

PROBLEMA 2

Quadro dei dati

- Fotodiodo pin in Silicio,
area $U=4 \text{ mm}^2$; spessore strato superficiale neutro $w_s = 1 \mu\text{m}$; spessore giunzione svuotata $w_D = 10 \mu\text{m}$
corrente di buio $I_D = 1 \text{ pA}$
a $\lambda=850 \text{ nm}$ coefficiente di riflessione $K_R=0,1$ e lunghezza di assorbimento $L_a=15 \mu\text{m}$
Resistenza di carico $R_L=1 \text{ k}\Omega$
- Preamplificatore
larga banda $\approx 100 \text{ MHz}$
resistenza di ingresso molto alta, capacità di ingresso e collegamenti $C_a \approx 1 \text{ pF}$
rumore del preamp ridotto all'ingresso (non include il rumore degli altri componenti collegati all'ingresso)
 $\sqrt{S_{va}} = 4 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ unilatera
 $\sqrt{S_{ia}} = 0,5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ unilatera
- LED
potenza ottica controllata dalla corrente nel diodo (proporzionale) e modulabile. La componente modulata sinusoidale può avere al massimo ampiezza 20% di quella costante. La potenza totale non può superare $P_{\text{max}} = 120 \text{ nW}$

(A) Caratteristiche del rivelatore pin

Efficienza quantica di rivelazione fotoni = (1 - probabilità di riflessione) · (probabilità di attraversare lo strato superficiale) · (probabilità di assorbimento nella giunzione svuotata)

$$\eta = (1 - K_R) e^{-\frac{w_s}{L_a}} \left(1 - e^{-\frac{w_D}{L_a}} \right) = 0,85 \cdot 0,935 \cdot 0,486 \approx 0,39$$

Responsività spettrale a $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$

$$S_D = \eta \frac{\lambda}{1,24} = 0,27 \frac{A}{W}$$

Capacità della giunzione $C_D = \varepsilon \varepsilon_o \frac{U}{w_D} = 40 pF$.

Il fotodiode si comporta come un generatore di corrente che alimenta il carico R_L e la capacità totale $C_D + C_a = 41 pF$ in parallelo. Essi perciò effettuano un semplice filtraggio passabasso a un polo sul segnale fornito al preamplificatore. Tuttavia la sua costante di tempo $R_L (C_D + C_a) \approx 40 ns$ risulta molto breve rispetto ai tempi dei segnali in gioco, quindi il filtraggio in questo caso è trascurabile

(B) Misura in condizioni di potenza ottica costante e rumore bianco

Calcoliamo il rumore totale riportato all'uscita del rivelatore e valutato in corrente, in modo da poterlo confrontare direttamente con il segnale del rivelatore. Preliminarmente confrontiamo i vari termini riportati in corrente

$$\sqrt{S_{ia}} = 0,5 pA / \sqrt{Hz}$$

$$\frac{\sqrt{S_v}}{R_L} = 4 pA / \sqrt{Hz}$$

$$\sqrt{\frac{4kT}{R_L}} = 4 pA / \sqrt{Hz}$$

$$\sqrt{2qI_D} = 5 \cdot 10^{-4} pA / \sqrt{Hz}$$

Nella composizione quadratica due termini risultano trascurabili e abbiamo

$$\sqrt{S_{iD}} = \sqrt{S_{ia} + \frac{S_{va}}{R_L^2} + \frac{4kT}{R_L} + 2qI_D} \approx \sqrt{\frac{S_{va}}{R_L^2} + \frac{4kT}{R_L}} \approx 5,6 pA / \sqrt{Hz}$$

Si verifica facilmente che il rumore dovuto alla fotocorrente è trascurabile anche con la massima

corrente:
$$\sqrt{S_{ip}} \leq \sqrt{2q \frac{P_{\max}}{S_D}} \approx 0,4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$$

Il segnale da misurare si può considerare costante su intervalli di 1s, quindi in presenza di rumore bianco risulta adattato un filtraggio con peso costante su intervallo $T_p \leq 1s$. Questo si può ottenere con un Gated Integrator (GI) che esegua una serie di misure con durata $T_p = 1s$ oppure con un integratore a media mobile (mobile mean integrator) con la stessa durata. Con l'integrazione su T_p si ottiene filtraggio passabasso con frequenza di taglio $f_s = 1/2T_p = 0,5\text{Hz}$ e quindi

$$\frac{S}{N} = \frac{I_s}{n_B^2} = \frac{I_s}{\sqrt{S_{iT} f_s}} = \frac{I_s}{\sqrt{\frac{S_{iT}}{2T_p}}}$$

il minimo segnale di corrente misurabile è eguale al rumore

$$I_{s,\min} = \sqrt{S_{iT} f_s} = \sqrt{\frac{S_{iT}}{2T_p}} = 4 \text{ pA}$$

la minima potenza ottica misurabile è

$$P_{\min} = \frac{I_{s,\min}}{S_D} \approx 15 \text{ pW}$$

che corrispondente a una dinamica di misura (rapporto tra massimo e minimo misurabile)

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \approx 8000$$

In alternativa potremmo impiegare un filtro passabasso con costante di tempo $T_F = RC$, ma per rilevare le variazioni del segnale su tempi di 1s occorre limitarsi a $T_F \leq 0,2s$. Perciò avremmo una frequenza di taglio più elevata $f_s = 1/4T_F \geq 1,25\text{Hz}$ e il filtraggio risulterebbe meno efficiente.

