de cada material. La longitud de onda de corte:

$$\lambda_C = \frac{1240}{E_G}[nm]$$

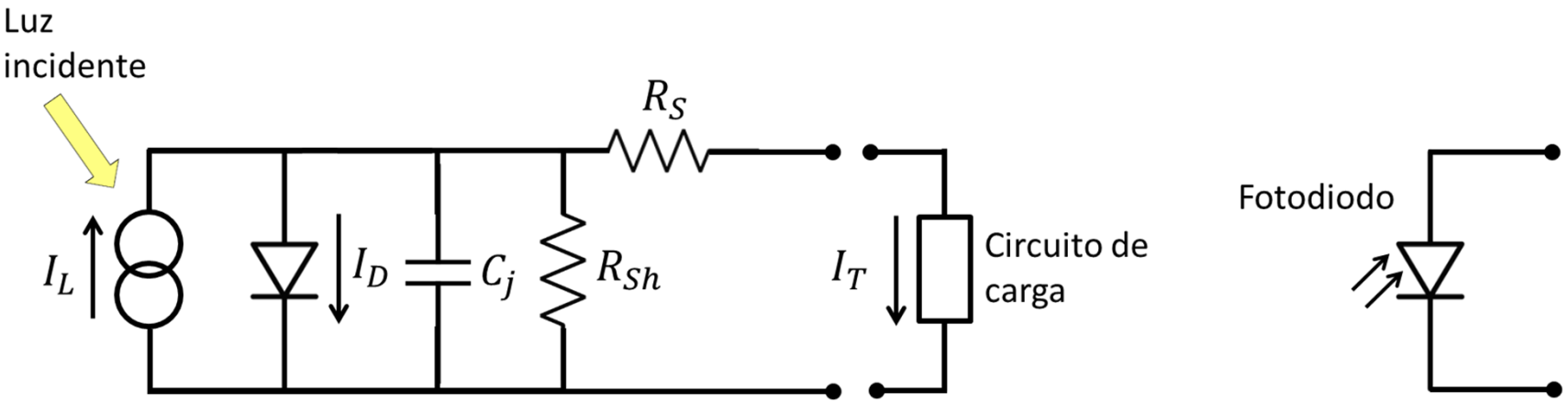
- La eficiencia cuántica (QE) viene definida por:

$$QE = \frac{R_\lambda 1240}{\lambda}[nm]$$



Ref.: Application Notes – OSI Electronics

Circuito equivalente



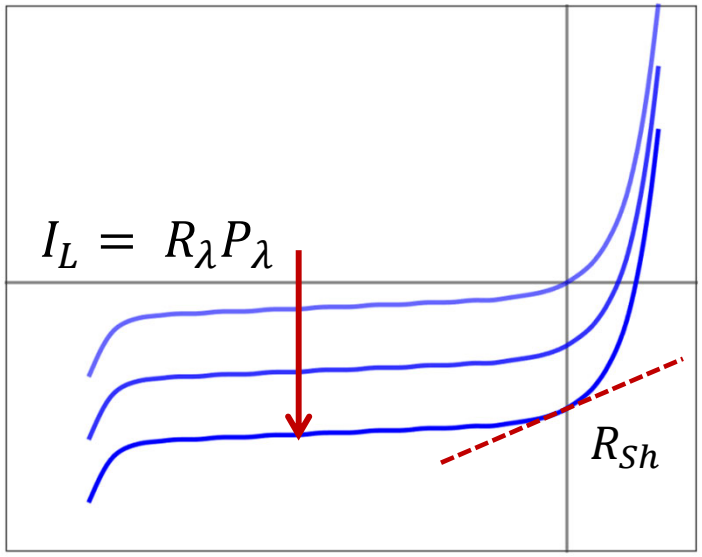
$$I_T = I_{DC}\left(e^{\frac{qV_D}{KT}} - 1\right) - I_L$$

$$I_L = R_\lambda P_\lambda$$

$R_{Sh} \approx 10M\Omega$ → Ruido térmico

$C_j \approx 1pF$ → Tiempo de respuesta

$R_S \approx 5\Omega$ → Resistencia de carga



Linealidad

- Determinada por la cantidad de portadores que el fotodiodo puede entregar en la zona de depleción.

$$Intensidad = 5x10^{-5} A/mm^2 \Rightarrow Intensidad = \frac{5x10^{-5}}{R} W/mm^2$$

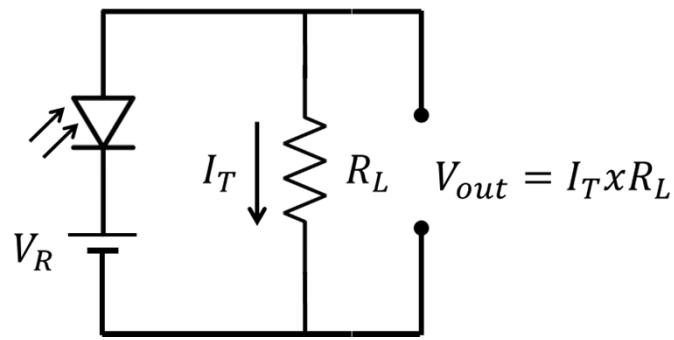
[para el silicio]

- Laser Helio Neon 1 mW, diámetro de spot 0.5 mm $\Rightarrow I = \frac{5x10^{-3}}{R} W/mm^2$
- Luz solar visible (400-700 nm) - zenith $\Rightarrow I = \frac{4x10^{-4}}{R} W/mm^2$
- Haz de 100 nW en un *spot* de radio de 50 µm $\Rightarrow I = \frac{1.2x10^{-5}}{R} W/mm^2$

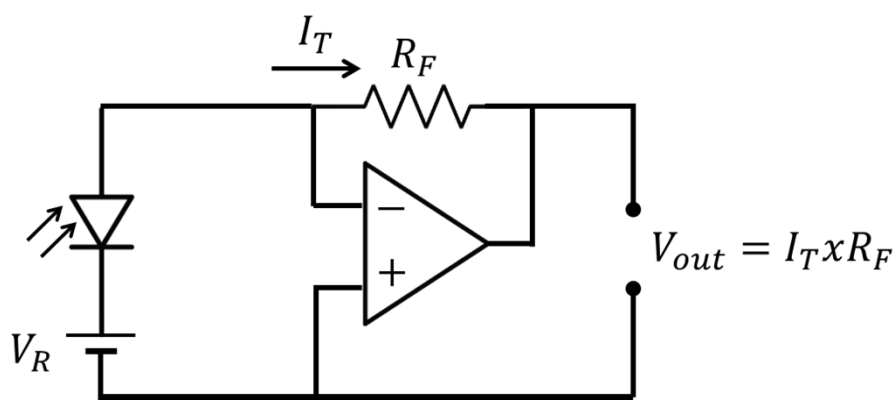
Linealidad

- Determinada por el circuito de carga que utilicemos para la medición de la fotocorriente.

