



# 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”

23 novembre 2025

## 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  $V$ .

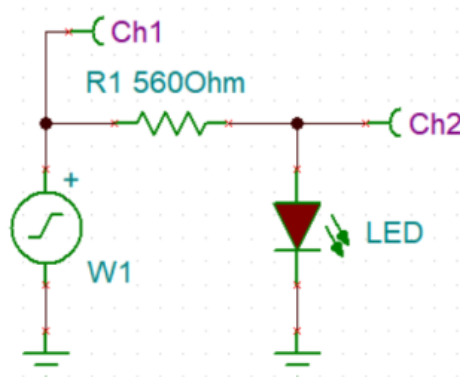


Figura: Schema del circuito

# 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

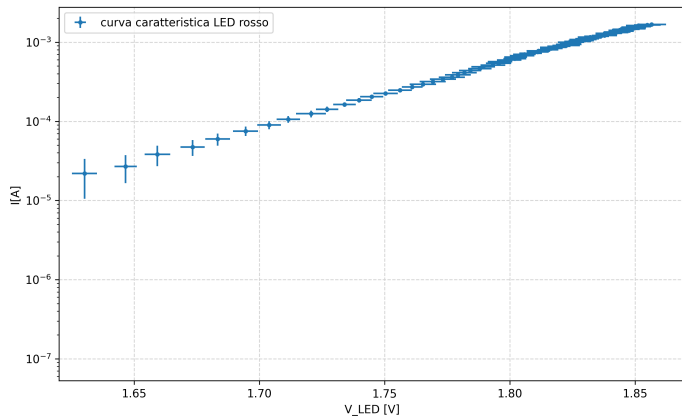


Figura: Curva caratteristica LED rosso in scala semilog.

# 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  $\lambda$  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  $\lambda$  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  $\lambda$  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:

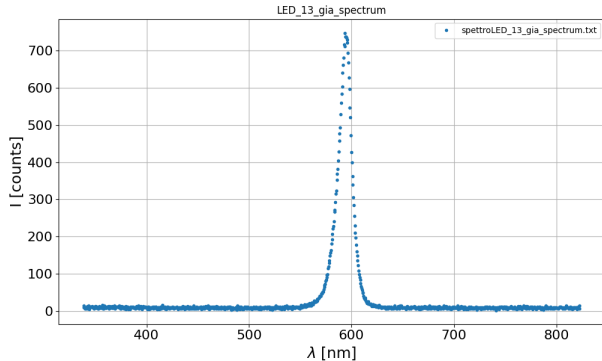


Figura: Esempio di spettro dei LED utilizzati.

# Stima della costante di Planck: esempio spettro LED e risultati

Per contestualizzare i conti sopra:

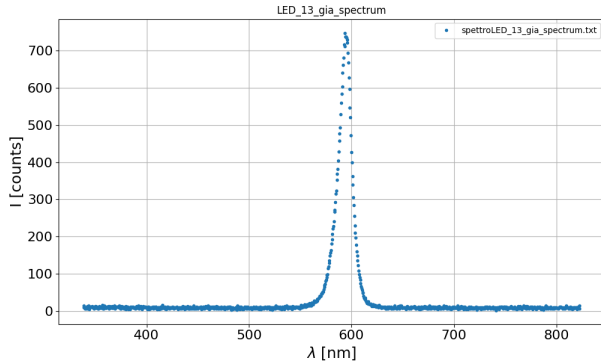


Figura: Esempio di spettro dei LED utilizzati.

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

| 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 $V_{\text{soglia}}$

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

## Stima della costante di Planck: ottenimento delle $V_{\text{soglia}}$

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

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

## Stima della costante di Planck: ottenimento delle $V_{\text{soglia}}$

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

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



## Stima della costante di Planck: ottenimento delle $V_{\text{soglia}}$

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

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

# Stima della costante di Planck: ottenimento delle $V_{\text{soglia}}$

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

1. Per tutti i LED si è scelto il seguente valore di  $I_{\text{soglia}}$ :  $I_{\text{soglia}} = 100\mu A$
2. Per ogni LED è stata acquisita la sua curva caratteristica e ricavato  $V_{\text{soglia}}$
3. I valori di  $V_{\text{soglia}}$  sono stati presi selezionando il punto più vicino al valore di  $I_{\text{soglia}}$  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                            |
|-----------------------|--|--|
| $\chi^2_{\text{rid}}$ | $10.2 \pm 0.7$   | 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

