

logbook (/github/MarcoMalucchi/logbook/tree/main)  
/ MALDIN\_logbook\_es\_06.ipynb (/github/MarcoMalucchi/logbook/tree/main/MALDIN\_logbook\_es\_06.ipynb)

# Logbook es. 06

## Introduzione

Lo scopo dell'esperienza è quello di studiare il comportamento dei LED e dei fotodiodi, determinandone le rispettive curve caratteristiche ed osservando il loro comportamento in particolari circuiti.

### Task 1

Obiettivo: Annotare i parametri principali del LED

1. Corrente di funzionamento (I).
2. Voltaggio di funzionamento (VS).
3. Intensità luminosa (in millicandles "mcd").

Inoltre determinare la corrente che W1 può erogare a seconda del valore della resistenza scelta per il circuito, assicurandosi che sia in accordo con le specifiche per le sorgenti di voltaggio a disposizione.

Per i parametri 1,2 e 3 ci si rifà al datasheet, ottenendo i seguenti valori:

1.  $I = 20 \text{ mA}$
2.  $VS = 2 - 2.2 \text{ V}$
3.  $I_{lum} = 600 - 800 \text{ mcd}$

Una volta collegata  $R_1$  al circuito che si realizzerà nel task successivo per il LED, selezionando il voltaggio di W1 (inizialmente impostato a VS), attraverso la legge di Ohm si potrà determinare la corrente che W1 erogherà nel circuito; quello che bisogna fare è capire qual è la corrente massima che l'AD2 può erogare e scegliere  $R_1$  in modo che tale valore non sia mai superato (a maggior ragione nei task successivi, in cui si effettueranno delle spazzate in voltaggio).

A seguito di varie prove empiriche si è constatato che per tutti i LED che verranno impiegati in seguito, l'AD2 non raggiunge mai la corrente massima erogabile, quindi siamo sempre nel regime di buona funzionalità della board.

## Task 2

Obiettivo: misurare la curva caratteristica I-V del dispositivo LED in uso (LED rosso, con incapsulamento rosso) attraverso il seguente circuito

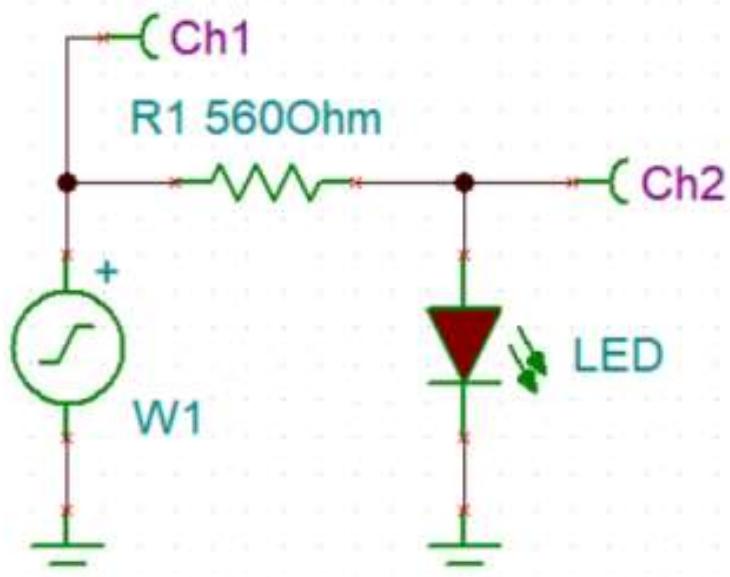


Figura 1: schema circuito per determinare curva caratteristica del diodo, notare come la resistenza inserita nel circuito sia di  $680\ \Omega$ , quindi diversa dal valore riportato nell'immagine.

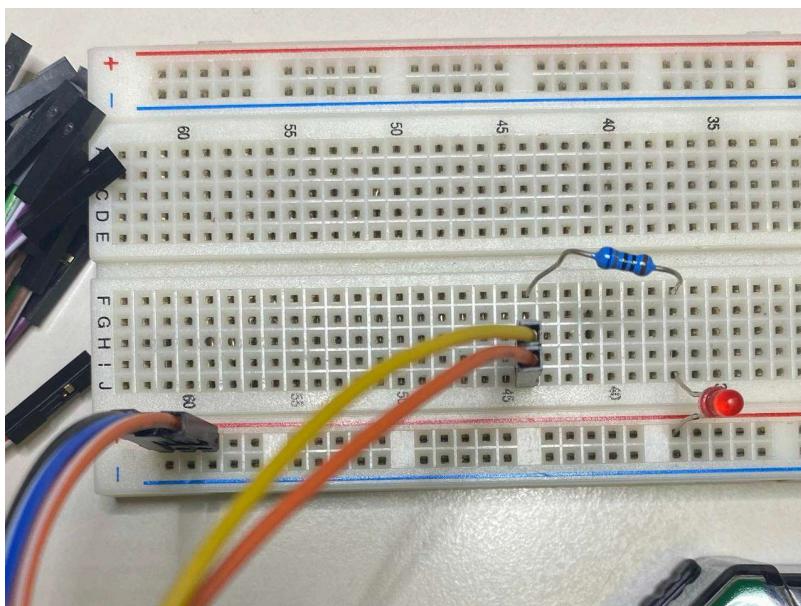


Figura 2: circuito realizzato in lab.

Inoltre:

- Annotare il valore della corrente in corrispondenza del quale il LED inizia a brillare, riportare il comportamento della sua luminosità all'aumentare del potenziale di ingresso.
- Plottare in scala semilogaritmica la curva caratteristica e salvarla in file LED.pdf

Visto lo schema del circuito risulta chiaro che:

- $V_{LED} = V_{Ch2}$

- $I = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$

Di seguito riportiamo il grafico della curva caratteristica del LED:

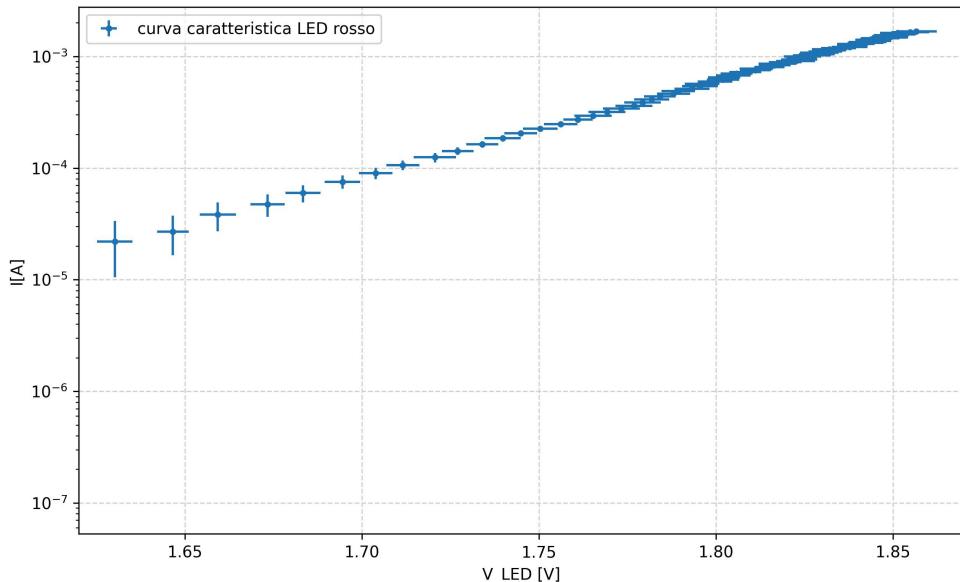


Figura 3: curva caratteristica acquisita per il LED rosso, i primi dati non sono stati plottati, in quanto le incertezze associate risultavano troppo grandi in scala semilogaritmica; il range di ddp scelto va da 1 a 3 V, considerando la conduzione del diodo.

ed il valore di ddp e della corrente per i quali il LED inizia ad emettere luce:

- $V_{soglia} = 1.5 \text{ V}$
- $I_{soglia} = 20 \mu \text{ A}$

Infine si osserva che all'aumentare del potenziale del segnale di ingresso la luminosità del LED tende ad aumentare evidentemente con lo stesso andamento di una carica di un condensatore, infatti tende a "saturare", cioè, superata una prima fase ripida, la luminosità aumenta in maniera sempre più impercettibile.

Nota: prima che il LED iniziasse ad emettere luce si è notato che il potenziale registrato al canale 2 era leggermente superiore al potenziale misurato al canale 1 dell'oscilloscopio; il problema sorge dalle capacità parassite e resistenze di contatto presenti nel circuito montato (breadboard e pin dei canali dell'oscilloscopio), queste modificano leggermente il potenziale. Tale differenza porta ad una corrente negativa (almeno se viene calcolata nel modo visto sopra e solo in corrispondenza delle ddp per le quali non ho ancora emissione luminosa), per ovviare a tale problema, nel plot della curva caratteristica è stato aggiunto un piccolo offset alla corrente (circa un microAmpere).

