



Optoelettronica: I–V dei LED, stima di h , fotodiodo e transimpedenza, verifica della legge di Lambert-Beer.

Corso di Tecnologie Digitali — Università di Pisa, A.A. 2025/2026

Alessia Di Nino Marco Malucchi
Tavolo T10

Dipartimento di Fisica “E. Fermi”

8 gennaio 2026

Passaggi principali

- Specifiche del LED: sue caratteristiche di funzionamento e curva caratteristica I-V.
- Stima della costante di Planck h .
- Fotodiodo OSD15-5T: test V_{OC} e I_{SC} , poi misura con transimpedenza.
- Verifica della linearità $I_{PD} \propto I_{LED}$ e discussione limiti sperimentali.

- LED (light emitting diode): diodo a giunzione pn, la luce viene emessa dai processi di ricombinazione delle cariche minoritarie che attraversano la giunzione quando è polarizzata direttamente.

- LED (light emitting diode): diodo a giunzione pn, la luce viene emessa dai processi di ricombinazione delle cariche minoritarie che attraversano la giunzione quando è polarizzata direttamente.
- Energia del fotone: $E = \frac{hc}{\lambda}$; visibile $\lambda \sim 400\text{--}700\text{ nm} \Rightarrow E \sim 3\text{--}1.7\text{ eV}$, assumo che l'energia dei fotoni emessi sia pari all'energia del band gap E_g .

- LED (light emitting diode): diodo a giunzione pn, la luce viene emessa dai processi di ricombinazione delle cariche minoritarie che attraversano la giunzione quando è polarizzata direttamente.
- Energia del fotone: $E = \frac{hc}{\lambda}$; visibile $\lambda \sim 400\text{--}700\text{ nm} \Rightarrow E \sim 3\text{--}1.7\text{ eV}$, assumo che l'energia dei fotoni emessi sia pari all'energia del band gap E_g .
- Equazione di Shockley: $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$, con $V_T \simeq 26\text{ mV}$ a T ambiente, mi aspetto che la curva caratteristica del LED abbia questo andamento.

Specifiche LED

Obiettivo: determinare la caratteristica del diodo, vedi schema del circuito:

- Potenziale ai capi del LED:

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

- Corrente ai capi del LED:

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

- Sweep in tensione (0–3/4 V), ~100 punti; grafico semi-log di I vs V .

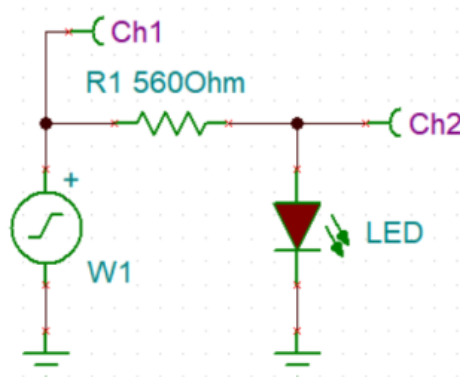


Figura: Schema del circuito

Specifiche LED

Specifiche LED rosso dal datasheet:

- Corrente di funzionamento: $I = 20 \text{ mA}$
- Voltaggio di funzionamento: $VS = 2 - 2.2 \text{ V}$
- Intensità luminosa (in millicandles "mcd"): $I_{lum} = 600 - 800 \text{ mcd}$

Specifiche LED rosso dal datasheet:

- Corrente di funzionamento: $I = 20 \text{ mA}$
- Voltaggio di funzionamento: $VS = 2 - 2.2 \text{ V}$
- Intensità luminosa (in millicandles "mcd"): $I_{lum} = 600 - 800 \text{ mcd}$

Infine i valori di ddp e corrente per i quali il LED inizia a brillare:

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

Curva caratteristica

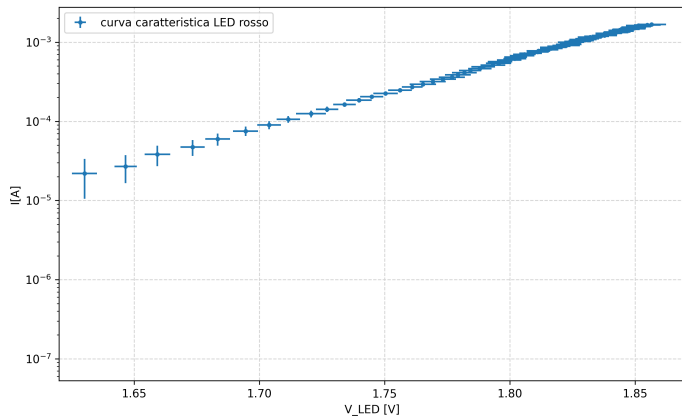


Figura: Curva caratteristica LED rosso in scala semilog.

