

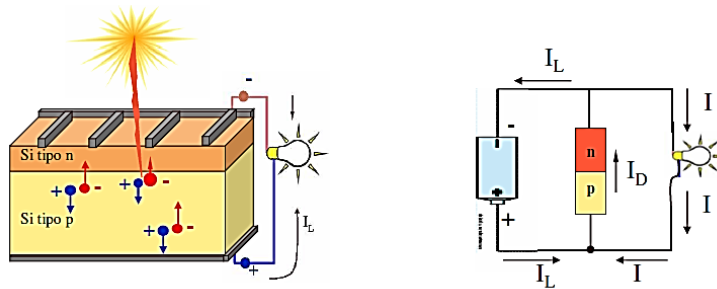
# LA CELLA FOTOVOLTAICA

## Scopo dell'esperimento

Determinare la curva caratteristica tensione-corrente di un pannello fotovoltaico.

## Richiamo teorico

Una cella solare o cella fotovoltaica è un dispositivo elettronico a semiconduttore che converte l'energia della luce solare incidente in elettricità tramite l'effetto fotovoltaico. Essa rappresenta l'elemento costitutivo dei moduli fotovoltaici, anche noti come pannelli solari. La cella fotovoltaica è costituita da una giunzione p-n, cioè un diodo polarizzato direttamente da una tensione dovuta ai fotoni incidenti su di essa che generano coppie elettrone-lacuna, producendo energia elettrica<sup>1</sup>.



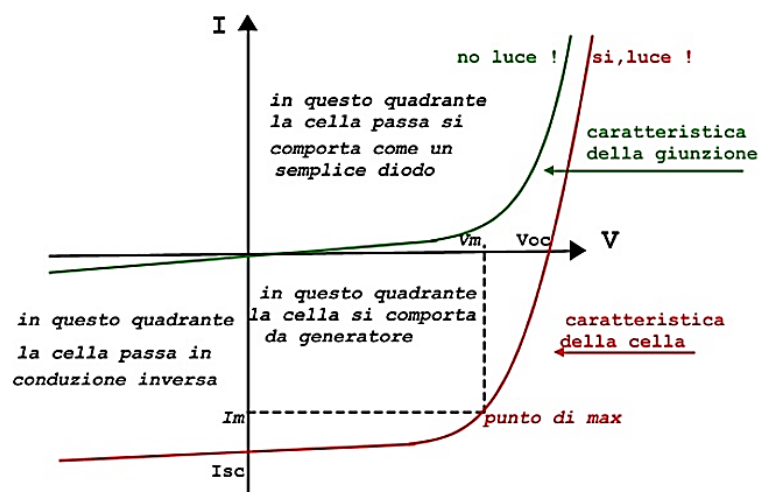
Applicando la legge di Kirchhoff dei nodi:  $I = I_D - I_L$

La corrente totale  $I$  che circola ad una data tensione  $V$  è la differenza tra la corrente del diodo ( $I_D$ ) espressa dalla legge di Shockley per la giunzione p-n e la corrente fotogenerata ( $I_L$ ):

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{\eta k_B T}} - 1 \right) - I_L$$

$I_s$  è la corrente di saturazione inversa (cioè la corrente massima del diodo quando è polarizzato con una tensione inversa),  $q$  è la carica dell'elettrone,  $k_B$  è la costante di Boltzmann,  $T$  è la temperatura in Kelvin,  $\eta$  è un fattore di idealità della giunzione che dipende dal materiale ( $\eta \approx 2$  per il Silicio).

La corrente fotogenerata, che circola dal lato p al lato n nel circuito esterno e da n a p all'interno (corrente inversa) si sottrae alla corrente del diodo, dando origine alla curva caratteristica rossa nella figura sotto.

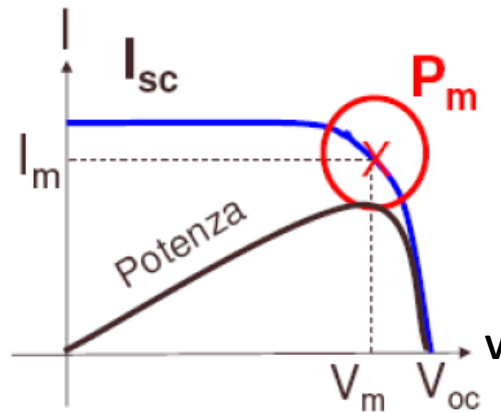


$I_m$  e  $V_m$  sono rispettivamente la corrente e la tensione alla massima potenza;  $I_{sc}$  è la corrente di corto circuito (cella chiusa su un carico di resistenza nulla) e  $V_{oc}$  è la tensione a circuito aperto.