Resistencia de carga

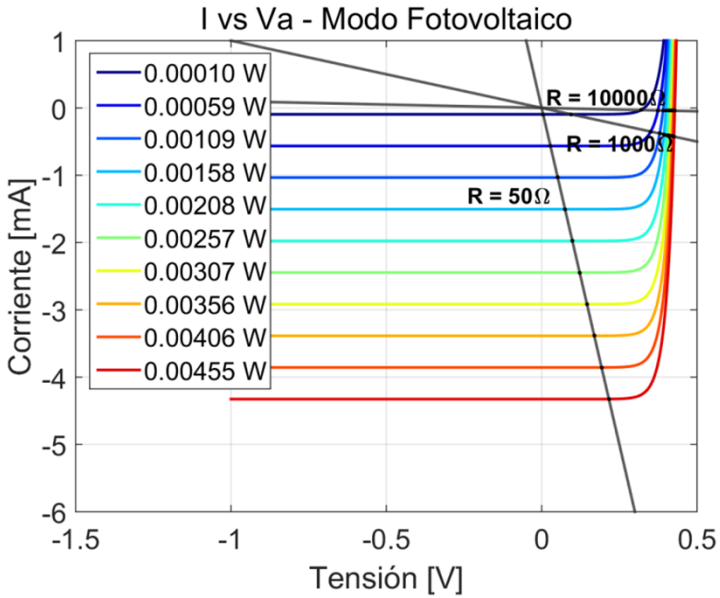


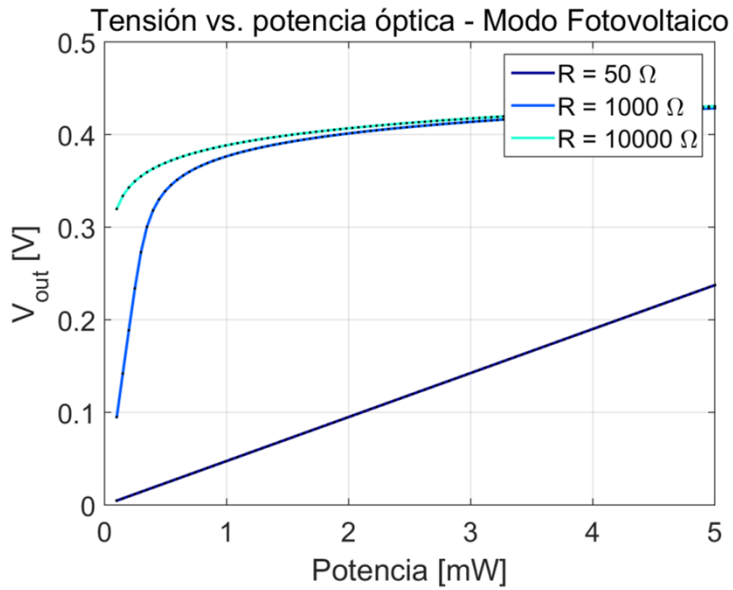
Amplificador de transimpedancia (niveles bajos de luz)

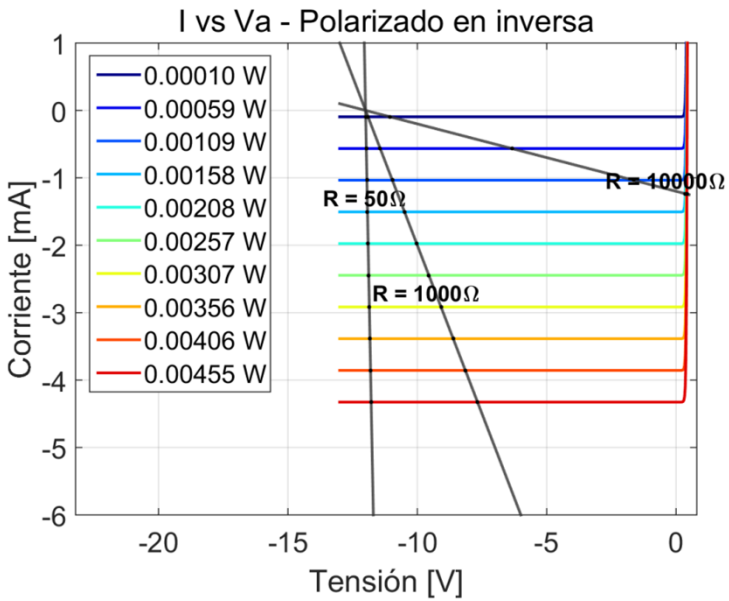


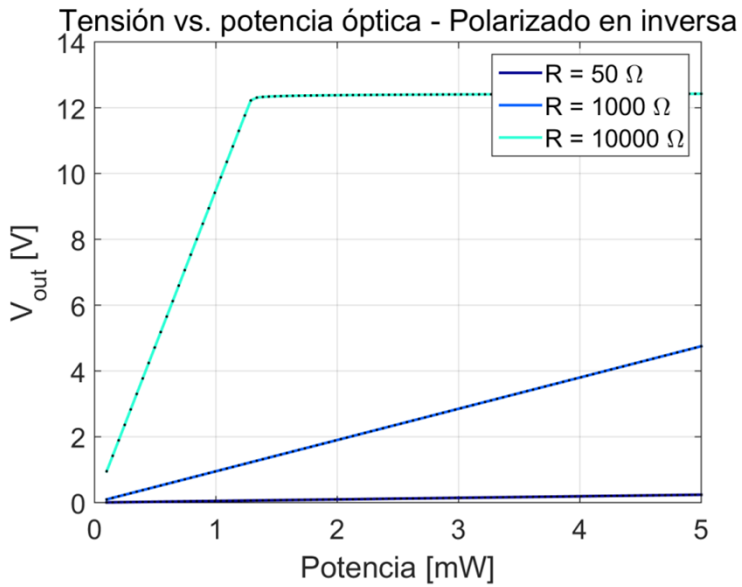
Potencia de saturación: $$P_{SAT} = \frac{V_R + V_{bi}}{(R_L + R_S) R_\lambda}$$

Linealidad









Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros del sensor DET01CFC - Thorlabs

Ancho de banda

El tiempo de respuesta del sensor depende de tres factores:

- Tiempo de difusión del par hueco-electrón por fuera de la zona de depleción. $t_{difusión} \sim 1\mu s$
- Tiempo de viaje del par hueco-electrón en la zona de depleción. $t_{drift} = \frac{W_d^2}{\mu V_R} \sim 1ps$
- Tiempo de respuesta del circuito de carga resistencia-capacitor. t_{RC}

$$t = \sqrt{t_{drift}^2 + t_{difusión}^2 + t_{RC}^2} \quad \Rightarrow \quad BW = \frac{0.35}{t}$$

- Generalmente t_{drift} y t_{RC} compiten entre sí, cuando una crece la otra decrece y viceversa.