## Task 3

Obiettivo: ricavare media e deviazione standard della lunghezza d'onda della luce emessa dai LED a disposizione.

Per farlo sono stati presi gli spettri raccolti della radiazione emessa dal LED, è stato rimosso il loro offset in maniera empirica e successivamente, trattandoli come distribuzioni, è stata calcolata la lunghezza d'onda media della radiazione emessa e la relativa deviazione standard (calcolata come semilarghezza a metà altezza del picco di massima emissione).

Di seguito i risultati ottenuti:

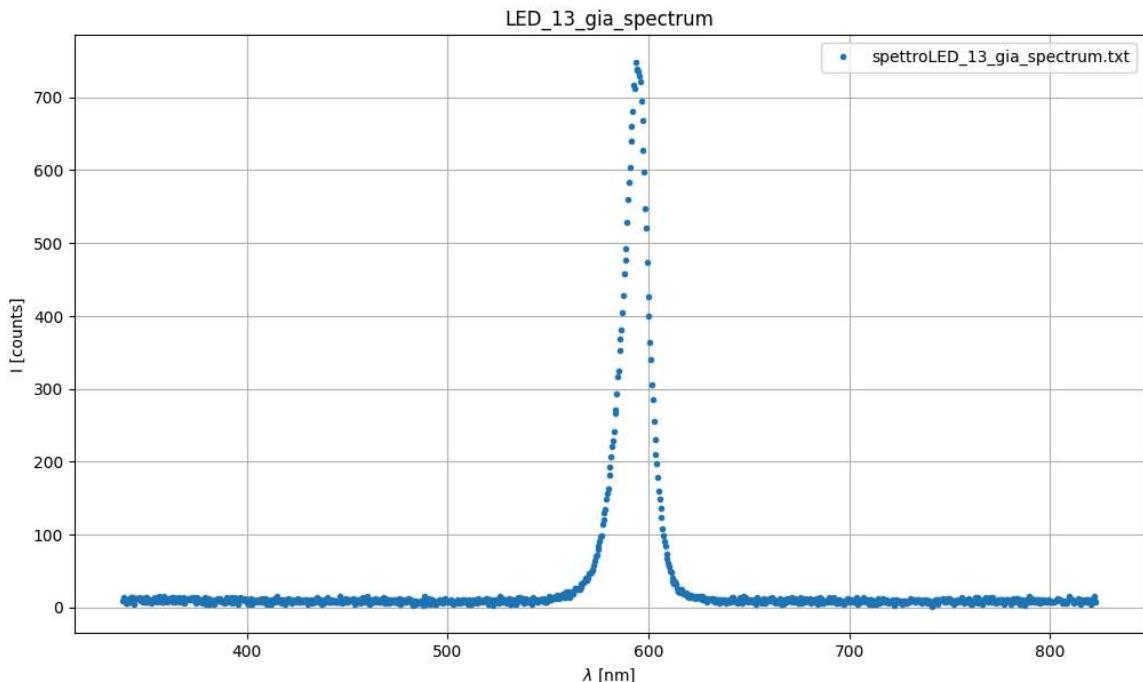


Figura 4: Esempio di uno degli spettri su cui è stata fatta l'analisi dati

LED	Mean [nm]	Standard deviation [nm]
Rosso	625	7
Blu	469	7
Giallo	588	7
Verde	532	1
Arancione	604	8
Viola	483	6

## Task 4

Obiettivo: Acquisire curva caratteristica dei vari LED e determinare i voltaggi per i quali viene raggiunta una data corrente di soglia (scelta univocamente, ed arbitrariamente, uguale per tutti i LED); generare un grafico di  $V(I_{soglia})$  in funzione di  $1/\lambda$  per i dati raccolti.

Sono state raccolte tutte le curve caratteristiche dei LED a disposizione (li stessi di cui si sono manipolati gli spettri nel task precedente) e si è scelta come corrente di soglia  $I_{soglia} = 100\mu A$ . La scelta di tale valore non è del tutto arbitraria, come già spiegato al task 2, per bassi voltaggi applicati al LED si ottengo correnti piccolissime (il cui valore è circa costante al variare del voltaggio, in prima approssimazione), ma al contrario, le loro incertezze associate restano molto maggiori del valore centrale (di ordini di grandezze) ed in scala semilogaritmica, questo impedisce di poter visualizzare bene i dati. In prossimità del valore scelto, invece, i valori centrali delle correnti erano sufficientemente alti per poter visualizzare bene i punti sperimentali per tutti i LED in uso.

Infine i valori dei voltaggi di soglia sono stati presi prendendo il valore di voltaggio corrispondente alla corrente più vicina al valore di soglia scelto. Di seguito i valori raccolti ed il plot  $V(I_{soglia})$  vs  $1/\lambda$ :

LED	$V(I_{soglia})$ [V]	Incertezza [V]
Rosso	1.710	0.005
Arancione	1.769	0.006
Giallo	1.798	0.004
Verde	2.210	0.005
Blu	2.501	0.005
Viola	2.885	0.006

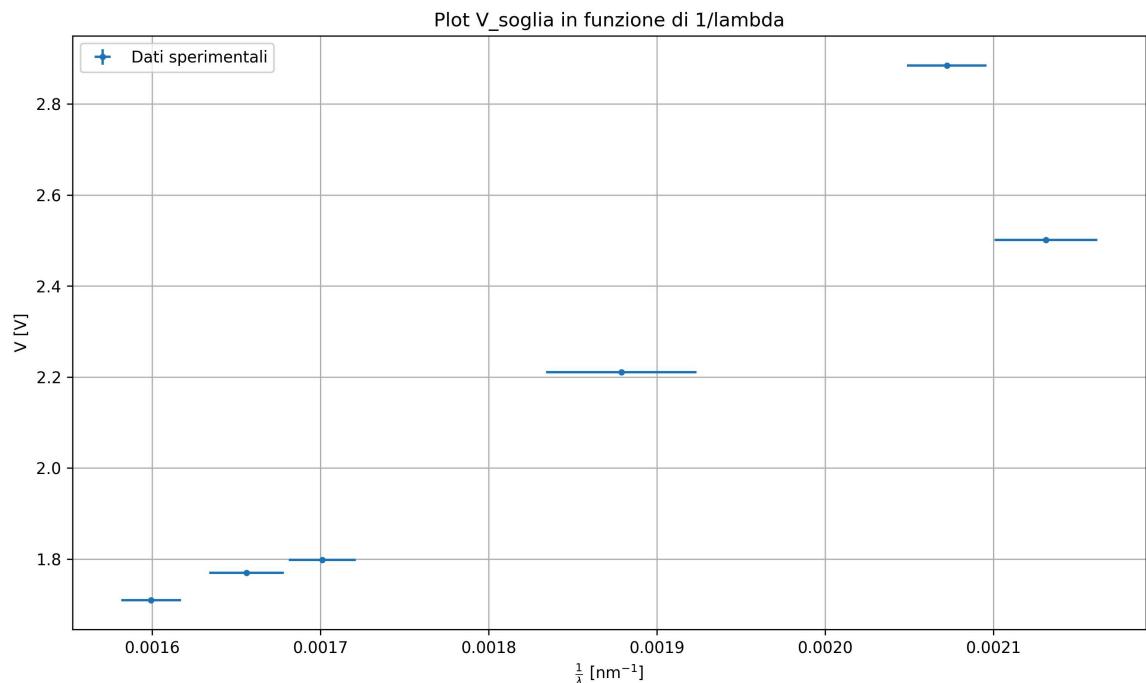


Figura 5: plot  $V(I_{soglia})$  vs  $1/\lambda$ , notare i grossi errori sulle x e i due punti in alto a destra che chiaramente non seguono l'andamento lineare atteso, infine gli errori sulle y sono presenti, ma sono anche molto piccoli, quindi difficili da vedere nel plot.

## Task 5

Obiettivo: Eseguire un fit lineare dei dati ottenuti nel task precedente.