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Trovo:

$$I \propto e^{\frac{V - V_g}{V_T}}$$

$$\text{con } V_g \equiv \frac{E_g}{e}$$

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Trovo:

$$I \propto e^{\frac{V - V_g}{V_T}}$$

con $V_g \equiv \frac{E_g}{e}$

Allora arbitrariamente fissata I_{soglia} e posto

$$V_{soglia} \equiv V(I_{soglia}):$$

$$V_{soglia} - V_g = V(I_{soglia}) - \frac{hc}{e\lambda}$$

è una **costante** per ogni LED

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Trovo:

$$I \propto e^{\frac{V - V_g}{V_T}}$$

con $V_g \equiv \frac{E_g}{e}$

Allora arbitrariamente fissata I_{soglia} e posto

$$V_{soglia} \equiv V(I_{soglia}):$$

$$V_{soglia} - V_g = V(I_{soglia}) - \frac{hc}{e\lambda}$$

è una **costante** per ogni LED

Stima di h :

1. Trovare V_{soglia} e λ per ogni LED

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Trovo:

$$I \propto e^{\frac{V - V_g}{V_T}}$$

con $V_g \equiv \frac{E_g}{e}$

Allora arbitrariamente fissata I_{soglia} e posto

$$V_{soglia} \equiv V(I_{soglia}):$$

$$V_{soglia} - V_g = V(I_{soglia}) - \frac{hc}{e\lambda}$$

è una **costante** per ogni LED

Stima di h :

1. Trovare V_{soglia} e λ per ogni LED
2. Fittare dati con funzione:

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

Stima della costante di Planck

Facendo le seguenti assunzioni:

- $I_s \propto n_i^2 \propto e^{\frac{-E_g}{k_B T}}$, con $E_g = \frac{hc}{\lambda}$
- $V \gg V_T$

Trovo:

$$I \propto e^{\frac{V - V_g}{V_T}}$$

con $V_g \equiv \frac{E_g}{e}$

Allora arbitrariamente fissata I_{soglia} e posto

$$V_{soglia} \equiv V(I_{soglia}):$$

$$V_{soglia} - V_g = V(I_{soglia}) - \frac{hc}{e\lambda}$$

è una **costante** per ogni LED

Stima di h :

1. Trovare V_{soglia} e λ per ogni LED
2. Fittare dati con funzione:

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

3. Stimare, dal coefficiente angolare modello lineare, h

Stima della costante di Planck: lunghezza d'onda LED

Per determinare $\frac{1}{\lambda}$, uso gli spettri dei LED utilizzati messi a disposizione.

Stima della costante di Planck: lunghezza d'onda LED

Per determinare $\frac{1}{\lambda}$, uso gli spettri dei LED utilizzati messi a disposizione. Li manipolo nel seguente modo:

1. Rimuovo l'offset.

Stima della costante di Planck: lunghezza d'onda LED

Per determinare $\frac{1}{\lambda}$, uso gli spettri dei LED utilizzati messi a disposizione. Li manipolo nel seguente modo:

1. Rimuovo l'offset.
2. Tratto lo spettro come distribuzione, quindi ricavo media e deviazione standard come:

$$\langle \lambda \rangle = \sum_i \lambda_i \frac{I(\lambda_i)}{I_{TOT}} ; \sigma_\lambda = HWHM$$

Stima della costante di Planck: lunghezza d'onda LED

Per determinare $\frac{1}{\lambda}$, uso gli spettri dei LED utilizzati messi a disposizione. Li manipolo nel seguente modo:

1. Rimuovo l'offset.
2. Tratto lo spettro come distribuzione, quindi ricavo media e deviazione standard come:

$$\langle \lambda \rangle = \sum_i \lambda_i \frac{I(\lambda_i)}{I_{TOT}} ; \sigma_\lambda = HWHM$$

quindi $\langle \lambda \rangle$ come media pesata con intensità luminosa relativa al totale e dev. std. come larghezza a metà altezza del picco principale

Stima della costante di Planck: esempio spettro LED e risultati

Per contestualizzare i conti sopra:

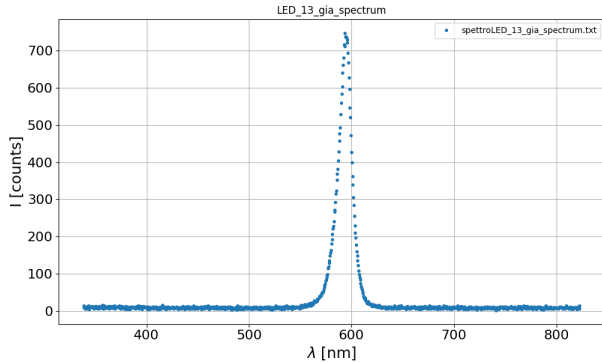


Figura: Esempio di spettro dei LED utilizzati.