Ancho de banda

$$t_{RC} = 2.2 C_j R_L$$

Capacidad de la juntura PN

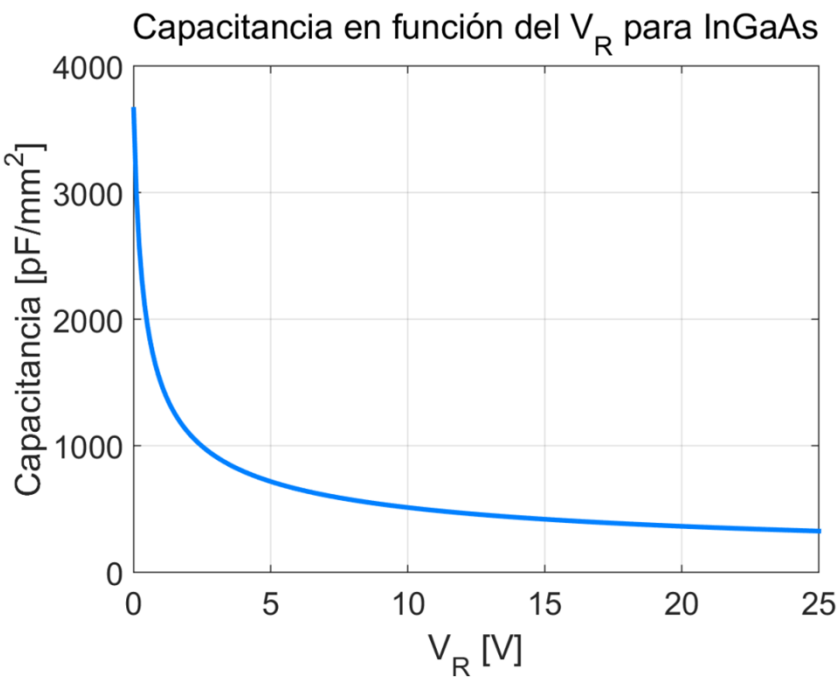
Resistencia de carga (o de *feedback* R_F)

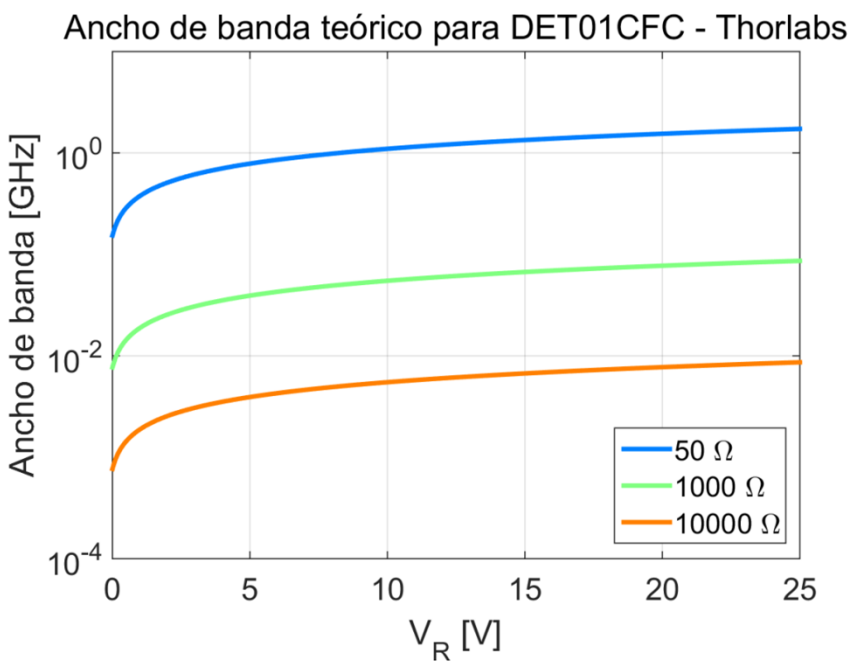
$$\mu_{si} = 1400\ cm^2/\text{Vs}$$

$$\mu_{InGaAs} = 10000\ cm^2/\text{Vs}$$

$$C_j = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_{mat}}{W_d}$$

$$W_d = \sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{mat}\mu\rho(V_R + V_{bi})} \sim 0.1 - 1\ \mu m$$





Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros del sensor DET01CFC - Thorlabs

Ruido

- Ruido térmico o ruido de Johnson debido a la agitación térmica de los portadores (distribución gaussiana, espectro de ruido blanco):

  $$I_{Rh} = \sqrt{\frac{4KTB_w}{R_{Sh}}}$$

- Ruido estadístico o *shot noise* de la fotocorriente y corriente oscura (distribución poissoniana, espectro de ruido blanco):

  $$I_s = \sqrt{2qB_w\,(I_L + I_{\mathrm{DC}})}$$

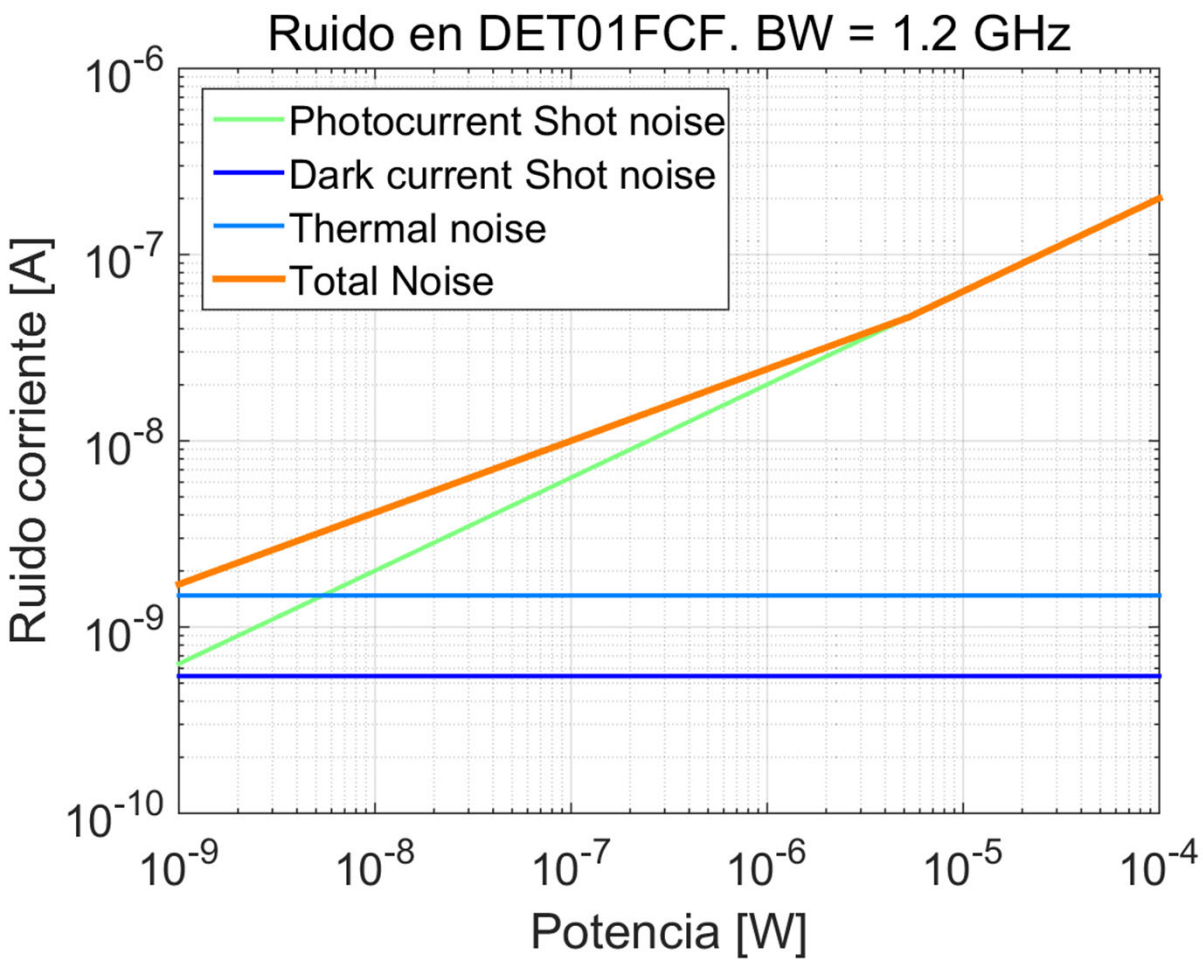
- Ruido *1/f* (presente a bajas frecuencias)*:*