<sup>1</sup> Nell'appendice finale è analizzato più in dettaglio il funzionamento microscopico di un diodo a giunzione p-n e di una cella fotovoltaica.

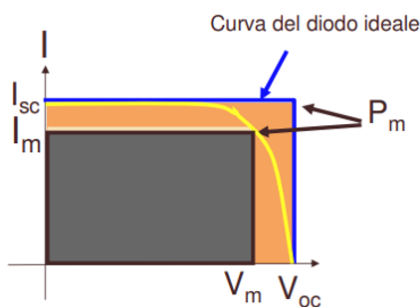
## CURVA CARATTERISTICA I-V DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA

In genere si usa ribaltare la curva caratteristica rispetto all'asse delle tensioni in modo da avere una corrente positiva, mostrata nel grafico sotto.



## PARAMETRI CARATTERISTICI DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA

- $I_{sc}$  è la **corrente di corto circuito** quando la tensione  $V = 0$  (la cella solare è cortocircuitata su una resistenza nulla) ed è la corrente massima che la cella può generare.  
La corrente  $I_{sc}$  è proporzionale all'intensità della luce incidente (che dipende dalla potenza della sorgente, dalla sua distanza e dall'angolo di incidenza), dipende dall'area della cella, dalla lunghezza d'onda della luce incidente, dalla temperatura e dalle caratteristiche ottiche della cella solare.
- $V_{oc}$  è la **tensione a circuito aperto** quando la corrente è nulla (la cella solare è chiusa su una resistenza infinita) ed è la tensione massima che la cella può produrre.  
La tensione  $V_{oc}$  aumenta in modo poco significativo (andamento logaritmico) con l'intensità della luce incidente e diminuisce all'aumentare della temperatura.
- $P_m = I_m \cdot V_m$  è la potenza massima prodotta dalla cella, ovvero il valore massimo della **potenza elettrica**  $P = I \cdot V$ , (cioè il rettangolo di area massima compreso sotto la curva caratteristica) che rappresenta il punto di funzionamento ideale per la cella. La potenza aumenta con la tensione, raggiunge un valore massimo ( $P_m$ ) e poi decresce nuovamente.



- Nella zona vicina alla corrente di corto circuito (tratto AB) la corrente è quasi costante, ovvero la cella si comporta da generatore di corrente.

- Nella zona vicina alla condizione di circuito aperto (tratto CD) la tensione è quasi costante, ovvero la cella si comporta da generatore di tensione

- Nella zona BC, detta "ginocchio" della curva, si trova il punto di potenza massima ( $P_{max}$ ), che corrisponde alla condizione in cui la cella eroga la massima potenza.

- Se la cella fosse un generatore ideale, la sua curva I-V sarebbe un gradino, con una corrente costante fino alla massima tensione di utilizzo. Nella realtà questo non avviene e la curva è "smussata". Come parametro della qualità della cella si definisce il **fattore di riempimento (FF → Fill Factor)**:

$$FF = P_{max} / (I_{sc} \cdot V_{oc})$$

Più elevato è il **fattore di riempimento** ( $FF_{max} = 1$ ) maggiore è la potenza prodotta dalla cella solare.

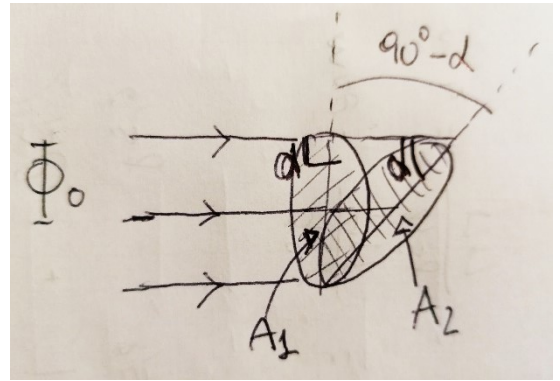
- È importante anche l'angolo di inclinazione ( $\alpha$ ) della cella rispetto al flusso luminoso incidente ( $\Phi_0$ ); l'illuminamento su una superficie è massimo quando la direzione della luce è perpendicolare alla superficie stessa. In tutti gli altri casi l'intensità si riduce poiché l'area della superficie su cui la luce si distribuisce è maggiore:

$A_2 = A_1 / \sin(\alpha) \rightarrow$  l'area  $A_2$  è maggiore di  $A_1$

$I_1 = \Phi_0 / A_1 \rightarrow I_1$  è l'intensità luminosa sulla superficie  $A_1$  disposta perpendicolarmente alla luce

$I_2 = \Phi_0 / A_2 \rightarrow I_2$  è l'intensità luminosa sulla superficie  $A_2$  inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto alla luce

$I_2 = \Phi_0 / [A_1 / \sin(\alpha)] \rightarrow I_2 = I_1 \sin(\alpha)$

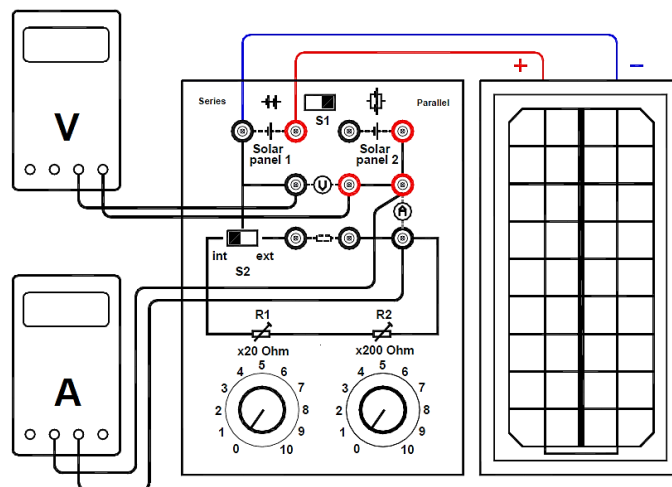


### Materiali e strumenti

- Pannello fotovoltaico
- Lampada alogena da 150 W con regolatore di potenza
- Supporto per variare la distanza e l'angolo ( $\alpha$ ) di inclinazione del pannello rispetto alla lampada
- Voltmetro e amperometro
- Luxmetro
- Scheda per collegare la cella fotovoltaica con un carico di resistenza R variabile

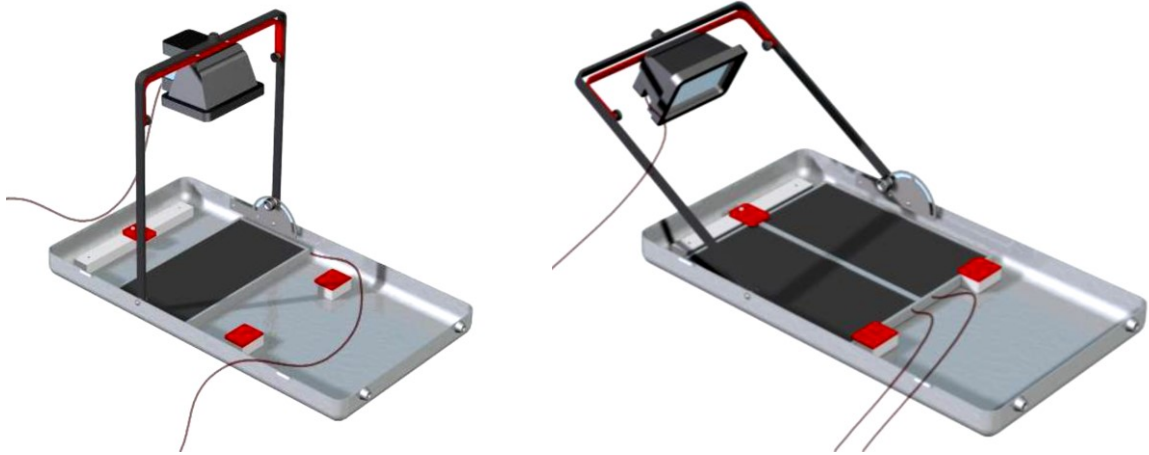
### Procedimento sperimentale ed analisi dati

