

Esperimenti con i semiconduttori:

caratteristica corrente-tensione di una batteria solare in funzione dell'irraggiamento

Fondamenti teorici

Una cella solare è un fotodiiodo con struttura appositamente disegnata per ottimizzare il processo di trasformazione di energia luminosa (tipicamente solare) in energia elettrica. Questa conversione ha luogo alla giunzione pn del diodo. Il fotodiiodo ha una grande superficie realizzata in modo tale che la luce può penetrare nella regione della giunzione attraverso un sottile strato di materiale conduttivo drogato n o p (ved. Fig. 1) e creare così coppie elettrone-lacuna.

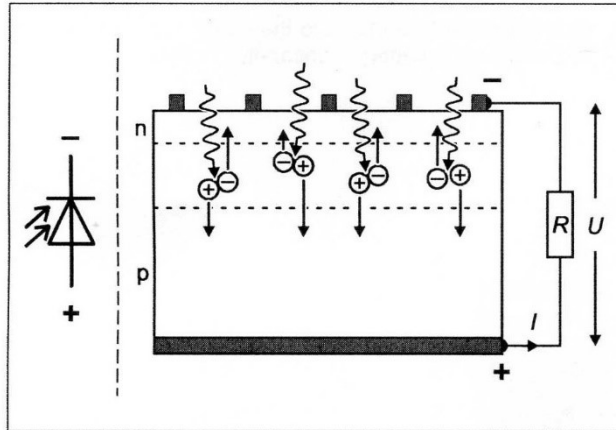
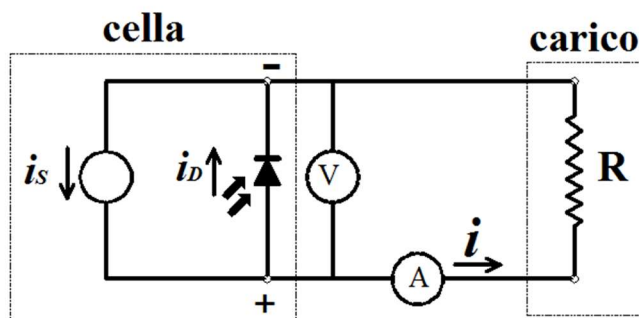


figura 1

Le cariche di queste coppie vengono separate dal campo di giunzione e migrano in direzioni opposte producendo una corrente opposta alla corrente "diretta" del diodo: gli elettroni migrano verso la regione drogata n e le lacune verso la regione drogata p (ved. ancora Fig.1).

