

Title of the Lab Report

Course Name

Author One

Author Two

Author three di nuovo

Supervisor: Supervisor Name

Date: January 17, 2026

Contents

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Materials and Methods | 2 |
| 2.1 | Setup | 3 |
| 2.2 | Data acquisition and analysis | 3 |
| 3 | Results | 3 |
| 4 | Discussion | 7 |
| 5 | conclusion | 8 |

List of Figures

| | | |
|---|---------------------------------------|---|
| 1 | schema circuitale fotodiodo | 1 |
| 2 | schema sperimentale | 3 |
| 3 | plot dati $V_{0\Omega}$ | 4 |
| 4 | plot dati $V_{500\Omega}$ | 5 |
| 5 | plot dati $V_{1000\Omega}$ | 5 |
| 6 | plot dati $V_{50000\Omega}$ | 6 |
| 7 | plot dati $V_{10000\Omega}$ | 6 |

List of Tables

| | | |
|---|--|---|
| 1 | Dati sperimentali di tensione (mV) al variare della frequenza e del carico | 4 |
| 2 | Parametri fissati per l'onda sinusoidale | 6 |
| 3 | Parametri fissati per l'onda quadra | 7 |
| 4 | Valori della capacità di giunzione C_d al variare della resistenza di carico R | 7 |

Abstract

Il presente lavoro di laboratorio si è posto l'obiettivo di studiare il comportamento del segnale rilevato dal fotodiodo in funzione della sua frequenza di modulazione e della resistenza di carico R usata. L'esperienza è stata condotta utilizzando un sistema accoppiato LED-Fotodiode. Il LED, alimentato da un generatore di funzioni, funge da sorgente luminosa modulata per il fotodiodo, il quale è inserito in un circuito chiuso con una resistenza di carico. Il segnale elettrico risultante viene prelevato ai capi della resistenza e analizzato tramite un oscilloscopio. Si consiglia di usare una modulazione in onda quadra che corrisponde ad una sequenza di accesi-spento per il LED, in modo da non prendere in considerazione fenomeni di distorsione della forma d'onda che non siano riconducibili alla detezione col fotodiodo.

1 Introduction

La seguente esperienza cercherà di analizzare il segnale in uscita da un circuito chiuso, composto da un fotodiodo e da una resistenza di carico R in serie. Analizzando lo schema circuitale di un fotodiodo accoppiato ad una resistenza

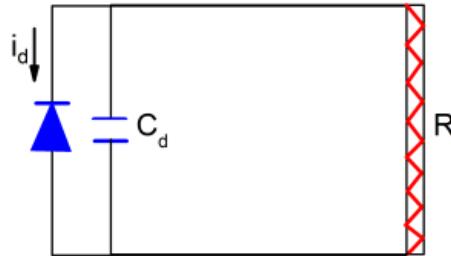


Figure 1: schema circuitale fotodiodo

è fondamentale tenere conto della capacità intrinseca (C_d) del fotodiodo. Considerando questo parametro, è possibile notare una forte analogia tra il sistema in esame e un circuito RC in parallelo. In questo modello, la corrente fotogenerata non fluisce interamente nella resistenza di carico R , ma viene in parte impiegata per caricare la capacità C_d .

Applicando la prima legge di Kirchoff al circuito:

$$I(t) = I_p h = I_d + C_d \frac{dQ}{dt} + \frac{V_R}{R} \quad (1)$$

dove può essere tralasciare il termine

$$I_d = I_0 (e^{-\frac{qV_d}{kT}} - 1) \quad (2)$$

poichè ci si concentra sulla corrente modulata nel caso di segnali variabili. Inoltre Se consideriamo una frequenza specifica ω , $I(t)$ deve assumere la forma

$$I(t) = I_0 + I_v e^{i\omega t} \quad (3)$$

con

$$I_0 > I_v \quad (4)$$

La parte modulata viene ad essere quindi data da

$$V_V = I_V (i\omega C + \frac{1}{R}) = I_V (\frac{i\omega RC + 1}{R}) \quad (5)$$

Il termine complesso indica che esiste uno sfasamento tra la corrente modulata I_V , fotogenerata, e il segnale di tensione V_V rilevato ai capi della resistenza

$$V_V = \frac{I_V R}{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{I_V R}{1 + \frac{f^2}{f_0^2}} \quad (6)$$

L'andamento in frequenza della risposta risulta quindi caratterizzato da una frequenza di taglio

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (7)$$

per la quale il segnale si riduce di un fattore $\sqrt{2}$, e tende a zero per frequenze maggiori.