  $$I_{1/f} \sim I\sqrt{\frac{B_w}{f}}$$

$$Total\ Noise = \sqrt{{I_{Rh}}^2 + {I_{sL}}^2 + {I_{sDC}}^2 + {I_{1/f}}^2}$$

- Típicamente se define el NEP de un fotodiodo (*Noise Equivalent Power*): la potencia óptica para la cual la SNR es 1. $[W/\sqrt{Hz}]$

Ruido

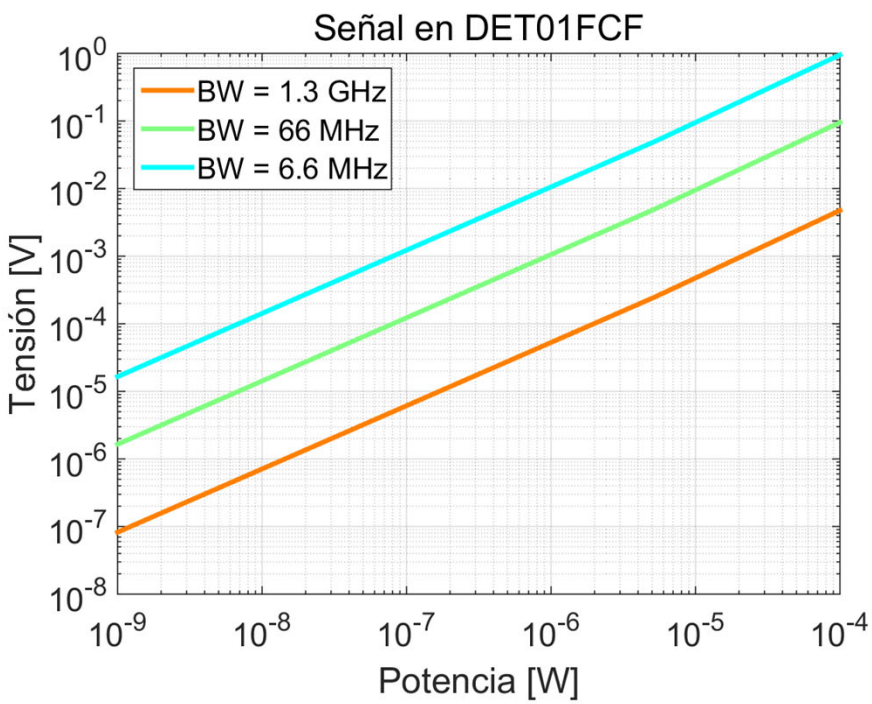


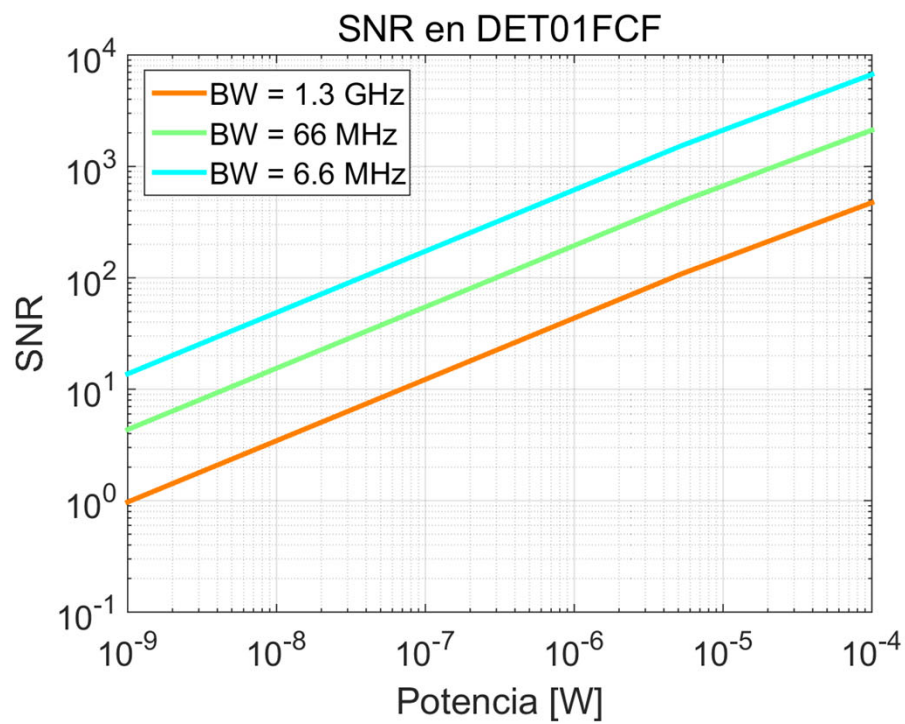
Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros del sensor DET01CFC - Thorlabs

Relación señal a ruido (SNR)

$$SNR = \frac{Signal}{Total\ Noise} \approx \frac{I_L}{Shot\ Noise} = \alpha\sqrt{I_L}$$

La SNR está limitada por la fotocorriente: es decir por la cantidad de fotones recibidos y la respuesta del sensor.





