

# Light Emitting Diodes (LED) e fotodiodi

In questa esperienza ci focalizzeremo su dispositivi “fotonici” a semiconduttore, dove abbiamo la possibilità di **convertire potenza elettrica in elettromagnetica e viceversa**. Nel primo caso abbiamo dispositivi quali i **diodi emettenti luce** (in inglese *Light Emitting Diodes* - LED) e i laser a diodo. Per quanto riguarda la conversione nella direzione opposta, abbiamo dispositivi adatti alla *rivelazione* di fotoni, quali per esempio i **fotodiodi**. In questa scheda ci occupiamo di questi componenti, con l’obiettivo di caratterizzarli in vista di un loro futuro utilizzo per esperienze di fisica di base.

## 1 Light Emitting Diode (LED)

Come illustrato a lezione, i diodi bipolari<sup>1</sup> si realizzano costruendo una giunzione fra due materiali semiconduttori di tipo *p* e *n*. Quando la giunzione viene sottoposta ad una *polarizzazione diretta* – ossia quando il voltaggio positivo  $V$  è applicato al materiale *p*, detto anche anodo, rispetto al materiale *n*, detto anche catodo – alla giunzione si verifica una forte iniezione di portatori minoritari *in eccesso*. Con un meccanismo che non rivediamo qui nel dettaglio, questo porta all’instaurarsi di una corrente elettrica che, notoriamente, cresce esponenzialmente con il voltaggio  $V$ .

I portatori minoritari iniettati attraverso la giunzione in polarizzazione diretta si vengono a trovare in una condizione fuori equilibrio e subiscono un processo di diffusione e ricombinazione, la cui esatta dinamica dipende dai parametri del semiconduttore. La ricombinazione consiste in un processo in cui una buca e un elettrone vengono convertiti in energia. Alternativamente, è completamente equivalente vedere questo processo come una transizione di un elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza, dove va ad occupare uno degli stati liberi a più bassa energia. In generale, questo processo può essere non-radiativo e rilasciare energia termica nella forma di fononi; nei semiconduttori *a gap diretto*<sup>2</sup>, la configurazione delle bande permette anche una rapida ricombinazione tramite emissione di fotoni. Dato che parleremo spesso di lunghezza d’onda  $\lambda$ , ricordiamo la relazione che la lega all’energia del fotone  $E_\gamma$

$$E_\gamma = \hbar\omega = \hbar \frac{2\pi}{T} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.1)$$

dove  $T$  è il periodo di oscillazione mentre  $h$  e  $c$  sono chiaramente la costante di Planck e la velocità della luce. In prima approssimazione si può identificare il “salto energetico” in questione con la separazione in energia  $E_g$  tra il minimo della banda di conduzione e il massimo di quella di valenza (*band gap*). In realtà la situazione è un poco più complicata: da un lato, sono possibili transizioni a energia superiore ( $\lambda$  minore), che coinvolgono livelli energetici che non si trovano a bordo banda e che possono per esempio essere popolati per motivi termici; dall’altro, il salto

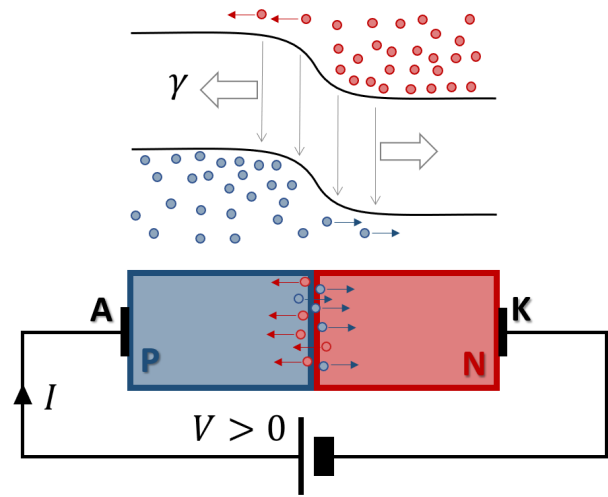


Figura 1.1: Diodo LED.