Stima della costante di Planck: esempio spettro LED e risultati

Per contestualizzare i conti sopra:

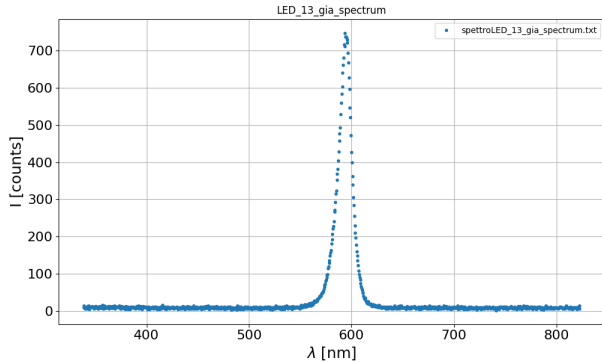


Figura: Esempio di spettro dei LED utilizzati.

Di seguito i risultati ottenuti per $\langle \lambda \rangle$ e σ_λ

LED	Media [nm]	Dev. std. [nm]
Rosso	625	7
Blu	469	7
Giallo	588	7
Verde	532	1
Arancione	604	8
Viola	483	6

Stima della costante di Planck: ottenimento delle V_{soglia}

Procedimento per ottenere i valori di V_{soglia} per ogni LED:

Stima della costante di Planck: ottenimento delle V_{soglia}

Procedimento per ottenere i valori di V_{soglia} per ogni LED:

1. Per tutti i LED si è scelto il seguente valore di I_{soglia} : $I_{\text{soglia}} = 100\mu A$

Stima della costante di Planck: ottenimento delle V_{soglia}

Procedimento per ottenere i valori di V_{soglia} per ogni LED:

1. Per tutti i LED si è scelto il seguente valore di I_{soglia} : $I_{\text{soglia}} = 100\mu A$
2. Per ogni LED è stata acquisita la sua curva caratteristica e ricavato V_{soglia}

Stima della costante di Planck: ottenimento delle V_{soglia}

Procedimento per ottenere i valori di V_{soglia} per ogni LED:

1. Per tutti i LED si è scelto il seguente valore di I_{soglia} : $I_{\text{soglia}} = 100\mu A$
2. Per ogni LED è stata acquisita la sua curva caratteristica e ricavato V_{soglia}
3. I valori di V_{soglia} sono stati presi selezionando il punto più vicino al valore di I_{soglia} per ogni curva caratteristica

Stima della costante di Planck: ottenimento delle V_{soglia}

Procedimento per ottenere i valori di V_{soglia} per ogni LED:

1. Per tutti i LED si è scelto il seguente valore di I_{soglia} : $I_{\text{soglia}} = 100\mu A$
2. Per ogni LED è stata acquisita la sua curva caratteristica e ricavato V_{soglia}
3. I valori di V_{soglia} sono stati presi selezionando il punto più vicino al valore di I_{soglia} per ogni curva caratteristica

Di seguito i valori ottenuti:

LED	$V(I_{\text{soglia}})$ [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

Stima della costante di Planck: fit e relativi risultati

Risultati del fit:

Parametro	Valore	Valore atteso
χ^2_{rid}	10.2 ± 0.7	1
a	$(4.3 \pm 0.2) \cdot 10^5 \text{ C J}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$806554 \text{ C J}^{-1} \text{ m}^{-1}$
b	$(9.0 \pm 0.4) \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$	difficile da stimare

Dove $a \equiv \text{coeff.ang}$ e $b \equiv \text{offset}$.

Costante di planck:

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

a circa 9 barre d'errore dal valore effettivo: $h \simeq 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Stima della costante di Planck: fit e relativi risultati

