

Materiali per l'elettronica con laboratorio

Gruppo 4: Francesca Capellino, Alessio Cemma, Sexhej Lala

25 settembre 2024



Indice

1	Caratterizzazione di Diodi e LED	1
1.1	Caratterizzazione elettrica di resistenze lineari	1
1.1.1	Scopo dell'esperienza	1
1.1.2	Strumentazione	1
1.1.3	Procedimento	1
1.1.4	Analisi dati	2
1.1.5	Propagazione degli errori (σ):	2
1.1.6	Conclusioni	2
1.2	Caratterizzazione in corrente elettrica di un diodo di silicio	3
1.2.1	Scopo dell'esperienza	3
1.2.2	Strumentazione	3
1.2.3	Procedimento	3
1.2.4	Analisi dati	5
1.2.5	Propagazione degli errori (σ):	6
1.2.6	Conclusioni	6
1.3	Caratterizzazione di diodi emettitori di luce (LED)	7
1.3.1	Scopo dell'esperienza	7
1.3.2	Strumentazione	7
1.3.3	Procedimento	7
1.3.4	Analisi dati	8
1.3.5	Propagazione degli errori (σ):	10
1.3.6	Conclusioni	10
2	Fotoconducibilità	11
2.1	Scopo dell'esperienza	11
2.2	Strumentazione	11
2.3	Procedimento	11
2.3.1	Misure di trasmittanza ottica e di fotocorrente:	11
2.4	Analisi dati	12
2.4.1	Calcolo del flesso della fotocorrente e della trasmittanza:	14
2.5	Propagazione degli errori (σ):	15
2.6	Conclusioni	15
3	Appendice	17

Nota: In tutti i grafici sono stati riportati i χ^2 ridotti, che per brevità sono stati chiamati χ^2 e basta. La scelta è stata giustificata con la necessità di tenere in considerazione che i dati analizzati sono vincolati da una funzione teorica, e non sono sample statistici.

1 Caratterizzazione di Diodi e LED

1.1 Caratterizzazione elettrica di resistenze lineari

1.1.1 Scopo dell'esperienza

Lo scopo di questa prima esperienza è stato di acquisire familiarità con la strumentazione e verificare la corretta calibrazione degli strumenti tramite una retta di taratura: nel circuito che abbiamo costruito era presente una resistenza ohmica, per cui ci aspettavamo un andamento del tipo $R = \frac{V}{I}$.

1.1.2 Strumentazione

- Voltmetro AMPROBE 37XR-A
- Generatore di tensione GWINSTEK GPS-4303
- Amperometro RSPRO IDM 103N (modalità fast)
- Universal Breadboard
- Cablaggio
- Resistenza da $10.0 \pm 0.5k\Omega$
- sensibilità voltmetro: $\pm 0.1\% + 5dgt$ s
- sensibilità amperometro: $\pm 0.6\% + 2dgt$ s

1.1.3 Procedimento

Abbiamo realizzato il circuito come in Figura 1 usando una resistenza ($R = 10k\Omega$) . Abbiamo affettuato una serie di misure della corrente I in funzione della tensione V (letta sul voltmetro) e abbiamo ottenuto i valori riportati in appendice nella tabella 1.

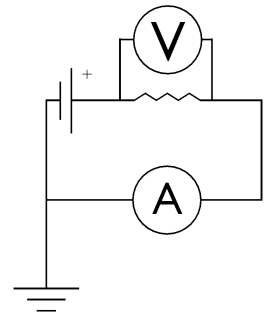
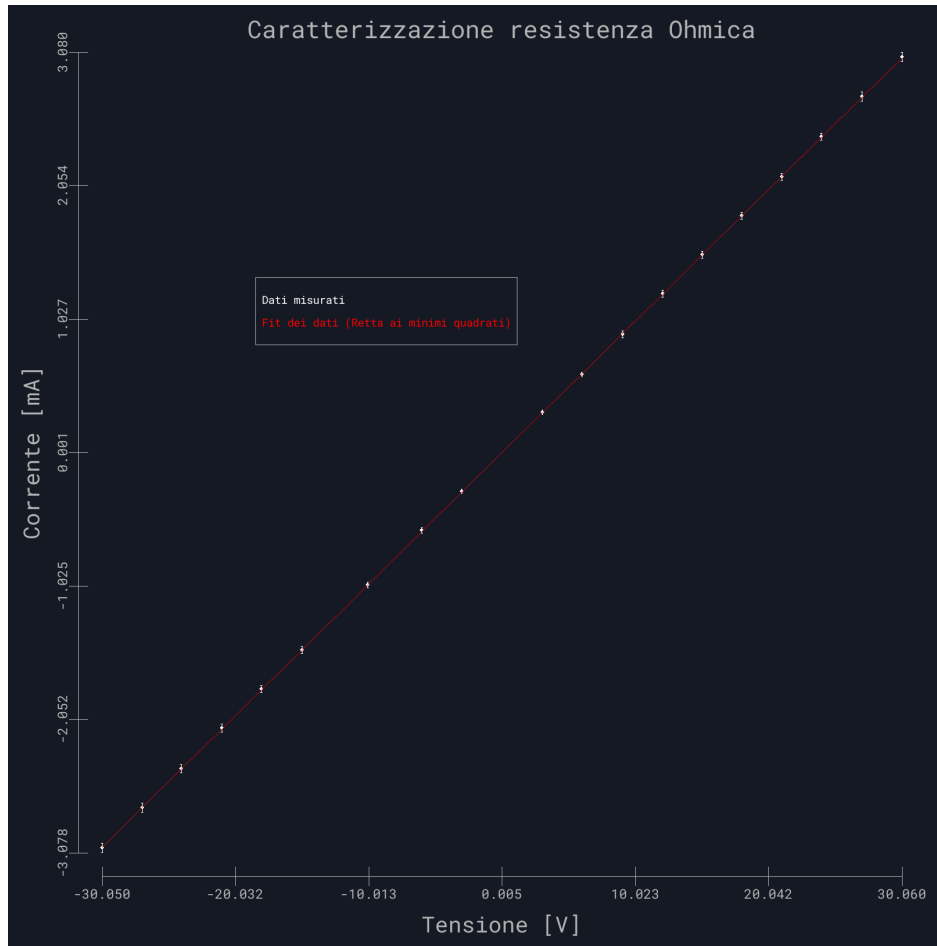


Figura 1: circuito per caratterizzazione di una resistenza

1.1.4 Analisi dati

Abbiamo effettuato un fit lineare dei dati precedenti con la funzione interpolante $y = ax + b$ da cui abbiamo ricavato, tramite la legge di Ohm $I = \frac{V}{R}$ (dove V è la tensione applicata, R è la resistenza del circuito e I è la corrente che passa attraverso) che la pendenza della retta interpolante a corrisponde a $\frac{1}{R}$, per cui:



- $a = (0.10055 \pm 4 * 10^{-5}) k\Omega^{-1}$
- $b = (0.0007 \pm 0.0007) k\Omega$
- $\chi^2 = 10.1$
- $R = \frac{1}{a} = (9.945 \pm 0.008) k\Omega$

Figura 2: Retta di taratura della resistenza ohmica

Abbiamo confrontato il valore di resistenza calcolato con quello indicato dal codice colore della resistenza usata: $10k\Omega$. Effettuando un t test sui due valori (resistenza calcolata e riportata) al 95% possiamo concludere che i due risultati sono correlati.

1.1.5 Propagazione degli errori (σ):

Partendo dalla regola generale per la propagazione degli errori con il metodo delle derivate parziali:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right)}$$

Otteniamo un errore di R pari a:

$$\sigma_R = R \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^2} = 0.008 k\Omega$$

1.1.6 Conclusioni

La retta di taratura ci ha confermato che il circuito rispetta la legge di Ohm e che la strumentazione è accurata.

1.2 Caratterizzazione in corrente elettrica di un diodo di silicio

1.2.1 Scopo dell'esperienza

Abbiamo potuto caratterizzare un diodo calcolandone il fattore di idealità η , la corrente di saturazione inversa I_0 e la resistenza di Shunt R_{Sh} .

1.2.2 Strumentazione

- Diodi
- Voltmetro Meterman 5XP
- Generatore di tensione GW INSTEK GPS-4303
- Pico-amperometro DMM6500 multimeter
- Universal Breadboard model SD-35
- Cavi
- Resistenza di $(10.0 \pm 0.5)k\Omega$

1.2.3 Procedimento

Per trovare il fattore di idealità e I_0 , abbiamo effettuato la misura in forward bias (polarizzazione diretta), successivamente abbiamo anche trovato I_0 e R_{Sh} lavorando in modalità reverse bias (polarizzazione inversa).

In Figura 3 è riportato l'andamento dei dati con i relativi errori (gli errori sono di 6 ordini di grandezza più piccoli rispetto alla scala delle y, dunque non sono visualizzabili sullo schermo). I dati sono riportati in Tabella 2.