Viste le grosse incertezze sulle  $x$ , per risparmiare tempo si preferisce fittare la funzione inversa (in modo da ritrovarsi con grossi errori sulle  $y$ , in accordo con le condizioni necessarie per eseguire un buon fit), con l'accortezza che il coefficiente angolare così ottenuto sarà il reciproco della quantità originariamente cercata, per essere più chiari:

$$y = ax + b \iff x = \frac{1}{a}y - \frac{b}{a}$$

Dove  $y = V(I_{soglia})$  e  $x = \frac{1}{\lambda}$

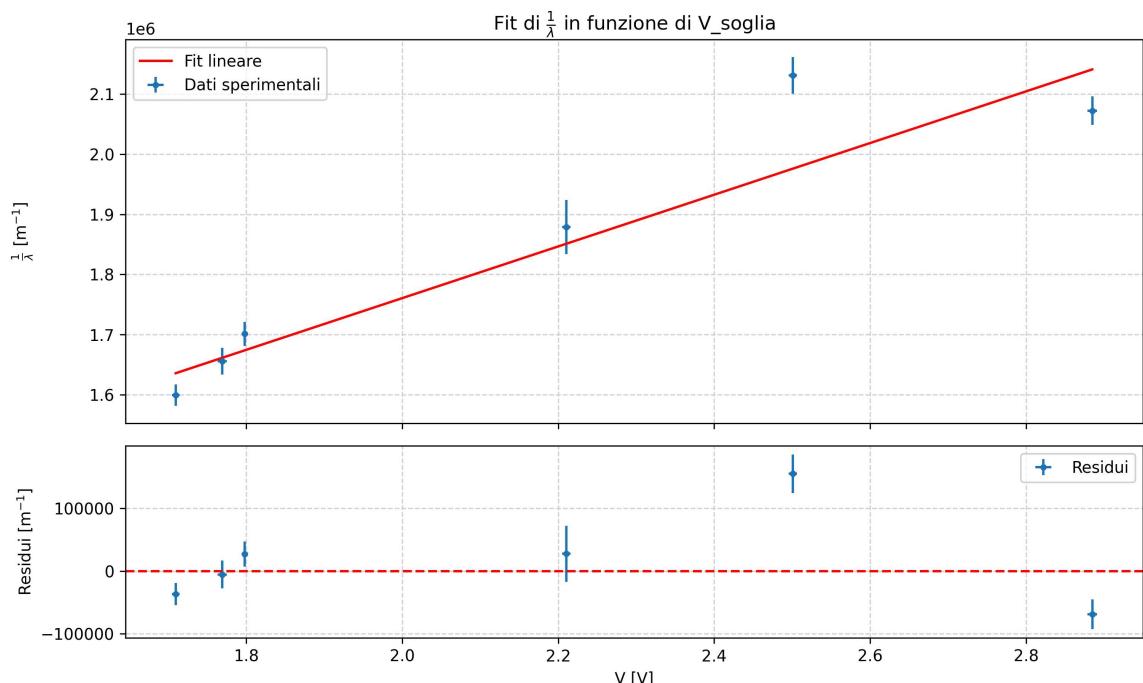
Per essere più precisi, anche per quanto riguarda i valori attesi dei parametri di fit, l'espressione completa del modello utilizzato è la seguente:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e}{hc}V(I_{soglia}) + b$$

Oss: la costante del modello "b" ha assorbito al suo interno il segno meno ed il reciproco del coefficiente angolare "originale", ciò è stato fatto in quanto si è più interessati al coefficiente angolare del modello ultimo sopra riportato, in quanto da esso si ricaverà la stima della costante di Planck, mentre l'offset, in questo senso, riveste un ruolo marginale.

Quindi di seguito i valori dei dati ottenuti ed il grafico di fit:

Parametro	Valore	Valore atteso
$\chi^2_{rid}$	$10.2 \pm 0.7$	1
$a$	$(4.3 \pm 0.2) \cdot 10^5$ C/Jm	806554 C/Jm
$b$	$(9.0 \pm 0.4) \cdot 10^5$ [m <sup>-1</sup> ]	difficile da stimare



*Figura 5: grafico di fit con il modello lineare riportato sopra, notare come i residui non siano correlati e come il modello fatichi a ben approssimare gli ultimi punti, notare come i valori delle lunghezze d'onda siano stati riscalati in metri, da nanometri, in modo da matchare le unità di multipli delle unità di misura, visto che si è usato il valore di  $c$  in m/s.*

Visti i dati raccolti è risultato difficile riuscire a stimare un valore di partenza dell'offset, fortunatamente un fit lineare riesce a convergere autonomamente, quindi non è stato un problema particolarmente grave. Infine il coefficiente angolare ottenuto dal fit ha almeno lo stesso ordine di grandezza di quello atteso (stimato a partire dai valori meglio noti delle costanti fondamentali in gioco) ed il chi quadro ridotto è decisamente troppo alto.

Per quanto riguarda il valore ottenuto della costante di Planck, abbiamo:

$$h = (1.24 \pm 0.06) \cdot 10^{-33} J \cdot s$$

Risultato ottenuto al 5%, ma chiaramente in disaccordo con il valore atteso:

$h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ , i due valori risultano distare di almeno 9 sigma.

Osservazione: per ricavare  $h$  si sono usati i valori di  $e$  e  $c$  forniti dal CODATA, quindi assunti noti con esattezza.

È chiaro che il fit ottenuto non sia particolarmente significativo, servirebbero più punti sperimentali (quindi più LED per esplorare più lunghezze d'onda), ma anche una stima migliore delle incertezze sulle lunghezze d'onda, cercando di analizzare meglio gli spettri acquisiti, evitando stime di semilarghezza a metà altezza brute. Almeno i residui non risultano correlati, ma con così pochi dati potrebbe anche essere un bias.

## Task 6

Obiettivo: Collegare il fotodiodo ad un tester utilizzandolo sia come amperometro che come voltmetro, così da poter verificare il funzionamento del fotodiodo sia nel regime fotoconduttivo che fotovoltaico rispettivamente. Verificare, di conseguenza, i valori di  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  in varie condizioni di illuminazione.

Si è scelto di verificare la risposta del fotodiodo nelle seguenti condizioni di illuminazione:

1. Luce naturale della stanza (condizione: STZ)
2. Luce della lampada a LED del tavolo di H1 (condizione: LPD)
3. Torcia del telefono (condizione: TRC)

Cond	$V_{OP}$ [V]	$I_{SC}$ [A]
STZ	$0.3347 \pm 0.0002$	$(5.99 \pm 0.01) \cdot 10^{-6}$
LPD	$0.4330 \pm 0.0002$	$(0.877 \pm 0.003) \cdot 10^{-3}$
TRC	$0.5770 \pm 0.0002$	$(1.877 \pm 0.001) \cdot 10^{-3}$

Come si vede dai dati riportati nella tabella, all'aumentare dell'intensità della luce emessa dalla sorgente luminosa scelta, la risposta del fotodiodo aumenta, come atteso, sia in voltaggio che in corrente.

## Task 7

Obiettivi:

- Realizzare il circuito in figura utilizzando  $R_2 = 10k\ \Omega$ ;

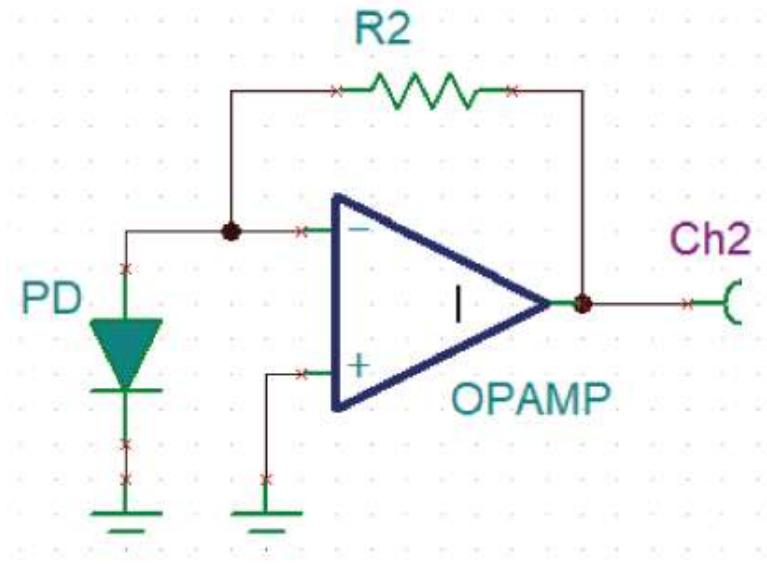


Figura 6: Schema circuitale dell'amplificatore a transimpedenza

- Utilizzando demoScope.ipynb visualizzare il segnale del fotodiodo su una scala temporale di circa 100ms e studiare il segnale misurato dalle varie sorgenti a disposizione;
- Valutare quanto potrebbe disturbare le misure future.