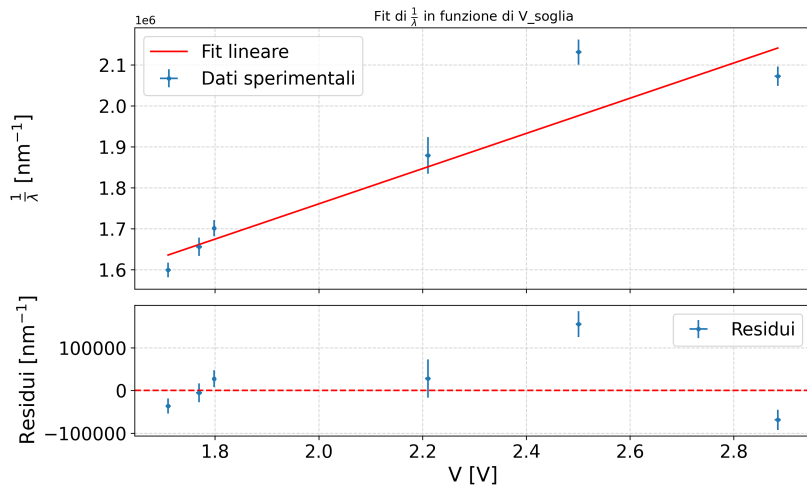


Figura: Grafici di fit e residui.

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - I_L$$

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - I_L$$

- In luce monocromatica, la corrente fotogenerata è proporzionale alla potenza ottica incidente:

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - I_L$$

- In luce monocromatica, la corrente fotogenerata è proporzionale alla potenza ottica incidente:

$$I_L = \eta(\nu) \frac{e}{h\nu} W \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\eta e}{h\nu}$$

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - I_L$$

- In luce monocromatica, la corrente fotogenerata è proporzionale alla potenza ottica incidente:

$$I_L = \eta(\nu) \frac{e}{h\nu} W \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\eta e}{h\nu}$$

- Si distinguono due regimi operativi fondamentali:

Fotodiodo: principio e modelli

- Il fotodiodo si comporta come un diodo la cui caratteristica è traslata di una fotocorrente:

$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right) - I_L$$

- In luce monocromatica, la corrente fotogenerata è proporzionale alla potenza ottica incidente:

$$I_L = \eta(\nu) \frac{e}{h\nu} W \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\eta e}{h\nu}$$

- Si distinguono due regimi operativi fondamentali:

Regime fotovoltaico: V_{OC} , Regime fotoconduttivo: I_{SC} .

Amplificatore a transimpedenza

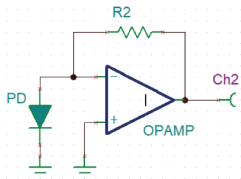


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

Amplificatore a transimpedenza

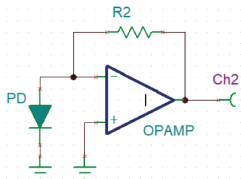


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

- Output: $V_{\text{out}} = -R_2 I_{\text{PD}}$
- MCP601/602 alimentati a $\pm 3\text{ V}$; aggiungere $C \parallel R_2$ per stabilità.
- Tipico: $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $C \sim 1\text{ nF}$.

Amplificatore a transimpedenza

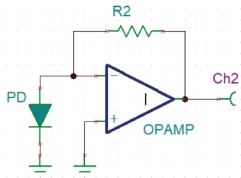


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

- Output: $V_{\text{out}} = -R_2 I_{\text{PD}}$
- MCP601/602 alimentati a $\pm 3\text{ V}$; aggiungere $C \parallel R_2$ per stabilità.
- Tipico: $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $C \sim 1\text{ nF}$.

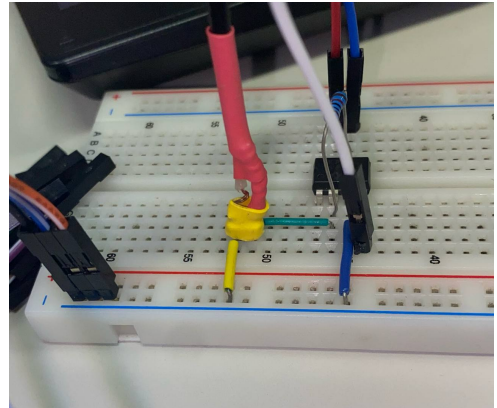


Figura: Circuito realizzato su breadboard

Segnali acquisiti e analisi del rumore (1/1)

Configurazioni testate:

1. Fotodiodo coperto (buio):

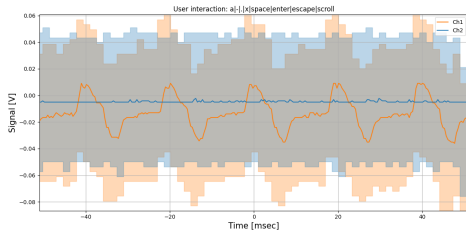


Figura: Segnale al buio (Rumore di fondo)

In buio: segnale stabile, $\sigma_V \approx 10$ mV (rumore elettronico).