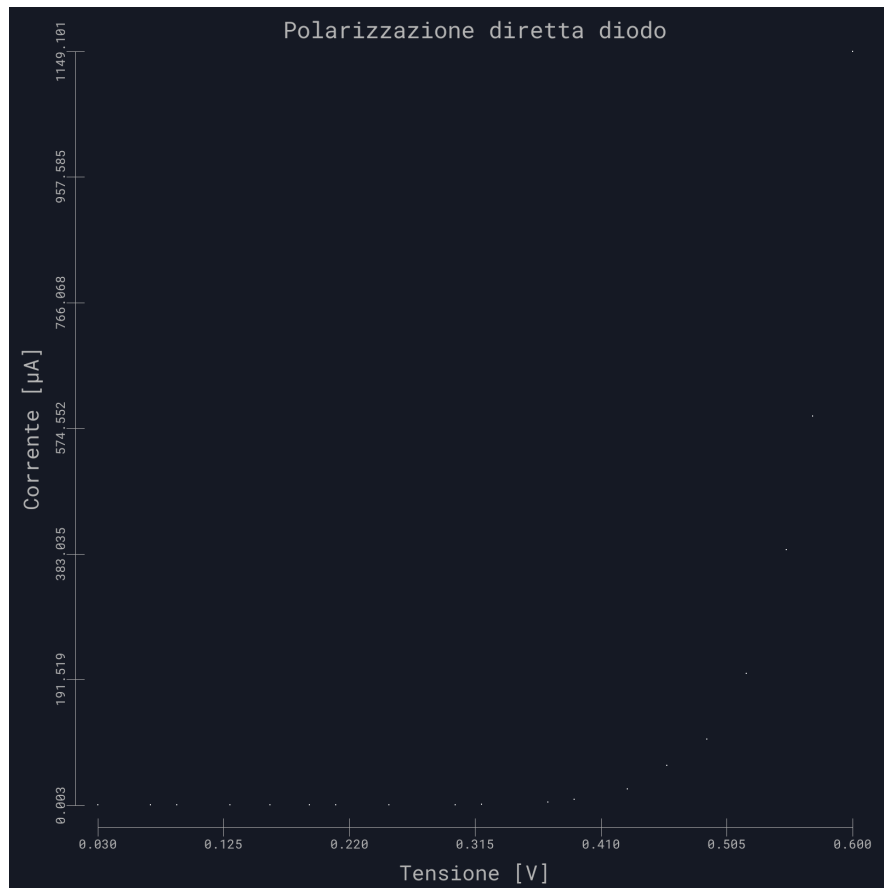


Figura 3: Corrente in polarizzazione diretta

Polarizzazione diretta: Non conoscendo l'orientazione del diodo a priori, abbiamo intuito quale fosse il verso della polarizzazione dall'andamento della curva caratteristica corrente-tensione. Abbiamo realizzato il circuito come in Figura 4; abbiamo impostato la configurazione dell'alimentatore per la misura in forward bias: dato che la I ha crescita esponenziale, abbiamo dovuto settare piccole variazioni di tensione per non avere valori troppo grandi di corrente e riuscire ad analizzare l'andamento prima di raggiungere il plateau. Abbiamo registrato i valori di corrente in funzione della tensione applicata, i dati sono riportati nella tabella 2. Abbiamo usato un'errore strumentale basandoci sull'ultima cifra stabile misurata.

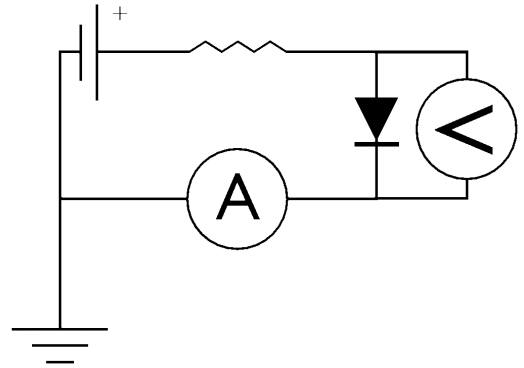


Figura 4: circuito per caratterizzazione di un LED forward

Polarizzazione inversa: Abbiamo realizzato il circuito come in Figura 5. Abbiamo impostato la configurazione dell'alimentatore per la misura in reverse bias e abbiamo registrato la corrente in funzione della tensione applicata leggendo i valori di V direttamente dal generatore: se avessimo messo in parallelo al diodo il voltmetro (come nella misura precedente), la grossa differenza di R (molto più grande nel diodo) avrebbe portato alla sola caratterizzazione della resistenza interna del voltmetro, e non del diodo.

Riportiamo la tabella 3 con i dati in appendice e la Figura 7 delle misure nel paragrafo dell'analisi dati, insieme al fit.

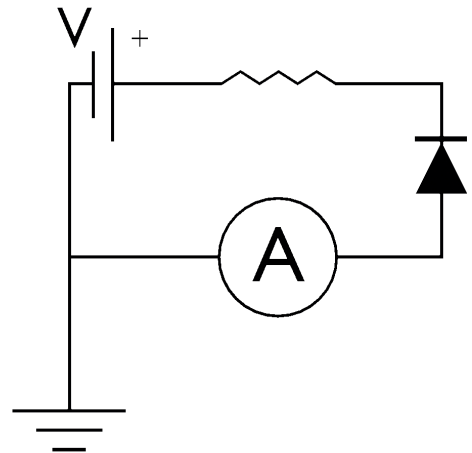


Figura 5: circuito per caratterizzazione di un LED inverso

1.2.4 Analisi dati

Polarizzazione diretta: Abbiamo effettuato un fit lineare dei dati precedenti in scala logaritmica con la funzione interpolante $y = ax + b$, e abbiamo sfruttato la relazione:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{\eta k_B T} \right) - 1 \right]$$

sapendo che in polarizzazione diretta:

$$V > \frac{\eta k_B T}{q} \quad \therefore \quad I \sim I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{\eta k_B T} \right) \right]$$

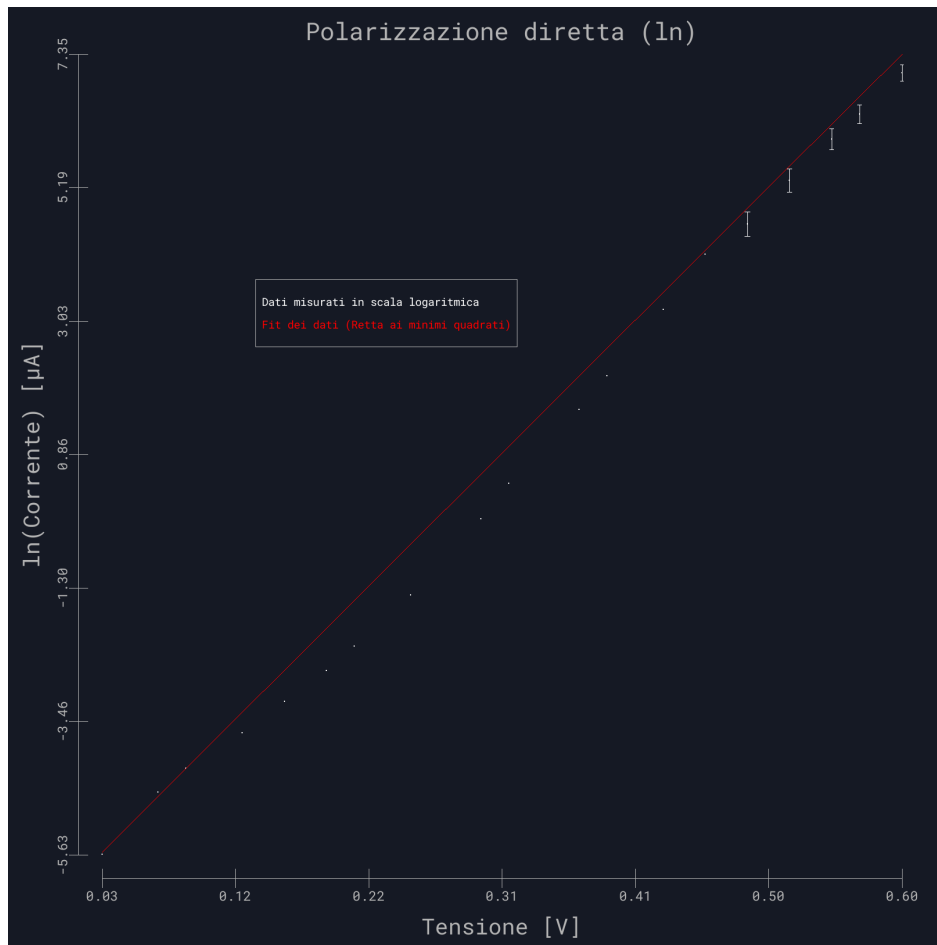
Applicando il logaritmo abbiamo potuto eguagliare la pendenza:

$$a = \frac{q}{\eta k_B T} \quad \therefore \quad \eta = \frac{q}{a k_B T}$$

Inoltre, dall'intercetta $b = \ln(I_0)$ abbiamo ricavato $I_0 = e^b$.

Riportiamo in tabella 2 i dati della tensione in funzione della corrente e del $\ln(I)$.

In Figura 6 è riportato l'andamento dei dati con i relativi errori (gli errori della prima metà del grafico sono di 5 ordini di grandezza più piccoli rispetto alla scala delle Y, dunque non sono visualizzabili sullo schermo). Il χ^2 estremamente diverso da 1 indica un grave errore nell'ordine di grandezza degli errori delle misure. Infatti χ^2 molto grandi sono indice di errori troppo piccoli per fittare correttamente i dati.