Basandoci su questa analogia l'analisi si concentra sul ricavare due parametri fondamentali:

- V_0 : il massimo valore che si raggiunge quando la frequenza è sufficientemente bassa da permettere al condensatore di caricarsi e scaricarsi completamente secondo la legge

$$V_d = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8)$$

con

$$\tau = RC \quad (9)$$

- f_0 (la frequenza di taglio): il limite oltre il quale il condensatore non ha più il tempo fisico per completare i cicli di carica e scarica. Superata tale soglia, il sistema si comporta come un integratore, causando un'attenuazione del segnale e portando l'ampiezza della tensione a decrescere verso lo zero all'aumentare della frequenza

2 Materials and Methods

Per l'esecuzione dell'esperienza è stata utilizzata la seguente strumentazione:

- Generatore di funzioni
- Basetta per circuiti
- Oscilloscopio
- 1 LED
- un set di resistenze di diverso valore
- Cavetti coassiali di connessione (e un connettore a T)
- Presa per cavo coassiale con morsetti

È fondamentale che il LED e il fotodiodo siano allineati con precisione l'uno di fronte all'altro per garantire che la photocorrente generata sia massima. Il fotodiodo può infatti fungere da generatore di corrente ideale proporzionale all'intensità di luce ricevuta(dal LED in questo caso). Il segnale luminoso prodotto dal LED, alimentato da un generatore di funzioni, è modulato in frequenza. L'alimentazione del LED si ottiene tipicamente impostando una tensione picco-picco di 5-6 Volt sul generatore. Pilotando il LED tramite un segnale in onda quadra, in cui l'intensità di illuminazione (e quindianche la corrente fotogenerata) viene mantenuta costante per un intervallo $\frac{T}{2} = \frac{2\pi}{2\omega}$ e quindi spenta per un intervallo di tempo analogo, possiamo analizzare in due fasi l'evoluzione del segnale. Supponendo che variare della frequenza ci si può aspettare un andamento proporzionale a

$$V_s = V_0 \tanh\left(\frac{\pi \omega_0}{2 \omega}\right) = V_0 \tanh\left(\frac{\pi f_0}{2 f}\right) \quad (10)$$

con

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC_d} \quad (11)$$

Per frequenze tendenti a zero, V_S tende a V_0 , mentre per frequenze grandi V_S tende a 0. Al variare della frequenza si analizzano i segnali visualizzati sull'oscilloscopio, che consentono di valutare la costante di tempo $\tau = R C_d$ (e quindi la capacità C_d) analizzando il comportamento in funzione della frequenza e valutando le frequenze a cui avviene la caduta di intensità, o meglio ancora determinando la frequenza di taglio f_0 dal fit dei dati.