Abbiamo realizzato il circuito in figura come indicato:

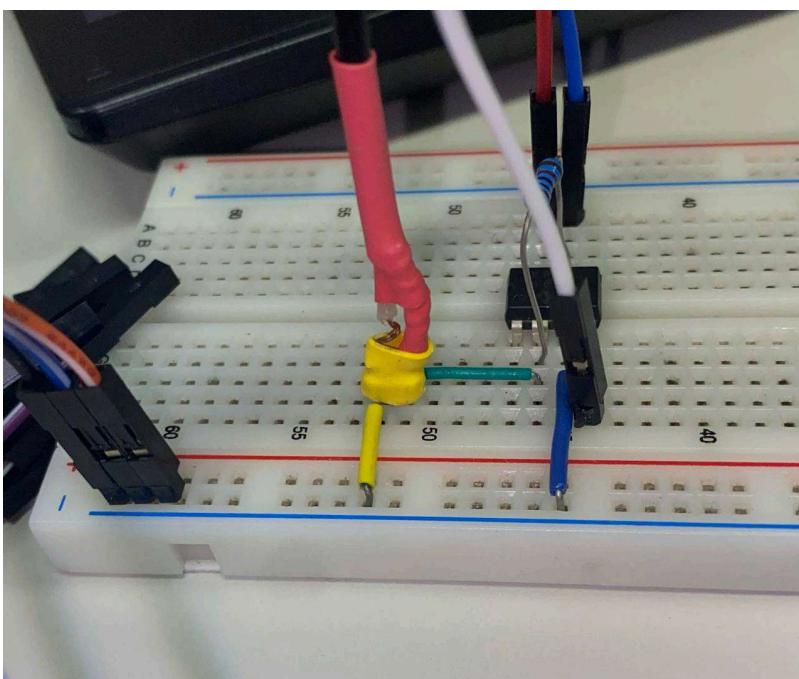
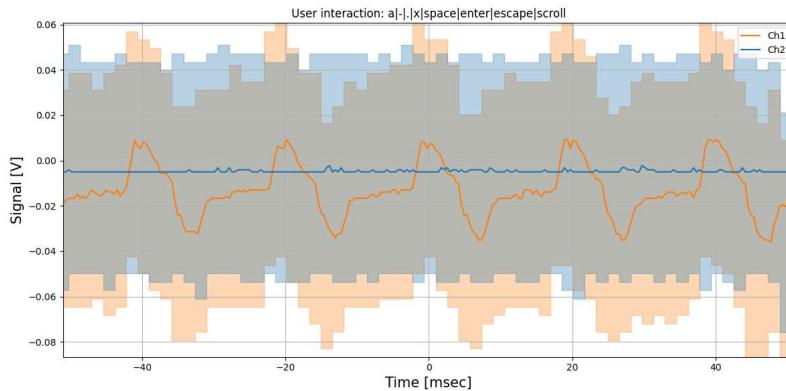


Figura 7: Realizzazione del circuito dell'amplificatore a transimpedenza.

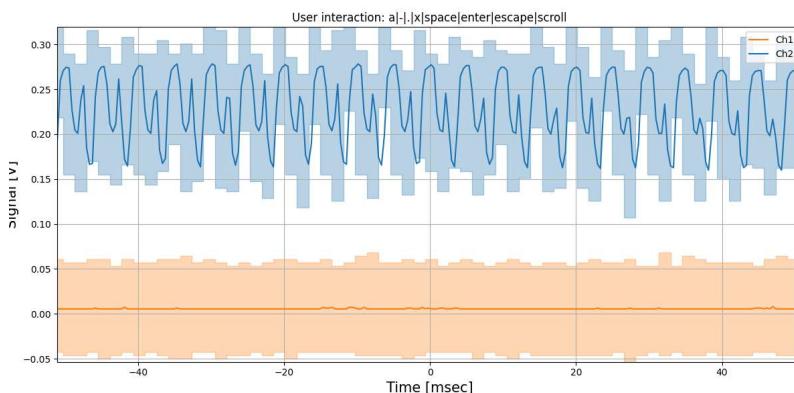
Abbiamo poi visualizzato il segnale su demoScope.ipynb utilizzando una scala temporale di circa 100ms ponendo  $f_s = 10kHz$  e npt = 1024, in quattro configurazioni diverse per il fotodiodo:

- coperto (al buio);



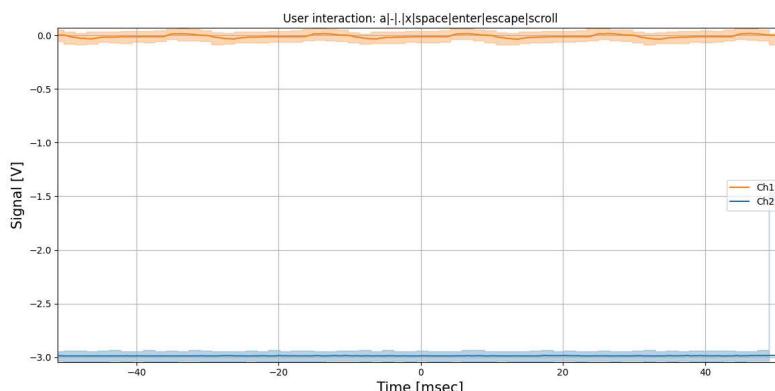
*Figura 8: visualizzazione del segnale del fotodiodo coperto*

- luce della stanza;



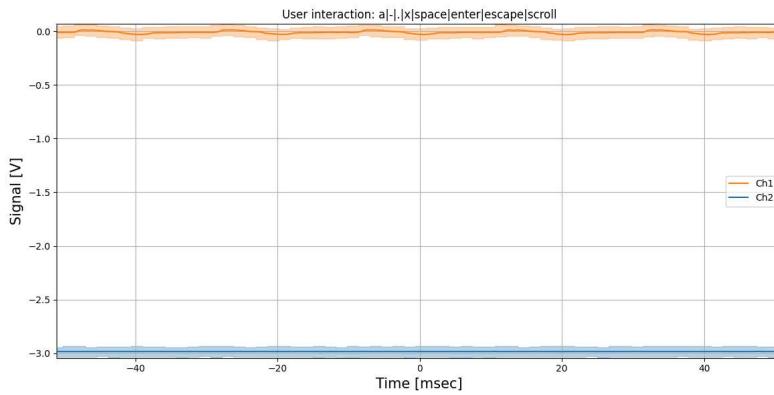
*Figura 9: visualizzazione del segnale del fotodiodo esposto alla luce del treno*

- luce della lampada;



*Figura 10: visualizzazione del segnale del fotodiodo esposto alla luce della lampada*

- flash;



*Figura 11: visualizzazione del segnale del fotodiodo esposto alla luce del flash del telefono*

calcoliamo prima la relazione tra  $I_{PD}$  e  $V_{OUT}$  nel circuito a transimpedenza:

Utilizzando le regole d'oro e scrivendo la legge di Kirchoff dei nodi otteniamo

$$I_{PD} + I_{R_2} = 0$$

La corrente attraverso la resistenza è:

$$I_{R_2} = \frac{V_- - V_{OUT}}{R_2}$$

Poiché  $V_- \approx 0$ , si ottiene:

$$I_{PD} = -\frac{V_{OUT}}{R_2}$$

da cui segue:

$$V_{OUT} = -R_2 I_{PD}$$

Come atteso, la ddp del fotodiodo cresce in valore assoluto linearmente con la luminosità della sorgente.

Per valutare la qualità delle misure acquisite con il fotodiodo, si può stimare l'errore statistico associato a una serie di dati ripetuti o fluttuanti.

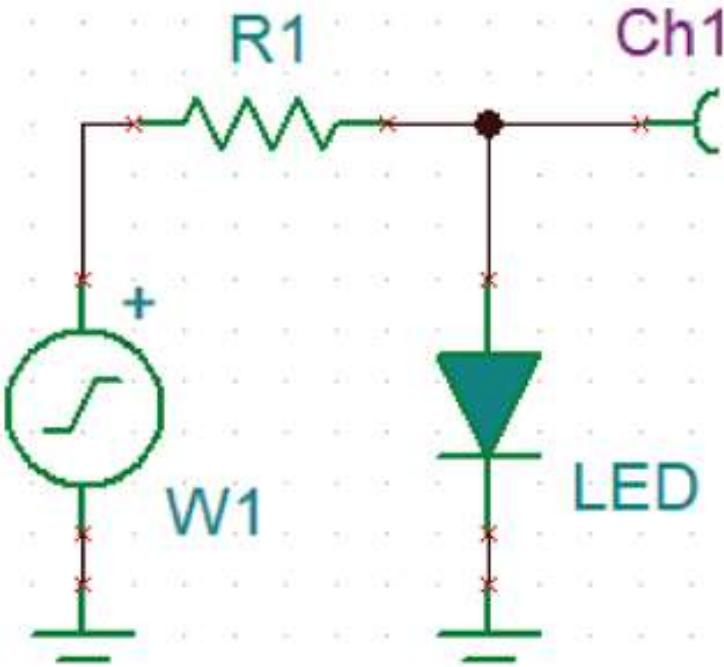
Lo strumento più semplice ed efficace è la deviazione standard, che nel caso dell'acquisizione al buio (dove la fluttuazione indica plausibilmente proprio il rumore strumentale) ottiene:

Media: -1.75e-02 V Deviazione standard: 1.58e-02 V

## Task 8

Obiettivi:

- Completare il circuito del task precedente con il seguente circuito e usare `sweeptbias.ipynb` per ricavare la funzione di risposta che lega la corrente misurata sul fotorivelatore  $I_{PD}$  a quella che alimenta il LED  $I_{LED}$ ;



*Figura 12: completamento del circuito del task 7*

- Verificare la linearità e l'intensità di emissione, verificando se i parametri riportati nel datasheet individuano una buona regione di lavoro;
- Costruire un grafico della potenza luminosa emessa in funzione di  $I_{LED}$  e verificare la consistenza con quanto dichiarato nel datasheet.