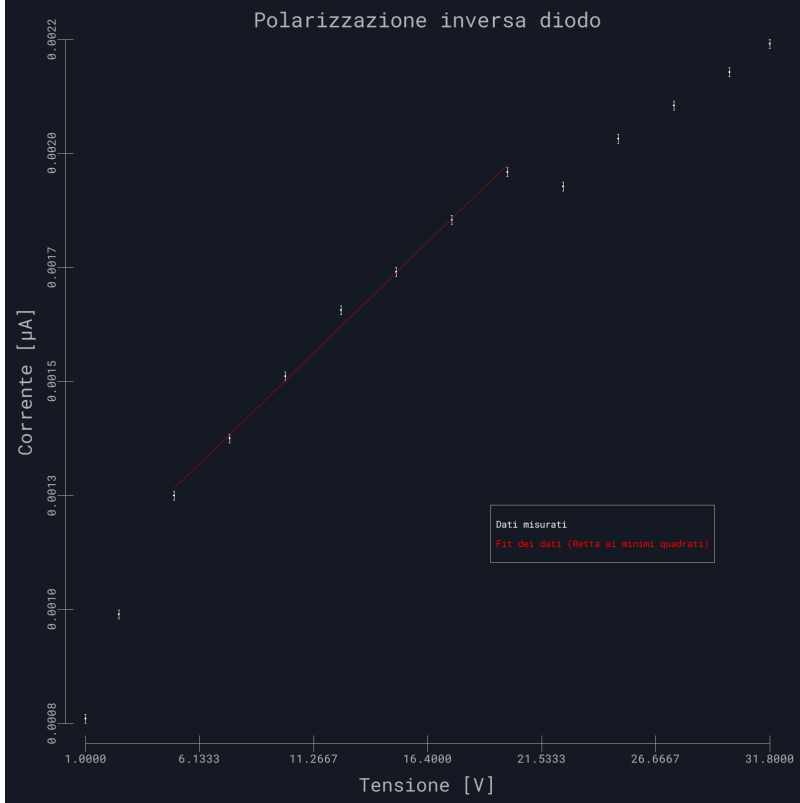
- Considerando $\frac{k_B T}{q} = 0.026V$
- $a = (22.39 \pm 0.19)V^{-1}$
- $b = (-6.37 \pm 0.08)\mu A$
- $\chi^2 = 75138.68$
- $\eta = 1.718 \pm 0.015$
- $I_0 = (0.00171 \pm 0.00014)\mu A = (1.71 \pm 0.14)nA$

Figura 6: Polarizzazione diretta di un diodo riportata in base logaritmica

Polarizzazione inversa: Abbiamo fatto un fit con l'equazione $y = ax + b$ della sola parte lineare. Dato che abbiamo registrato piccolissime variazioni di corrente, e dato che il generatore, per poter erogare diversi range di corrente possiede anch'esso una piccola resistenza (che in genere non inficia sui dati ma nel nostro caso l'ha fatto dato l'ordine di grandezza di I) abbiamo notato uno scalino che interrompe la linearità della curva caratteristica, per cui abbiamo deciso di troncarla per poter fare il fit. I dati sono riportati in tabella 3. Tenendo conto del contributo della resistenza interna al diodo (resistenza di Shant), possiamo scrivere che la caratteristica corrente/tensione per tensioni in polarizzazione inversa sufficientemente elevate assume l'espressione:

$$I = -I_0 + \left(\frac{V}{R_{Sh}} \right)$$

per cui la pendenza a del fit è uguale a $1/R_{Sh}$, mentre $-I_0 = b$.



- $a = (0.000040 \pm 0.000003) \mu\Omega^{-1}$
- $b = (0.00109 \pm 0.00005) \mu A$
- $\chi^2 = 0.28$
- Corrente saturazione inversa = b
- $R_{Sh} = (25.0 \pm 1.9) G\Omega$

Figura 7: Polarizzazione inversa di un diodo

1.2.5 Propagazione degli errori (σ):

Polarizzazione diretta:

$$\sigma_\eta = \eta * \sigma_a / a$$

$$\sigma_{I_0} = \sigma_b * e^b$$

Polarizzazione inversa:

$$\sigma_{R_{Sh}} = R_{Sh} \frac{\sigma_a}{a}$$

1.2.6 Conclusioni

Tramite queste misurazioni abbiamo potuto verificare che l'andamento della tensione in funzione della corrente all'interno di un diodo è abbastanza coerente con quello che ci aspettavamo.

1.3 Caratterizzazione di diodi emettitori di luce (LED)

1.3.1 Scopo dell'esperienza

In questa esperienza abbiamo caratterizzato un led servendoci di uno spettrometro e dei multimetri usati nell'esperienza 1.1. Così facendo, abbiamo potuto determinare la lunghezza d'onda di emissione del led, il fattore d'idealità, la corrente di saturazione inversa, la tensione di turn on e la corrente di turn on.

1.3.2 Strumentazione

- Voltmetro AMPROBE 37XR-A
- Generatore di tensione GWINSTEK GPS-4303
- Amperometro RSPRO IDM 103N
- Universal Breadboard
- Cablaggio
- LED che emette nell'arancione
- resistenza da $(1 \pm 0.5)k\Omega$
- Spettrometro Ocean Optics (S13335)
- PC con software SpectraSuite
- sensibilità voltmetro: $\pm 0.1\% + 5dgt$ s
- sensibilità amperometro: $\pm 0.6\% + 2dgt$ s

1.3.3 Procedimento

Abbiamo realizzato il circuito come in Figura 8. Abbiamo poi posizionato il diodo in direzione dello spettrometro collegato al pc. Dopo aver acquisito il segnale di buio per il background, abbiamo cominciato a misurare per diversi valori di tensione V_{in} del generatore, la V dal voltmetro, la corrente dall'amperometro e l'intensità luminosa del led (integrando il picco tramite il software). Il primo spettro acquisito è stato registrato in modo tale che l'intensità del picco maggiore arrivasse quasi a saturazione. Ne abbiamo riportato la lunghezza d'onda e la FWHM (tempo di integrazione: 1s, medie di misurazioni usate: 1):

- $\lambda = (623 \pm 18)nm$
- $FWHM = 36nm$
- energia $E = (1.99 \pm 0.06)eV$

Abbiamo riportato solo 6 picchi per non sovraffollare la Figura 9a, e perché a bassi valori di corrente l'amperometro non era in grado di registrare dei dati stabili. Abbiamo effettuato una caratteristica tensione-corrente: a causa della scarsa precisione degli strumenti usati, non abbiamo potuto registrare i dati nel range interessato, cioè per valori di corrente piccoli, per cui nella Figura 12 la zona iniziale di plateau non è visibile, mentre è visibile il secondo plateau a più alte correnti. Per questo motivo i risultati da noi ottenuti non sono accurati. Riportiamo i dati nella tabella 4 e nella Figura 9b.

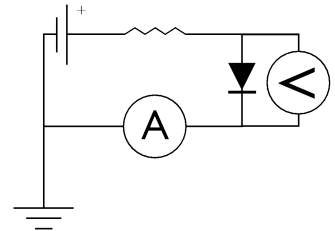


Figura 8: circuito per caratterizzazione di un LED

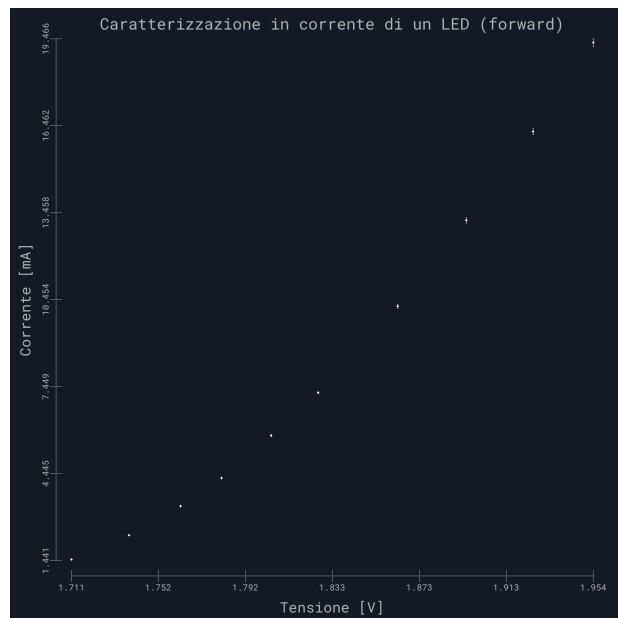
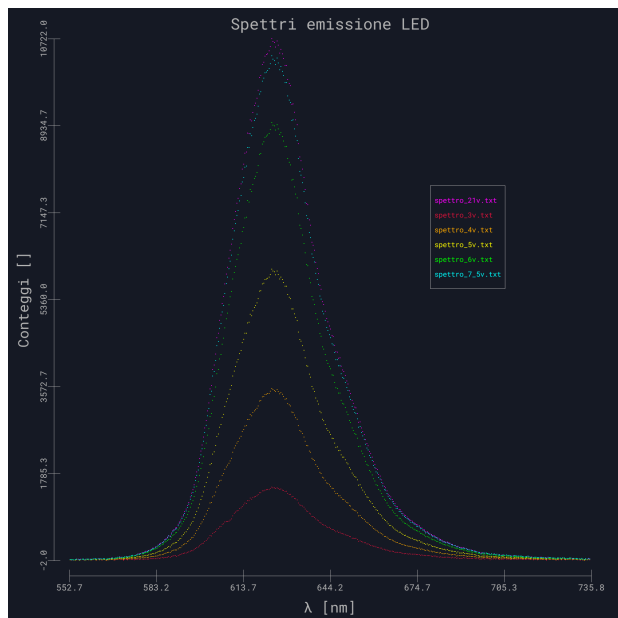


Figura 9: a) Spettri di emissione a varie tensioni, b) Caratteristica corrente-tensione in scala lineare (tensione misurata sul diodo)

1.3.4 Analisi dati

Abbiamo effettuato un fit lineare dei dati precedenti in scala logaritmica con la funzione interpolante $y = ax + b$, e abbiamo sfruttato la relazione:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{\eta k_B T} \right) - 1 \right]$$