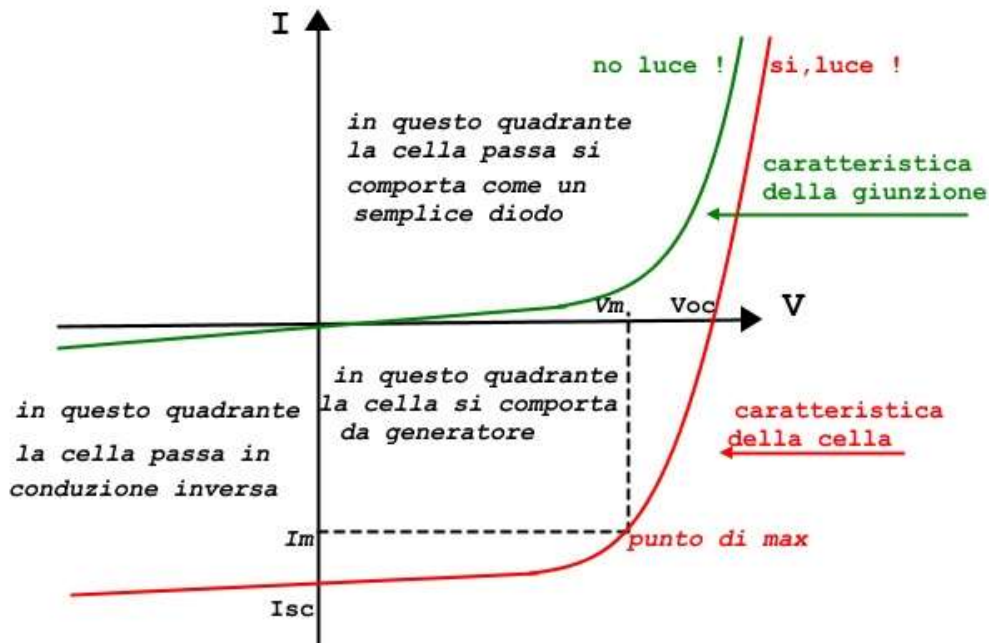
Se i contatti metallici esterni del diodo sono cortocircuitati (cioè collegati tra loro attraverso fili conduttori di resistenza trascurabile) si genera nel diodo **una corrente inversa di corto circuito I_s** direttamente proporzionale al numero di coppie elettrone-lacuna generate per unità di tempo, e quindi direttamente proporzionale all'irraggiamento Φ e all'area della superficie della cella. **Se i contatti metallici esterni del diodo sono aperti** la corrente inversa genera un accumulo di carica elettrica che produce **una ddp di circuito aperto U_0** . L'accumulo di carica genera anche una corrente di diffusione I_d opposta ad I_s e in condizioni stazionarie i due flussi di carica si cancellano. **Se si inserisce un carico di resistenza R** tra i contatti metallici del diodo la corrente I che si genera nella resistenza dipende dalla ddp U che si viene a creare tra i contatti. Lo schema elettrico equivalente del circuito in Fig.1 è il seguente:



Quindi possiamo scrivere:

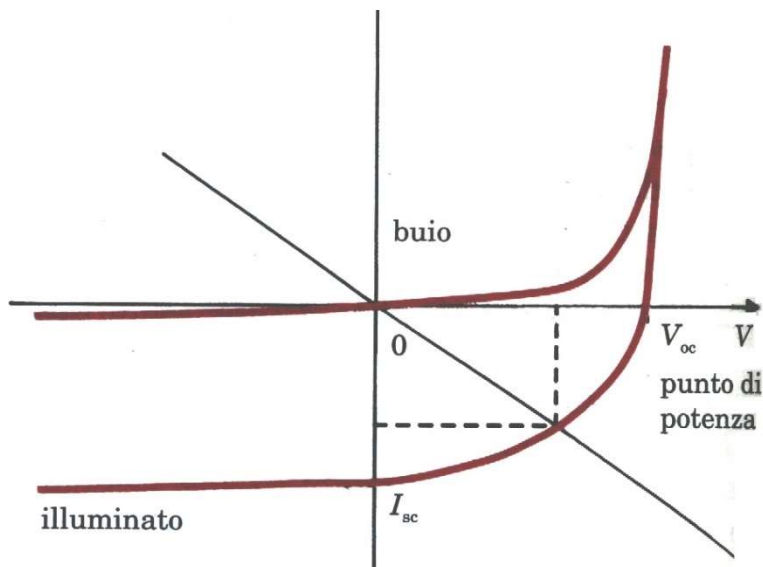
$$I = I_S(\Phi) - I_D(U) \text{ (eq.1),}$$

cioè: $I = -(I_D(U) - I_S(\Phi))$. In pratica la corrente I nel carico si ottiene sottraendo il valore costante $I_S(\Phi)$ alla corrente del diodo $I_D(U)$