#### 1. Determinazione della curva caratteristica tensione corrente

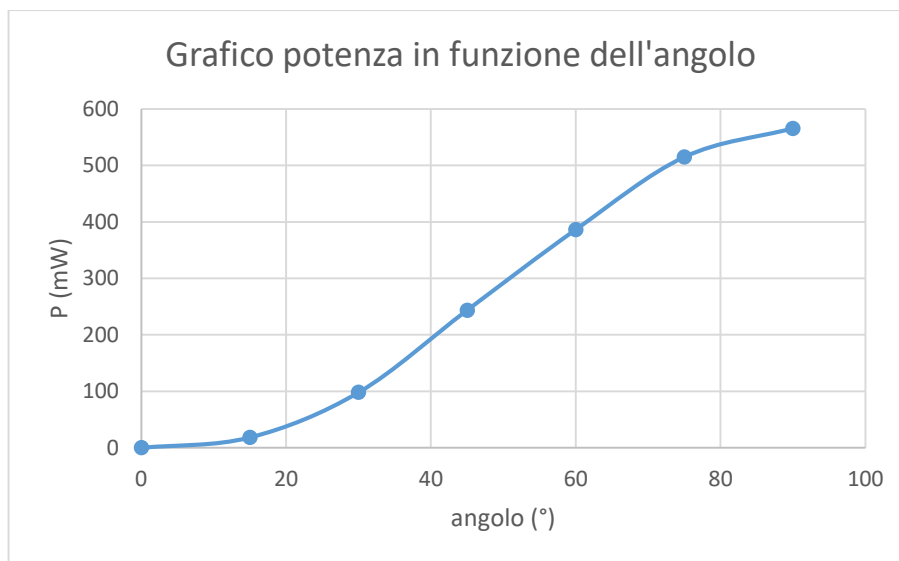


- Orientare il pannello perpendicolarmente rispetto alla lampada ( $\alpha = 90^\circ$ ) e allinearli centralmente.
- Collegare il faretto alogeno al regolatore di potenza e quest'ultimo alla rete elettrica.
- Collegare alla scheda di connessione il modulo solare, il voltmetro e l'amperometro.
- Accendere la lampada alla luminosità massima e regolare l'interruttore S1 su "parallelo" e l'interruttore S2 su "est".
- Ponticellare con il connettore il carico esterno ( $R = 0 \rightarrow$  corto circuito) e misurare la tensione e la corrente; poi togliere il connettore dal carico esterno ( $R = \infty \rightarrow$  circuito aperto) e misurare la tensione e la corrente.
- Porre l'interruttore S2 su "int", misurare la tensione e la corrente generate per i diversi valori del carico interno (R): 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 200, 300, 400  $\Omega$ .
- Raccogliere i dati una tabella e costruire la curva caratteristica tensione-corrente
- Fare il grafico della potenza elettrica in funzione della tensione e determinare il valore del carico ottimale ( $R_0$ ) corrispondente alla potenza massima ( $P_{max}$ ).

## 2. Influenza dell'angolo di illuminazione sulla potenza



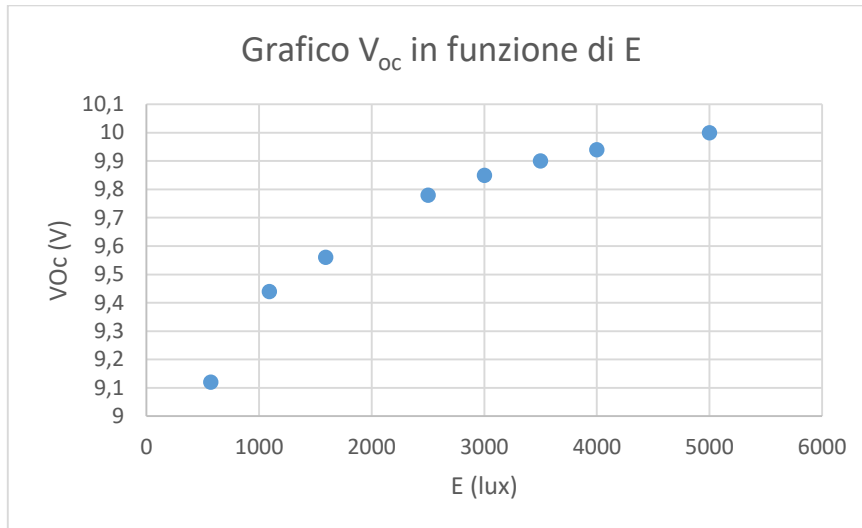
- Orientare il pannello perpendicolarmente rispetto alla lampada ( $\alpha = 90^\circ$ ) e allinearli centralmente.
- Collegare il faretto alogeno al regolatore di potenza e quest'ultimo alla rete elettrica.
- Collegare alla scheda di connessione il modulo solare, il voltmetro e l'amperometro.
- Regolare l'interruttore S1 su "parallelo" e l'interruttore S2 su "int"
- Accendere la lampada alla luminosità massima, misurare la tensione e la corrente generate per il valore del carico ottimale ( $R_0$ ), ottenuto precedentemente.
- Ripetere la misura inclinando il pannello verso angoli più piccoli:  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $15^\circ$  (il selettore consente passi di  $15^\circ$ ).
- Raccogliere i dati una tabella e costruire la curva della potenza elettrica in funzione dell'angolo.