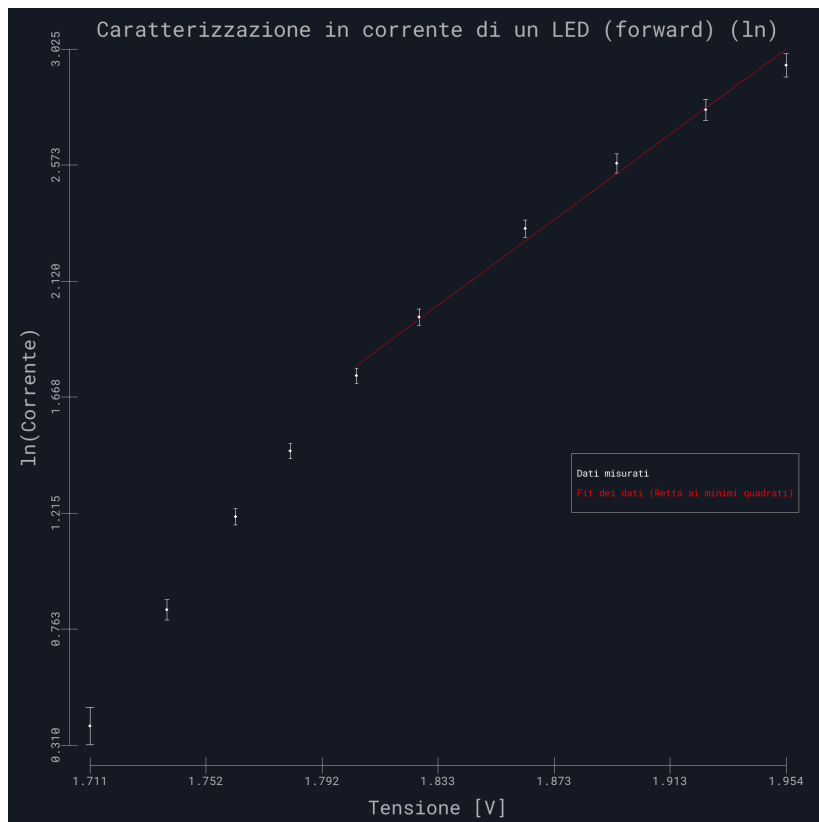
sapendo che in polarizzazione diretta:

$$V > \frac{\eta k_B T}{q} \quad \therefore \quad I \sim I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{\eta k_B T} \right) \right]$$

Applicando il logaritmo abbiamo potuto eguagliare la pendenza:

$$a = \frac{q}{\eta k_B T} \quad \therefore \quad \eta = \frac{q}{a k_B T}$$

Inoltre, dall'intercetta $b = \ln(I_0)$ abbiamo ricavato $I_0 = e^b$.

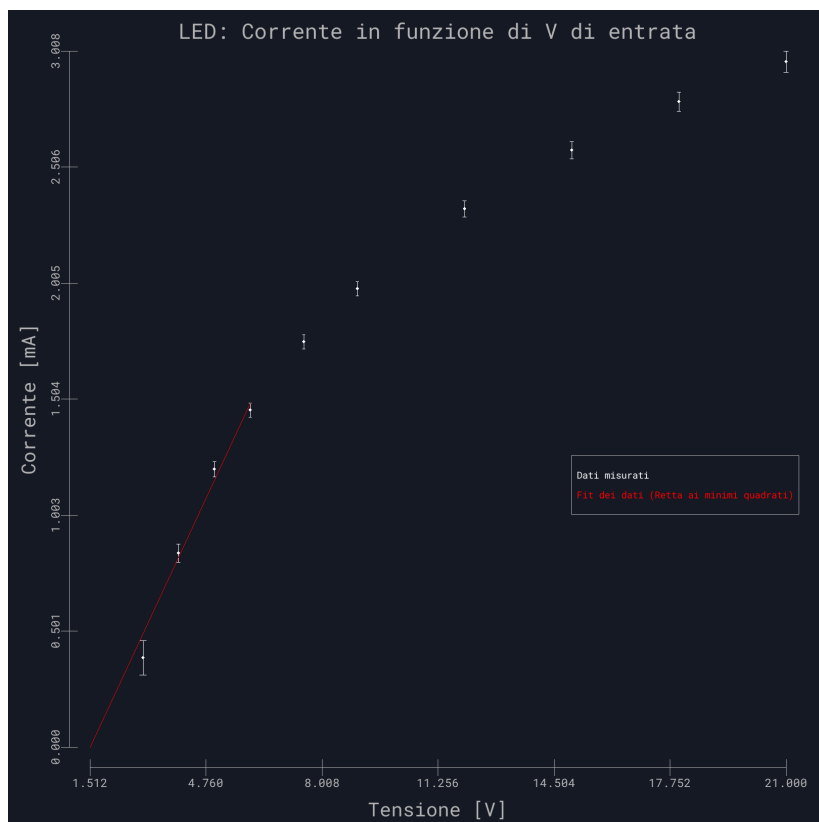


FIT1

- $a = (7.8 \pm 0.3)V^{-1}$
- $b = (-12.2 \pm 0.6)mA$
- $\chi^2 = 0.77$
- $I_0 = (5 * 10^{-6} \pm 3 * 10^{-6})mA = (5 \pm 3)nA$
- $\eta = (4.93 \pm 0.19)$
- Range di interpolazione: da 1.804V a 1.954V

Figura 10: Caratteristica corrente-tensione (del diodo) in scala ln

Tramite il fit della tensione di entrata in funzione della corrente invece abbiamo potuto estrapolare la tensione di Turn-On, ottenuta tramite l'intersezione con l'asse X.

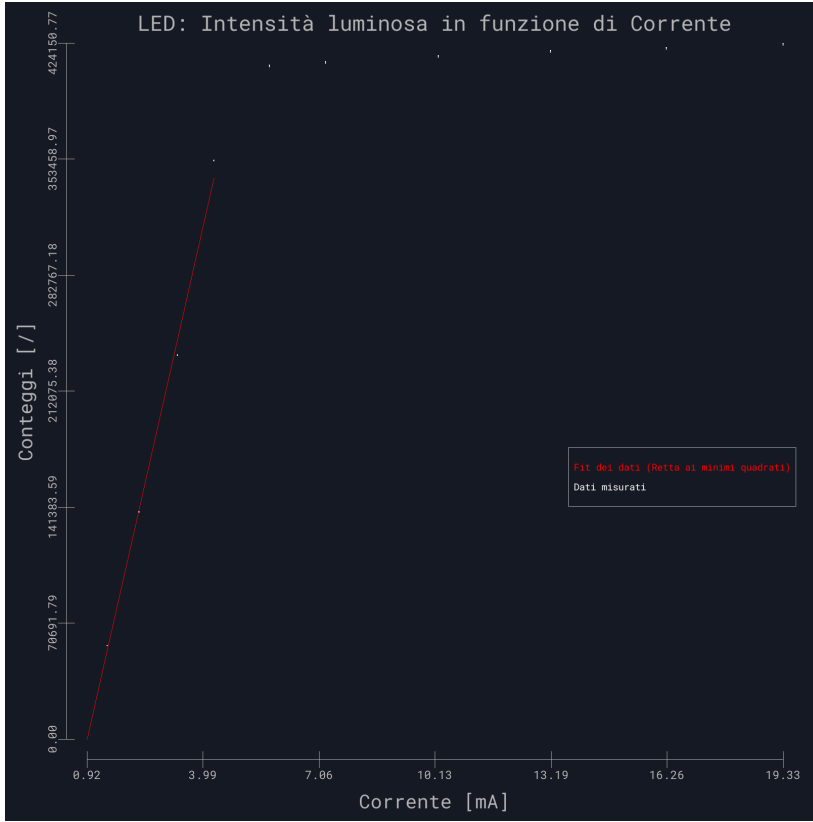


FIT2

- $a = (0.33 \pm 0.03)V^{-1}$
- $b = (-0.50 \pm 0.17)mA$
- $\chi^2 = 2.45$
- $V_{TO} = (1.5 \pm 0.7)V$
- Range di interpolazione: da 3V a 6V

Figura 11: Dati caratterizzazione LED (2)

Infine, tramite il fit della parte lineare della corrente in funzione dell'intensità luminosa abbiamo potuto estrapolare la corrente di Turn-On leggendo sull'intersezione dell'asse X .



FIT3

- $a = (1.02 * 10^5 \pm 4 * 10^3) mA^{-1}$
- $b = (-9.4 * 10^4 \pm 9 * 10^3)$
- $\chi^2 = 380$
- $I_{TO} = (0.93 \pm 0.05) mA$
- Range di interpolazione: da $1.47 mA$ a $4.29 mA$

Figura 12: Dati caratterizzazione LED (3)

1.3.5 Propagazione degli errori (σ):

$$\sigma_E = E \frac{\sigma_\lambda}{\lambda} \sim 0.06 eV$$

Fit 1:

$$\sigma_\eta = \eta \frac{\sigma_a}{a} \sim 0.19$$

$$\sigma_{I_0} = \sigma_b e^b \sim 3 * 10^{-6} mA$$

Fit 2:

$$V_{TO} = -\frac{b}{a}$$

$$\sigma_{V_{TO}} = V_{TO} \left(\frac{\sigma_a}{a} + \frac{\sigma_b}{b} \right) \sim 0.7V$$

Fit 3:

$$I_{TO} = -\frac{b}{a}$$

$$\sigma_{I_{TO}} = I_{TO} \left(\frac{\sigma_a}{a} + \frac{\sigma_b}{b} \right) \sim 0.05 mA$$

1.3.6 Conclusioni

I risultati sono coerenti con quello che ci aspettavamo (nonostante il χ^2 fortemente maggiore di 1, il che indica che gli errori sono molto più piccoli della dispersione statistica dei dati raccolti), confermano inoltre ciò che potevamo vedere empiricamente, infatti il led era di colore arancione e la lunghezza d'onda rilevata è di 623 nm.