2.1 Setup

Lo schema sperimentale è il seguente

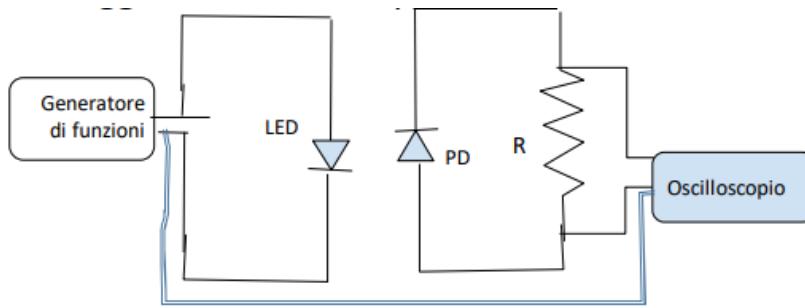


Figure 2: schema sperimentale

2.2 Data acquisition and analysis

Per una corretta presa dei dati, è opportuno alimentare il LED impostando una tensione picco-picco di 5-6 Volt sul generatore. L'acquisizione dei dati è avvenuta variando la frequenza di alimentazione del generatore, partendo da basse frequenze a salire, e registrando la corrispondente tensione riportata sull'oscilloscopio. Per garantire un miglior dato sperimentale si è atteso un intervallo di alcuni secondi per assecondare i tempi di risposta della strumentazione e permettere segnale di stabilizzarsi. Si è cercato di ridurre l'influenza della luce ambientale mediante l'impiego di un tubicino, per garantire che il LED e il fotodiodo siano correttamente affacciati e isolati dall'esterno. I dati sono stati inizialmente raccolti in Excell, dove la visualizzazione in tempo reale dei grafici ha permesso di monitorare la coerenza delle misure e identificare eventuali anomalie sperimentali. La fase finale di analisi è stata successivamente condotta mediante Google Colab, dove possono essere ricavati i parametri sperimentali eseguendo due diverse strategie di fit:

- Fit onda sinusoidale: in cui i parametri f_0 e V_0 vengono ricavati utilizzando l'equazione (6).
- Fit onda quadra: in cui i parametri f_0 e V_0 vengono ricavati utilizzando l'equazione (10).

Una volta ricavati in maniera solida questi parametri è possibile confrontare i valori che C_d assume per diverse resistenze di carico.

3 Results

plotando i dati sperimentali qui elencati si ottengono i seguenti grafici

Table 1: Dati sperimentali di tensione (mV) al variare della frequenza e del carico

| Freq. (Hz) | $V_{0\Omega}$ (mV) | $V_{500\Omega}$ (mV) | $V_{1000\Omega}$ (mV) | $V_{5000\Omega}$ (mV) | $V_{10000\Omega}$ (mV) |
|------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 100 | 220 | 18.8 | 36 | 184 | 320 |
| 500 | 220 | 18.8 | 36 | 184 | 320 |
| 1000 | 220 | 18.4 | 35.2 | 184 | 320 |
| 2000 | 160 | 18.4 | 35.2 | 184 | 320 |
| 5000 | 140 | — | — | — | 320 |
| 10000 | 140 | — | 35.2 | 184 | 320 |
| 20000 | 100 | — | — | — | 312 |
| 50000 | — | 18.4 | 35.2 | — | — |
| 100000 | 40 | 17.6 | 35.2 | — | — |
| 200000 | 20 | — | 34.4 | 160 | 208 |
| 500000 | 20 | 17.6 | — | — | 104 |
| 1000000 | 20 | 17.6 | 30.4 | 56 | 64 |