2. Luce ambiente della stanza:

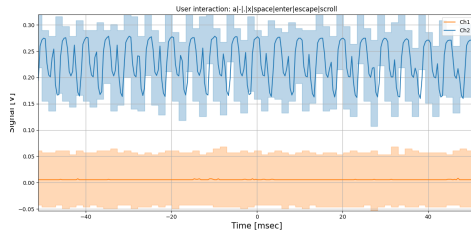


Figura: Segnale con luce ambiente

3. Lampada:

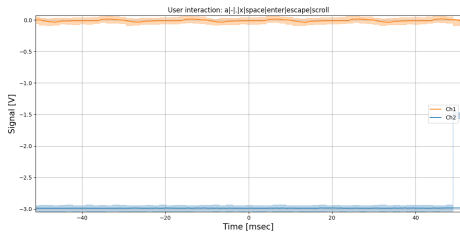


Figura: Segnale lampada

In esposizione a luce: disturbi periodici.

4. Flash del telefono:

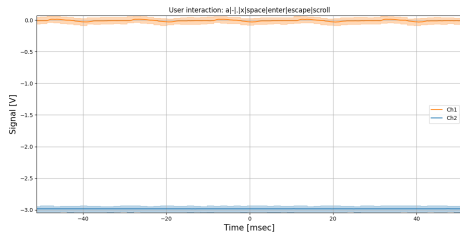


Figura: Segnale flash telefono

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di $W1$ come per le curve IV del LED.