2 Fotoconducibilità

2.1 Scopo dell'esperienza

2.2 Strumentazione

- Spettrometro USB 4000
- Lampada calibrata HG-2 (Hg-Ar)
- Pc con software ocean optics Spectrasuite
- Fibra ottica
- Oscilloscopio Tektronix TBS1104
- Monocromatore MINI-CHROM 1
- Chopper a 80 Hz
- Generatore di tensione GWinstek GPS-4303 (24.8V)
- Fotodiodo al silicio DET-100-A2 biased detector 320-1100 nm
- Campione semiconduttore su supporto e resistenza
- Lampada alogena
- Supporti meccanici per la disposizione degli strumenti (breadboard, ...)

2.3 Procedimento

Calibrazione dello spettrometro: Abbiamo collegato lo spettrometro al pc e alla lampada con la fibra ottica e abbiamo settato il tipo di scan sul software; Abbiamo registrato due spettri a due tempi d'integrazione diversi (integration time=3,800 μs e 14,1 μs), e abbiamo impostato gli scans to average a 15. Lo spettro così impostato ha i pixel come grandezza sull'asse delle x e i conteggi sulle y; abbiamo allentato leggermente la vite della fibra ottica allo spettrometro per non avere dei picchi fuori scala nel primo zoom (per rilevare i picchi abbiamo ingrandito una volta lo spettro: nel primo "zoom" erano così intensi da dover allentare la fibra ottica, nel secondo l'abbiamo riavvitata).

Abbiamo acquisito il background, poi abbiamo registrato lo spettro per confrontare i picchi in pixel con le lunghezze d'onda teoriche della lampada usata. Per ottenere questa corrispondenza, ci siamo dovuti orientare lungo lo spettro: guardando solo il range del visibile (perché lo spettrometro acquisisce indicativamente nel range del visibile) e guardando le intensità dei picchi rivelati con quelle delle righe spettrali segnate sulla lampada. Di questi picchi abbiamo fatto poi dei fit gaussiani per determinarne i massimi e la FWHM (che corrisponde alla deviazione standard di ogni gaussiana). Abbiamo usato ogni FWHM/2 come errore di ogni picco.

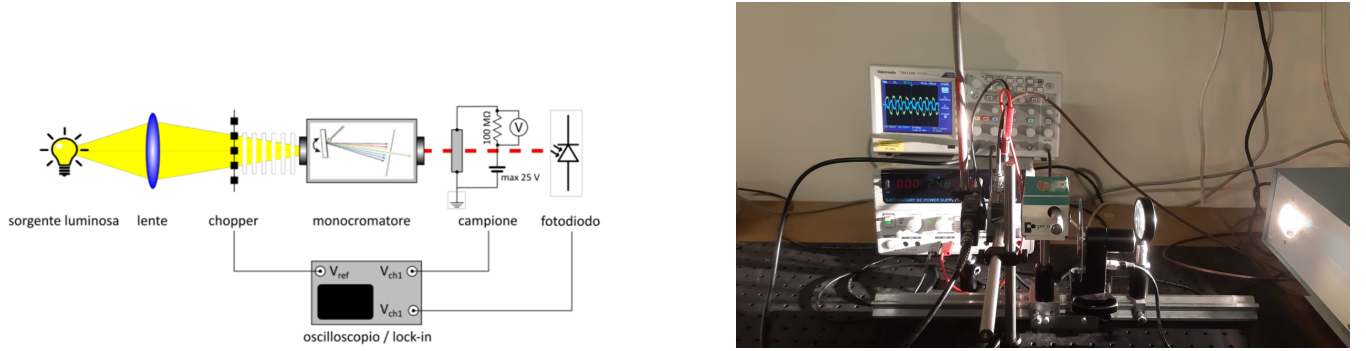
Calibrazione monocromatore: Abbiamo collegato tramite fibra ottica il monocromatore allo spettrometro (usando un collimatore tra fibra ottica e monocromatore) e abbiamo orientato la sorgente luminosa al monocromatore interponendo una lente focale condensatrice e il chopper; dopo aver acquisito il dark, abbiamo misurato, per ogni unità arbitraria impostata con la manopola del monocromatore, la lunghezza d'onda del picco (in pixel) sullo spettro acquisito e la FWHM. Con questi dati abbiamo potuto ricavare la retta di calibrazione.

Tempo d'integrazione: 30 ms.

2.3.1 Misure di trasmittanza ottica e di fotocorrente:

Misura dello spettro di riferimento (I_0): Abbiamo montato la sorgente di luce allineata con la lente, il chopper, il monocromatore e il fotodiodo (in quest'ordine). Abbiamo acceso la luce e il chopper e abbiamo posto un panno nero sul monocromatore e il fotodiodo dopo aver collegato il fotodiodo all'oscilloscopio (Channel 1) e un amplificatore in serie. Sull'oscilloscopio abbiamo impostato la suddivisione della griglia (5 mV) per un tempo di 2.5 ms. Abbiamo registrato per diverse lunghezze d'onda (e quindi diverse unità arbitrarie impostate dal monocromatore) le ampiezze del segnale dell'oscilloscopio. Questi dati sono serviti per poi normalizzare i dati della misura successiva, considerando una sensibilità dell'oscilloscopio pari a $\pm 0.40 mV$, che è stata presa in base al rumore elettrico di fondo riportato sullo strumento.

Misura di trasmittanza e fotocorrente: Abbiamo posizionato il campione tra il fotodiodo e il monocromatore. Abbiamo polarizzato il campione collegandolo ad un generatore di tensione impostando una tensione di 24.8 V. Il set up sperimentale è come nella seguente figura:



Come in figura, il canale 2 dell'oscilloscopio è stato collegato al campione polarizzato. Abbiamo poi messo un panno scuro sul monocromatore, il campione e il fotodiodo, e sono state così prese le misure di fotocorrente (lette dalle tensioni del canale 2) e di intensità trasmessa (lette dalle tensioni del canale 1). Nei grafici l'asse X misura le lunghezze d'onda λ , e non in unità arbitraria. Questo perchè la conversione è già stata fatta usando le calibrazioni precedenti.

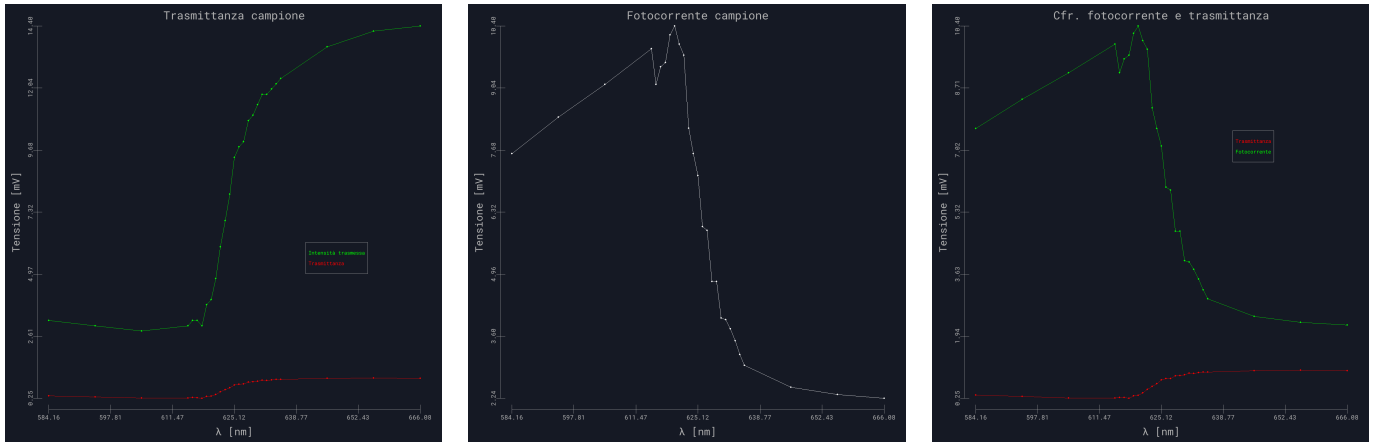


Figura 13: a) Grafico dell'intensità trasmessa I_t e della trasmittanza $\frac{I_t}{I_0}$, b) Grafico della fotocorrente in funzione della lunghezza d'onda, c) Confronto della fotocorrente e della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda.

2.4 Analisi dati

Calibrazione dello spettrometro: Correlazione pixel-lunghezze d'onda (Figura 14): abbiamo calcolato la retta di taratura pixel vs λ della lampada. Dati riportati in tabella 6. Abbiamo considerato e utilizzato la retta di taratura, invece che i risultati del fit cubico (Figura 15), a causa del valore del χ^2 (idealmente = 1). Tra le due interpolazioni, il fit lineare restituisce il risultato migliore. Il motivo di un χ^2 così piccolo nel fit cubico risiede nell'ottimo risultato del fit, ma gli errori dei dati così grandi permettono a più cubiche di interpolare i dati, per cui il χ^2 diminuisce di valore e dunque lo rende non accettabile. Le calibrazioni future saranno basate sui risultati del fit lineare.

Calibrazione monocromatore: Per trovare a quali lunghezze d'onda corrispondono le unità arbitrarie del monocromatore, abbiamo prima cercato a quali lunghezze d'onda corrispondevano i pixel misurati; per fare questo abbiamo usato la retta di taratura precedente: $x = (y - b)/a$ dove x è la lunghezza d'onda da estrapolare, y è il valore dei pixel di ogni massimo di ogni picco nello spettro.