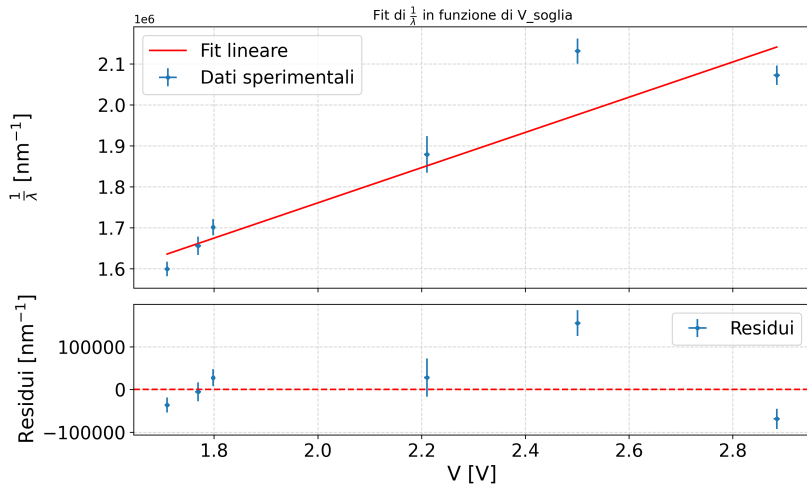


Figura: Grafici di fit e residui.

- 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:

# 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:

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



- 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

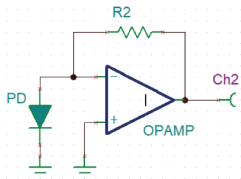


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

# Amplificatore a transimpedenza

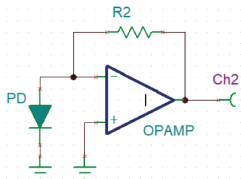


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

- 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

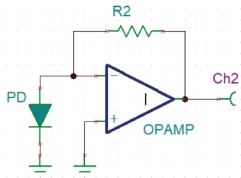


Figura: Schema dell'amplificatore a transimpedenza

- 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:  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C \sim 1\text{ nF}$ .

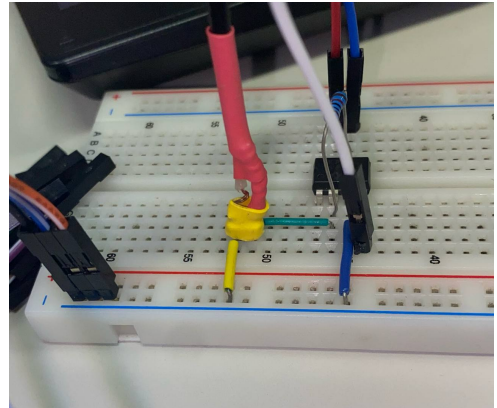


Figura: Circuito realizzato su breadboard

# Segnali acquisiti e analisi del rumore (1/1)

## Configurazioni testate:

### 1. Fotodiodo coperto (buio):

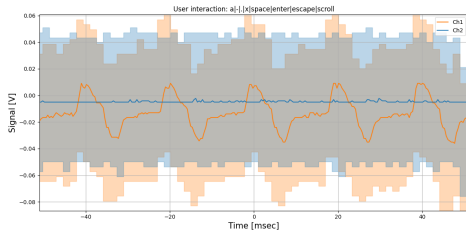


Figura: Segnale al buio (Rumore di fondo)

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

### 2. Luce ambiente della stanza:

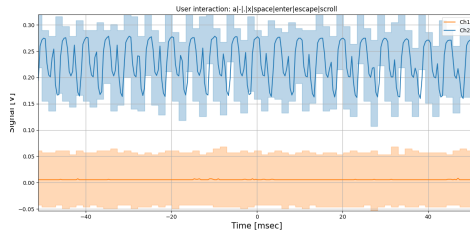


Figura: Segnale con luce ambiente

## 3. Lampada:

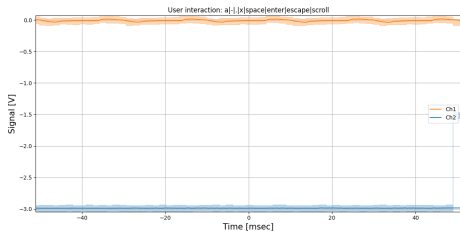


Figura: Segnale lampada

In esposizione a luce: disturbi periodici.