<sup>1</sup>Ricordiamo che esistono anche quelli basati sulle giunzioni metallo-semiconduttore, che sono dette giunzioni Schottky e sono alla base degli omonimi diodi unipolari. I diodi Schottky rettificano in maniera praticamente simile ma qualitativamente diversa da quelli bipolari. In particolare il loro funzionamento non coinvolge fenomeni diffusione/ricombinazione di portatori minoritari, e sono per questo motivo intrinsecamente più veloci nella commutazione.

<sup>2</sup>Tipicamente si tratta di materiali III-V quali GaAs, InP e molti altri. Notoriamente, il gruppo *non* include né il Si né il Ge, che non possono emettere luce in maniera efficiente con questo meccanismo.

energetico può essere anche minore del *gap* ( $\lambda$  maggiore) quando nella transizione sono coinvolti livelli di impurezza oppure stati eccitonici. Inoltre, mentre in emissione può essere grossolanamente corretto aspettarsi  $E_\gamma = E_g$ , ricordiamo che in assorbimento l'energia  $E_g$  va senza dubbio considerata solo una soglia *inferiore* all'assorbimento, a partire dalla quale il semiconduttore diventa sostanzialmente opaco alla radiazione elettromagnetica.

Fatte queste premesse e avvertenze, nel seguito considereremo in prima approssimazione valido  $E_\gamma = E_g$ . Dato che useremo sostanzialmente sorgenti di luce visibile, ricordiamo anche che questa regione dello spettro, spesso indicata come VIS<sup>3</sup>, va dal violetto ( $\approx 400$  nm) al rosso ( $\approx 700$  nm). Le corrispondenti energie in elettronVolt possono essere calcolate tramite la formula mnemonica

$$\Delta E [\text{eV}] \approx \frac{1240}{\lambda [\text{nm}]} \quad (1.2)$$

da cui vediamo che lo spettro visibile si estende da  $\approx 1.7$  eV fino a  $\approx 3$  eV.

### 1.1 Caratteristica IV del LED

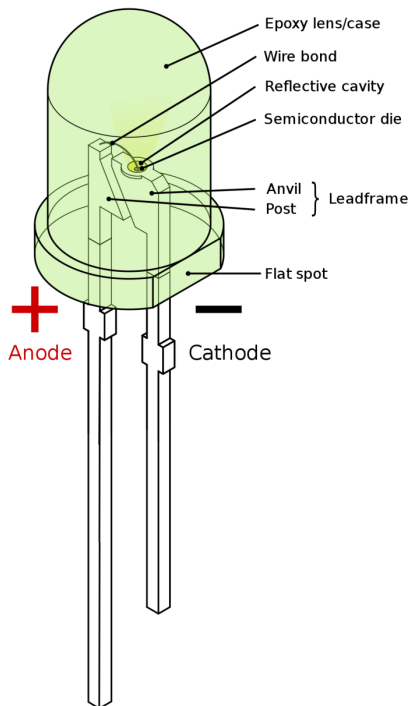


Figura 1.2: Tipico LED.

Prima di cominciare, è utile dedicare un po' di attenzione alla struttura di un LED, che si presenta tipicamente nell'incapsulamento standard visibile in Fig.1.2. Chiaramente l'incapsulamento è trasparente alla radiazione, a volte è colorato, e ha in genere una forma arrotondata che collima parzialmente l'emissione. Esistono due modi diversi per distinguere l'anodo (A, terminale *positivo*, a cui vanno connessi voltaggi positivi) e il catodo (K) nell'incapsulamento standard:

- la gambetta (o *reoforo*) dell'anodo è più lunga;
- l'incapsulamento è tondo, con una zona piatta sul lato del catodo.