## 3. Influenza dell'intensità di illuminazione sulla tensione a vuoto

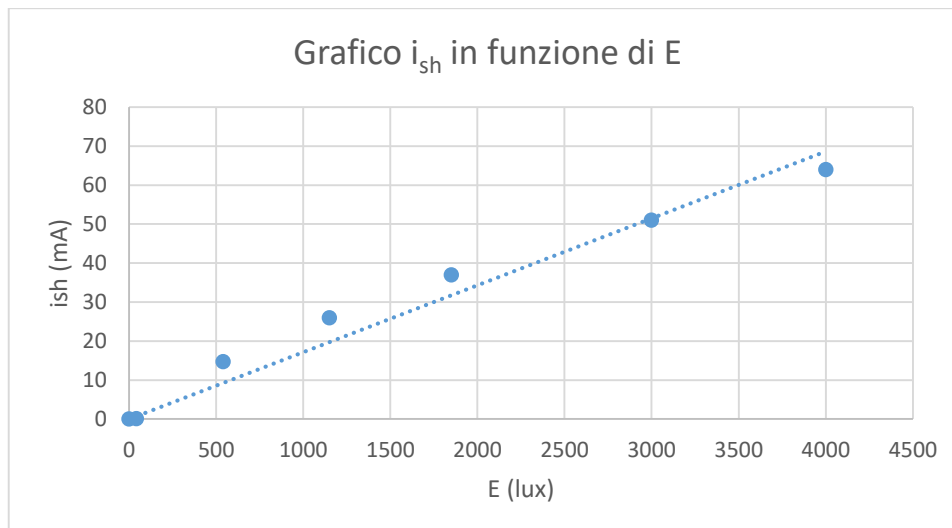
- Orientare il pannello perpendicolarmente rispetto alla lampada ( $\alpha = 90^\circ$ ) e allinearli centralmente.
- Collegare il faretto alogeno al regolatore di potenza e quest'ultimo alla rete elettrica.
- Collegare alla scheda di connessione il modulo solare e il voltmetro.
- Regolare l'interruttore S1 su "parallelo" e l'interruttore S2 su "est" ( $R = \infty \rightarrow$  circuito aperto)
- Accendere la lampada, regolando al minimo la luminosità del faretto, misurare con il luxmetro l'intensità di illuminazione ( $E$  in lux) sulla superficie del pannello e il corrispondente valore della tensione a circuito aperto ( $V_{oc}$ ).
- Aumentare progressivamente la luminosità del faretto fino al massimo, misurando ogni volta l'intensità luminosa  $E$  e la tensione  $V_{oc}$  (prendere 6-7 valori)

- Raccogliere i dati in una tabella e costruire il grafico di  $V_{oc}$  in funzione di  $E$  (vedi figura seguente come esempio).



#### 4. Influenza dell'intensità di illuminazione sulla corrente di cortocircuito

- Orientare il pannello perpendicolarmente rispetto alla lampada ( $\alpha = 90^\circ$ ) e allinearli centralmente.
- Collegare il faretto alogeno al regolatore di potenza e quest'ultimo alla rete elettrica.
- Collegare alla scheda di connessione il modulo solare e l'amperometro.
- Regolare l'interruttore S1 su "parallelo", l'interruttore S2 su "est" e ponticellare con il connettore i poli "est" ( $R = 0 \rightarrow$  corto circuito).
- Accendere la lampada, regolando al minimo la luminosità del faretto, misurare con il luxmetro l'intensità di illuminazione ( $E$  in lux) sulla superficie del pannello e il corrispondente valore della corrente di corto circuito ( $i_{sc}$ ).
- Aumentare progressivamente la luminosità del faretto fino al massimo, misurando ogni volta l'intensità luminosa  $E$  e la corrente di corto circuito ( $i_{sc}$ ) (prendere 6-7 valori).
- Raccogliere i dati in una tabella e costruire il grafico di  $i_{sc}$  in funzione di  $E$  (vedi figura seguente come esempio).