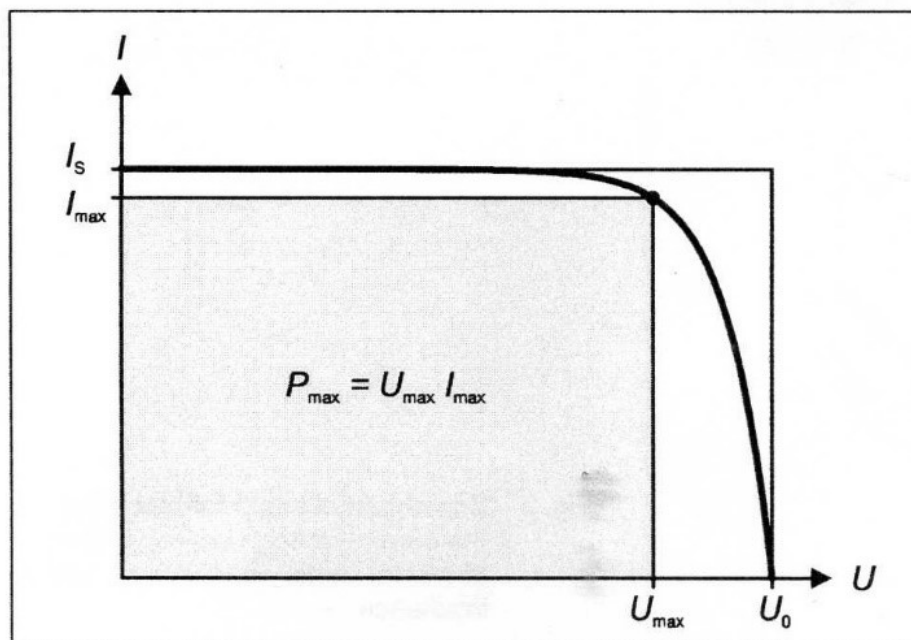
caratteristica I-V di una cella fotovoltaica

e cambiando di segno. Il punto di lavoro del circuito si ottiene disegnando la retta $I=U/R$ del carico (legge di Ohm) e la curva $I = -(I_D(U) - I_S(\Phi))$ della cella



Cambiando il carico R si cambia l'inclinazione della retta e quindi l'intersezione con la curva del diodo.

Assegnando alla corrente I il (corretto) segno positivo otteniamo infine la curva che ci serve per interpretare le misure:



Esaminiamo due casi estremi. Se R è molto piccola la cella si comporta come una sorgente di corrente costante, poiché in questo caso la corrente in diretta del diodo si può trascurare. Se la resistenza di carico R è invece molto grande il comportamento è approssimativamente quello di una sorgente di ddp costante (a piccole variazioni di U corrispondono grandi variazioni di I).

La potenza elettrica ($P=UI$) generata dalla cella a fissata illuminazione dipende quindi dalla resistenza di carico R . Si può dimostrare con qualche calcolo che la cella raggiunge la sua massima potenza P_{\max} in corrispondenza di un carico che, in buona approssimazione, coincide con la cosiddetta "resistenza interna":

$$R_{\max} = R_i = U_0/I_s. \quad (\text{eq. II})$$

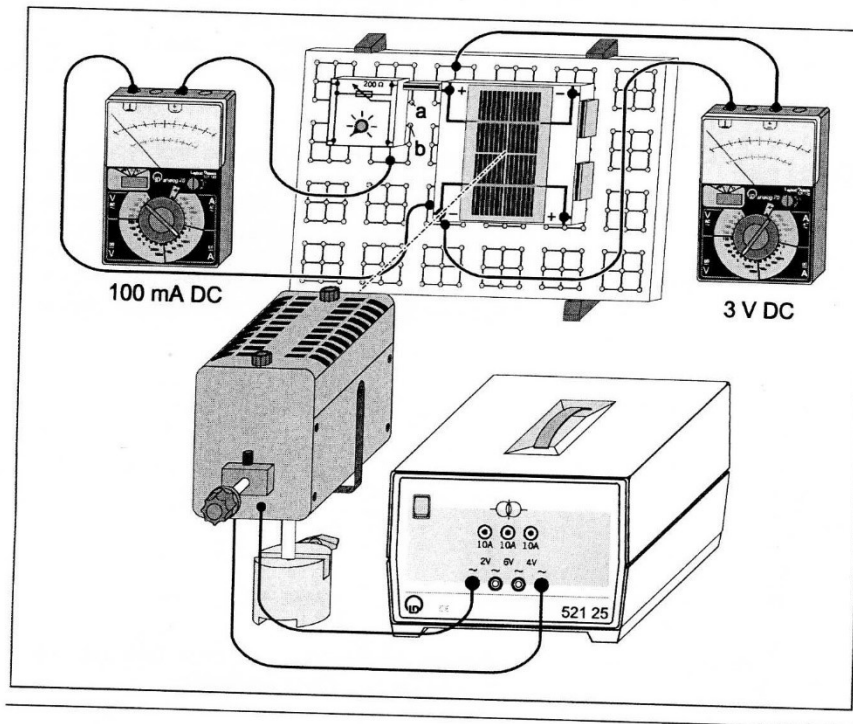
La potenza massima (ved. figura precedente, rettangolo piccolo) è inferiore al prodotto del potenziale di circuito aperto U_0 per la corrente di corto circuito I_s (ved. figura precedente, rettangolo grande).