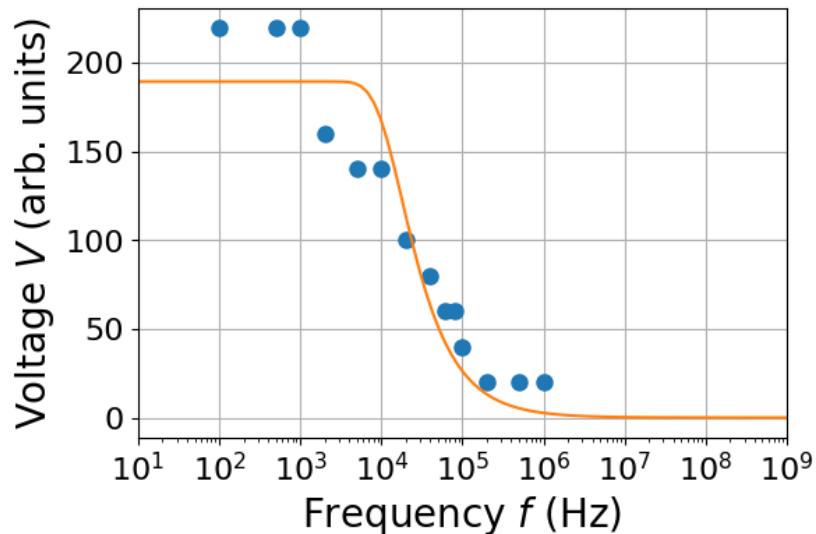


Figure 3: plot dati $V_{0\Omega}$

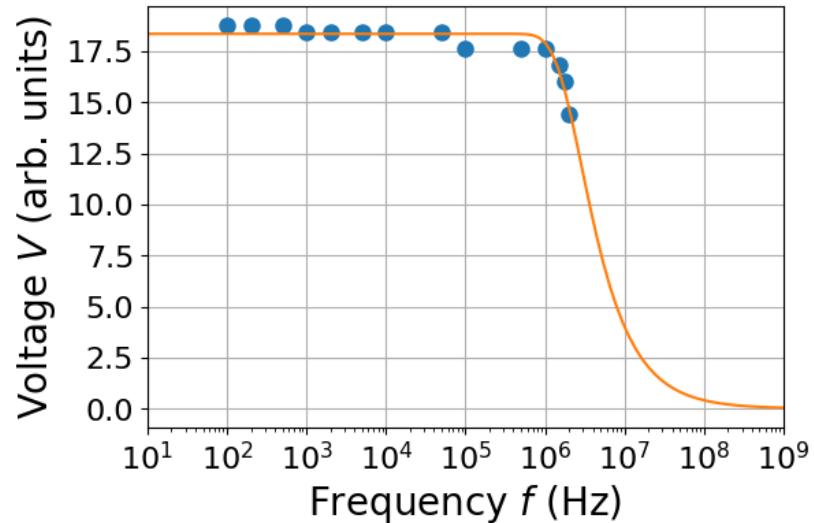


Figure 4: plot dati $V_{500\Omega}$

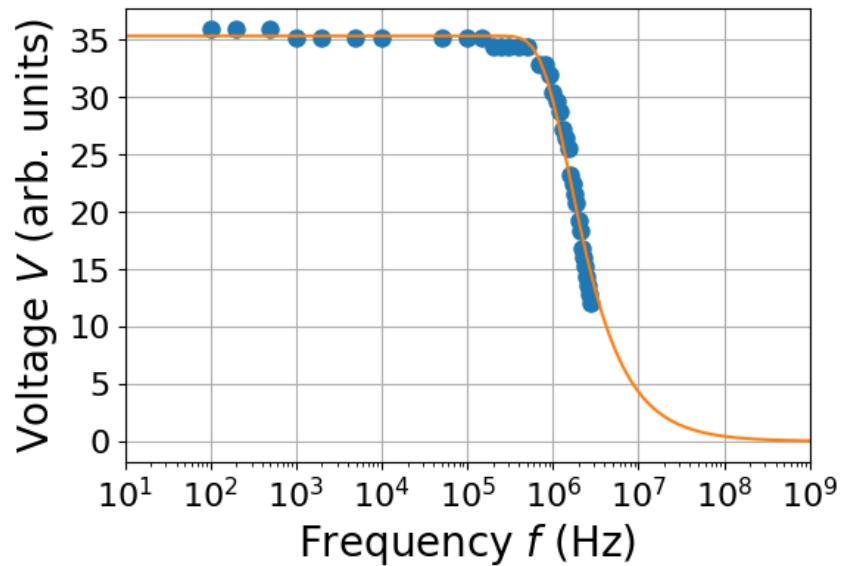


Figure 5: plot dati $V_{1000\Omega}$

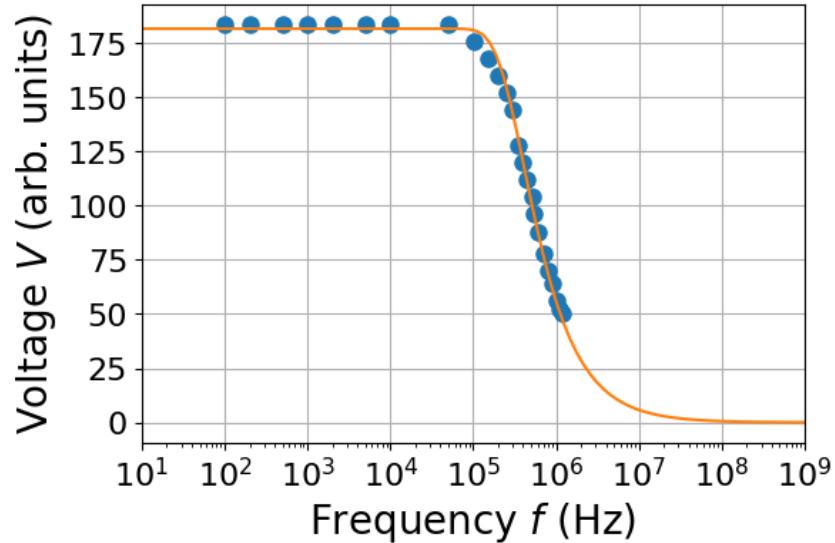


Figure 6: plot dati $V_{50000\Omega}$

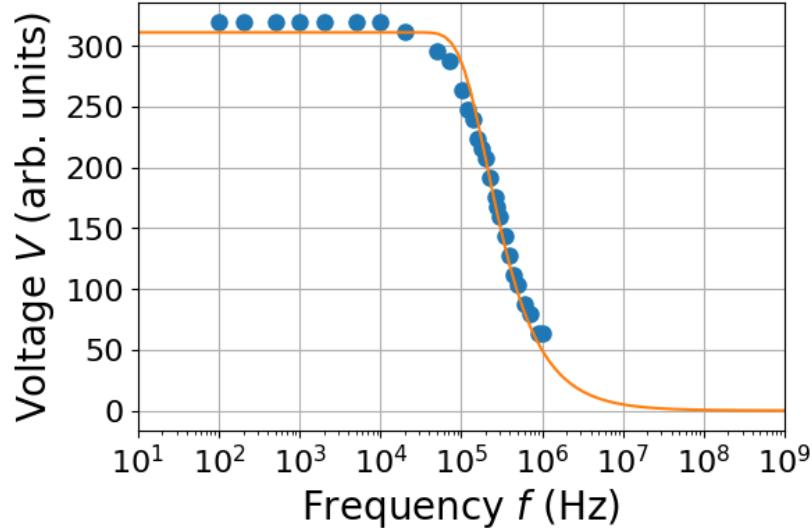


Figure 7: plot dati $V_{10000\Omega}$

A seguire sono riportati i valori dei parametri fisici f_0 , V_0 , mediante un fit sinusoidale, con i corrispettivi errori:

Table 2: Parametri fittati per l'onda sinusoidale

| Resistenza | f_0_fit (Hz) | std_dev_{f0} | rel_error_{f0} | V_0_fit (mV) | std_dev_{V0} | rel_error_{V0} |
|---------------|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 0Ω | 1.435547×10^4 | 1.1979×10^4 | 8.3444×10^{-1} | 193.710686 | 42.5722 | 2.1977×10^{-1} |
| 500Ω | 2.834884×10^6 | 6.6799×10^5 | 2.3563×10^{-1} | 18.429425 | 0.5076 | 2.7541×10^{-2} |
| 1000Ω | 1.304796×10^6 | 2.6375×10^5 | 2.0214×10^{-1} | 35.967929 | 2.4609 | 6.8419×10^{-2} |
| 5000Ω | 3.384685×10^5 | 1.7267×10^4 | 5.1014×10^{-2} | 184.657070 | 3.1904 | 1.7277×10^{-2} |
