

Tecnologie Digitali - Logbook Week 6

Salvatore Bottaro¹ and Lorenzo M. Perrone²

¹salvo.bottaro@hotmail.it

²lorenzo.perrone.lmp@gmail.com

Sommario—Logbook di laboratorio di Tecnologie Digitali, a.a. 2015/2016. Week 6.

I. GRANDEZZE FOTOMETRICHE

In tabella I sono mostrate le grandezze fotometriche impiegate con relativa unità di misura.

Tabella I: Grandezze fotometriche.

Grandezza	Unità SI	Unità fotometrica
Flusso luminoso	W	lumen (lm)
Intensità luminosa	W/sr	candela (cd)
Luminanza	W/(sr m ²)	nit = cd/m ²
Illuminamento	W/m ²	lux

Un'unità alternativa per l'illuminamento è il foot-candle (fc) di origine anglosassone, con 1 fc = 10.764 lux.

II. FOTODIODO E SUE SPECIFICHE

A. Hm. 1

Nel documento *Photodiode Technical Information* della *Hamamatsu* è possibile leggere alcune definizioni tecniche di parametri presenti nei datasheet.

- Risposta spettrale: la relazione fra le sensibilità fotoelettrica e la lunghezza d'onda espressa in termini di efficienza quantica, fotosensibilità ... ;
- Fotosensibilità (S): rapporto fra la potenza incidente sul dispositivo (W) e la fotocorrente generata (A);
- Efficienza quantica (QE): il rapporto fra il numero di elettroni o buche rilevabili come fotocorrente e il numero di fotoni incidenti. Il QE è espresso in percentuale ed è legato alla fotosensibilità dalla relazione:

$$QE = \frac{S \cdot 1240}{\lambda} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

con λ in nm;

- Corrente di corto circuito (Isc), tensione a circuito aperto (Voc): la Isc è la fotocorrente che scorre nel dispositivo in modalità fotoconduttiva, ovvero quando il dispositivo è corto circuitato. La Voc è la tensione generata dal fotodiodo a circuito aperto;
- Dark current (I_D), resistenza di shunt (Rsh): la I_D è la corrente che scorre nel fotodiodo quando non è esposto alla luce e vi è applicata una tensione negativa ed è un'importante fonte di rumore quando al fotodiodo è applicata una tensione inversa. Negli altri casi si deve

tenere della Rsh, ovvero il rapporto $\frac{V}{I}$ in prossimità di 0 V definita da:

$$R_{sh} = \frac{10[mV]}{I_D} [\Omega] \quad (2)$$

dove I_D è la dark current a 10 mV;

- Terminal Capacitance (C_t): la giunzione PN del fotodiodo ha una capacità effettiva che costituisce il fattore principale nel determinare il tempo di risposta del fotodiodo;
- Tempo di salita (tr): tempo di risposta del diodo ad un segnale a scalino ed è definito come il tempo necessario per passare dal 10 % al 90 % del valore costante di output;
- Cut-off frequency (fc): misura del tempo di risposta del fotodiodo ad un segnale luminoso sinusoidale. Si definisce come la frequenza a cui l'output diminuisce di 3 dB rispetto a 100 kHz (con resistenza di carico di 50 Ω e diodo laser di 830 nm). Fra tempo di salita e cut-off frequency vale la relazione:

$$tr = \frac{0.35}{fc}; \quad (3)$$

- Noise Equivalent Power (NEP): il NEP è definito come la potenza luminosa incidente necessaria per ottenere un rapporto segnale-rumore pari a 1. Nei datasheet il NEP è riferito alla lunghezza di picco λ_p . Analiticamente:

$$NEP[W/Hz^{\frac{1}{2}}] = \frac{Noise\ current\ [A/Hz^{\frac{1}{2}}]}{Fotosensibilità\ a\ \lambda_p[A/W]}; \quad (4)$$