Solitamente più celle solari si combinano per formare una "batteria solare". Una connessione in serie porta ad una maggiore ddp di circuito aperto U_0 . Una connessione in parallelo porta ad una maggiore corrente di corto circuito I_s .

Nell'esperimento che vi viene proposto quattro celle sono collegate in serie e viene misurata la caratteristica $I(V)$ per diversi valori dell'irraggiamento. In pratica l'irraggiamento viene cambiato variando la distanza tra la cella e la sorgente di luce. Inoltre la potenza $P=UI$ fornita dalla cella viene graficata in funzione della resistenza di carico $R=U/I$.

Apparato Sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato è mostrato nella figura seguente.



Inserite le quattro celle nella basetta e collegatele in serie collegando il polo negativo di una cella col polo positivo della cella successiva. Inserire quindi in serie alla cella il potenziometro che funge da resistore variabile e, sempre in serie, inserire l'amperometro che misura la corrente. Fissate l'intervallo di misura 100 mA DC. Collegare infine in parallelo alla batteria solare il voltmetro e selezionare l'intervallo di misura 3V DC. A questo punto collegare la lampada al trasformatore e posizionarla in modo tale che la batteria solare sia irradiata uniformemente.

Conduzione dell'esperimento

Chiudete il circuito, dapprima cortocircuitando il resistore variabile tramite collegamento conduttore tra i punti a e b. Muovere la lampada fin tanto che la corrente di corto circuito diventa circa 100 mA.

Ora rimuovete il cavo di corto circuito e aumentate la ddp agli estremi o diminuite la corrente nell'intervallo di valori fissato sugli strumenti un passo alla volta cambiando la resistenza di carico. Ad ogni passo memorizzate tensione e corrente in una tabella. Infine aprite il circuito e misurate la ddp a circuito aperto.

Ripetere le misure cambiando la corrente di circuito aperto ai valori 75 mA, 50 mA, 25 mA, aumentando la distanza della lampada dalla cella. Nel seguito vengono riportate a titolo di esempio alcune sequenze di misure per le quantità da ottenere dall'esperimento.

Table 1: measured values of the terminal voltage U of the solar battery and the current I flowing through the load resistor.