Abbiamo completato il circuito inserendo la maglia che coinvolge il led e abbiamo montato il fotodiodo e il led sulla basetta in modo tale che il fascio di luce del led fosse ben collimato sul fotorivelatore:

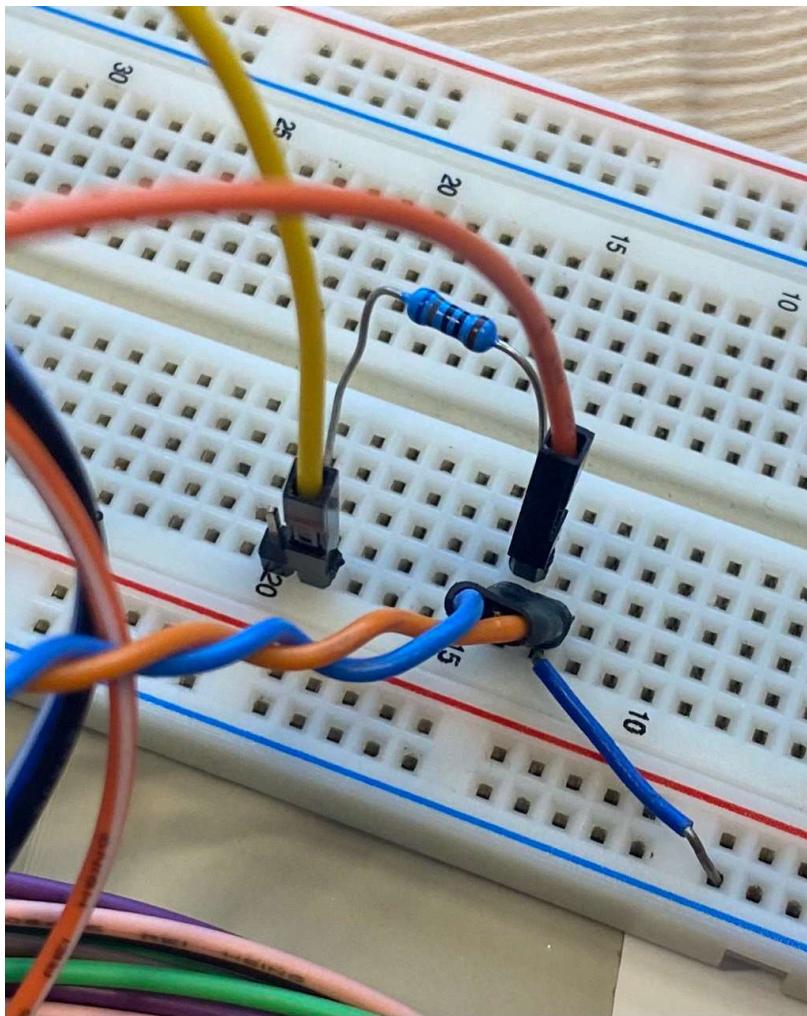


Figura 13: inserimento della maglia del led nel circuito



Figura 14: sistemazione di fotodiodo e led nella basetta

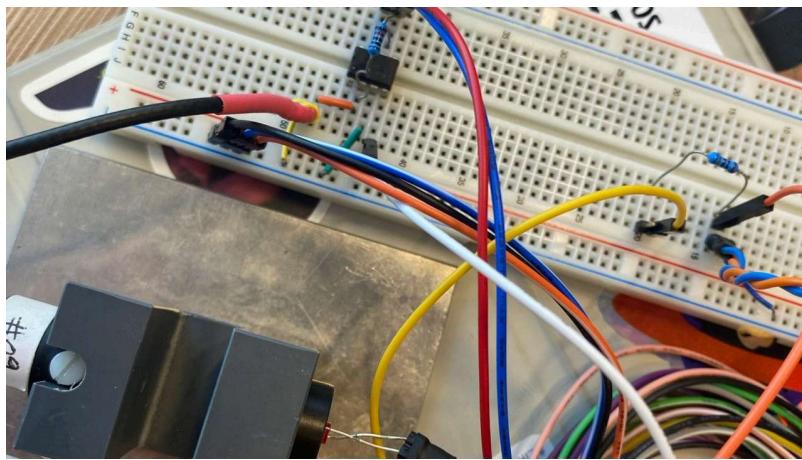


Figura 15: circuito completo

Per discutere la linearità, possiamo notare che:

- nel circuito di sinistra il generatore  $W_1$  alimenta il LED, la cui corrente è data da:

$$I_{LED} = \frac{V_{W1} - V_{LED}}{R_1}$$

- nel circuito di destra il fotodiodo (PD), colpito dalla radiazione luminosa del LED, genera una corrente proporzionale alla potenza ottica incidente  $W$ :

$$I_{PD} = \eta(\nu) \frac{e}{h\nu} W$$

dove:

- $\eta(\nu)$  è l'efficienza quantica del fotodiodo alla frequenza  $\nu$ ,
- $e$  è la carica dell'elettrone,
- $h\nu$  è l'energia del fotone.

La potenza ottica emessa dal LED è a sua volta proporzionale alla corrente che lo attraversa, fintanto che il dispositivo opera in regime lineare, dunque anche alla sua potenza:

$$W \propto I_{LED}$$

Combinando le due relazioni si ottiene quindi:

$$I_{PD} \propto W \propto I_{LED}$$

In condizioni ideali (tra cui efficienza quantica costante, rumore e luminosità ambientale trascurabili) ci si aspetta dunque un andamento lineare:

$$I_{PD} = k I_{LED}$$

ossia un grafico  $I_{PD}$  vs  $I_{LED}$  che mostri una retta passante per l'origine.

Un aumento di corrente nel LED comporta quindi un aumento proporzionale di luce emessa, che produce un incremento proporzionale della photocorrente nel fotodiodo, e dalle acquisizioni con `sweepbias.ipynb` ci aspettiamo dunque proprio un comportamento lineare.

Abbiamo acquisito i dati per ciascun led al buio ed abbiamo effettuato fit lineari ( $I_{PD} = m I_{LED} + b$ ) su ogni configurazione; è plausibile che qualche punto iniziale delle acquisizioni si riferisca ancora alla corrente di buio del fotodiodo, traducendosi in un andamento non immediatamente lineare. Le incertezze sono state stimate tramite deviazione standard sulla media di cinque sweep. Abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

LED (colore)	$m$ [A/A]	$b$ [A]	$\chi^2_{\text{rid}}$
<b>Arancio</b>	$(3.69 \pm 0.37) \times 10^{-4}$	$(-1.36 \pm 0.06) \times 10^{-7}$	$22.00 \pm 0.14$
<b>Rosso</b>	$(1.25 \pm 0.08) \times 10^{-4}$	$(-1.00 \pm 0.05) \times 10^{-7}$	$7.59 \pm 0.14$
<b>Giallo</b>	$(3.10 \pm 0.33) \times 10^{-4}$	$(-1.11 \pm 0.05) \times 10^{-7}$	$27.30 \pm 0.14$
<b>Verde</b>	$(2.47 \pm 0.43) \times 10^{-3}$	$(-4.06 \pm 0.54) \times 10^{-8}$	$524.37 \pm 0.14$
<b>Blu</b>	$(3.81 \pm 0.73) \times 10^{-3}$	$(-1.22 \pm 0.06) \times 10^{-7}$	$28.85 \pm 0.14$
<b>Viola</b>	$(4.34 \pm 0.41) \times 10^{-3}$	$(-8.65 \pm 0.57) \times 10^{-7}$	$1.91 \times 10^4 \pm 0.14$

**Nota:** le incertezze sui parametri derivano dalla matrice di covarianza del fit pesato, mentre  $\chi^2_{\text{rid}}$  è calcolato come  $\chi^2/\text{ndof}$  con incertezza teorica  $\sigma_{\chi^2_{\text{rid}}} = \sqrt{2/\text{ndof}}$ .