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

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

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

•

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

-

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

•

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

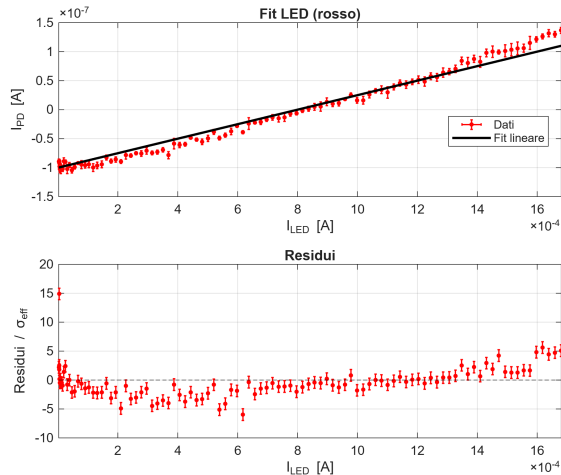


Figura: Fit per LED rosso

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

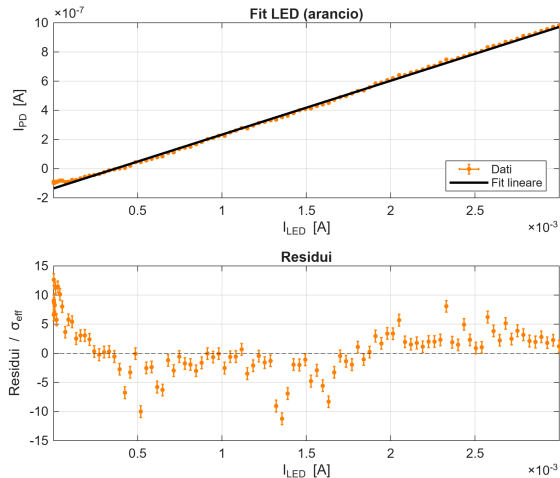


Figura: Fit per LED arancio

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

•

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

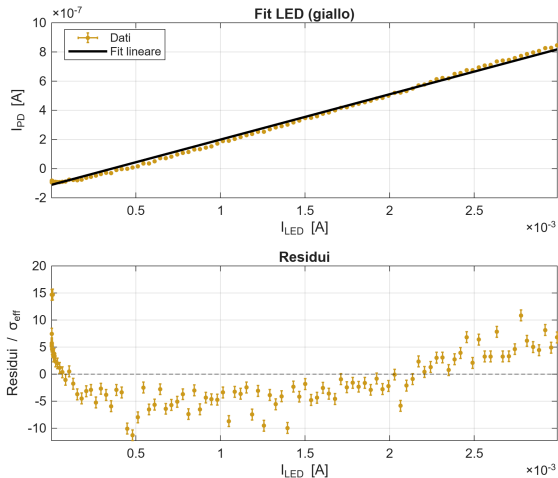


Figura: Fit per LED giallo

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

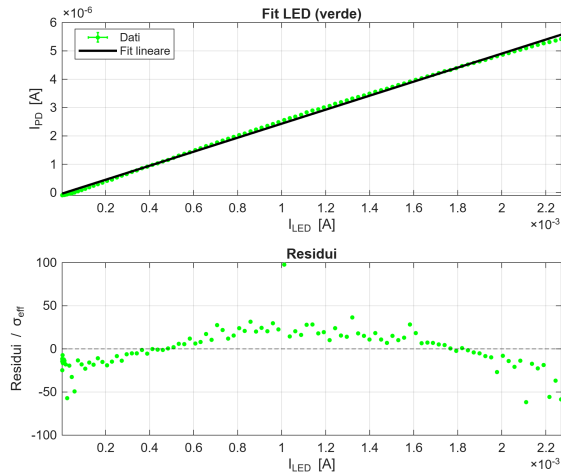


Figura: Fit per LED verde

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

•

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

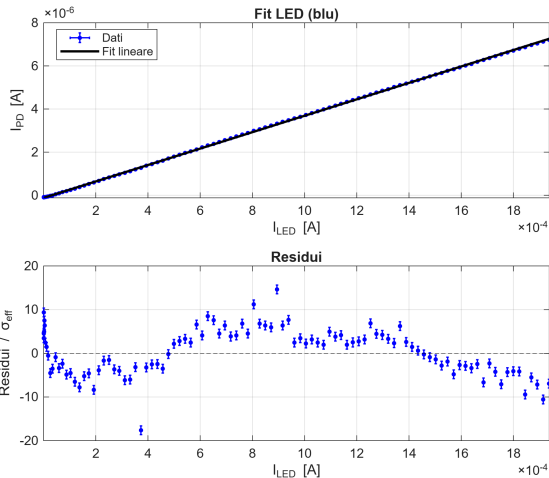


Figura: Fit per LED blu

Linearità I_{PD} vs I_{LED} (LED \rightarrow Fotodiodo)

Procedura:

- **Setup:** Allineare il LED al PD; sweep di W1 come per le curve IV del LED.
- **Calcolo Correnti:**

$$I_{LED} = \frac{V_{Ch1} - V_{Ch2}}{R_1}$$

•

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

- **Fit lineare:**

$$I_{PD} = a I_{LED} + b$$

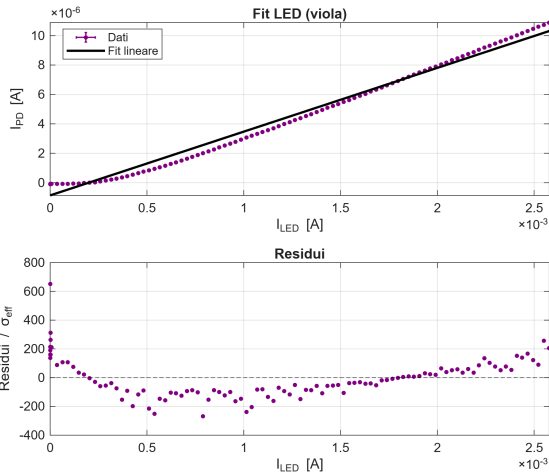


Figura: Fit per LED viola

Conversione fotometrica \rightarrow radiometrica:

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

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

Conversione fotometrica \rightarrow radiometrica:

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

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

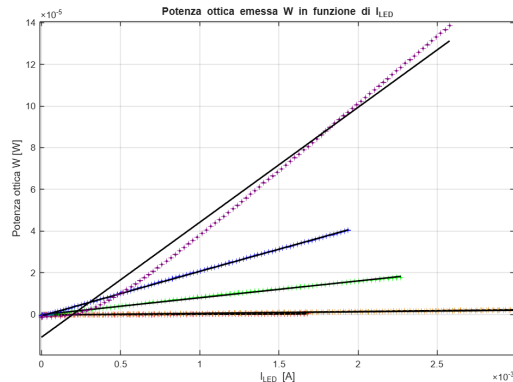


Figura: Potenza ottica W in funzione di I_{LED}

Conversione fotometrica \rightarrow radiometrica:

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

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

Interpretazione:

- Tutti i LED si trovano sotto la linea $y = x$ (solo una frazione del fascio raggiunge il PD).
- Il trend delle potenze è coerente con i datasheet.
- Differenze dovute a geometria e sensibilità spettrale del fotodiode.