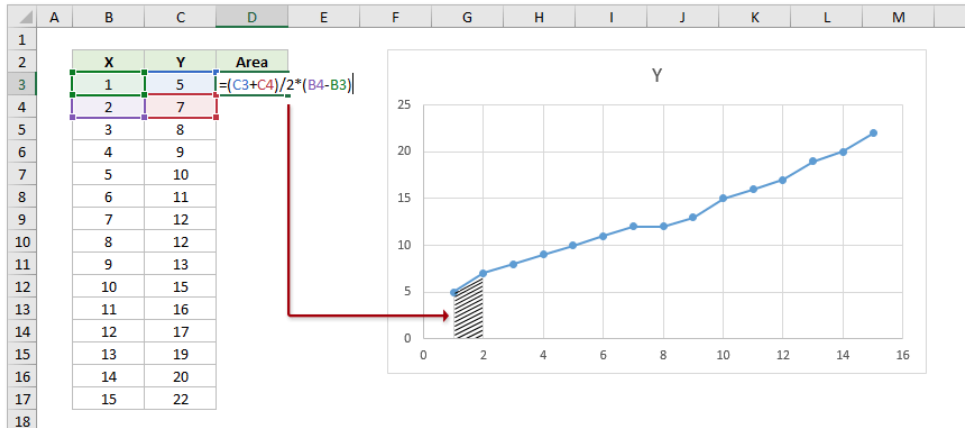
### Conclusioni

1. Determinare i parametri caratteristici del pannello fotovoltaico: la corrente di cortocircuito ( $i_{sc}$ ), la tensione a circuito aperto ( $V_{oc}$ ), la potenza massima ( $P_{max}$ ) e il fattore di riempimento (FF).
2. Verificare che la potenza elettrica aumenta in funzione dell'angolo di illuminazione con un andamento sinusoidale, calcolare la potenza media (come media integrale con la regola dei trapezi) e confrontarla col valore massimo. Durante il giorno l'inclinazione dei raggi solari varia, quindi il valore medio è

importante per dimensionare correttamente il pannello in base al fabbisogno medio giornaliero di potenza elettrica.

Nell'immagine seguente è mostrato il calcolo dell'area sotto un grafico Excel con la regola dei trapezi.

1. Il primo trapezio è compreso tra  $x = 1$  e  $x = 2$  sotto la curva come mostrato nell'immagine sottostante. Puoi calcolare facilmente la sua area con questa formula:  $=(C3+C4)/2*(B4-B3)$ .



2. Quindi puoi trascinare verso il basso la maniglia di riempimento automatico della cella della formula per calcolare le aree di altri trapezi.

Note: L'ultimo trapezio è compreso tra  $x = 14$  e  $x = 15$  sotto la curva. Pertanto, trascina la maniglia di Compilazione automatica sulla penultima cella come mostrato nell'immagine

Il valore medio integrale della potenza si ottiene dal rapporto tra l'integrale definito nell'intervallo tra 0 e 90° (cioè l'area totale sotto il grafico) e il valore dell'intervallo di integrazione (cioè 90-0).

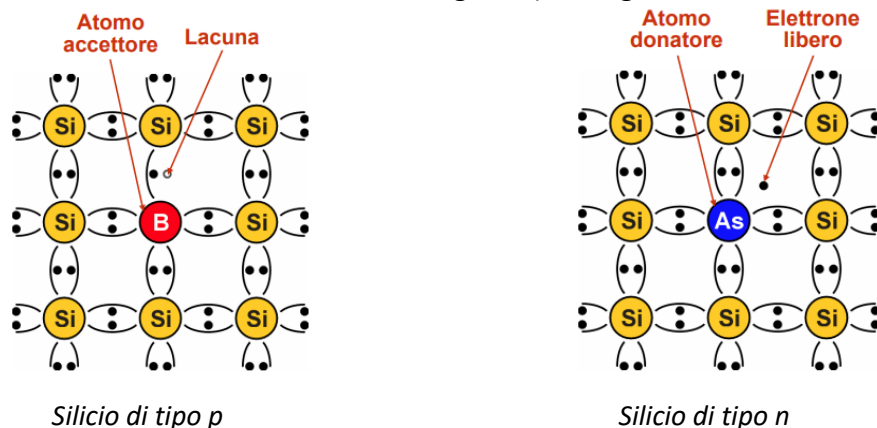
In generale data una funzione  $f(x)$  il suo valore medio integrale in un intervallo  $(a,b)$  è definito dalla seguente relazione:

$$\bar{f} = \frac{1}{(b-a)} \int_a^b f(x) dx$$

3. Discutere l'aumento poco significativo della tensione a circuito aperto con l'intensità di illuminazione e verificare l'andamento logaritmico della curva, facendo il grafico di  $V_{oc}$  in funzione di  $\log(E)$ .
4. Verificare la proporzionalità della corrente di corto circuito con l'intensità di illuminazione.