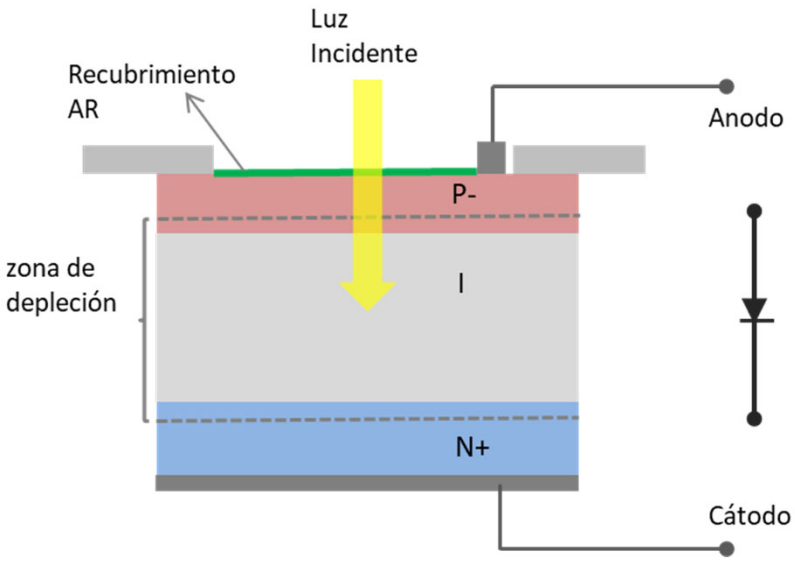
Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros del sensor DET01CFC - Thorlabs

Fotodiodo PIN

- Para aumentar el nivel de señal y sensibilidad del fotodiodo debemos aumentar la resistencia de carga del circuito que convierte corriente a tensión.
- Sin embargo un aumento de la resistencia aumenta el tiempo del respuesta del sensor (o reduce el ancho de banda).

$$t = \sqrt{t_{drift}^2 + t_{difusión}^2 + t_{RC}^2} \qquad t_{RC} = 2.2 C_j R_L$$

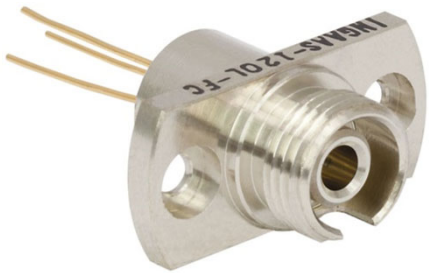
- En el fotodiodo PIN se agrega material Intrinseco fotosensible que:
  - Aumenta W_d ⟹ Reduce C_j
  - Aumenta la sensibilidad del sensor ⟹ aumenta R_λ
  - Reduce la posibilidad de portadores fuera de la zona de depleción. ⟹ $t_{difusión} \approx 0$



Comparación fotodiodo PIN y PN

Fotodiodo PIN - FPD510

Fotodiodo PN - FGA01FC



Amplificador de transimpedancia integrado:

- Ancho de banda 200 MHz
- Ganancia de transimpendancia:

$$\boxed{G_{PIN} = 1.5x10^5 V/W}$$

- $V_{1uW} \approx 150\ mV$
- $SNR_{1uW} \approx 100$
- 1700 USD

$$\boxed{\frac{G_{PIN}}{G_{PN}} > 400}$$

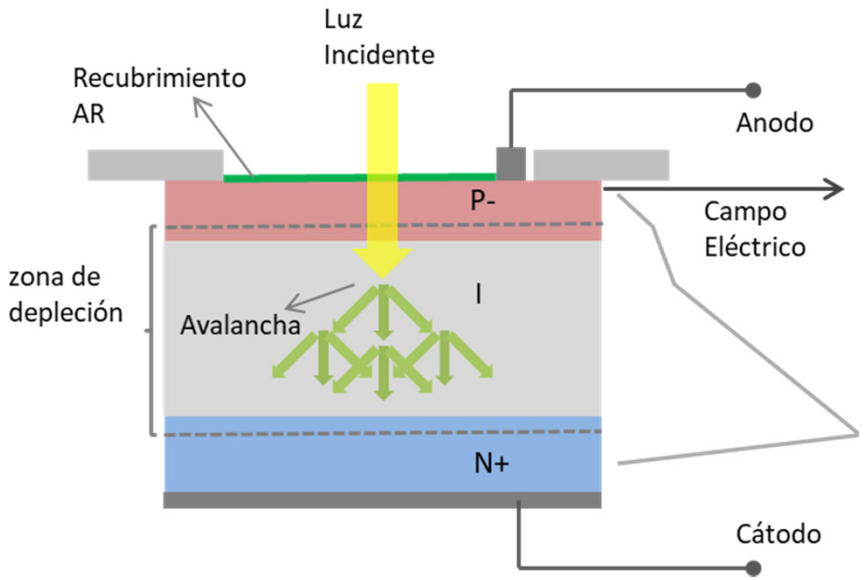
¿Cual debe ser la resistencia de carga para tener el mismo ancho de banda (200 MHz)?

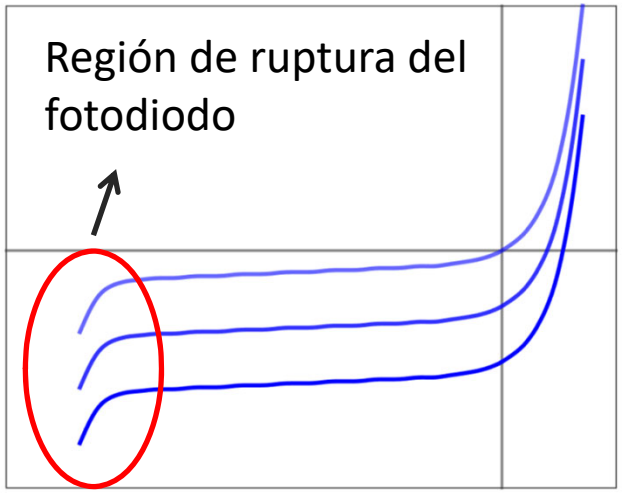
- $V_R = 12\ V \Rightarrow C_j = 2.4\ pF$
- $R_L = \frac{0.35}{2.2 B_w C_j} = 330\ \Omega$

$$\boxed{G_{PN} = R_L R_\lambda \approx 330\ V/W}$$

- $V_{1uW} \approx 330\ \mu V$
- $SNR_{1uW} \approx 110$
- 150 USD

Fotodiodo de avalancha APD





- Al aumentar la tensión en inversa aumenta la velocidad y la energía de los portadores en la zona de depleción, favoreciendo el fenómeno de avalancha. $Energia > 10^5\ V/cm$
- La fotocorriente queda entonces:

$$I_L = R_\lambda P_\lambda M$$

- La corriente oscura:

$$I_{DC} = I_{DS} + I_{DB} M$$

Factor de multiplicación *M*:

- Silicio ≈ 500
- Germanio ≈ 10
- InGaAs ≈ 10

Ruido en APD

- Ruido térmico o ruido de Johnson:

$$I_{RL} = \sqrt{\frac{4KTB_w}{R_L}}$$

- Ruido estadístico o *shot noise* de la fotocorriente y corriente oscura:

$$I_{sL} = \sqrt{2qR_\lambda P_\lambda M^2 F B_w}$$

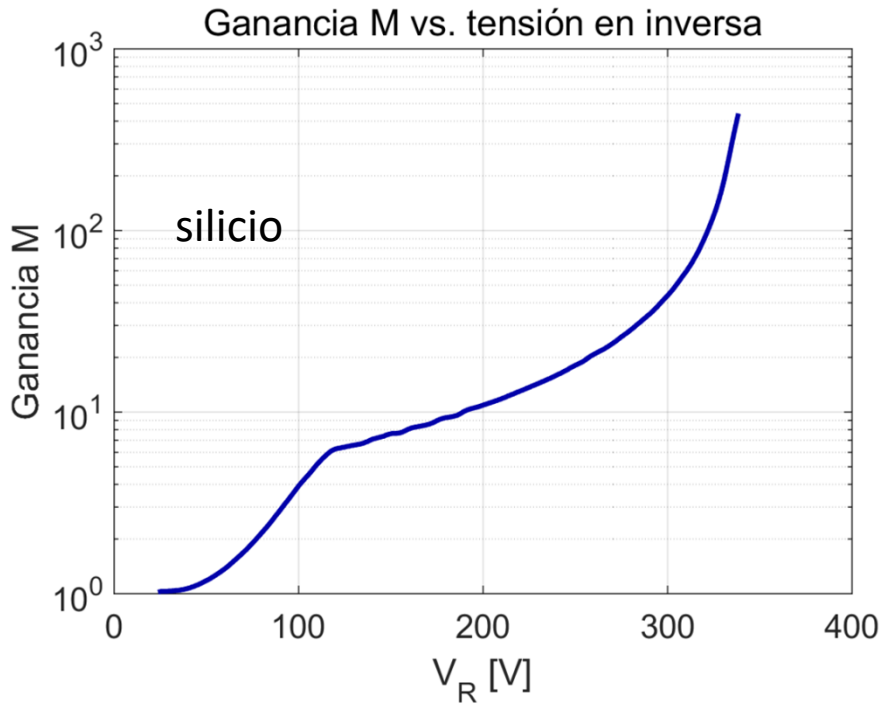
$$I_{sDC} = \sqrt{2q(I_{DS} + I_{DB}M^2F)B_w}$$

- *F (Excess noise) :* debido a la fluctuación en la multiplicación *M*. El factor *M* no es el mismo para huecos (α) y electrones (β). $F \approx 2 + kM$

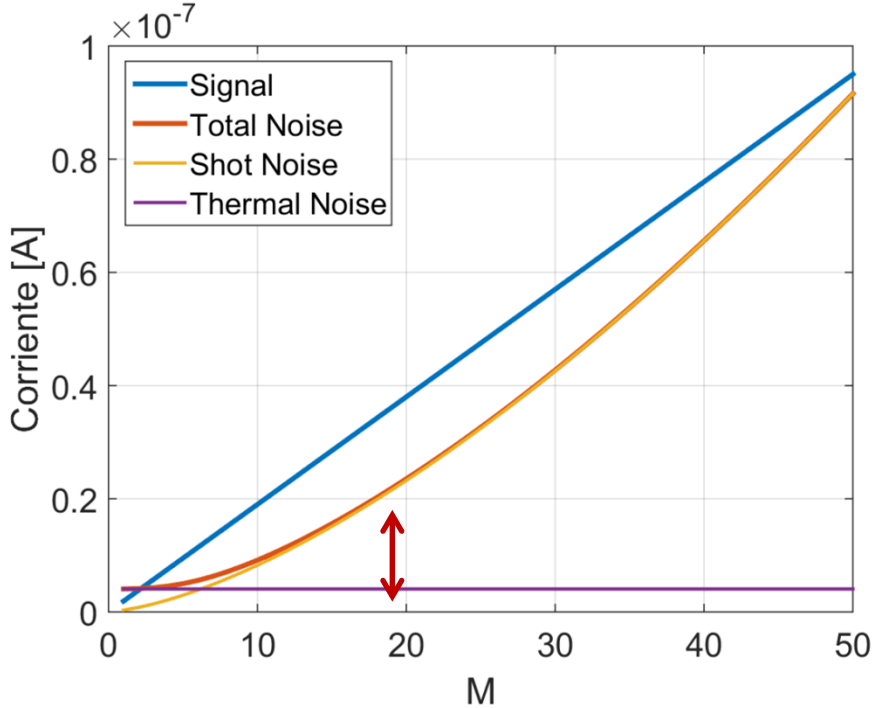
$$Total\ Noise = \sqrt{{I_{RL}}^2 + {I_{sL}}^2 + {I_{sDC}}^2}$$

Fotodiodo de avalancha APD

- El factor de multiplicación *M* aumenta con la tensión inversa, sin embargo también lo hace el ruido.
- El factor de multiplicación M óptimo es aquel que maximiza la SNR.