Diversamente, sconsigliamo di affidarsi alla diversa forma dei due elettrodi all'interno dell'incapsulamento, dato che la corrispondenza con la polarità non è sempre quella indicata in figura. I diodi LED possono reggere qualche volt di tensione inversa senza problemi, ma non è il caso di maltrattarli mandandoli in inversione con noncuranza, quindi fate attenzione alla polarità. Tuttavia, uno dei modi più comuni per distruggere un LED consiste nel polarizzarlo nella direzione giusta, ma superando la **corrente massima**, sostanzialmente fondendolo per effetto Joule. Indicativamente, i LED standard reggono bene **10 – 20 mA** in alimentazione continua (nel senso di non impulsata), ma in ogni caso è sempre raccomandabile fare fede ai *datasheet*, dove disponibili.

Per le prime prove di laboratorio useremo uno dei LED colorati prodotti dalla ditta AUKENIEN. Purtroppo questi LED, pur essendo disponibili in commercio, non sono dotati di un vero e proprio *datasheet*, ma soltanto delle indicazioni di funzionamento stampate sulla scatola e riportate, per comodità, in Fig. 1.4. Si consiglia, come test iniziale, l'utilizzo del **LED rosso con incapsulamento dello stesso colore**.

Per eseguire la misura della caratteristica IV useremo il semplice schema in Fig.1.3, usando il generatore di forme d'onda arbitrarie di Analog Discovery 2 W1 come un alimentatore. I parametri del LED possono essere ricavati dalle letture di ingresso secondo le banali relazioni

$$V_{\text{LED}} = V_{\text{Ch2}} \quad (1.3)$$

$$I_{\text{LED}} = (V_{\text{Ch1}} - V_{\text{Ch2}}) / R_1 \quad (1.4)$$

che potete eseguire in fase di analisi dati. Facciamo notare che i canali di ingresso di Analog Discovery 2 sono in realtà *differenziali*, quindi una alternativa consiste nel scollegare Ch1 - dalla terra e collegarlo nella stessa posizione di Ch2 in Fig.1.3. In questo modo, Ch1 misurerà direttamente la caduta di tensione su  $R_1$ .

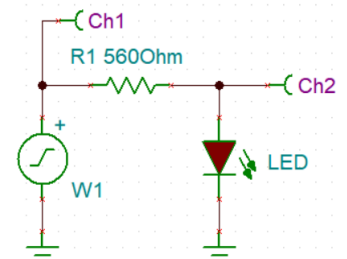


Figura 1.3: IV del LED.

<sup>3</sup>Altri codici comuni sono UV per ultravioletto, NIR per *near infrared*, MIR e FIR per *medium e far infrared*.



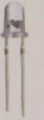
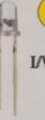
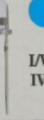


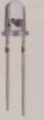
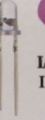
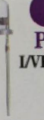



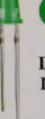
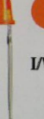
 Φ 3MM <b>WHITE</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:5000-7000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>RED</b> I/VF:20mA/1.8-2V IV:600-800mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>GREEN</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:6000-8000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>YELLOW</b> I/VF:20mA/1.9-2.1V IV:800-1500mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>BLUE</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:5000-7000mcd 30 Pcs
 Φ 3MM <b>WARM WHITE</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:5000-7000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>ORANGE</b> I/VF:20mA/1.8-2V IV:1500-3000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>CHARTREUSE</b> I/VF:20mA/1.8-2V IV:150-250mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>PINK</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:3000-5000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>PURPLE(UV)</b> I/VF:20mA/3.2-3.4V IV:200-400mcd 30 Pcs
 Φ 3MM <b>RED</b> I/VF:20mA/2-2.2V IV:600-800mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>BLUE</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:600-800mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>YELLOW</b> I/VF:20mA/1.8-2V IV:600-800mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>GREEN</b> I/VF:20mA/3-3.2V IV:2000-3000mcd 30 Pcs	 Φ 3MM <b>ORANGE</b> I/VF:20mA/1.8-2V IV:600-800mcd 30 Pcs