- Massima tensione inversa ($V_R\ MAX$);
- Detectivity (D^*): D è il reciproco del NEP e misura la capacità di rilevare un segnale. Poiché il NEP è proporzionale alla radice dell'area sensibile, moltiplicando D per tale radice si ottiene un indicatore della capacità di rilevare i segnali indipendente dalle dimensioni del dispositivo:

$$D^* = \frac{(Area\ sensibile\ [cm^2])^{\frac{1}{2}}}{NEP}. \quad (5)$$

In figura 1 sono mostrate le curve caratteristiche del fotodiodo al variare della luminosità incidente. Poiché l'elettrone e la buca generate dall'interazione radiazione materia nella regione di svuotamento della giunzione, a causa del campo elettrico presente nella regione stessa diretto dalla regione n alla regione p, sono spinti rispettivamente nella zona n e p, la corrente da essi generata si somma alla reverse current dei portatori minoritari. Questo fa sì che all'aumentare della luminosità la

curva caratteristica trasli verso il basso di una quantità data da:

$$I = \eta \frac{We}{h\nu} \quad (6)$$

dove η è l'efficienza quantica, ovvero la probabilità che un fotone incidente generi una coppia elettrone-buca che contribuisca alla fotocorrente.

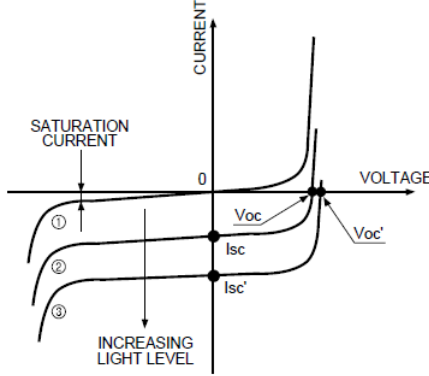


Figura 1: Curve caratteristiche del fotodiode al variare della luminosità incidente.

III. FOTODIODO VTB8440BH

Dal datasheet del fotodiode si possono leggere le specifiche in tabella II.

Tabella II: Specifiche del fotodiode VTB8440BH

Grandezza	Test conditions	Valore tipico
I_{SC}	H = 100 fc, 2850 K	5 μA
V_{OC}	2850 K	420 mV
I_D	H = 100 fc, 2850 K	2 nA (max)
R_{SH}	H = 0, V = 10 mV	70 M Ω
C_J	H = 0, V = 0	1 nF
λ_p		580 nm
NEP		$1.1 \cdot 10^{-13} \text{ W}/\sqrt{Hz}$
D*		$2.2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^2/\sqrt{Hz}/W$

Le prime prove sono state fatte collegando direttamente il fotodiode al multimetro. Abbiamo dapprima impiegando il multimetro come voltmetro studiando quindi la risposta del fotodiode in modalità fotovoltaica. Abbiamo individuato anodo e catodo del fotodiode semplicemente guardando in che modo bisognava collegarlo per avere tensioni positive, dal momento che in caso di esposizione alla luce in modalità fotovoltaica la d.d.p. fra anodo e catodo deve essere positiva. In particolare abbiamo individuato il catodo (-) in corrispondenza di un forellino presente sul dispositivo. Abbiamo effettuato diverse misure dell'intensità luminosa in varie condizioni, in tabella III abbiamo riportato i risultati con le relative condizioni.

Tabella III: V_{oc} (mV) in varie condizioni.

Condizione	V_{oc} (mV)
Luce lab.	388 ± 1
Flash cellulare	534 ± 5
Lente di ingrandimento	400 ± 2
Coperto con foglio di carta	2 ± 1

Per vedere come la risposta fotovoltaica dipenda dall'intensità luminosa abbiamo posizionato il flash della fotocamera del cellulare sul fotodiode a varie distanze, tenendo conto che l'intensità luminosa è quadratica nella distanza (anche se non è proprio così nel caso del flash del cellulare), coprendo in parte cellulare e fotodiode con un foglio per schermare la luce del laboratorio (misura effettivamente non essenziale). I dati sono riportati in figura 2 e mostrano chiaramente come l'andamento sia non lineare. I valori ottenuti sono comunque dello stesso ordine di grandezza della V_{oc} tipica riportata nel datasheet.