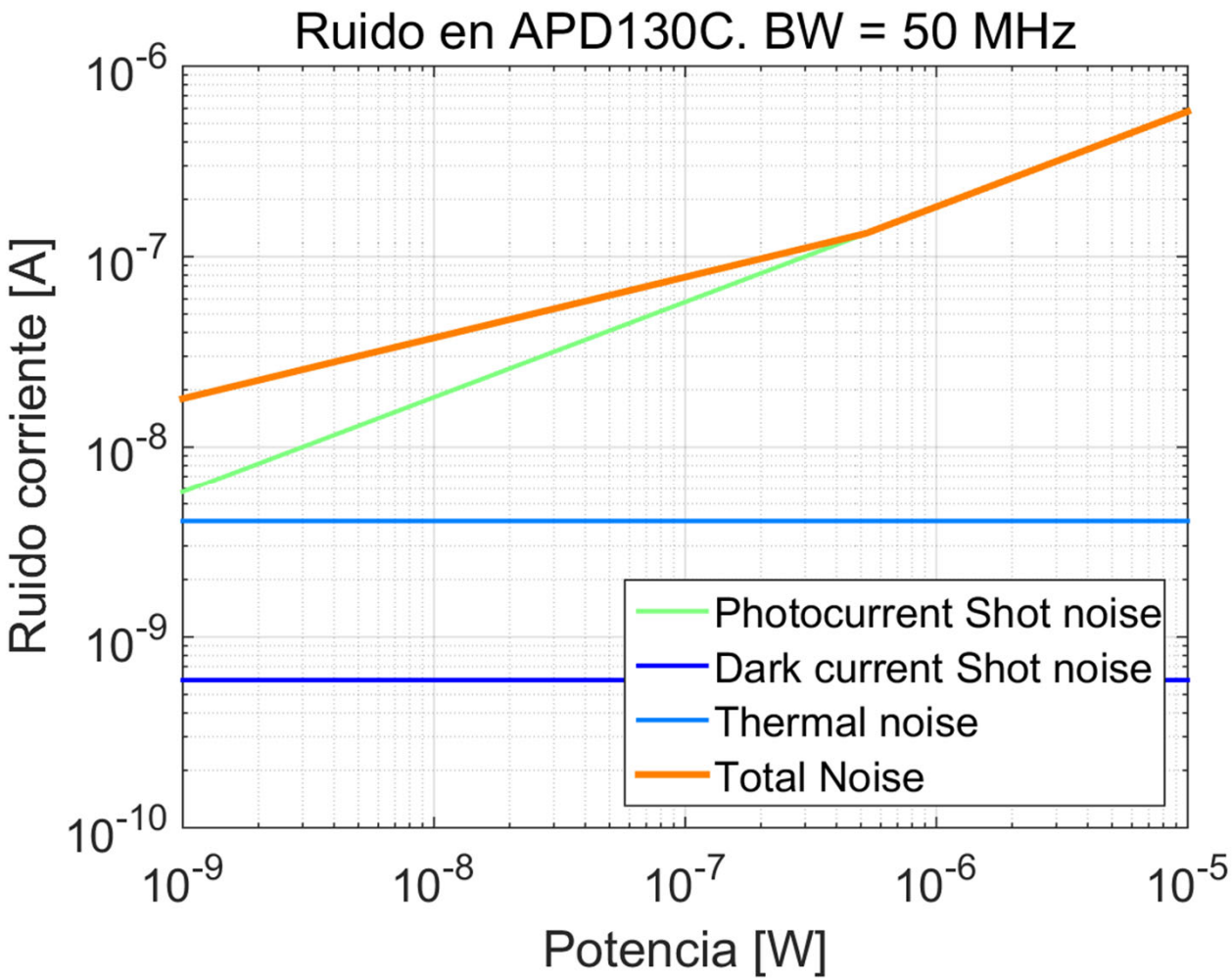


Ref.:Avalanche photodiode A User Guide - PerkinElmer



Ref.: Gráfico obtenido a partir de los parámetros del sensor APD130C - Thorlabs

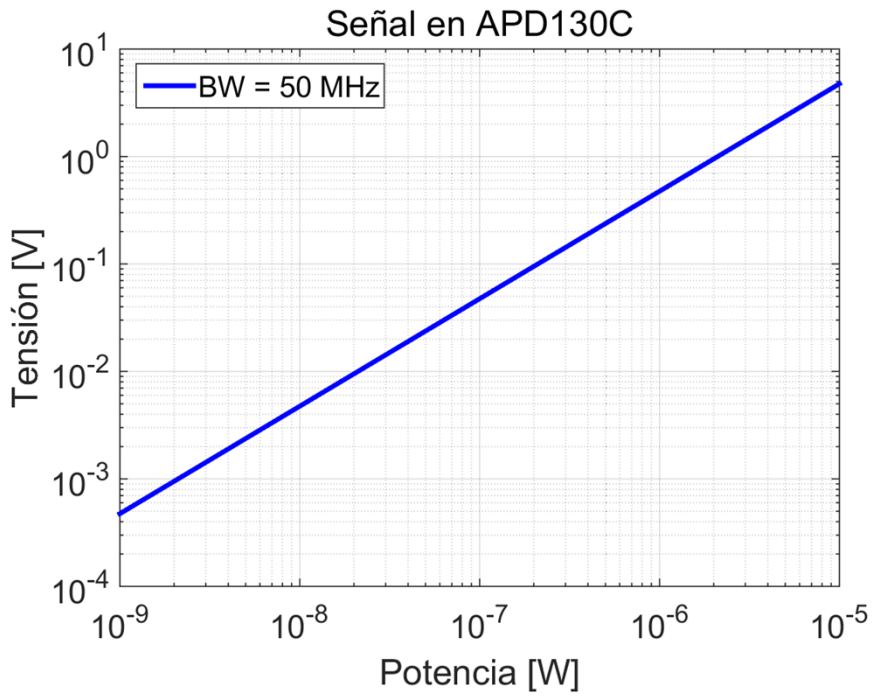
Ruido en APD

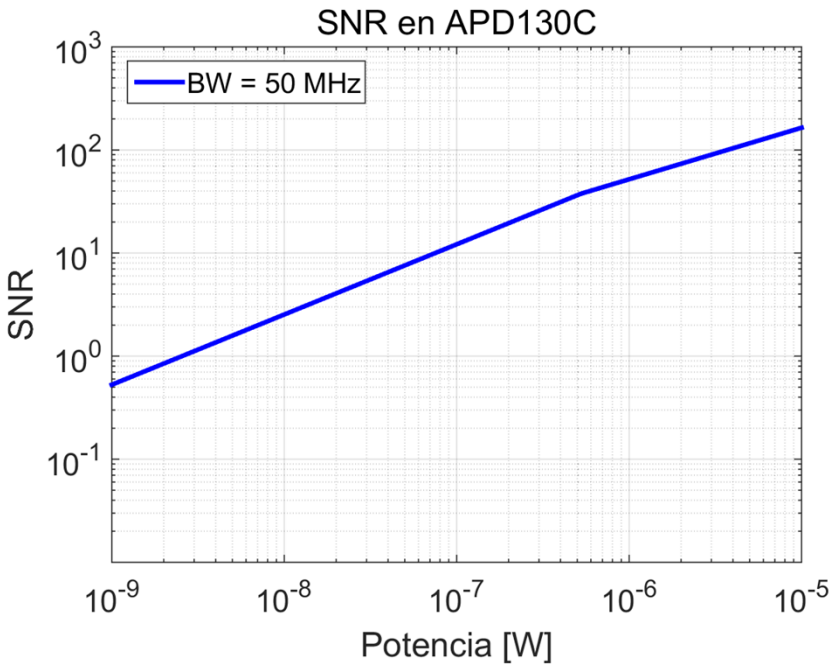


Ref.: Gráfico obtenido a partir de los parámetros del sensor APD130C - Thorlabs

Relación señal a ruido en APD

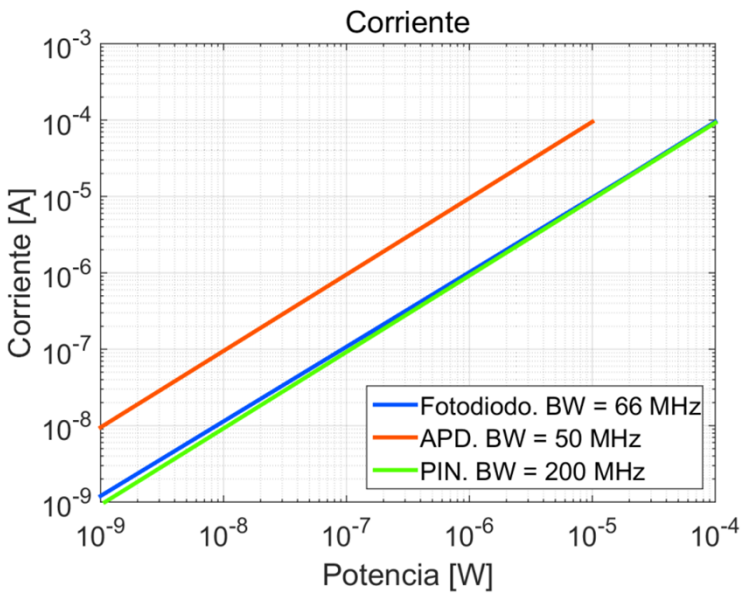
- Respecto de un fotodiodo PN y PIN, el APD tiene mayor nivel de señal pero mayores niveles de ruido y menor SNR.