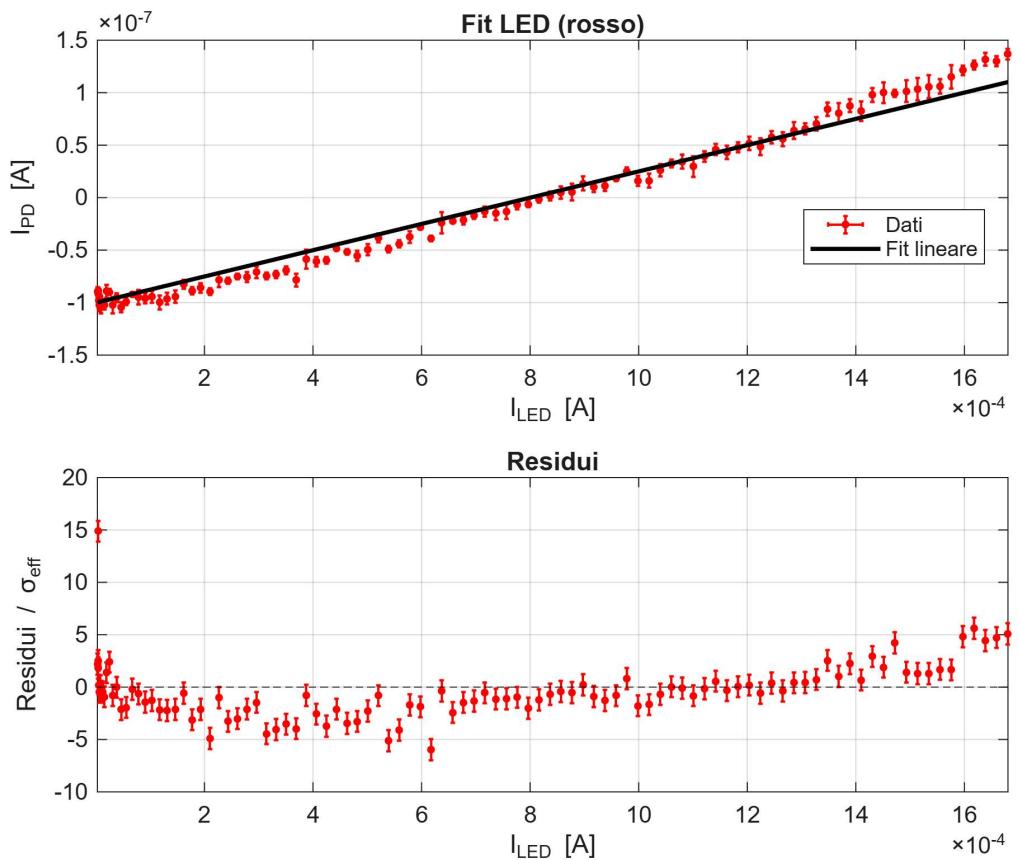


Figura 16: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED rosso

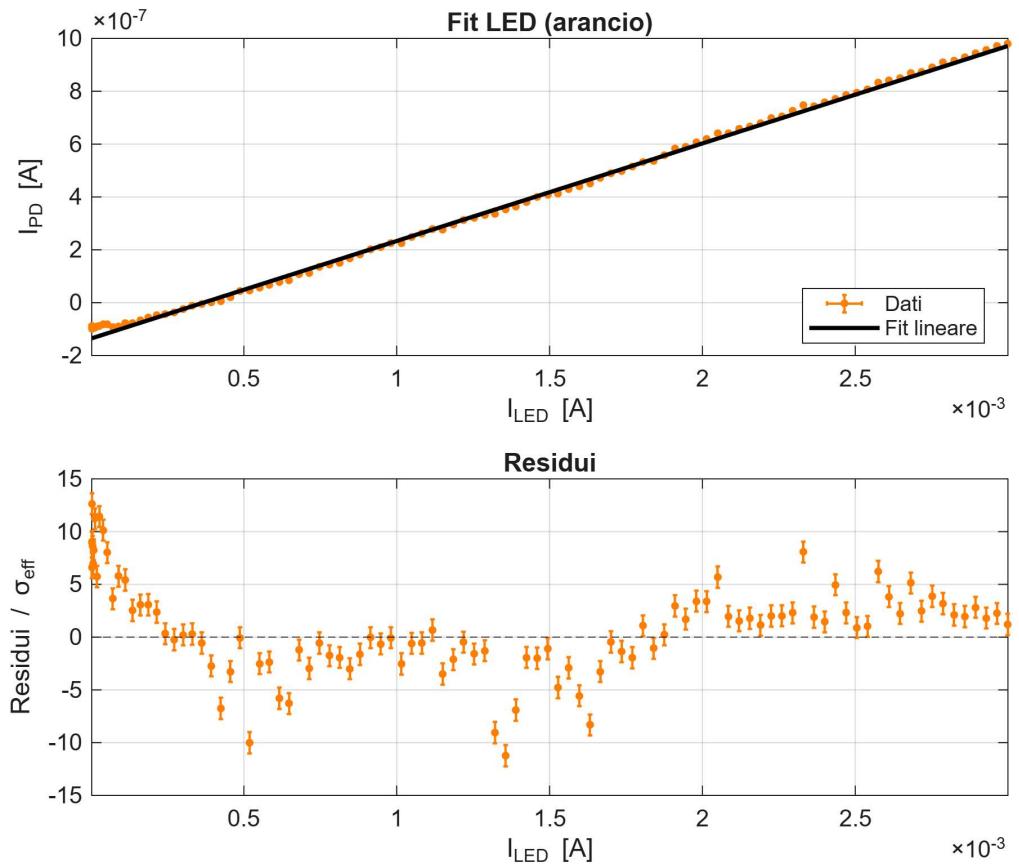


Figura 17: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED arancio

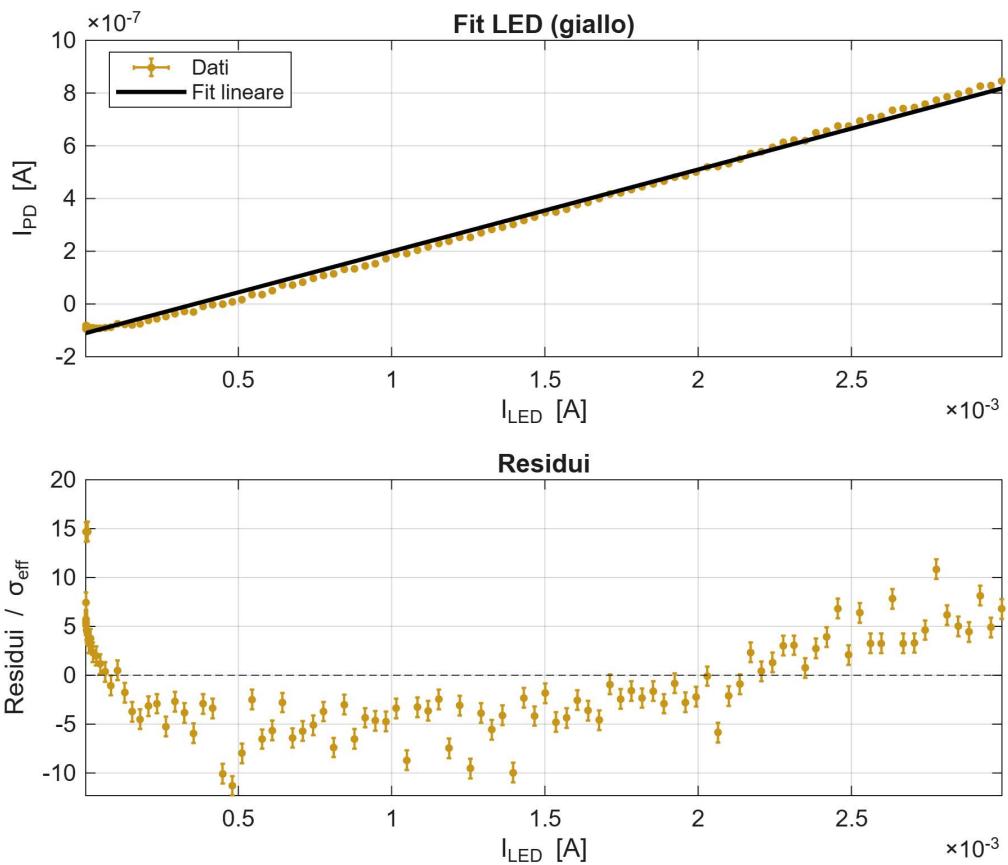


Figura 18: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED giallo

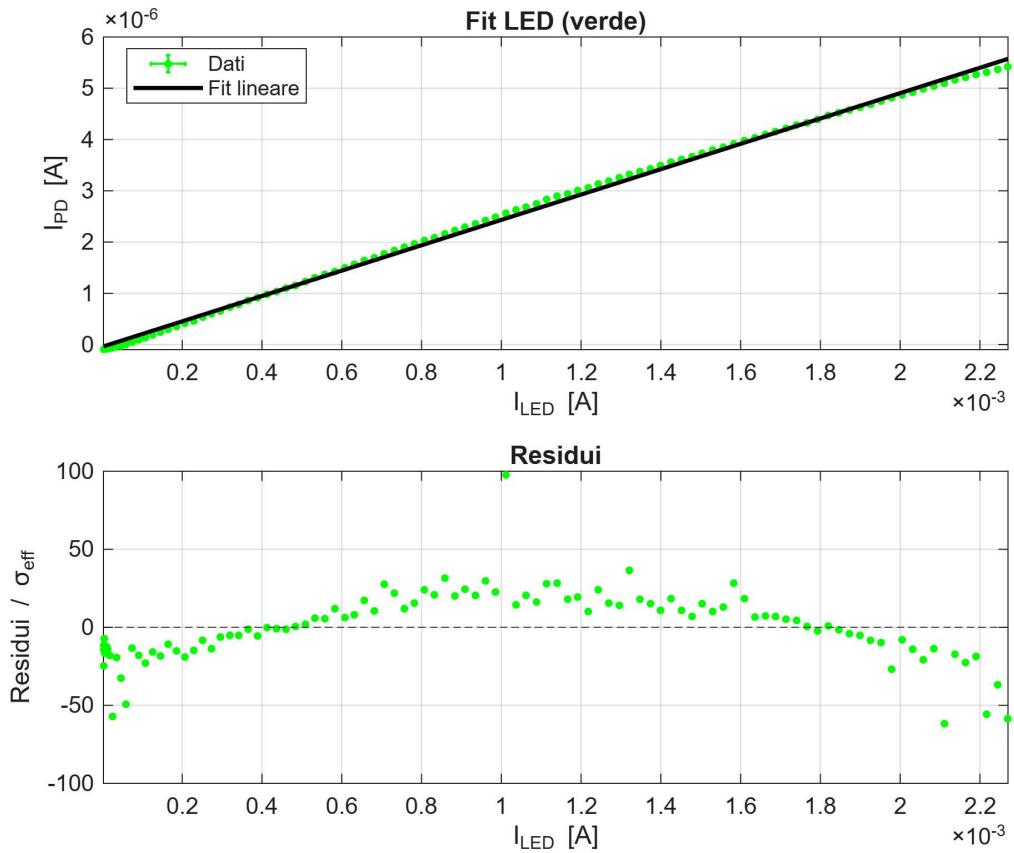


Figura 19: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED verde

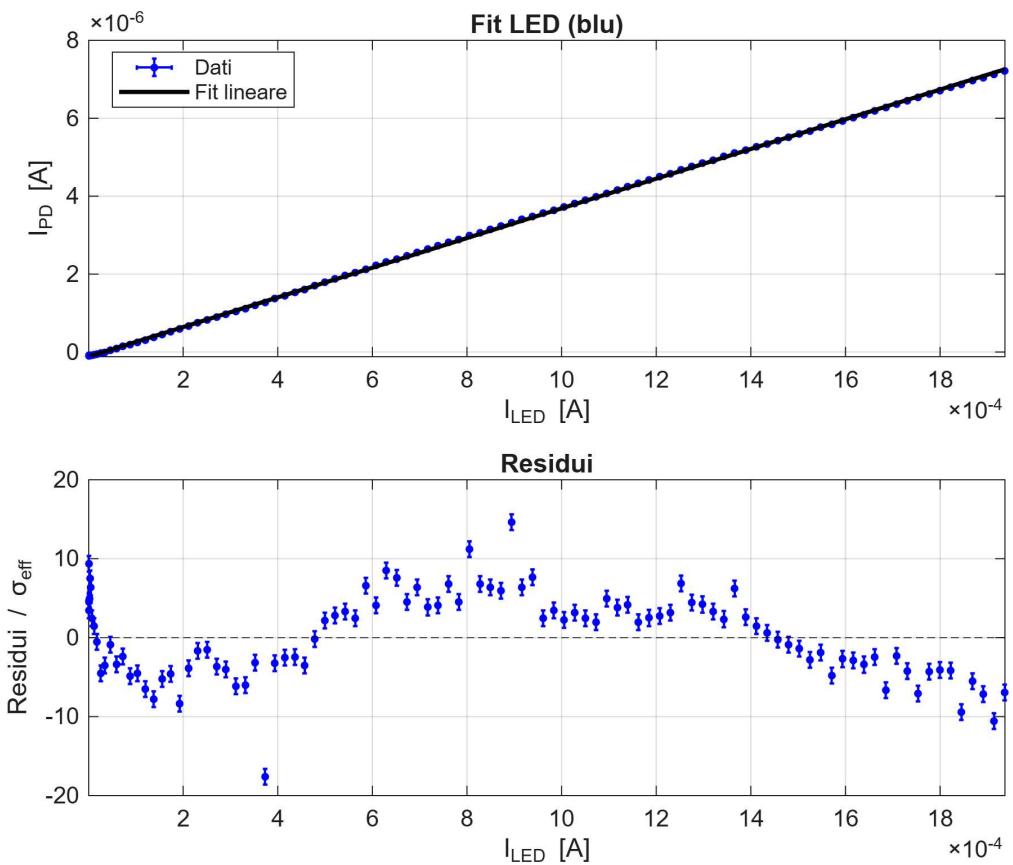


Figura 20: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED blu

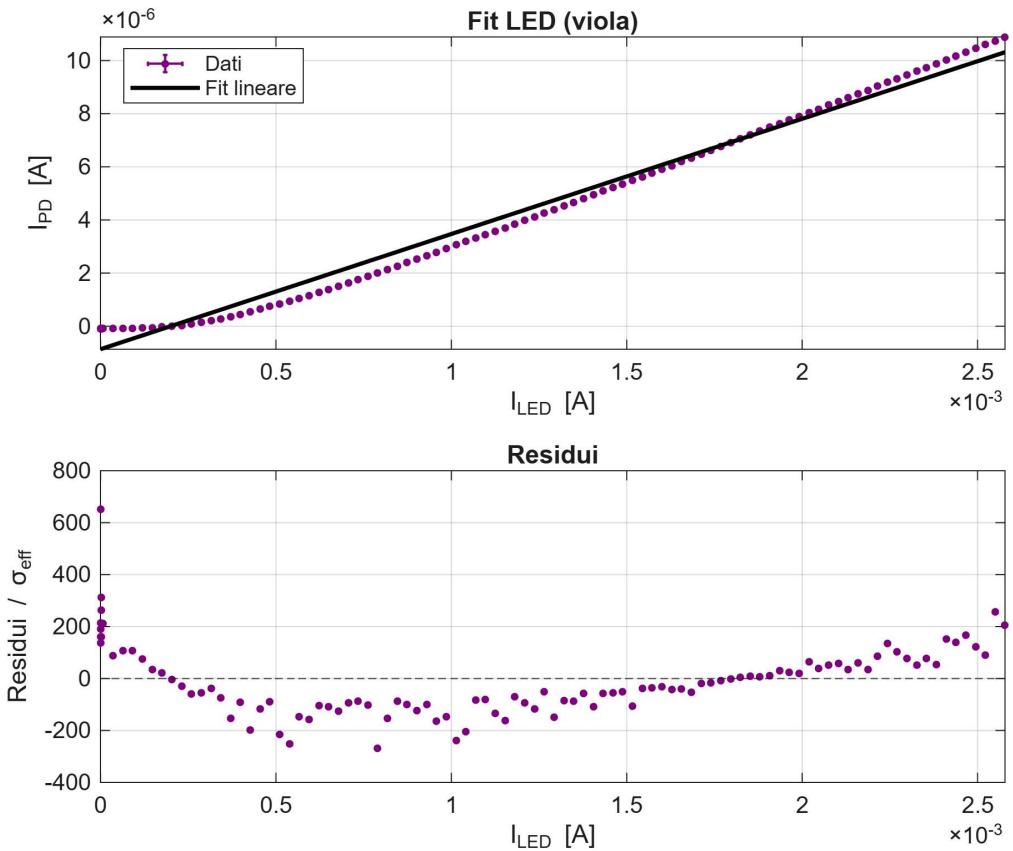


Figura 21: Fit e residui per il fotodiodo alimentato dal LED viola

L'andamento  $I_{PD}$  in funzione di  $I_{LED}$  mostra una dipendenza quasi lineare per tutti i LED, come previsto dal modello teorico  $I_{PD} \propto I_{LED}$ , ma con deviazioni significative per alcune lunghezze d'onda.