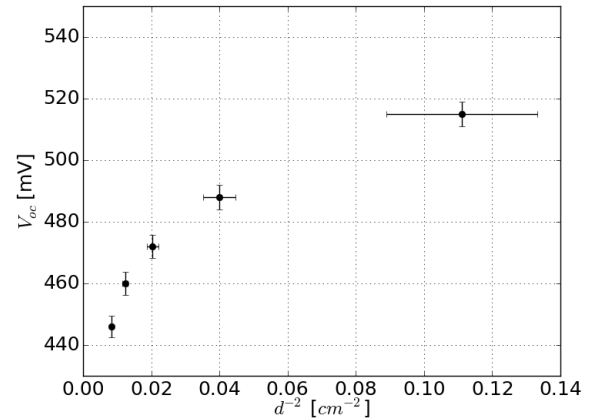


Figura 2: Grafico di V_{oc} in funzione dell'inverso della distanza al quadrato del flash.

Impiegando il multimetro come amperometro, in buona approssimazione i capi del fotodiode sono cortocircuitati per cui si ha che esso lavora in modalità fotoconduttiva. In questa modalità si dovrebbe avere una dipendenza lineare dall'illuminazione, e quindi nelle ipotesi precedenti lineare con il quadrato della distanza del flash del cellulare impiegato. Abbiamo collegato l'anodo del fotodiode all'ingresso del multimetro, per cui le correnti osservate dovrebbero essere negative. Di fatti quello che abbiamo osservato sono state proprio correnti negative, per cui nel seguito ci si riferirà ai valori assoluti. Il valore della fotocorrente nel diode alla luce del laboratorio, nella nostra postazione, vale $I = (1.12 \pm 0.01) \mu A$, mentre il valore tipico riportato nel datasheet è $5 \mu A$. Con le stesse modalità di prima abbiamo indagato la dipendenza della corrente dalla distanza, ottenendo il grafico in figura 12 in cui è evidente un andamento decisamente più lineare.

Dopo queste prove preliminari, abbiamo realizzato sulla breadboard il circuito in figura 4. In queste condizioni, per le regole d'oro dell'opamp il fotodiode è in modalità fotoconduttiva poiché i suoi terminali sono alla stessa differenza di potenziale, per cui la resistenza di carico elevata consente di tradurre in tensioni che si possono agevolmente misurare delle correnti piccole come le fotocorrenti.

Utilizzando il VI ACQUIS_BASE_2015 abbiamo misurato l'illuminazione del laboratorio. I dati sperimentali sono in figura 5.

Come si vede le tensioni sono negative, questo perché la fotocorrente scorre verso l'uscita dell'opamp. Il segnale osservato è periodico ad una frequenza di 100 Hz, questo

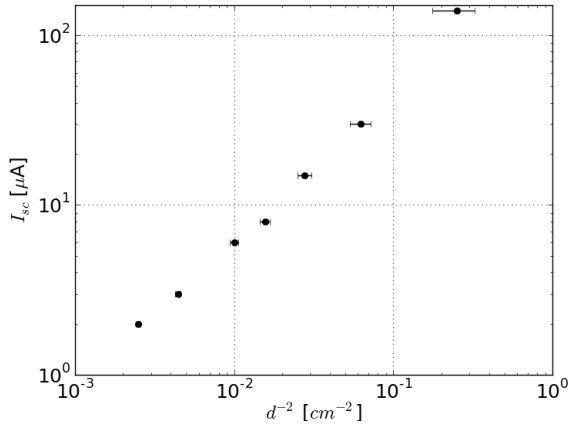


Figura 3: Grafico di I_{sc} in funzione dell'inverso del quadrato della distanza.