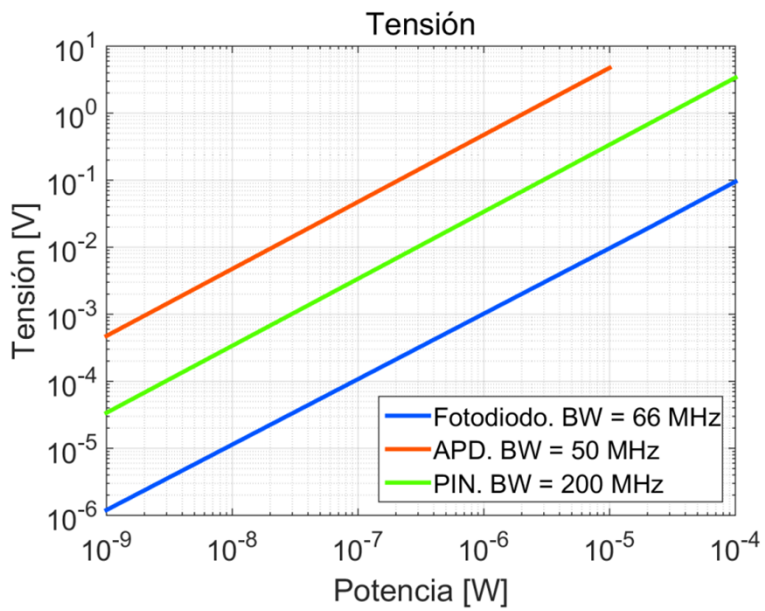


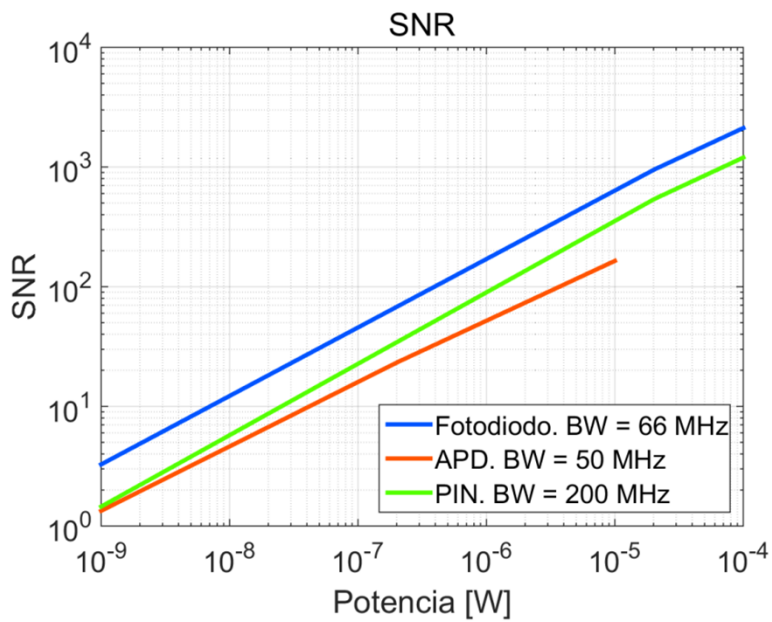


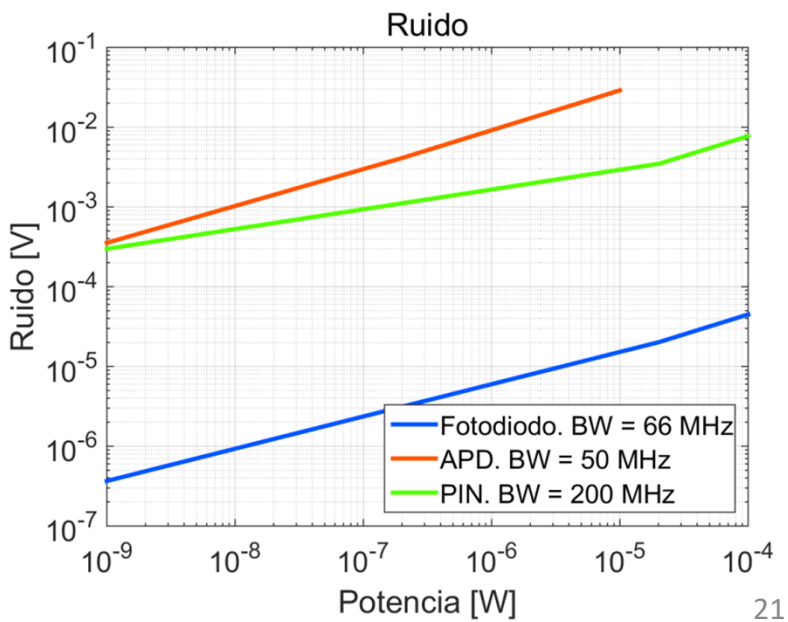
Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros del sensor APD130C - Thorlabs

Comparativa fotodiodo PN, PIN y APD





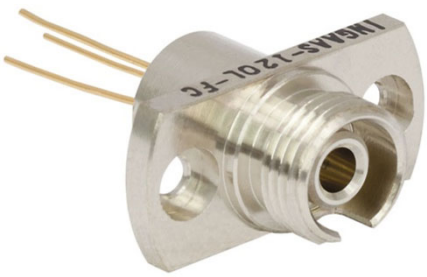




Ref.: Gráficos obtenidos a partir de los parámetros de los sensores DET01CFC, FPD510, APD130C - Thorlabs

Comparativa fotodiodo PN, PIN, APD

Fotodiodo PN - FGA01FC Thorlabs



Fotodiodo PIN - FPD510 Menlo Systems

Fotodiodo APD – APD130C Thorlabs