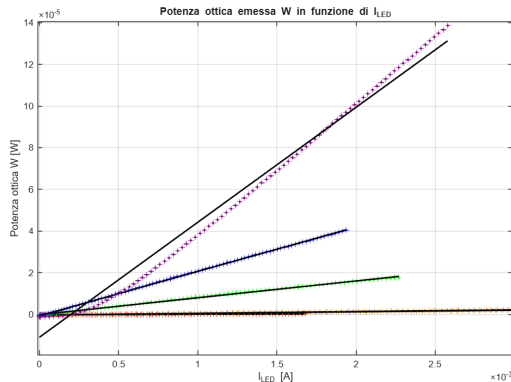


Figura: Potenza ottica W in funzione di I_{LED}

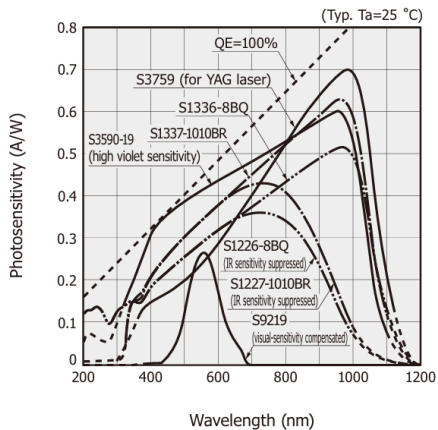
- IV dei LED coerenti con Shockley; V_{soglia} cresce all'aumentare di $1/\lambda$.
- Fit lineare V_{soglia} vs $1/\lambda \Rightarrow$ stima di h compatibile con CODATA (entro $\sim 10\%$).
- Transimpedenza: misura pulita di I_{PD} ; buona linearità $I_{\text{PD}} \propto I_{\text{LED}}$ nel rosso.

(Backup) Formule utili

- Shockley: $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$, $V_T = \frac{k_B T}{e} \approx 25.85 \text{ mV}$.
- Relazioni di calcolo: $I_{\text{LED}} = \frac{V_{\text{Ch1}} - V_{\text{Ch2}}}{R_1}$, $I_{\text{PD}} = -\frac{V_{\text{out}}}{R_2}$.
- Fit per h : $V_{\text{soglia}} = k + m(1/\lambda)$, $h = m e/c$ (se λ in nm: $h = m e 10^{-9}/c$).
- Regime fotoconduttivo: $I_{\text{PD}} = \eta(\nu) \frac{e}{h\nu} W$ (responsività $R = \eta e/h\nu$).

(Backup) Spazi per figure e tabelle

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



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

Tabella: Confronto tra potenze misurate e da datasheet a 20 mA.

Parte 2: Concetti teorici di base

- Legge di Lambert-Beer: modello per quantificare il processo di assorbimento della radiazione elettromagnetica. Stima probabilità di assorbimento in termini di sezione d'urto di assorbimento e densità di centri assorbitori.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)x}$$

x coordinata all'interno del materiale

- Definisco poi $T \equiv \frac{I(d)}{I_0}$ trasmittanza e $A = -\log\left(\frac{I(d)}{I_0}\right)$ assorbanza, dove d è lo spessore del materiale.

- Nel caso dei liquidi $\alpha(\lambda) = c\epsilon(\lambda)$, dove c è la concentrazione della sostanza di interesse nel liquido e $\epsilon(\lambda)$ è il coefficiente di assorbimento molare.
- In conclusione, nel caso in esame scrivo: $A = [c\epsilon(\lambda)]d$

Passaggi principali

- Preparazione campioni liquido di interesse a varie concentrazioni.
- Acquisizioni fotocorrenti del fotodiodo generate da luce emessa dai vari LED a disposizione che attraversa i vari campioni.
- Fit lineare per ogni lunghezza d'onda per stimare il relativo coefficiente di assorbimento.
- Spettro del coefficiente di assorbimento e comparazione con risultati presenti in letteratura.

Parte 2: Preparazione campioni di liquido

Sono state utilizzate 5 cuvette, riempite ciascuna con una parte di Powerade ed una di acqua, di seguito le concentrazioni ottenute:

Conc [V]	V_W	V_L
0.0 ± 0.1	4.0 ± 0.5	0.0 ± 0.5
0.3 ± 0.1	3.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
0.50 ± 0.09	2.0 ± 0.5	2.0 ± 0.5
0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.5	3.0 ± 0.5
1.0 ± 0.1	0.0 ± 0.5	4.0 ± 0.5

Tabella: Tabella dei valori delle concentrazioni di Powerade diluito in acqua utilizzate

Parte 2: Acquisizione fotocorrenti

Descrizione presa dati:

- Per ogni LED si è selezionato un voltaggio al quale questo aveva un'emissione il più possibile brillante.
- Al dato voltaggio di alimentazione si è campionato più volte il potenziale del fotodiodo con sweepbias.ipynb, cambiando di volta in volta le cuvette, passando a campioni sempre più concentrati di powerade.
- Il potenziale è stato tradotto in corrente, proporzionale all'intensità luminosa, da questa si è calcolata l'assorbanza per ogni lunghezza d'onda studiata. L'assorbanza è stata calcolata misurando per ogni acquisizione anche la fotocorrente prodotta dalla luce dei LED in uscita dalla cuvetta piena d'acqua (intensità luminosa di riferimento)
- Si è esguito un fit lineare della concentrazione in funzione dell'assorbanza con il modello:

$$\frac{V_L}{V_W + V_L} = -\log \frac{I(d)}{I_0} \cdot M + C$$

Parte 2. Fit e risultati ottenuti.