Il modello lineare funziona bene solo quando:

- il LED opera nel regime lineare di emissione;
- il fotodiodo mantiene risposta lineare;
- il segnale è abbastanza sopra al rumore da garantire un buon SNR.

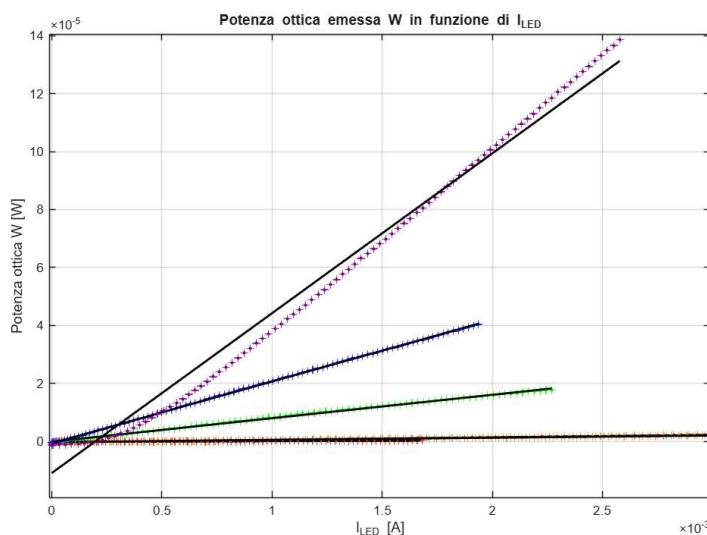
Nel LED rosso il fit è il migliore ( $\chi^2_{\text{rid}} \approx 7.6$ ), i residui sono distribuiti casualmente e senza evidenti correlazioni sistematiche: questo indica che il modello lineare descrive bene la relazione  $I_{PD} - I_{LED}$ . Anche i LED arancio e giallo mostrano una linearità discreta, seppur con  $\chi^2_{\text{rid}}$  più alto, probabilmente per leggere variazioni di rumore o piccole fluttuazioni dovute alla luce ambiente.