## 4. Flash del telefono:

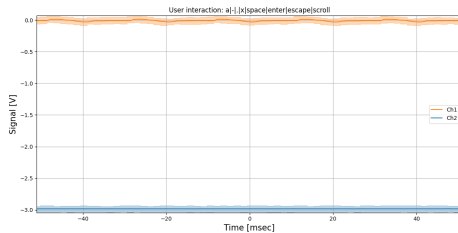


Figura: Segnale flash telefono

## 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:**

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

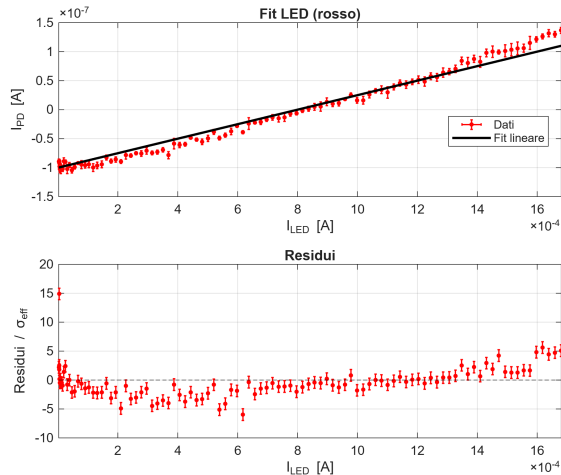


Figura: Fit per LED rosso

# 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:**

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

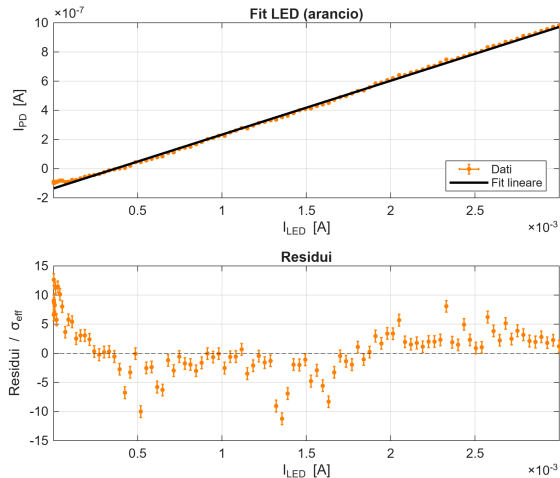


Figura: Fit per LED arancio

# 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:**

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

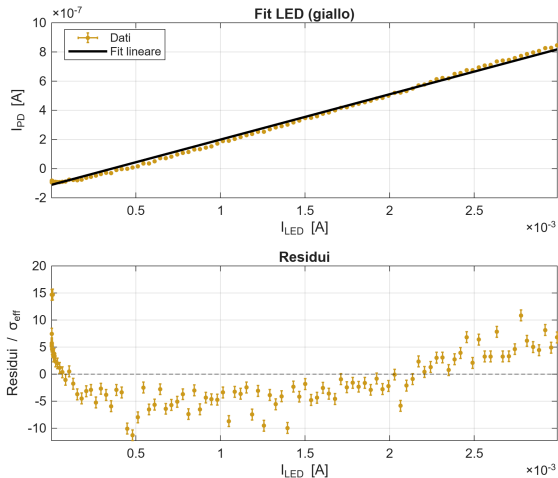


Figura: Fit per LED giallo

# 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:**

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

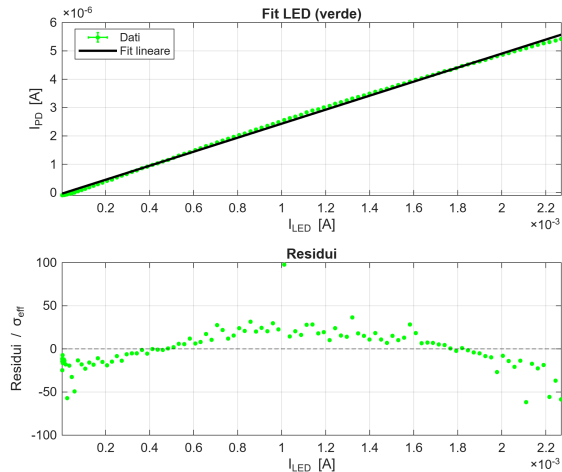


Figura: Fit per LED verde



# 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:**

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

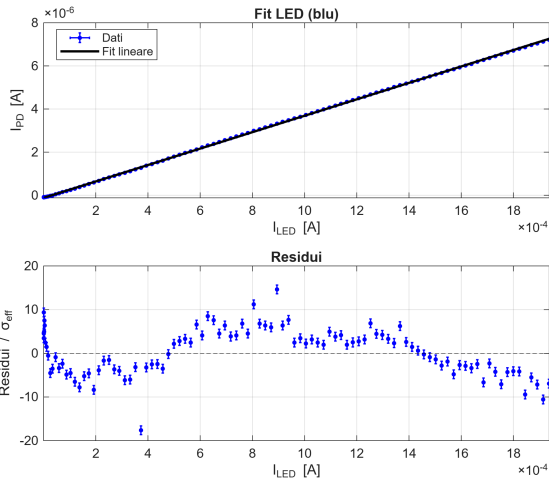


Figura: Fit per LED blu

# 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:**

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

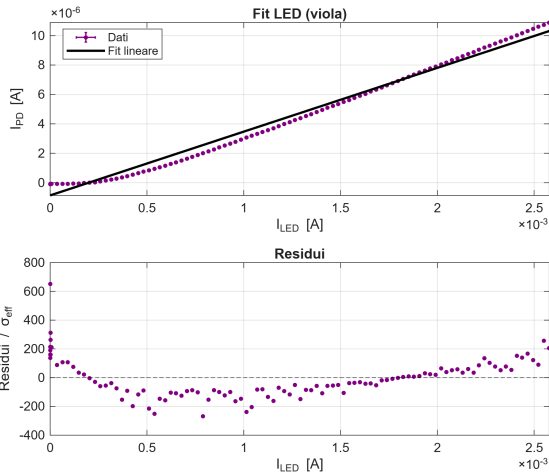


Figura: Fit per LED viola

**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:

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

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