L'errore considerato in questo caso è stato mantenuto come errore percentuale dato che la retta di taratura non copre i valori prossimi a quelli degli errori.

Abbiamo quindi ottenuto un set di lunghezze d'onda a cui corrisponde ogni valore di unità arbitrarie impostato sul monocromatore (si veda tabella 5).

Con queste corrispondenze abbiamo effettuato un fit per poter estrapolare ogni lunghezza d'onda per qualsiasi valore di unità arbitraria (si veda la figura 15).

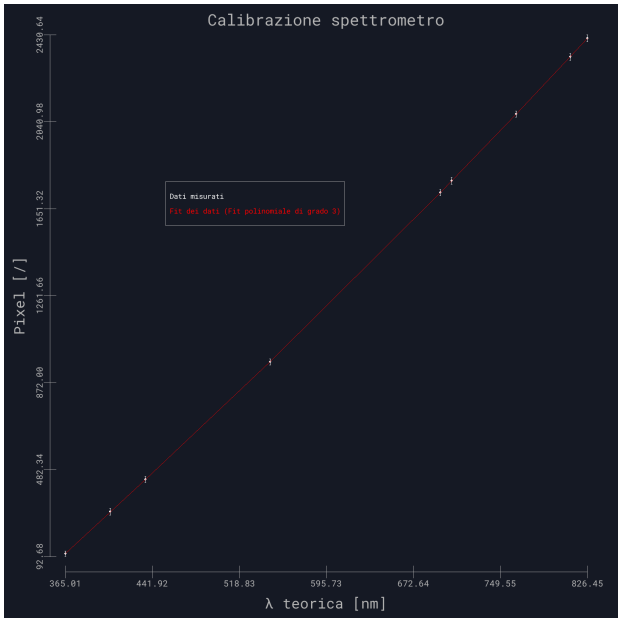
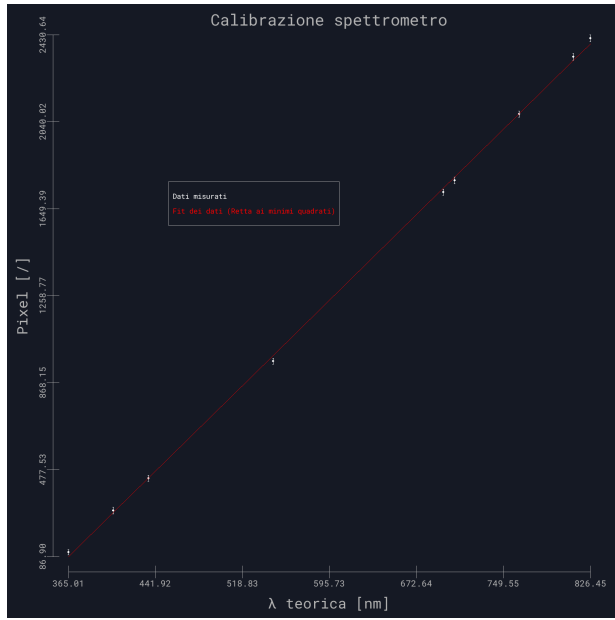
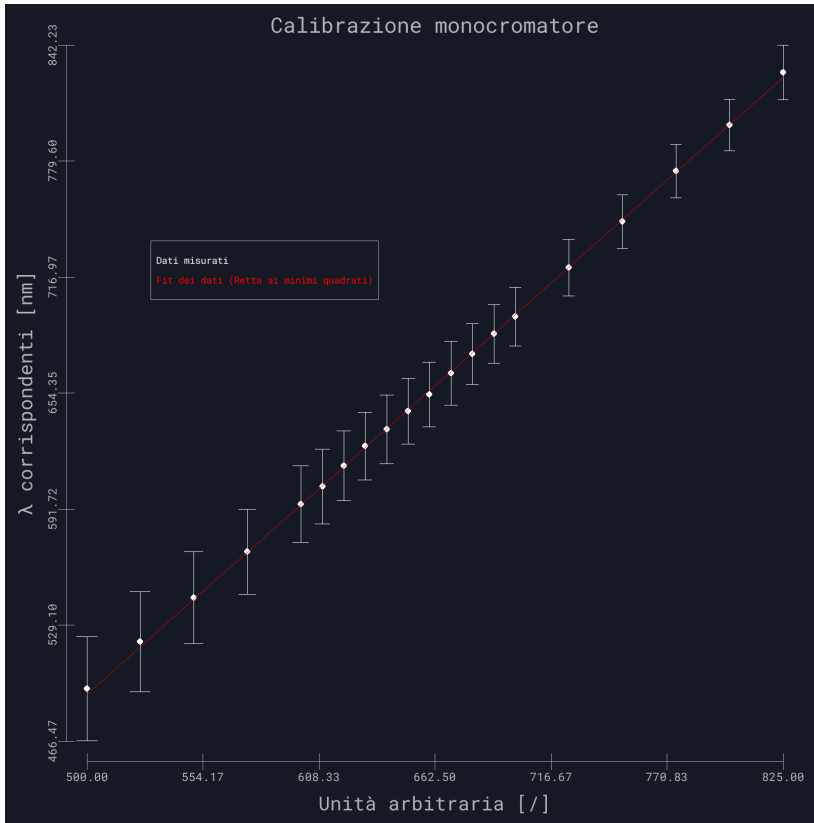


Figura 14: Retta di calibrazione dello spettrometro (software) Figura 15: Fit cubico di calibrazione dello spettrometro (software) (Parametro $b = 0.00029 \pm 0.0005$)

- $a = (4.99 \pm 0.04)nm^{-1}$
- $b = -1730 \pm 20$
- $\chi^2 = 1.764$

- $c = 4.26 \pm 0.29$
- $d = -1501 \pm 55$
- $\chi^2 = 0.01$



- $a = 1.025 \pm 0.003$
- $b = (-21 \pm 2)nm$
- $\chi^2 = 0.005$

Figura 16: Retta di calibrazione del monocromatore (hardware)

Misura dello spettro di riferimento: Una volta effettuata la misura dello spettro della lampada, abbiamo dovuto reinfiltrare il range di lunghezze d'onda dove cadeva il campione. Per farlo abbiamo rimontato il circuito in maniera più compatta per permettere una lettura più accurata dei dati. Dato che la geometria del setup influenza i valori di intensità rilevati, l'andamento dei dati rimane lo stesso ma risultano completamente fuori scala, quindi abbiamo dovuto riassettarli. Per farlo abbiamo usato un fit lineare ($R^2 = 0.953$, $a = (0.44 \pm 0.10) \frac{1}{mV}$, $b = (0 \pm 2mV)$) di 3 punti che cadevano già in quel range, e che quindi ci hanno dato una linea guida sui valori da seguire, dato che la zona di infittimento era pressoché lineare.

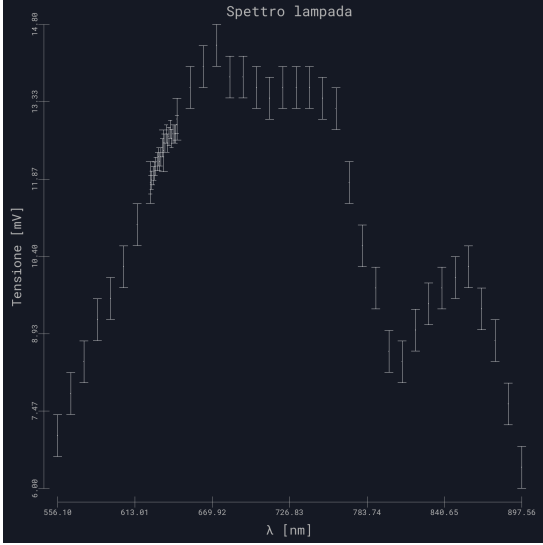


Figura 17: I_0 in funzione della lunghezza d'onda.

Con questi dati abbiamo potuto calcolare la trasmittanza e la fotocorrente normalizzata.

Misura di trasmittanza e fotocorrente: Grafico andamento della trasmittanza e fotocorrente normalizzate per permettere un confronto visivo:

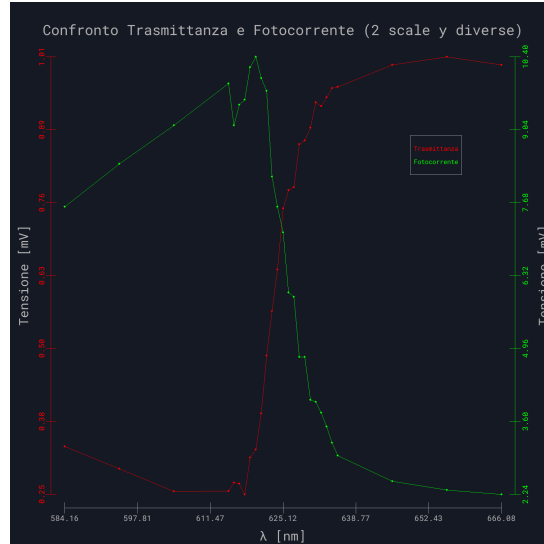


Figura 18: Grafico di fotocorrente e trasmittanza, normalizzate e sovrapposte

2.4.1 Calcolo del flesso della fotocorrente e della trasmittanza:

Primo metodo: massimo della derivata. Il fit della derivata corrisponde ad una gaussiana.
 $y = dV/d\lambda$ $x = \lambda$

Secondo metodo: fit della curva con una sigmoide.

$$S(\lambda) = b + \frac{A}{1 + \exp(\pm \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda})}$$

Ch 1 non normalizzato:

- Mean: 625.1645056248408
- Standard Deviation: 10.970706530478989
- Lunghezza d'onda: $(625, 2 \pm 11, 0)nm$
- $E_g = (1, 98 \pm 0, 03)eV$

Ch 1 non normalizzato:

- λ_0 : 624.528019861369
- Δ_λ : 3.151767216307566
- Lunghezza d'onda: $(625 \pm 3)nm$
- $E_g = (1, 984 \pm 0, 010)eV$

Ch 1 normalizzato:

- Mean: 625.2883483286292
- Standard Deviation: 12.37392154208691
- Lunghezza d'onda: $(625 \pm 12)nm$
- $E_g = (1, 98 \pm 0, 04)eV$

Ch 1 normalizzato:

- λ_0 : 623.9500368592087
- Δ_λ : 2.245275722023942
- Lunghezza d'onda: $(624 \pm 2)nm$
- $E_g = (1, 987 \pm 0, 006)eV$

Ch 2 non normalizzato:

- Mean: 628.2806686585551
- Standard Deviation: 10.837864792387364
- Lunghezza d'onda: $(625, 3 \pm 10, 8)nm$
- $E_g = (1, 98 \pm 0, 03)eV$

Ch 2 non normalizzato:

- λ_0 : 626.8199096670963
- Δ_λ : 2.1117241944834335
- Lunghezza d'onda: $(627 \pm 2)nm$
- $E_g = (1, 978 \pm 0, 006)eV$

Ch 2 normalizzato:

- Mean: 626.2479509379564
- Standard Deviation: 12.696673651440905
- Lunghezza d'onda: $(626 \pm 13)nm$
- $E_g = (1, 98 \pm 0, 04)eV$

Ch 2 normalizzato:

- λ_0 : 626.2788529248645
- Δ_λ : 2.5898284977240458
- Lunghezza d'onda: $(626 \pm 3)nm$
- $E_g = (1, 981 \pm 0, 009)eV$

Le energy gap sono correlate con un t-test al 95% di confidenza. Weighted Average Function: $2.0eV \pm 0.8eV$.

La differenza tra la σ_{std} e la $\Delta\lambda$ risiede innanzitutto sul grafico applicato: il fit gaussiano è stato applicato sulla derivata della funzione, mentre il fit sigmoide direttamente sui dati ottenuti.

2.5 Propagazione degli errori (σ):

Partendo dalla regola generale per la propagazione degli errori con il metodo delle derivate parziali $\sigma_y = \sqrt{\sigma(\frac{\partial y}{\partial x_i} * \sigma_{x_i})^2}$

$$\sigma_E = E \frac{\sigma_\lambda}{\lambda}$$

Il calcolo degli errori nella retta di taratura del monocromatore per le λ è stato fatto in questo modo:

Valendo la retta di taratura dello spettrometro solo per λ comprese tra $\sim 365nm$ e $\sim 826nm$ non abbiamo potuto trasformare le incertezze delle misure da pixel a nm partendo dalle FWHM.

Abbiamo quindi calcolato in percentuale quanto fosse la FWHM rispetto alla propria misura e abbiamo riapplicato lo stesso errore alle nuove misure convertite in nm.

2.6 Conclusioni

Dall'andamento della fotocorrente e della trasmittanza possiamo confermare che ad alte energie e quindi basse lunghezze d'onda ci sono bassi valori di trasmittanza e alti valori di fotocorrente perché le energie sono più alte dell'energy gap. Per basse energie (cioè per quelle minori dell'energy gap del campione, presumibilmente Si o GaAs) allora abbiamo bassa fotocorrente e alta trasmittanza. I risultati sono buoni e questo viene confermato dal fatto che gli otto valori di lunghezze d'onda da noi calcolati portano circa ad uno stesso punto di flesso (che corrisponde alla lunghezza d'onda che ci interessa, la quale rispecchia l'energy gap del campione). La bontà della misura è data dal fatto che questi otto valori soddisfano il test di compatibilità.

Uso del chopper: la modulazione del fascio luminoso è servita in modo da poter da effettuare la misura usando l'oscilloscopio che va a corrente alternata.

Plot dei fit:

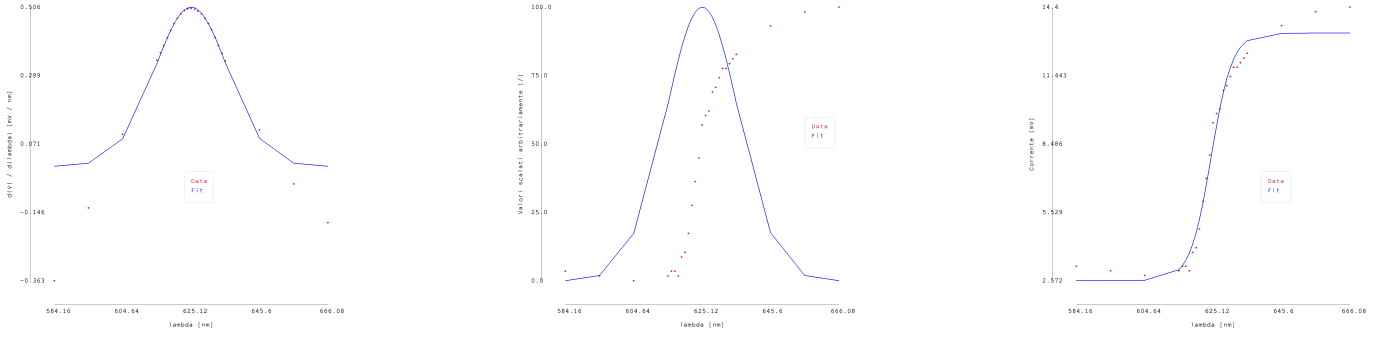


Figura 19: Grafico del fit a) gaussiano con derivate, b) gaussiano con dati, c) sigmoide sul CH1 non normalizzato

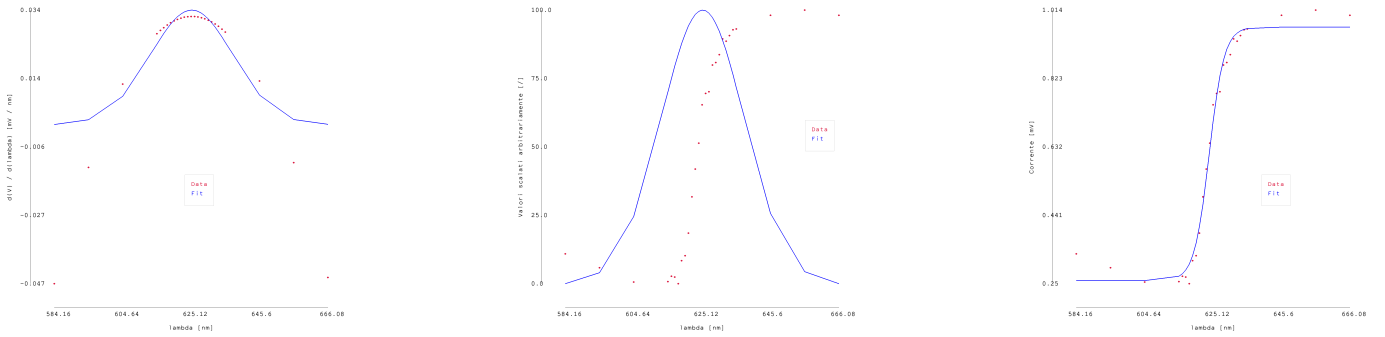


Figura 20: Grafico del fit a) gaussiano con derivate, b) gaussiano con dati, c) sigmoide sul CH1 normalizzato

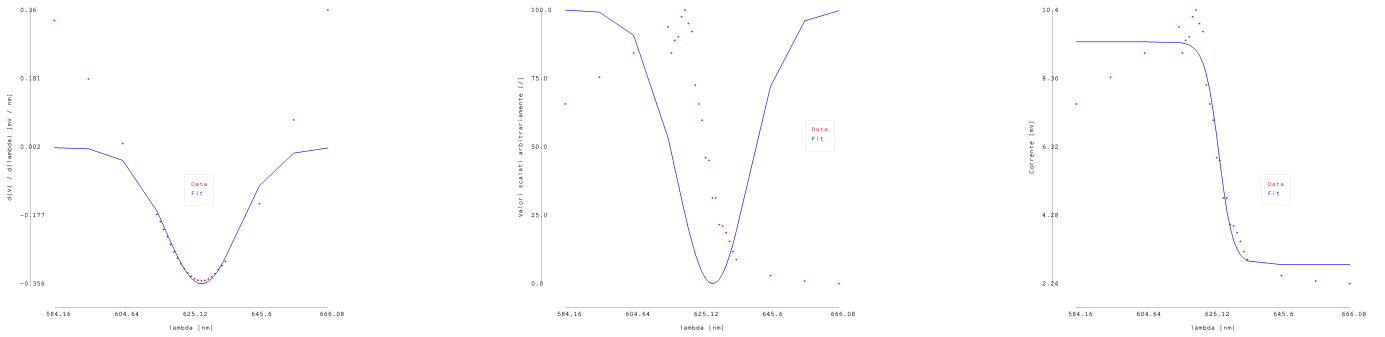


Figura 21: Grafico del fit a) gaussiano con derivate, b) gaussiano con dati, c) sigmoide sul CH2 non normalizzato