| 10000Ω | 1.720020×10^5 | 1.3778×10^4 | 8.0106×10^{-2} | 316.187221 | 8.7224 | 2.7586×10^{-2} |

analogamente sono riportati a seguire i valori dei parametri fisici f_0 , V_0 , mediante un fit con onda quadra

Table 3: Parametri fittati per l'onda quadra

| Resistenza | f_0 (Hz) | std_dev_{f0} | rel_error_{f0} | V_0 (mV) | std_dev_{V0} | rel_error_{V0} |
|---------------|------------------------|----------------------|-------------------------|------------|-----------------|-------------------------|
| 0Ω | 8.854299×10^3 | 7.6533×10^3 | 8.6436×10^{-1} | 189.320226 | 45.4134 | 2.3988×10^{-1} |
| 500Ω | 1.416685×10^6 | 2.2776×10^5 | 1.6077×10^{-1} | 18.348945 | 0.4869 | 2.6534×10^{-2} |
| 1000Ω | 7.807551×10^5 | 9.8678×10^4 | 1.2639×10^{-1} | 35.334172 | 1.6828 | 4.7626×10^{-2} |
| 5000Ω | 2.028521×10^5 | 1.5609×10^4 | 7.6949×10^{-2} | 181.695559 | 5.1630 | 2.8416×10^{-2} |
| 10000Ω | 1.025996×10^5 | 1.6375×10^4 | 1.5960×10^{-1} | 310.899398 | 18.6648 | 6.0035×10^{-2} |

Dai risultati appena riportati è possibile confrontare i valori che assume C_d al variare della resistenza di carico usata.