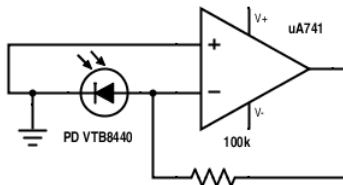


Figura 4: Circuito realizzato per la misura delle fotocorrenti.

perché le lampade fluorescenti del laboratorio sono alimentate da corrente alternata a 50 Hz e dal momento che l'intensità è quadratica nei campi si ottiene una frequenza principale doppia (più armoniche superiori). Il fatto che il segnale non vada a zero quando è dovuto al fatto che i tempi di reazione del gas nelle lampade sono maggiori del periodo della corrente di alimentazione, per cui non tutte le molecole del gas sono diseccitate quando la corrente è nulla. Non può essere infatti un problema di offset del fotodiode poiché il segnale che si ottiene coprendo con dei fogli il fotodiode varia in un intervallo compreso fra -2 mV e 6 mV, come si vede in figura 6. Calcolando il valore medio e lo scarto quadratico medio si ottiene una misura dell'offset di $(2217 \pm 2) \mu\text{V}$.

Abbiamo infine ripetuto la misura dell'illuminazione del laboratorio con una lente di ingrandimento, facendo convergere il più possibile la luce della lampada sul fotodiode. Come si vede in figura 7, si ottiene un segnale praticamente identico a quello di figura 5, ma traslato verso il basso di circa 30 mV e con un'ampiezza di 20 mV circa maggiore, corrispondente al passaggio di più corrente nel fotodiode e quindi ad un'illuminazione maggiore.

A. Hm. 2

Dal datasheet il grafico che consente la conversione fra corrente e illuminazione è quello riportato in figura 8. Sull'asse delle coordinate viene riportata la corrente relativa, ovvero 100 volte il rapporto fra la fotocorrente misurata e il valore tipico di $5 \mu\text{A}$ riportato sul datasheet. A $I_{rel} = 5 \mu\text{A}$ corrisponde un'illuminazione di 100 fc.

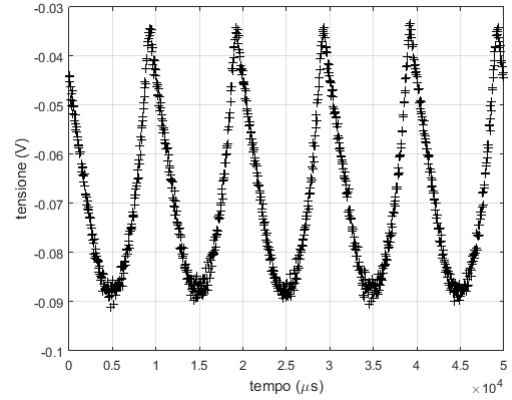


Figura 5: Illuminazione del laboratorio rilevata dal fotodiode in funzione del tempo.

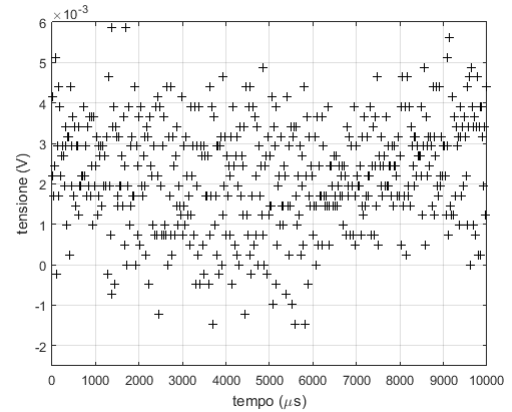


Figura 6: Segnale rilevato coprendo il fotodiode con dei fogli.

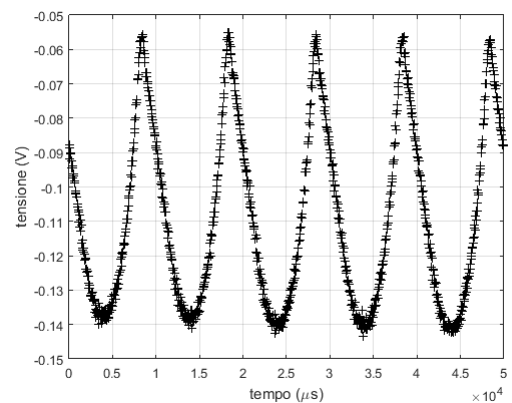


Figura 7: Illuminazione del laboratorio con lente di ingrandimento.