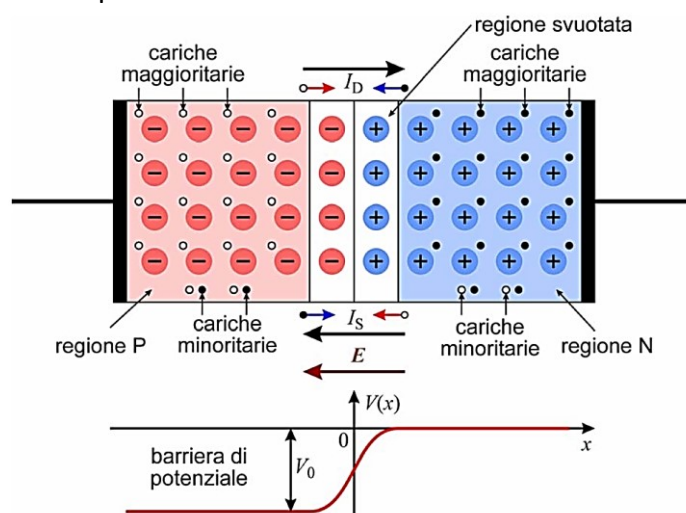
## APPENDICE: LA GIUNZIONE P-N

La giunzione p-n è l'interfaccia che separa due parti di un semiconduttore sottoposte a drogaggio di tipo differente. Nella **zona p** del cristallo di silicio (tetravalente) vengono inseriti degli atomi accettori trivalenti (ad esempio il boro): si formano tre legami covalenti, un legame rimane incompleto, quindi si forma una lacuna che può essere occupata da un elettrone di un atomo vicino, in questo modo viene prodotta una nuova lacuna. Gli spostamenti degli elettroni producono un movimento della lacuna in verso opposto, quindi la lacuna si comporta come una particella di carica positiva uguale ed opposta a quella dell'elettrone. **Nella zona p si ha quindi un incremento della concentrazione di lacune** e gli atomi accettori acquistando un elettrone diventano ioni negativi (vedi figura sotto a sinistra).



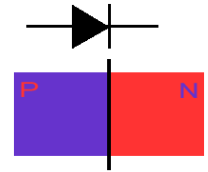
Nella **zona n** del cristallo di silicio (tetravalente) vengono inseriti degli atomi donatori pentavalenti (ad esempio il fosforo): si formano 4 legami covalenti e il quinto elettrone rimane libero. **Nella zona n si ha quindi un incremento della concentrazione di elettroni** e gli atomi donatori cedendo un elettrone diventano ioni positivi (vedi figura sopra a destra)

La diversa concentrazione dei portatori di carica genera una corrente di diffusione ( $i_D$ ) costituita da lacune che diffondono dalla regione p a quella n ed elettroni che diffondono dalla regione n a quella p. Questa corrente determina una *regione svuotata* in prossimità della giunzione in cui le lacune si ricombinano con gli elettroni della regione n e gli elettroni si ricombinano con le lacune della regione p, lasciando non compensati gli atomi ionizzati dei droganti (per questo motivo si parla anche di *regione di carica spaziale*), i quali a loro volta genereranno una differenza di potenziale (dell'ordine di 0.6 - 0.9 V per il silicio) e un campo elettrico che si oppone a quella di diffusione.



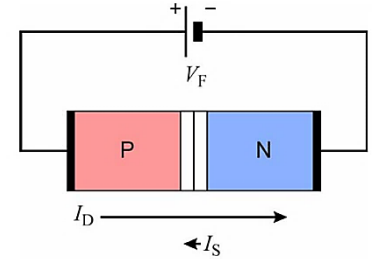
Nelle regioni p e n sono presenti anche cariche minoritarie prodotte per effetto dell'agitazione termica: elettroni nella regione e lacune nella regione n. Il verso del campo elettrico è tale da spingere le cariche minoritarie ad attraversare la giunzione dando origine ad una corrente di deriva ( $I_S$ ) diretta in verso opposto alla corrente di diffusione. In condizioni di equilibrio le correnti  $I_D$  e  $I_S$  si bilanciano e quindi la corrente totale attraverso la giunzione è nulla.