* Short-circuit current I_s , + Open-circuit voltage U_0

← minimum		irradiance				maximum →	
Meas. series 4		Meas. series 3		Meas. series 2		Meas. series 1	
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0.02	25.5 *	0.05	50.0 *	0.04	74.0 *	0.06	100.0 *
0.25	25.5	0.25	50.0	0.20	73.5	0.24	99.5
0.50	25.5	0.50	50.0	0.50	73.0	0.50	99.5
0.75	25.0	0.82	50.0	0.75	73.0	0.75	99.0
1.00	25.0	1.05	50.0	1.00	72.5	1.00	99.0
1.10	25.0	1.20	49.5	1.10	73.0	1.10	99.5
1.20	25.0	1.35	49.5	1.25	73.0	1.20	99.0
1.30	24.5	1.45	49.0	1.40	73.0	1.35	99.5
1.40	24.0	1.60	49.0	1.55	72.5	1.50	98.0
1.50	23.5	1.72	46.5	1.67	69.5	1.60	96.0
1.60	22.5	1.80	42.0	1.75	65.5	1.70	91.0
1.70	20.5	1.88	35.0	1.80	61.5	1.80	84.0
1.80	16.5	1.92	30.0	1.85	56.0	1.85	78.0
1.85	13.0	1.95	20.0	1.90	50.0	1.90	66.5
1.88	10.0	2.01	10.0	1.95	40.0	1.95	57.0
1.96 +	0.0	2.04 +	0.0	1.98	30.0	1.98	50.0
—	—	—	—	2.02	20.0	2.01	40.0
—	—	—	—	2.04	10.0	2.04	30.0
—	—	—	—	2.07 +	0.0	2.06	20.0
—	—	—	—	—	—	2.08	10.0
—	—	—	—	—	—	2.10 +	0.0

Table 3: load resistance R_{max} corresponding to the maximum power and internal resistance R_i calculated according to Eq. (II)

	← minimum irradiance maximum →			
	Meas. series 4	Meas. series 3	Meas. series 2	Meas. series 1
$\frac{R_{max}}{\Omega}$	71.1	37.0	24.0	18.7
$\frac{R_i}{\Omega}$	76.9	40.8	28.0	21.0
$\frac{R_{max}}{R_i}$	0.92	0.91	0.86	0.89

Table 4: maximum power P_{max} and product of the open-circuit voltage and the short-circuit current

	← minimum irradiance maximum →				n →			
	Meas. series 4	Meas. series 3	Meas. series 2	Meas. series 1				
$\frac{P_{max}}{W}$	36.0 W	80.0 W	116.1 W	154.7 W	6.0			
$\frac{U_0 \cdot I_s}{W}$	50.0 W	102.0 W	153.2 W	210 W	23.9			
$\frac{P_{max}}{U_0 \cdot I_s}$	0.72	0.78	0.76	0.74	49.8			
					74.3			
					39.0			
	44.0	27.5	24.2	59.4	15.1	80.3	11.1	109.5
	48.0	30.0	27.3	66.8	17.1	91.3	12.1	118.8
	53.1	31.9	29.6	71.1	19.2	102.2	13.6	134.3
	58.3	33.6	32.7	78.4	21.4	112.4	15.3	147.0
	63.8	35.3	37.0	80.0	24.0	116.1	16.7	153.6
	71.1	36.0	42.9	75.6	26.7	114.6	18.7	154.7
	82.9	34.9	53.7	65.8	29.3	110.7	21.4	151.2
	109.1	29.7	64.0	57.6	33.0	103.6	23.7	144.3
	142.3	24.1	97.5	39.0	38.0	95.0	28.6	126.4
	188.0	18.8	201.0	20.1	48.8	78.0	34.2	111.2
	—	—	—	—	66.0	59.4	39.6	99.0
	—	—	—	—	101.0	40.4	50.3	80.4
	—	—	—	—	204.0	20.4	68.0	61.2
	—	—	—	—	—	—	103.0	41.2
	—	—	—	—	—	—	208.0	20.8

La caratteristica corrente-tensione dai dati della Tab. 1 per i 4 valori di irraggiamento considerati è riportata in Fig. 4. A bassi valori di ddp U , cioè a piccoli valori della resistenza di carico R , la batteria solare fornisce una corrente approssimativamente costante, il cui valore dipende dall'irraggiamento. Ai più alti potenziali misurati la cella si comporta come una sorgente di ddp costante, il cui valore dipende in modo meno marcato

dall'irraggiamento, come previsto dalla curva teorica esaminata precedentemente. Le curve tracciate nel diagramma fanno uso dell'eq. I. La tensione di circuito aperto della batteria solare è di circa 2 V. Poiché le singole celle sono collegate in serie e sono identiche, ciascuna cella ha una ddp di circuito aperto pari a 0.5 V.