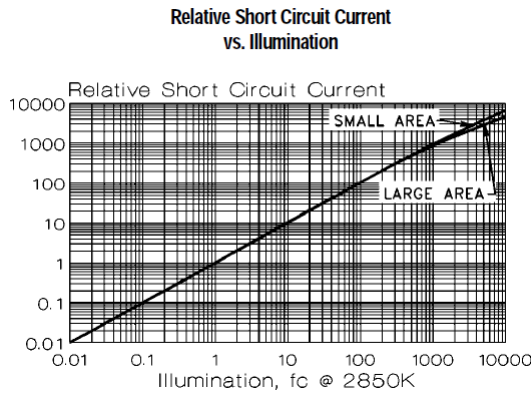


Figura 8: Illuminazione vs corrente relativa.

Il valor medio della corrente nel fotodiodo vale $(0.674 \pm 0.002) \mu\text{A}$ che dal grafico 8 corrisponde un'illuminazione di circa 13-14 fc.

IV. FOTODIODO E LED

Poiché dal datasheet emerge che il fotodiodo ha la migliore risposta per $\lambda = 580 \text{ nm}$, abbiamo deciso di usare un LED HLPM-C315 che ha lunghezza d'onda di picco a 585 nm. Come si vede dalla figura 9 tratta dal datasheet del LED, la luminosità cresce linearmente con la corrente a partire dai 12-13 mA, per cui nel seguito abbiamo fatto attenzione a mantenerci in questo range.

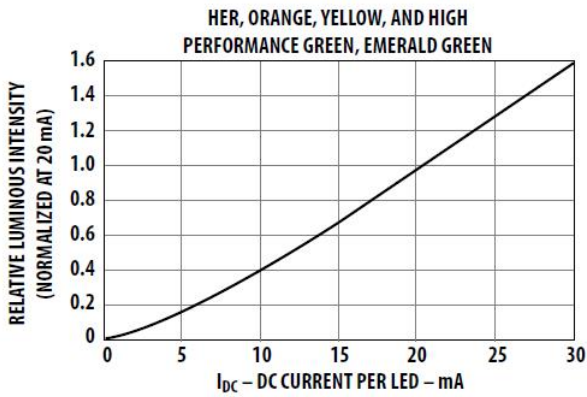


Figura 9: Intensità luminosa emessa dal LED in funzione della corrente.

Abbiamo montato sulla breadboard il circuito di alimentazione del LED. Abbiamo scelto come resistenza di carico $R = 215 \Omega \pm 0.8 \%$, in modo tale da poter raggiungere le correnti di lavoro. Tramite il VI $V_{in_Vout_2C}$ abbiamo individuato il range di tensioni da applicare al LED per ottenere le correnti di interesse. Dai dati in tabella IV si vede che per tensioni comprese fra 5 e 6 V le correnti rientrano nella regione di linearità del LED, inoltre si vede anche come la corrente dipenda linearmente dalla tensione V_{in} di alimentazione.

Il LED è stato collegato ad un cavo flessibile in modo tale da poterlo posizionare direttamente sul fotodiodo. Tramite il VI PD_LED abbiamo tracciato la caratteristica $I_{LED} vs I_{PD}$,

Tabella IV: Correnti nel LED all'aumentare di V_{in} .

V_{in} (V)	V_R (V)	I_{LED} (mA)
5	3(0)	14
5.2	3.191(0)	14.8
5.4	3.3812(6)	15.7
5.6	3.569(0)	16.6
5.8	3.7596(5)	17.5
6	3.95(0)	18.4

impiegando un range di tensioni da 0 V a 6 V. In figura 10 sono mostrati i dati sperimentali in cui è evidente, già per basse correnti, un andamento lineare. Questo è in accordo con la risposta lineare del fotodiodo e con la dipendenza lineare dell'illuminazione emessa dal LED dalla tensione applicata, soprattutto per alte correnti.