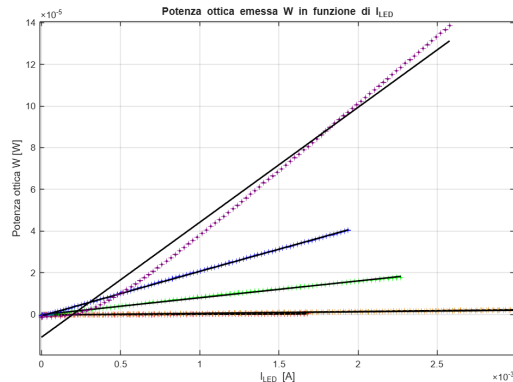


Figura: Potenza ottica  $W$  in funzione di  $I_{LED}$

## 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 fotodiodo.

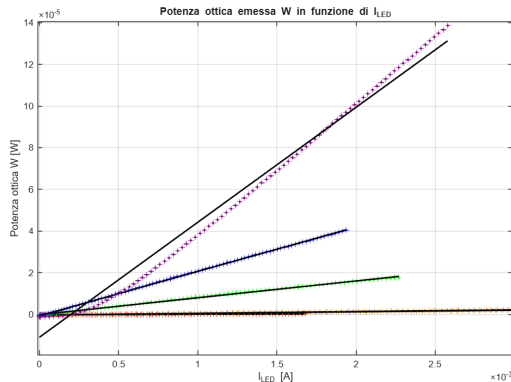


Figura: Potenza ottica  $W$  in funzione di  $I_{LED}$

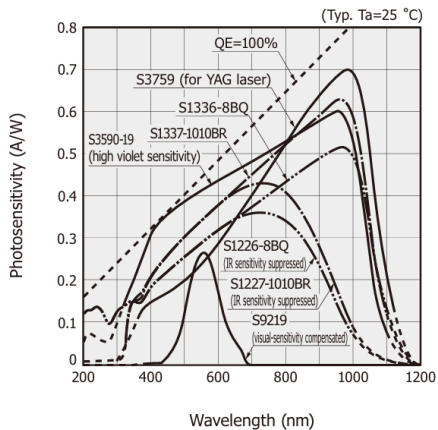
- IV dei LED coerenti con Shockley;  $V_{\text{soglia}}$  cresce all'aumentare di  $1/\lambda$ .
- Fit lineare  $V_{\text{soglia}}$  vs  $1/\lambda \Rightarrow$  stima di  $h$  compatibile con CODATA (entro  $\sim 10\%$ ).
- Transimpedenza: misura pulita di  $I_{\text{PD}}$ ; buona linearità  $I_{\text{PD}} \propto I_{\text{LED}}$  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  $\lambda$  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      | $1.68 \times 10^{-5}$                  | $2.86 \times 10^{-3}$                |
| Rosso        | $5.37 \times 10^{-6}$                  | $1.88 \times 10^{-3}$                |
| Giallo       | $1.48 \times 10^{-5}$                  | $1.22 \times 10^{-3}$                |
| Verde        | $1.62 \times 10^{-4}$                  | $3.44 \times 10^{-3}$                |
| Blu          | $4.26 \times 10^{-4}$                  | $2.52 \times 10^{-3}$                |
| Viola        | $1.09 \times 10^{-3}$                  | $7.24 \times 10^{-3}$                |