(C) Misura in presenza di rumore 1/f con potenza ottica costante

Dato che la potenza ottica è costante per tutto il tempo coperto dalle misure, per limitare il contributo del rumore 1/f non possiamo utilizzare un filtro passa-alto a parametri costanti perchè taglierebbe il segnale continuo. Con questo segnale continuo non si può usare nemmeno un BaseLine Restorer BLR. Possiamo solo effettuare un azzeramento della linea di base prima di iniziare la sequenza di misure. Si ottiene così un filtraggio passa-alto con frequenza di taglio f_i data dal reciproco dell'intervallo di tempo tra azzeramento e misura, quindi una piccola frazione di Hertz. Valutiamo il contributo del rumore 1/f con frequenza caratteristica $f_c = 10kHz$ considerando di avere un taglio passa-alto $f_i \approx 0,01Hz$ e il taglio passabasso $f_s = \frac{1}{2T_p} = 0,5Hz$ dato

dall'integrazione su $T_p = 1s$

$$\sqrt{n_f^2} = \sqrt{2S_{it}f_c \ln\left(\frac{f_s}{f_i}\right)} = \sqrt{S_{it}f_s 2\frac{f_c}{f_s} \ln\left(\frac{f_s}{f_i}\right)} = \sqrt{2\frac{f_c}{f_s} \ln\left(\frac{f_s}{f_i}\right)} \cdot \sqrt{S_{it}f_s} \approx 400 \sqrt{n_B^2}$$

Vediamo che in queste condizioni il S/N peggiora di un fattore 400 e di altrettanto peggiorano la potenza minima, che sale a $P_{min} \approx 6nW$, e la dinamica di misura che scende a $P_o/P_{min} \approx 20$

(D) Misura in presenza di rumore 1/f con potenza ottica modulata

Comandando il LED con una corrente somma di una corrente costante e di una componente sinusoidale di minore ampiezza possiamo portare il segnale a frequenza più alta della zona in cui prevale il rumore 1/f. Dato che la componente sinusoidale può avere al massimo ampiezza 20% di quella costante e la potenza totale è limitata a $P_o = 120nW$, possiamo operare con una componente modulata sinusoidale avente al massimo ampiezza $P_m = 20nW$ e componente costante $P_c = 100nW$. Scegliamo frequenza di modulazione ben al di fuori della zona in cui domina il rumore 1/f, ad esempio $f_m = 10f_c = 100kHz$.

Filtriamo segnale e rumore provenienti da rivelatore e preamplificatore con un amplificatore lock-in (LIA). Utilizziamo come riferimento il segnale sinusoidale con cui abbiamo modulato la corrente del LED. Dovendo seguire le variazioni del segnale su tempi di 1s, per il filtro passabasso del LIA

vale la limitazione discussa alla fine del punto (B), cioè la frequenzi di taglio deve rispettare il limite $f_F = 1/4T_F \geq 1,25\text{Hz}$. Scegliamo quindi $f_F = 2\text{Hz}$

Indicando con I_m l'ampiezza della componente di corrente del rivelatore modulata sinusoidalmente, abbiamo

$$\frac{S}{N} = \frac{I_m}{\sqrt{2S_{iF}f_F}}$$

La corrente minima misurabile risulta quindi

$$I_{m,\min} = \sqrt{2S_{iF}f_F} = 11,2 \text{ pA}$$

corrispondente a una potenza ottica minima

$$P_{m,\min} = \frac{I_{s,\min}}{S_D} \approx 41 \text{ pW}$$

che risulta abbastanza vicina a quella che avevamo valutato in (B) senza tener conto del rumore bianco. Anche la dinamica di misura (rapporto tra massimo e minimo misurabile) risulta migliorata, ma il suo fattore di miglioramento è minore di quello ottenuto per la potenza minima perchè la massima potenza modulata di cui possiamo disporre ($P_{m,\max} = 20 \text{ nW}$) è notevolmente inferiore alla massima potenza continua disponibile ($P_{\max} = 120 \text{ nW}$)

$$\frac{P_{m,\max}}{P_{m,\min}} \approx 490$$