Figura 1.4: Dati dei diversi LED forniti dal produttore

**Task 1** Prendere nota dei parametri principali del LED, in particolare (i) la corrente di funzionamento (I), il corrispondente voltaggio di funzionamento (VF) e (ii) l'intensità luminosa, espressa in *millicandles* - mcd. Pur non avendo a disposizione la massima corrente supportata dal diodo, orientiamoci con corrente e voltaggio di funzionamento, non superando eccessivamente i valori riportati. Dato che inizialmente alimenteremo il LED con l'uscita W1, verificate anche quale corrente massima vi aspettate con la resistenza in fig. 1.3, in modo da non superare anche le specifiche della sorgente di voltaggio a vostra disposizione.

**Task 2** Realizzare il circuito in Fig.1.3 e utilizzare il già noto `sweepbias.ipynb` per misurare le *IV* del dispositivo. All'aumentare di  $V_{in}$  si annoti il valore della corrente a cui il LED inizia a brillare e si aumenti progressivamente il valore della  $V_{in}$  osservando la luminosità del LED. Tracciare la *IV* in scala semi-logaritmica e salvarla sul file `LED.pdf`.

## 1.2 Stima della costante di Planck

Sfruttando la relazione approssimativa  $E_g = E_\gamma$ , è possibile stimare la costante di Planck a partire dalle caratteristiche *IV* di una serie LED "omogenei". La stima si basa sulla relazione fra le caratteristiche *IV* di un diodo bipolare e le proprietà del semiconduttore con cui è fabbricato. Da un punto di vista elettrico un diodo a giunzione, per correnti ragionate<sup>4</sup>, può essere descritto dall'equazione di diodo ideale

$$I = I_S \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right) \quad (1.5)$$

dove  $k_B T$  è l'energia termica ed è anche possibile introdurre un voltaggio termico  $V_T = k_B T/e \approx 26 \text{ mV}$ . La corrente  $I_S$  dipende da una varietà di parametri del semiconduttore. Fra questi, la dipendenza più forte coinvolge il gap del semiconduttore. Si può in fatti dimostrare che  $I_S$  è proporzionale a  $n_i^2$ , la densità intrinseca al quadrato, che è a sua volta proporzionale a  $e^{-E_g/k_B T}$ , in quanto coinvolge l'eccitazione termica di coppie elettrone-buca attraverso il gap. In realtà  $I_S$  dipende da una varietà di altri parametri del semiconduttore ma – nell'ipotesi in cui la tecnologia e i materiali con cui sono fabbricati i LED siano simili – li considereremo secondari e trascurabili. Non avremo un grande controllo su questo aspetto, ma una comparazione fra le diverse *IV* dei LED ci darà almeno qualche conferma su questa supposta omogeneità. Date queste assunzioni e nel limite in cui  $V \gg V_T$ , possiamo concludere che

$$I \propto e^{(V-V_g)/V_T} \quad (1.6)$$

dove abbiamo introdotto  $V_g = E_g/e$ . Combinando assieme tutte le ipotesi ci aspettiamo quindi che – **fissata una certa corrente  $I_{\text{soglia}}$  e detta  $V_{\text{soglia}} = V(I_{\text{soglia}})$  la tensione a cui viene raggiunta** – la quantità

$$V_{\text{soglia}} - V_g = V(I_{\text{soglia}}) - \frac{E_g}{e} = V(I_{\text{soglia}}) - \frac{hc}{e\lambda} \quad (1.7)$$

**sia una costante per i vari LED.** Per questo studio vi sarà fornita una serie di LED omogenei con diverse lunghezze d'onda di emissione e quindi con diversi colori: uno rosso, uno arancione, uno giallo, uno verde, uno blu e uno viola. Tutti LED eccetto quello viola hanno un incapsulamento colorato che permette di identificarli in maniera immediata.