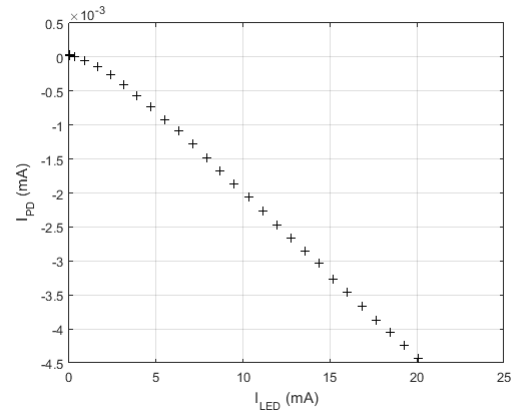


Figura 10: Caratteristica $I_{LED} vs I_{PD}$ con intervallo di tensioni 0-6 V

A. Hm. 3

In figura 11 si vede il grafico della sensibilità del fotodiodo in funzione della lunghezza d'onda. Questo consente di tradurre i dati sulla corrente in termini di illuminamento del fotodiodo. Poiché il LED emette ad una lunghezza d'onda di $583 \pm 15 \text{ nm}$, si può stimare dal grafico 11 una sensibilità di $0.23 \pm 0.01 \text{ (A/W)}$.

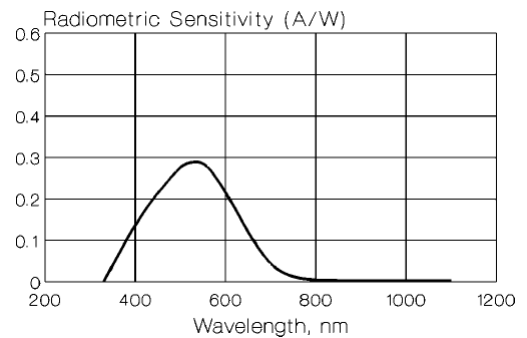


Figura 11: Sensibilità del fotodiodo in funzione della lunghezza d'onda.

Poiché 1 W vale 683 lm a 555 nm di lunghezza d'onda e dal momento che la lunghezza d'onda impiegata è simile, si

può assumere valido questo fattore di conversione. Il grafico con l'illuminamento in funzione della corrente nel LED è in figura 12.

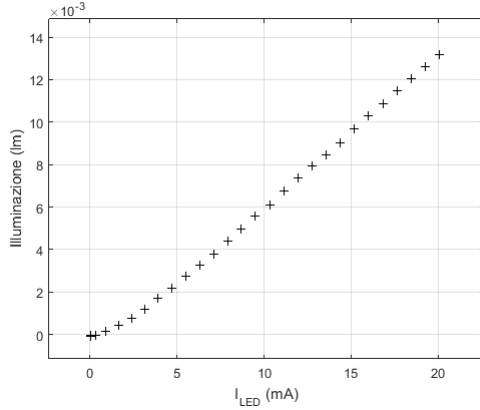


Figura 12: Illuminazione sul fotodiodo in funzione della corrente nel LED.

Abbiamo studiato la dipendenza dell'intensità luminosa al variare della distanza del LED. Per fare questo abbiamo avvolto un foglio di carta su se stesso e infilato dentro il LED, dopodiché abbiamo poggato il rotolo sul fotodiodo e avviato il VI *PD_LED* aumentando progressivamente la distanza del LED. In figura 13 sono riportate le caratteristiche I_{LED} vs I_{PD} al variare della distanza.