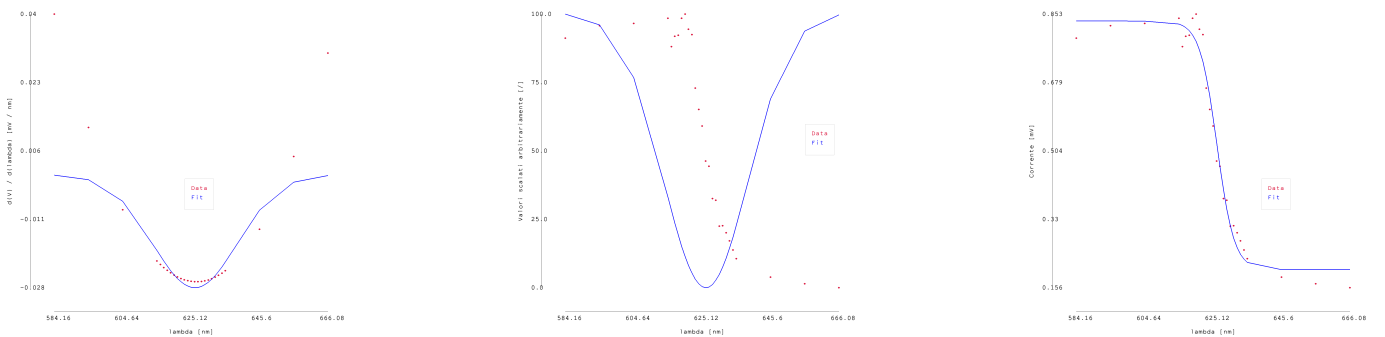


Figura 22: Grafico del fit a) gaussiano con derivate, b) gaussiano con dati, c) sigmoide sul CH2 normalizzato

3 Appendice

tensione voltmetro [V]	I[mA]	errore V	errore I [mA]
-30.05	-3.04	0.08	0.04
-27.01	-2.73	0.08	0.04
-24.08	-2.43	0.07	0.03
-21.05	-2.12	0.07	0.03
-18.05	-1.82	0.07	0.03
-15.03	-1.52	0.07	0.03
-10.08	-1.02	0.06	0.03
-6.01	-0.60	0.06	0.02
-3.00	-0.30	0.05	0.02
3.07	0.31	0.05	0.02
6.01	0.60	0.06	0.02
9.07	0.91	0.06	0.03
12.08	1.22	0.06	0.03
15.07	1.52	0.07	0.03
18.03	1.82	0.07	0.03
21.04	2.12	0.07	0.03
24.01	2.43	0.07	0.03
27.09	2.74	0.08	0.04
30.06	3.04	0.08	0.04

Tabella 1: Dati caratterizzazione resistenza Ohmica

tensione [V]	corrente [μ A]	Err V	Err [μ A]	corrente ln [μ A]	Err [μ A]
0.0300	0.0036	0.0004	0.0001	-5.626821	0.000018
0.0700	0.0099	0.0008	0.0001	-4.61522	0.00002
0.090	0.015	0.001	0.001	-4.2267	0.0002
0.130	0.026	0.001	0.001	-3.6497	0.0003
0.160	0.043	0.002	0.001	-3.1442	0.0003
0.190	0.071	0.002	0.001	-2.6451	0.0004
0.210	0.106	0.002	0.001	-2.2443	0.0004
0.250	0.242	0.003	0.001	-1.4188	0.0007
0.300	0.830	0.003	0.001	-0.186	0.005
0.320	1.480	0.003	0.001	0.392	0.003
0.370	4.911	0.004	0.001	1.5915	0.0006
0.390	8.501	0.004	0.001	2.1402	0.0005
0.430	24.711	0.004	0.001	3.2073	0.0003
0.460	60.690	0.005	0.001	4.1058	0.0002
0.490	100	0.005	1	4.6	0.2
0.520	201	0.005	1	5.30	0.19
0.550	390	0.006	1	5.97	0.17
0.570	593	0.006	1	6.38	0.16
0.600	1149	0.006	1	7.05	0.14

Tabella 2: Dati caratterizzazione tensione corrente in polarizzazione diretta

tensione [V]	Err tensione generatore [V]	corrente [μ A]	Errore corrente [μ A]
1.0	0.1	0.0008	0.0001
2.5	0.1	0.0010	0.0001
5.0	0.1	0.0013	0.0001
7.5	0.1	0.0014	0.0001
10.0	0.1	0.0015	0.0001
12.5	0.1	0.0016	0.0001
15.0	0.1	0.0017	0.0001
17.5	0.1	0.0018	0.0001
20.0	0.1	0.0019	0.0001
22.5	0.1	0.0019	0.0001
25.0	0.1	0.0020	0.0001
27.5	0.1	0.0021	0.0001
30.0	0.1	0.0021	0.0001
31.8	0.1	0.0022	0.0001

Tabella 3: Dati corrente caratteristica polarizzazione inversa (per effettuare l'interpolazione non abbiamo utilizzato gli arrotondamenti per evitare di avere dati approssimati allo stesso valore nella prima metà del grafico)

voltm. V_D [V]	e. V_D [V]	V_{in} [V]	e. V_{in} [V]	I [mA]	e. I [mA]	$\ln(I)$ [mA]	e. $\ln(I)$ [mA]	I_L [a.u.]	e. I [a.u.]
1.711	0.001	3.0	0.1	-1.47	0.03	0.39	0.07	56800	200
1.738	0.001	4.0	0.1	-2.31	0.03	0.84	0.04	138500	400
1.762	0.001	5.0	0.1	-3.32	0.04	1.20	0.03	23400	500
1.781	0.001	6.0	0.1	-4.29	0.05	1.46	0.03	352500	600
1.804	0.001	7.5	0.1	-5.76	0.05	1.75	0.03	410000	600
1.826	0.001	9.0	0.1	-7.24	0.06	1.98	0.03	412300	600
1.863	0.001	12.0	0.1	-10.22	0.08	2.32	0.03	416000	600
1.895	0.001	15.0	0.1	-13.19	0.10	2.58	0.04	419000	600
1.926	0.001	18.0	0.1	-16.25	0.12	2.79	0.04	421000	600
1.954	0.001	21.0	0.1	-19.33	0.14	2.96	0.05	423500	700

Tabella 4: Caratterizzazione LED

UA	pixel	FWHM (pixel)	err. % (pixel)	$\lambda[nm]$	err. $\lambda[nm]$
500	735	42	6	495	28
525	861	45	5	520	27
550	980	45	5	544	25
575	1104	45	4	569	23
600	1232	43	3	594	21
610	1280	43	3	604	20
620	1336	41	3	615	19
630	1389	41	3	626	18
640	1434	42	3	635	19
650	1483	41	3	645	18
660	1528	41	3	654	18
670	1584	41	3	665	17
680	1637	40	2	675	17
690	1691	39	2	686	16
700	1737	40	2	696	16
725	1869	40	2	722	15
750	1993	39	2	747	15
775	2129	40	1.9	774	15
800	2253	40	1.8	799	14
825	2395	43	1.8	827	15

Tabella 5: Calibrazione monocromatore

lambda teorica [nm]	pixel max gaussiana	Sd
365.015	106.200	13.500
404.656	293.400	16.400
435.833	438.400	13.700
546.074	964.300	13.600
696.543	1723.800	13.700
706.722	1776.700	16.000
763.511	2074.700	15.200
811.531	2330.500	15.400
826.452	2415.200	15.400

Tabella 6: Calibrazione spettrometro

unità arbitarie (ua)	intensità oscilloscopio [mV]
550	7.0
560	7.8
570	8.4
580	9.2
590	9.6
600	10.2
610	11.0
620	11.8
630	12.4
640	13.0
650	13.6
660	14.0
670	14.4
680	13.8
690	13.8
700	13.6
710	13.4
720	13.6
730	13.6
740	13.6
750	13.4
760	13.2
770	11.8
780	10.6
790	9.8
800	8.6
810	8.4
820	9.0
830	9.5
840	9.8
850	10.0
860	10.2
870	9.4
880	8.8
890	7.6
900	6.4

Tabella 7: Misura spettro di riferimento (I_0)

ua	mV
620	25.8
621	26.0
622	26.2
623	26.4
624	26.6
625	26.8
626	27.0
627	26.8
628	27.0
629	27.4
630	27.6
631	27.6
632	28.0
633	27.6
634	27.9
635	28.2
636	27.8
637	28.0
638	28.0
639	28.0
640	28.4

Tabella 8: Infittimento range (620-640 nm)

ua	ch1 corrente trasmessa [mV]	errore ch1 [mV]	ch2 fotocorrente [mV]	errore ch2 [mV]
590	3.20	0.40	7.60	0.40
600	3.00	0.40	8.40	0.40
610	2.80	0.40	9.12	0.40
620	3.00	0.40	9.90	0.40
621	3.20	0.40	9.12	0.40
622	3.20	0.40	9.50	0.40
623	3.00	0.40	9.60	0.40
624	3.80	0.40	10.2	0.4
625	4.00	0.40	10.4	0.4
626	4.80	0.40	10.0	0.4
627	6.00	0.40	9.76	0.40
628	7.00	0.40	8.16	0.40
629	8.00	0.40	7.60	0.40
630	9.40	0.40	7.12	0.40
631	9.80	0.40	6.00	0.40
632	10.0	0.4	5.92	0.40
633	10.8	0.4	4.80	0.40
634	11.0	0.4	4.80	0.40
635	11.4	0.4	4.00	0.40
636	11.8	0.4	3.96	0.40
637	11.8	0.4	3.76	0.40
638	12.0	0.4	3.50	0.40
639	12.2	0.4	3.20	0.40
640	12.4	0.4	2.96	0.40
650	13.6	0.4	2.48	0.40
660	14.2	0.4	2.32	0.40
670	14.4	0.4	2.24	0.40

Tabella 9: Misura fotocorrente