Per i LED verde, blu e viola i valori di  $\chi^2_{\text{rid}}$  sono molto elevati ( $10^2 - 10^4$ ), segno che il modello lineare non è più adeguato:

- il fotodiodo al silicio ha bassa sensibilità a lunghezze d'onda corte ( $\lambda < 550$  nm), quindi il segnale misurato è debole e distorto dal rumore;
- nei colori blu e viola i residui sono chiaramente correlati, con andamento sistematico positivo alle alte correnti e negativo alle basse: questo suggerisce una "curvatura" della risposta reale, forse per saturazione del LED o per non linearità ottica del fotodiodo.

Confrontando i risultati con la regione di funzionamento consigliata dal produttore, si osserva che i valori riportati dal produttore sono consistenti con il funzionamento dei led (in merito al range di ddp utilizzato per la sweep, in quanto non è altrimenti possibile arrivare a  $\simeq 20mA$ ) in quelli a più bassa energia, mentre quelli nel violetto probabilmente presentano un funzionamento leggermente diverso.

Analogo discorso vale per il plot della potenza incidente in funzione di  $I_{LED}$ :



\*Figura 22: andamento della potenza in funzione di  $I_{LED}$

Si può vedere che l'andamento è lo stesso ed anche il  $\chi^2$  nei fit, poiché in effetti si tratta semplicemente di riscalare per una costante:

$$I_{LED} \propto I_{PD} = \eta(\nu) \frac{W}{H\nu} e$$

dove il coefficiente di W è la responsività del dispositivo, ricavabile dal datasheet:

[Figure 2-8] Spectral response (Si photodiodes)

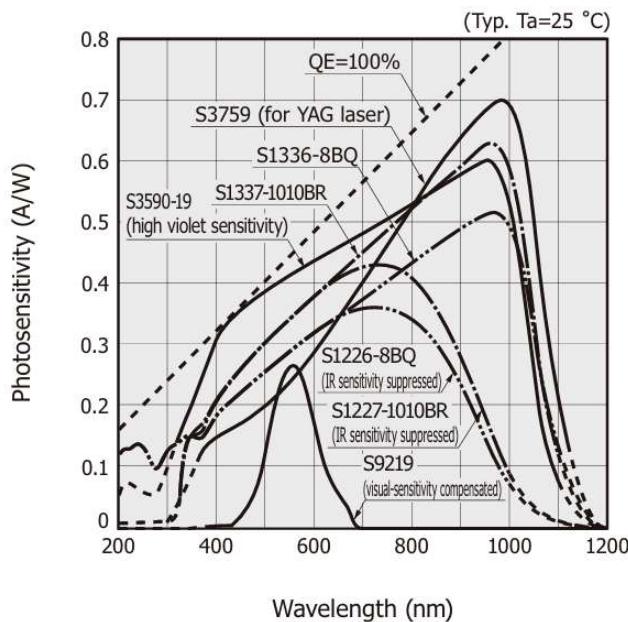


Figura 23: fig. 2-8 pag.6, kspd901e. Curva S1337-1010BR

Le osservazioni sperimentali sono consistenti con i valori attesi per la potenza, in quanto il viola è più energetico del rosso.

Per completezza ed approfondimento, abbiamo confrontato la grandezza fotometrica riportata nel datasheet (intensità luminosa, in millicandele) con la potenza ottica reale che il fotodiodo riceve e che abbiamo misurato sperimentalmente.

Il datasheet dei LED fornisce l'intensità luminosa  $I_v$  in mcd, che è definita come:

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

dove:

- $\Phi_v$  è il **flusso luminoso** (lumen),
- $d\Omega$  è l'**angolo solido** (steradiani).

La **potenza luminosa totale** emessa dal LED (flusso luminoso) è:

$$\Phi_v = I_v \Omega_{LED}$$

con  $\Omega_{LED}$  l'angolo solido emesso dal LED, che può essere stimato dal **mezzo angolo di emissione**  $\theta_{1/2}$ :

$$\Omega_{LED} = 2\pi (1 - \cos \theta_{1/2})$$

L'intensità luminosa (in lumen/steradiante) è una grandezza fotometrica, cioè ponderata con la sensibilità dell'occhio umano  $V(\lambda)$ . Per ottenere la potenza radiativa (Watt), si usa la relazione:

$$\Phi_v = 683 V(\lambda) \Phi_e$$

da cui:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{683 V(\lambda)} = \frac{I_v \Omega_{LED}}{683 V(\lambda)}$$

dove:

- $\Phi_e$  è il flusso radiativo (W),
- $V(\lambda)$  è la funzione di efficienza visiva fotopica (massimo a 555 nm,  $V(555) = 1$ ),
- 683 lm/W è la costante di conversione per la luce a 555 nm.

Il fotodiodo riceve solo una frazione della potenza totale, che dipende dalla geometria di misura.

Se il fotodiodo ha area sensibile  $A_{PD}$  e si trova a distanza  $d$  dal LED, l'angolo solido sotteso dal fotodiodo è:

$$\Omega_{PD} \approx \frac{A_{PD}}{d^2}$$

(vale se  $A_{PD} \ll d^2$ ).

La frazione di luce raccolta è quindi:

$$\eta_{coll} = \frac{\Omega_{PD}}{\Omega_{LED}} = \frac{A_{PD}}{d^2 \Omega_{LED}}$$

La potenza ottica che incide sul fotodiodo (quella che misuriamo) è:

$$W_{PD}^{(ds)} = \Phi_e \eta_{coll} = \frac{I_v A_{PD}}{683 V(\lambda) d^2}$$

N.B. l'angolo solido del LED  $\Omega_{LED}$  si semplifica, quindi non serve conoscerlo con precisione.

$$W_{PD}^{(exp)} = \frac{I_{PD}}{\mathcal{R}(\lambda)}$$

dove:

- $I_{PD}$  è la corrente del fotodiodo,
- $\mathcal{R}(\lambda)$  è la **responsività spettrale** del fotodiodo [A/W], letta direttamente dalla figura precedente

Colore LED	$\lambda$ [nm]	$\mathcal{R}(\lambda)$ [A/W]
Viola	$\approx 400$	0.08
Blu	$\approx 460$	0.17
Verde	$\approx 530$	0.30
Giallo	$\approx 590$	0.40
Arancio	$\approx 610$	0.43

Colore LED	$\lambda$ [nm]	$\mathcal{R}(\lambda)$ [A/W]
------------	----------------	------------------------------

Rosso	$\approx 630$	0.45
-------	---------------	------

Per verificare la consistenza con il datasheet, si confrontano i valori di potenza calcolati dai due approcci:

$$\frac{W_{PD}^{(exp)}}{W_{PD}^{(ds)}} = \frac{I_{PD}/\mathcal{R}(\lambda)}{I_v A_{PD}/(683 V(\lambda) d^2)}$$

con  $A_{PD} = 100mm^2$  area fotosensibile del fotodiodo e  $d \approx 1.5cm$ .

### Confronto tra potenza misurata e potenza attesa dal datasheet a 20 mA

LED (colore)	$W_{20\text{ mA}}^{(\text{meas})}[W] \simeq$	$W_{20\text{ mA}}^{(\text{ds})}[W] \simeq$
<b>Arancio</b>	$1.68 \times 10^{-5}$	$2.86 \times 10^{-3}$
<b>Rosso</b>	$5.37 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-3}$
<b>Giallo</b>	$1.48 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-3}$
<b>Verde</b>	$1.62 \times 10^{-4}$	$3.44 \times 10^{-3}$
<b>Blu</b>	$4.26 \times 10^{-4}$	$2.52 \times 10^{-3}$
<b>Viola</b>	$1.09 \times 10^{-3}$	$7.24 \times 10^{-3}$

dove la differenza tra gli ordini di grandezza è dovuta al fatto che la potenza misurata è solo una porzione di quella emessa (calcolata come attesa) dal LED. Il fatto che verso il viola le misure siano dello stesso ordine di grandezza potrebbe derivare dalla minore responsività del fotodiodo alle basse lunghezze d'onda. Verifichiamo, ad ogni modo, che l'ordine energetico è rispettato (la potenza diminuisce dal viola verso il rosso).