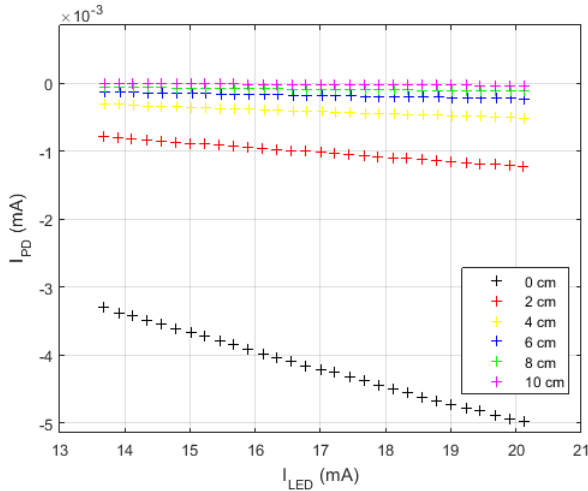


Figura 13: Caratteristica I_{LED} vs I_{PD} al variare della distanza del LED

L'ipotesi più semplice per quanto riguarda la dipendenza intensità-distanza è una legge del tipo:

$$I = a + \frac{b}{(x - c)^2} \quad (7)$$

che rende conto del fatto che il fotodiodo potrebbe avere un offset (parametro a) e che per $x = 0$ I resti finita (idealmente quello che si osserva ponendo il LED a contatto con il fotodiodo). Per verificare questo andamento abbiamo scelto gli

Tabella V: Parametri stimati dal fit

Parametro	Valore
a	$1.16(10) \cdot 10^{-4} \text{ mA}$
b	$-0.0228(6) \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$
c	$-2.11(3) \text{ cm}$
χ^2/ndof	0.57/3

ultimi dati di ciascuna curva stimando l'errore sulla corrente tramite:

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{R}\right)^2 + \left(\frac{I \Delta R}{R}\right)^2} \quad (8)$$

In figura 14 è riportato il fit, mentre in tabella V i parametri fittati secondo la legge 7.

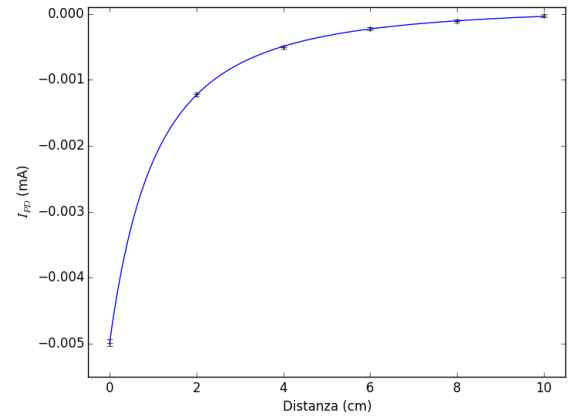


Figura 14: Fit dei dati della corrente nel fotodiodo in funzione della distanza del LED. Non sono riportati gli errori sulla distanza.

Si vede come l'andamento ipotizzato sia ben verificato.

V. FOTODIODO IN REGIME FOTOVOLTAICO

Un fotodiodo dovrebbe obbedire all'equazione di Shockley traslata verso il basso a causa della fotocorrente:

$$I = I_s(\exp^{\frac{V}{V_T}} - 1) - I_{lux} \quad (9)$$

In modalità fotovoltaica $I=0$ da cui:

$$V = V_T \ln\left(1 + \frac{I_{lux}}{I_s}\right) = V_T \ln(1 + k I_{LED}) \quad (10)$$

Dove si è sfruttata l'ipotesi verificata sperimentalmente che $I_{lux} \propto I_{LED}$. Tramite il VI *Vin_Vout_2C* abbiamo individuato la tensione di prima accensione del LED, $V \approx 1.36 \text{ V}$, e la tensione ai capi del fotodiodo oscurato, $V = 0.06408 \pm 0.00014 \text{ V}$, e alla luce del laboratorio, $V = 0.3701 \pm 0.0002 \text{ V}$.

Tramite il VI *PD_LED* abbiamo tracciato la caratteristica $V_{OC} - I_{LED}$, dove V_{OC} è la tensione al fotodiodo. In figura 15 sono mostrati i dati sperimentali: sembra evidente un andamento simile a quello previsto dall'equazione 10.