<sup>4</sup>Questo non è vero per correnti molto alte, quando si fanno sentire gli effetti di *alta iniezione* e quelli resistivi. Non è nemmeno vero a correnti troppo basse, quando le correnti connesse con la ricombinazione nella zona svuotata possono diventare rilevanti.

**Task 3** Scaricare dallo share gli spettri dei vari LED che vi sono stati forniti. Determinare per ogni LED la lunghezza d'onda media, trattando lo spettro dell'intensità di emissione come una distribuzione; l'incertezza sulla lunghezza d'onda sarà la deviazione standard della distribuzione stessa. Notate che gli spettri hanno un fondo di segnale diverso da zero, che dovrete opportunamente eliminare.

**Task 4** Acquisire le  $IV$  dei vari LED con `sweepbias.ipynb` ed estrarre i voltaggi a cui viene raggiunta una data corrente di soglia  $I_{soglia}$ . Consigliamo di scegliere il valore di  $I_{soglia}$  nell'intervallo che va da pochi  $\mu A$  e poche centinaia di  $\mu A$ . Per ogni  $I_{soglia}$  scelta generare un grafico di  $V(I_{soglia})$  in funzione di  $1/\lambda$ . Siete liberi di usare il metodo che preferite per estrarre  $V(I_{soglia})$ , per esempio: (i) cercare il punto più vicino alla soglia scelta; (ii) fare un fit lineare nell'intorno della soglia.

**Task 5** Fare un fit lineare dei punti estratti. Dati per noti i valori di  $e$  e  $c$ , la pendenza della curva fornisce una stima della costante di Planck  $h$ . Date le approssimazioni fatte, non stupitevi di trovare deviazioni dell'ordine del 10%, ma stupitevi di deviazioni molto superiori. Individuate eventuali outliers, anche sulla base della forma delle  $IV$  e di eventuali anomalie riscontrate nelle misure. Salvare il risultato finale di questo studio su un grafico `Planck.pdf`.

Per il calcolo di  $h$  sono necessari i valori delle altre costanti fondamentali: per queste fare riferimento ai valori forniti da CODATA <sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Una eccellente fonte dei parametri fisici e delle costanti fondamentali è il *Committee on Data for Science and Technology (CODATA)*, che pubblica i valori aggiornati delle costanti fisiche: si veda il lavoro **E. Tiesinga, P. J. Mohr, D. B. Newell, and B. N. Taylor, Rev. Mod. Phys. 93, 025010 (2021)**. Si abbia cura di valutare l'incertezza sui valori tabulati.

## 2 Fotodiodo

La struttura di un fotodiodo a giunzione  $pn$  è schematicamente rappresentata in Fig.2.1 e consiste in una giunzione dove una delle due parti (in figura la regione  $p$ ) è molto più sottile ed esposta alla luce. La luce può così raggiungere la zona di svuotamento e, se ha un'energia sufficiente, generare una coppia elettrone-buca. Dato il forte campo elettrico *built-in* presente nella giunzione, le cariche vengono separate e spinte verso la zona  $p$  ed  $n$  generando una corrente di segno opposto a quella tipica del diodo  $pn$  in polarizzazione diretta. Dato questo meccanismo di base, si possono idealmente distinguere due modalità di operazione per un dispositivo di questo tipo:

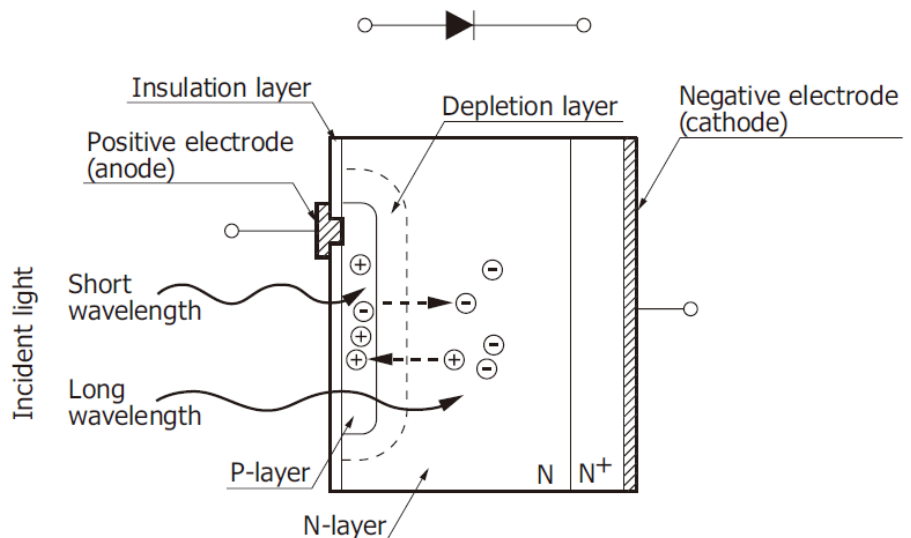


Figura 2.1: Fotodiodo a giunzione  $pn$ .

- **Regime fotovoltaico.** Se il dispositivo è collegato a un carico ad alta impedenza (eventualmente anche infinita), le cariche generate si accumuleranno fino a bilanciare l'effetto dando luogo ad una differenza di potenziale ai capi del fotodiodo.
- **Regime fotoconduttivo.** Nel limite opposto, se invece anodo e catodo vengono collegati esternamente ad un carico a bassa impedenza, le cariche generate daranno luogo ad una *fotocorrente*.

Una pittura più generale si ottiene realizzando che sostanzialmente la caratteristica  $IV$  del fotodiodo non è altro che quella di un diodo, traslata dalla presenza di una fotocorrente (Fig.2.2)

$$I = I_S (e^{V/V_T} - 1) - I_L, \quad (2.1)$$

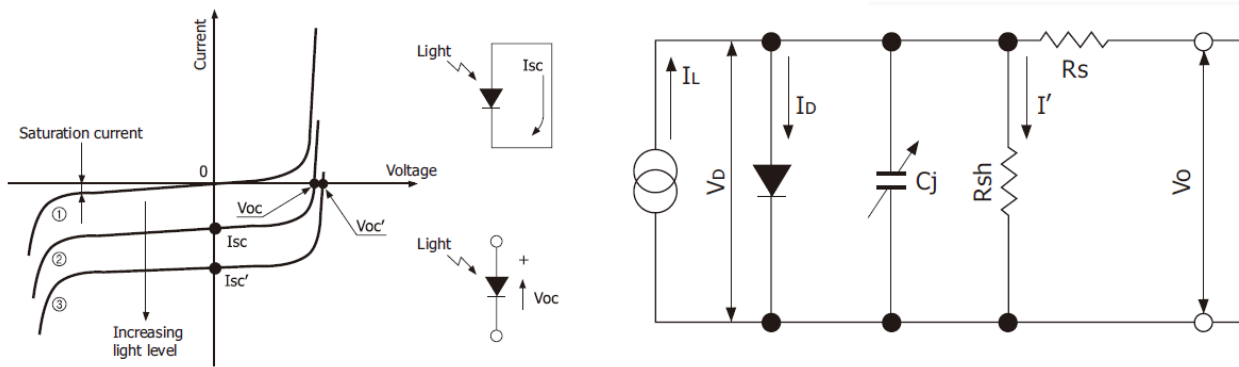


Figura 2.2: Caratteristica  $IV$  di un fotodiodo e possibile modello semplificato.