Sono stati eseguiti 6 fit, uno per ogni LED (rosso, arancione, giallo, verde, blu, e viola), di seguito si riportano i risultati del fit per il LED rosso a scopo di esempio:

Parametro	Valore
χ^2_{rid}	0.7 ± 0.8
M	11 ± 2
Q	-0.02 ± 0.09

Per tutti gli altri fit sono stati ottenuti χ^2_{rid} simili, cioè entro una sigma da 1 e offset tutti confrontabili con zero, a supporto della validità dei risultati ottenuti.

Parte 2. Fit e risultati ottenuti.

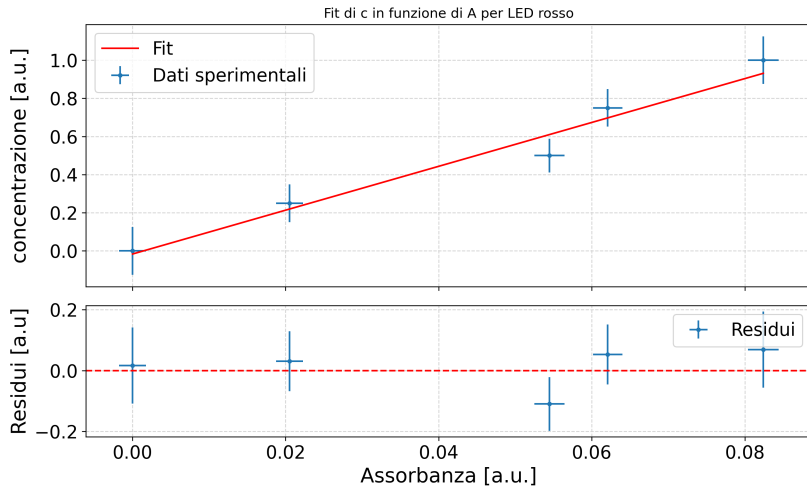


Figura: Grafico di fit per LED rosso: concentrazione campioni vs assorbanza.

Parte 2. Spettro del coefficiente di assorbimento.

Da ogni fit concentrazione vs assorbanza dei LED è stato ricavato il coefficiente di assorbimento del liquido, alla lunghezza del LED utilizzato; i valori ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

Colore	λ [nm]	α [m ⁻¹]
Rosso	625 ± 7	7 ± 1
Arancione	604 ± 8	46 ± 8
Giallo	588 ± 7	6 ± 1
Verde	532 ± 13	31 ± 5
Blu	469 ± 7	$(9 \pm 2) \cdot 10$
Viola	401 ± 5	$(7 \pm 1) \cdot 10$

Tabella: Valori di lunghezza d'onda e coefficienti di assorbimento.

Parte 2. Spettro del coefficiente di assorbimento.

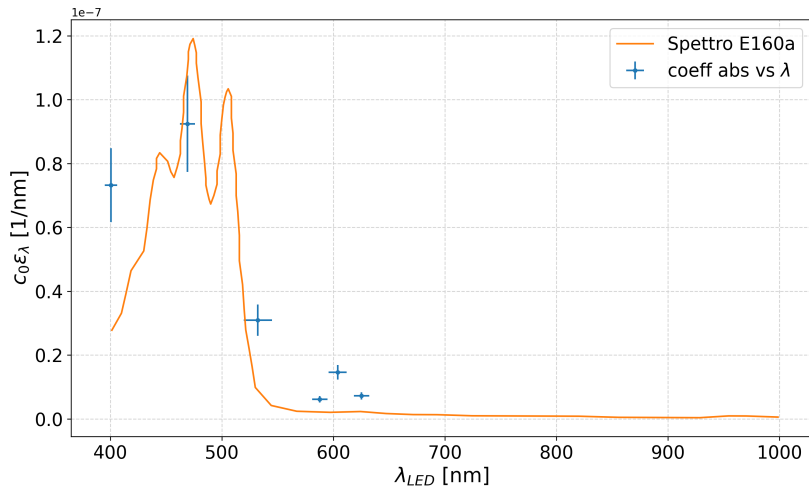


Figura: Coefficiente di assorbimento Powerade in funzione della lunghezza d'onda dei LED utilizzati.