**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]        | $V_W$         | $V_L$         |
|-----------------|---------------|---------------|
| $0.0 \pm 0.1$   | $4.0 \pm 0.5$ | $0.0 \pm 0.5$ |
| $0.3 \pm 0.1$   | $3.0 \pm 0.5$ | $1.0 \pm 0.5$ |
| $0.50 \pm 0.09$ | $2.0 \pm 0.5$ | $2.0 \pm 0.5$ |
| $0.8 \pm 0.1$   | $1.0 \pm 0.5$ | $3.0 \pm 0.5$ |
| $1.0 \pm 0.1$   | $0.0 \pm 0.5$ | $4.0 \pm 0.5$ |

**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:

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

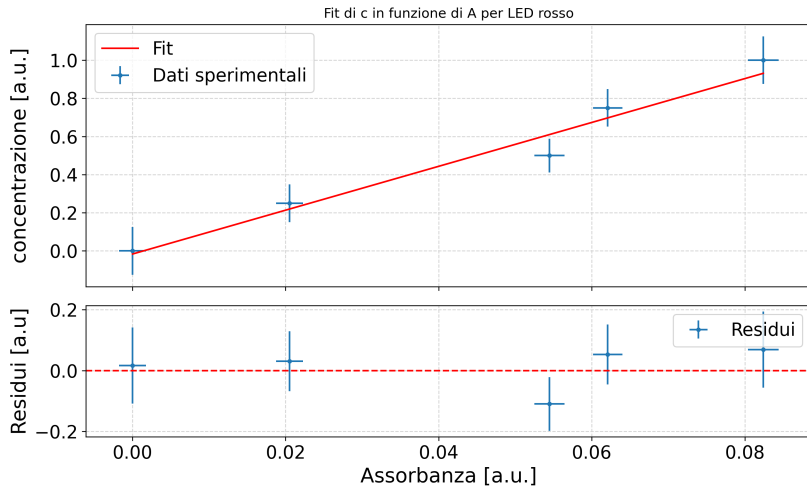
## Parte 2. Fit e risultati ottenuti.

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           |
|----------------|------------------|
| $\chi^2_{rid}$ | $0.7 \pm 0.8$    |
| M              | $11 \pm 2$       |
| Q              | $-0.02 \pm 0.09$ |

Per tutti gli altri fit sono stati ottenuti  $\chi^2_{rid}$  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.

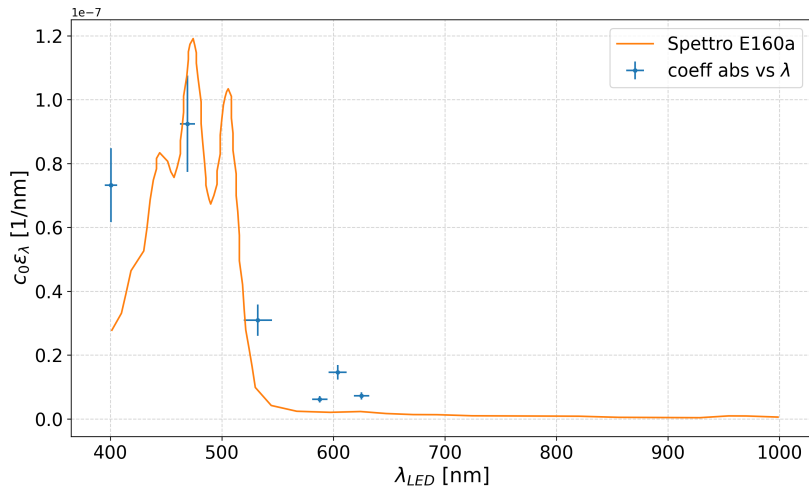
## Parte 2. Spettro del coefficiente di assorbimento.

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    | $\lambda$ [nm] | $\alpha$ [m <sup>-1</sup> ] |
|-----------|----------------|-----------------------------|
| Rosso     | $625 \pm 7$    | $7 \pm 1$                   |
| Arancione | $604 \pm 8$    | $46 \pm 8$                  |
| Giallo    | $588 \pm 7$    | $6 \pm 1$                   |
| Verde     | $532 \pm 13$   | $31 \pm 5$                  |
| Blu       | $469 \pm 7$    | $(9 \pm 2) \cdot 10$        |
| Viola     | $401 \pm 5$    | $(7 \pm 1) \cdot 10$        |

**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.