dove  $I_L$  è la corrente generata dalla radiazione, rappresentata nello schema come un generatore di corrente in parallelo alla giunzione  $pn$ , **che ovviamente dipende dall'illuminazione**. Se ci immaginiamo di inviare sul fotodiodo una radiazione monocromatica di potenza  $W$  e frequenza  $\nu$ , avremo

$$I_L = \eta(\nu) \frac{W}{h\nu} e, \quad (2.2)$$

dove  $W/h\nu$  è il *rate* di fotoni generati ed  $\eta(\nu)$  è detta **efficienza quantica** e misura quanti fotoelettroni in  $I_L$  vengono generati da ogni fotone incidente. Nella formula, il fattore  $R = \eta e/h\nu$  viene anche detto **responsività** (o a volte sensibilità, termine leggermente più improprio) del dispositivo, ed è misurata in Ampere per Watt. Infine, **la dipendenza di  $\eta(\nu)$  dalla frequenza in quella che si chiama risposta spettrale del fotodiodo**, che in generale è tutt'altro che piatta.

Chiaramente, i regimi puramente fotoconduttivo e puramente fotovoltaico sono semplicemente dei limiti ottenuti cortocircuitando il detector (dando luogo ad **una corrente di short circuit  $I_{SC}$** ) o lasciandolo aperto (dando luogo da un **vtaggio di open-circuit  $V_{OC}$** ). Più in generale, è possibile collegare il fotodiodo ad un circuito che possa anche applicare un bias e il punto di lavoro sarà determinato da una opportuna retta di carico. Per comprendere appieno il comportamento del dispositivo, come indicato nello schema in Fig.2.2, è utile ricordare che un fotodiodo reale include delle resistenze di shunt e di serie e, come tutte le giunzioni, degli effetti capacitivi. Oltre a quelle già discusse, fra le caratteristiche generali di un rivelatore vanno infine ricordate:

- La **corrente di buio**, ossia la corrente generata dal dispositivo anche in assenza di luce; ovviamente in questo caso ci si immagina che il **fotodiodo sia polarizzato**;
- Il **rumore del dispositivo**, che nel caso dei fotorivelatori si misura in termini di **noise equivalent power (NEP)**, ossia si quantifica quale potenza in ingresso darebbe una rivelazione con rapporto segnale-rumore pari a 1.
- varie figure di merito per la risposta in frequenza del fotodiodo, di cui ci occuperemo in seguito.

## 2.1 Fotodiodo OSD15

In questa esercitazione useremo un fotodiodo al Silicio (discretamente costoso, quindi evitiamo di distruggerlo!), prodotto sia dalla Centronic sia dalla OSI Optoelectronics, il modello OSD15-5T. Per le prime prove usiamo semplicemente il fotodiodo ed un tester.

**Task 6** Fare alcuni test preliminari con OSD15 collegandolo al *tester* sia in modalità di voltmetro (data la resistenza interna elevata saremo circa in regime puramente fotovoltaico) che di amperometro (regime opposto). Verificare i valori di  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  in varie condizioni di illuminazione nella stanza, usando le sorgenti a vostra disposizione (luci della stanza, lampada, cellulare, eventuali altre sorgenti). Valutate la linearità della risposta nei due casi. *SHARING IS CARING! - Data la disponibilità limitata di multimetri in laboratorio, cercate di non monopolizzarne l'uso, ma siate collaborativi con i compagni di corso.*