La giunzione p-n può essere utilizzata come un diodo che permette alle cariche elettriche di scorrere in verso, ma non in quello opposto. Quando la giunzione p-n è polarizzata direttamente, la differenza di potenziale sulla giunzione diminuisce e questo fa sì che possa scorrere una corrente apprezzabile verso il catodo (zona n). Quando la giunzione p-n è polarizzata inversamente, invece, la barriera di potenziale alla giunzione (e quindi anche la resistenza) aumenta e la corrente inversa che può scorrere verso l'anodo (zona p) è bassissima.



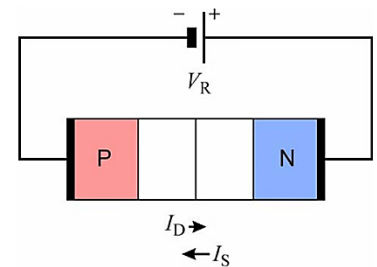
**Polarizzazione diretta**

Quando la giunzione p-n è polarizzata direttamente, la zona p (anodo) è collegata col polo positivo di un generatore di tensione, quindi gli elettroni e le lacune si spostano verso la regione di carica spaziale ricombinandosi, riducendo l'estensione della regione svuotata e facendo diminuire la barriera di potenziale sulla giunzione: questo aumenta molto la corrente di diffusione ( $i_D$ ) e produce una corrente complessiva elevata da p verso n dentro il diodo.



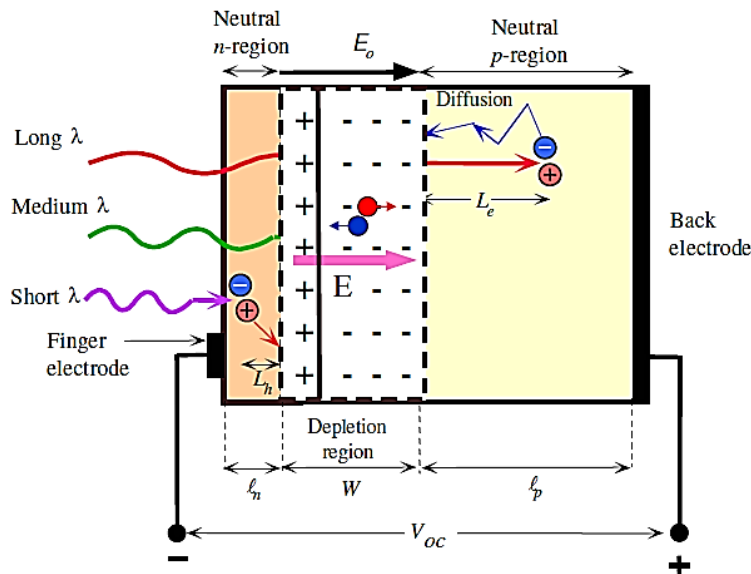
**Polarizzazione inversa**

Quando la giunzione p-n è polarizzata inversamente la zona p (anodo) è collegata col polo negativo di un generatore di tensione, quindi gli elettroni e le lacune si allontanano dalla regione di carica spaziale allargando la regione svuotata e facendo aumentare la barriera di potenziale sulla giunzione: questo riduce molto la corrente di diffusione ( $i_D$ ), quindi circola solo una piccola inversa corrente da n verso p dentro il diodo.



**Cella solare**

Una cella solare o fotovoltaica è formata da una lamina di silicio di tipo p con sopra un sottile strato di silicio di tipo n, che deve avere uno spessore tale da permettere alle radiazioni incidenti sulla cella di penetrare nel cristallo per una profondità sufficiente a creare coppie di lacune-elettroni in prossimità della giunzione p-n. I fotoni di luce dotati di energia sufficientemente alta ( $E = hf \rightarrow$  grande energia  $E \rightarrow$  grande frequenza  $f \rightarrow$  piccola lunghezza d'onda  $\lambda$ )<sup>2</sup> penetrando nella giunzione, possono creare delle coppie elettrone-lacuna (liberano un elettrone dal legame covalente generando quindi anche una lacuna). Il campo elettrico della giunzione tende a separare le coppie generando un flusso netto di elettroni dal cristallo di tipo p verso quello di tipo n e un flusso di lacune nel verso opposto. Vengono fotogenerate una corrente ( $I_L$ ) che circola dalla regione n alla regione p all'interno (corrente inversa rispetto a quella di diffusione) e una differenza di potenziale (indicata con  $V_{oc}$  nella figura sotto), quindi viene prodotta energia elettrica.



<sup>2</sup> E è l'energia del fotone, f è la sua frequenza, h è la costante di Planck =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s