Table 4: Valori della capacità di giunzione C_d al variare della resistenza di carico R .

| Resistenza di carico R (Ω) | Capacità di giunzione C_d (F) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | $2.2468597418468055 \times 10^{-10}$ |
| 500 | $2.2468636309369896 \times 10^{-10}$ |
| 1000 | $2.0384746377861727 \times 10^{-10}$ |
| 5000 | $1.5691718930142804 \times 10^{-10}$ |
| 10000 | $1.55122334985695 \times 10^{-10}$ |

4 Discussion

Il confronto tra i modelli di fit ha confermato che la funzione basata sulla tangente iperbolica descrive con maggior coerenza la risposta all'onda quadra, evitando le sovrastime di f_0 indotte dal modello sinusoidale.

L'analisi della capacità di giunzione C_d al variare della resistenza di carico R ha rivelato un andamento non costante: il valore decresce da circa 225 pF (per $R \leq 500\Omega$) a circa 155 pF (per $R \geq 5\text{k}\Omega$). Tale fenomeno suggerisce che l'aumento della tensione ai capi del fotodiodo, indotto da resistenze di carico elevate, provochi un aumento della regione di svuotamento della giunzione, riducendone la capacità intrinseca. In conclusione, sebbene il modello RC parallelo sia efficace per una prima caratterizzazione, una descrizione accurata del dispositivo richiede di considerare la dipendenza funzionale di C_d dalla tensione di esercizio. Sebbene si sia osservata una diminuzione della capacità di giunzione C_d all'aumentare della resistenza di carico R , la costante di tempo del sistema $\tau = RC_d$ mostra un netto aumento complessivo. Questo conferma che l'effetto della resistenza è prevalente nella dinamica del circuito, determinando una drastica riduzione della larghezza di banda (frequenza di taglio f_0) per valori elevati di R . Fino ad adesso abbiamo parlato di resistenze da 0Ω ma in realtà il fotodiodo era collegato all'oscilloscopio che presenta una resistenza interna di $1M\Omega$ in parallelo con 20 pF. Inoltre si osserva che il valore di V_0 per la configurazione a 0Ω nominali risulta inferiore a quello ottenuto con $R = 10\text{k}\Omega$. Questo fenomeno è riconducibile alla saturazione del fotodiodo: lavorando sull'impedenza d'ingresso dell'oscilloscopio ($1M\Omega$), la tensione ai capi della giunzione raggiunge un limite fisico (tensione di circuito aperto) che impedisce alla risposta $V = I \cdot R$ di crescere ulteriormente. La scarsa affidabilità del dato in questa configurazione è confermata dall'elevato errore relativo del fit (24%), suggerendo che l'impedenza complessa dello strumento domini e distorca la risposta.

5 conclusion

In conclusione il fit basato sulla funzione tanh si è rivelato il più accurato per descrivere la risposta all'onda quadra. Dai risultati ottenuti la capacità C_d è stata determinata con successo, osservando una sua diminuzione all'aumentare di R . Si osserva un errore relativo critico($> 80\%$) nella configurazione a 0Ω per la frequenza di taglio. Tale incertezza è attribuibile all'elevata impedenza di carico presentata dall'oscilloscopio ($1\text{ M}\Omega$), che porta il fotodiodo in regime di saturazione. In queste condizioni, l'effetto delle capacità parassite dei cavi e l'impedenza complessa dello strumento degradano il rapporto segnale-rumore, rendendo il modello RC parallelo meno accurato nel descrivere i dati sperimentali rispetto alle configurazioni con resistenze di carico medie, come quelle analizzate($1\text{--}10\text{ k}\Omega$). Per studi futuri, si consiglia l'uso di connessioni più corte per ridurre le capacità parassite dei cavi, che possono influire sulla raccolta dati, specialmente ad alte frequenze.