## 2.2 Amplificatore a transimpedenza

Abbiamo visto che le correnti tipiche, per intensità luminose dell'ordine di quelle che si riscontrano in una stanza normalmente illuminata, sono dell'ordine di qualche microampere. Lo strumento più adatto a misurare correnti di questo ordine e di valore inferiore è l'amplificatore a transimpedenza, che è illustrato in Fig.2.3. In questo caso il feedback resistivo  $R_2$  amplifica la corrente che arriva dal fotodiodo e porta  $V_-$  verso terra. In questo caso si dice che il circuito realizza una "terra virtuale" e, detta  $I_{PD}$  la corrente generata nel fotodiodo, l'output del circuito sarà  $V_{out} = -R_2 I_{PD}$ . Per questo montaggio consigliamo di utilizzare MCP601/MCP602, ma siete liberi di provare altre soluzioni. **E' importante ricordare che MCP60x è alimentato a  $\pm 3V$  e applicare un'alimentazione di  $\pm 5V$  potrebbe bruciare il dispositivo.** Si noti infine che al classico amplificatore a transimpedenza di Fig. 2.3 può essere aggiunto un condensatore in parallelo a  $R_2$  in modo da garantire una maggior stabilità al segnale.

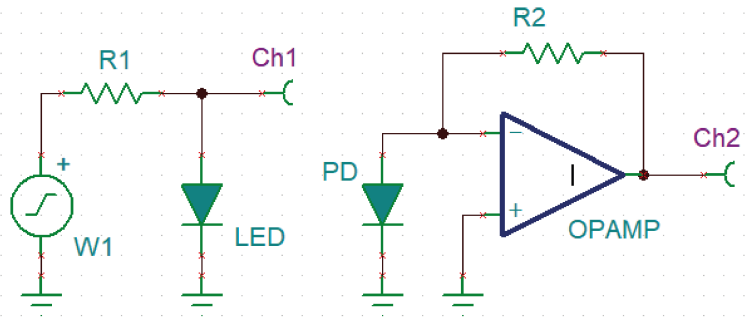


Figura 2.3: Fotodiodo con amplificatore.

**Task 7** Si realizzi sulla breadboard il circuito di Fig.2.3 usando  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$  (ma provatene anche altre se volete amplificare di più). In caso di instabilità, si consiglia l'aggiunta di un condensatore in parallelo a  $R_2$  con  $C_1 = 1\text{ nF}$  (o la capacità più vicina che avete a disposizione). Non è per ora necessario montare la parte di emissione del LED. Utilizzando `demoScope.ipynb` visualizzare il segnale del fotodiodo su una scala temporale di circa 100 ms e studiare il segnale misurato dalle varie sorgenti a vostra disposizione (lampade varie, LED, cellulare, eccetera). Cercate di valutare anche quanto potrebbe disturbare delle future misure.

## 2.3 Linearità della risposta in regime fotoconduttivo

Lo studio che segue si basa sull'aspettativa che un LED emetta radiazione con intensità, con buona approssimazione, proporzionale alla corrente che circola. In effetti, la corrente quantifica il numero di cariche che attraversano il LED nell'unità di tempo. Assumendo che queste, con una certa probabilità (indipendente dalla corrente per alimentazioni tipiche di un LED), si ricombinino dando luogo all'emissione di un fotone per ogni ricombinazione, il numero di fotoni generati e la intensità luminosa risulteranno proporzionali alla corrente.

Nel seguente montaggio dovrete allineare il LED al fotodiodo in maniera da raccogliere la maggior parte possibile della luce emessa. Per farlo, potete portate il LED a contatto con il fotodiodo<sup>5</sup>.

**Task 8** Completare il circuito in Fig.2.3 connettendo il segnale in ingresso ad W1 e usare `sweepbias.ipynb` per ricavare la funzione di risposta che lega la corrente misurata sul fotorivelatore  $I_{PD}$  a quella che alimenta il LED  $I_{LED}$ . Verificare la linearità e l'intensità di emissione, verificando se i parametri riportati nel datasheet individuano una buona regione di lavoro. Costruite un grafico della potenza luminosa emessa in funzione di  $I_{LED}$  e verificare la consistenza con quanto dichiarato nel datasheet.

Potrebbe risultare interessante estendere lo studio del Task 8 a diversi diodi in modo da confrontarne il funzionamento alla luce della prossima esperienza.

<sup>5</sup>Siate pure creativi per il montaggio.