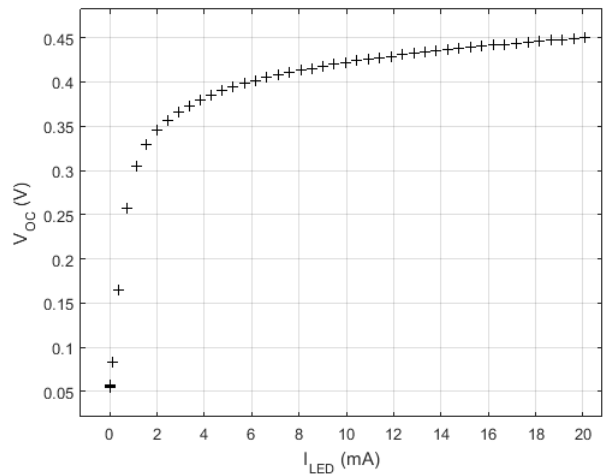


Figura 15: Caratteristica $V_{OC} - I_{LED}$ del fotodiodo.

A. Hm. 4

Per verificare ciò abbiamo fittato i dati sperimentali tramite fit a due parametri secondo la 10, prendendo k e V_T come parametri liberi. In figura 16 è mostrato il grafico di fit, mentre in tabella VI i risultati del fit stesso.

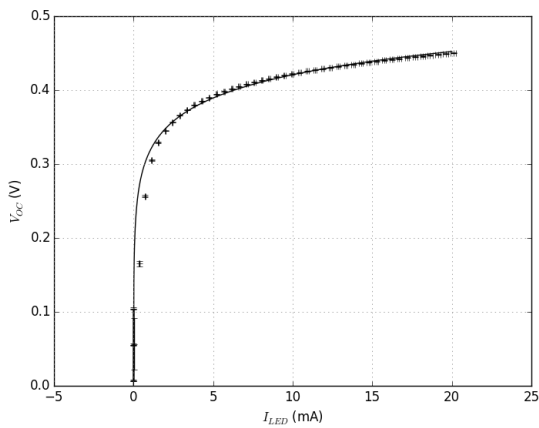


Figura 16: Fit caratteristica $V_{OC} - I_{LED}$

Tabella VI: Parametri del fit

Parametro	Valore
a	0.0453(10) V
b	11(2)·10 ³ mA ⁻¹
χ^2/ndof	2055/48

Come si vede il fit segue abbastanza bene i dati sperimentali, a parte i primi dati, dove però il LED non è più in regime lineare. Se si escludono quindi le prime misure, il fit ottenuto risulta essere quello in figura 17 e tabella VII. Il grafico risulta maggiormente in accordo con i dati sperimentali e il χ^2 molto più ragionevole, per cui questi valori si possono considerare più significativi dei precedenti.

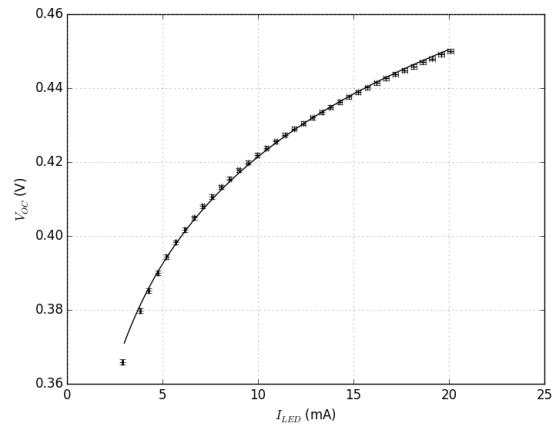


Figura 17: Fit caratteristica $V_{OC} - I_{LED}$ senza le prime misure.

Tabella VII: Parametri del fit.

Parametro	Valore
a	0.0419(3) V
b	235(14) ·10 mA ⁻¹
χ^2/ndof	57/34