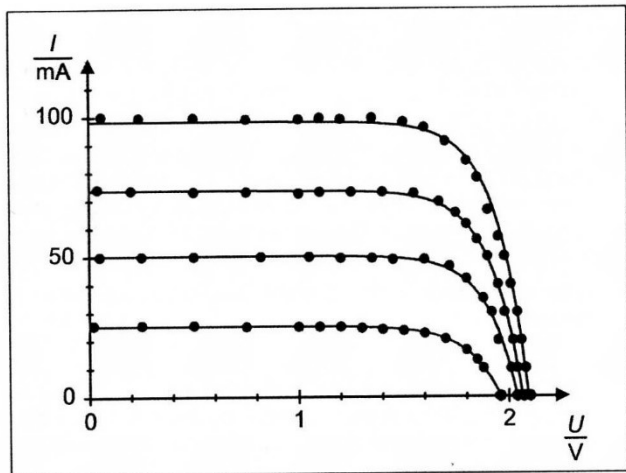


Fig. 4 Current-voltage characteristics of the solar battery measured for four different values of the irradiance

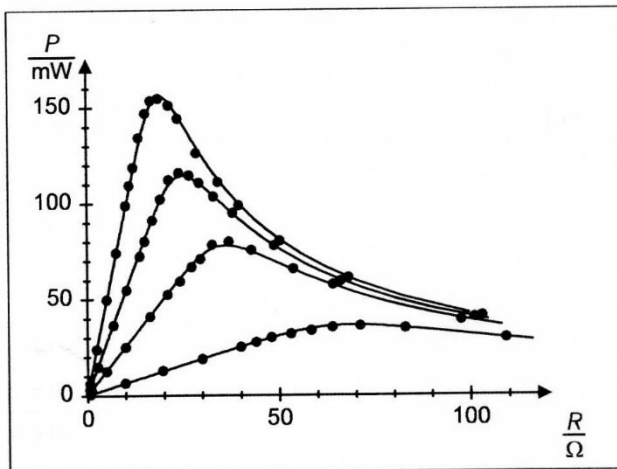


Fig. 5 Power-load resistance characteristics of the solar battery for four different values of the irradiance

La curva potenza- resistenza di carico della Figura 5 si ottiene utilizzando i dati in Tabella 2. Osserviamo che quando R è piccola P aumenta linearmente con R per ogni fissato irraggiamento. Questo avviene perché la cella si comporta come un generatore di corrente costante. Quando R è invece molto grande P diventa inversamente proporzionale ad R perché in queste condizioni la cella si comporta come un generatore di tensione costante.

Il valore di R a cui la potenza fornita raggiunge il massimo valore, che chiameremo R_{max} , diminuisce all'aumentare dell'irraggiamento. I valori sono riportati in Tabella 3 assieme alle resistenze interne R_i calcolate utilizzando l'eq. II.

La Tabella 4 contiene i valori di potenza massima ai 4 irraggiamenti considerati. Il rapporto

$$F = \frac{P_{max}}{U_0 I_s}$$

è chiamato "fill factor" e per la nostra batteria solare è 75%.

Conclusioni

In una batteria (cella) solare la corrente di corto circuito è direttamente proporzionale all'irraggiamento, mentre la dipendenza della tensione di corto circuito dall'irraggiamento è più debole.

Per piccoli R la cella si comporta come un generatore di corrente costante, per grandi R come un generatore di ddp costante.

La potenza fornita per ogni assegnato carico R dipende dall'irraggiamento. La massima potenza è fornita con un carico R uguale alla resistenza interna della batteria (cella) e diminuisce con l'irraggiamento.