

Giacomo Torzo*,
Barbara Pecori*

*ICIS-CNR, INFN
Dipartim. di Fisica
Università di Padova
*Dipartim. di Fisica
Università di Bologna

Studio sperimentale di una cella fotovoltaica

(Pervenuto il 10.02.04, approvato il 04.03.05)

ABSTRACT

An experimental investigation on the electro-optical behavior of a photodiode was carried out using an RTL acquisition system with current and voltage probes. Information is given on the theoretical background and the results of measurements aimed at identifying the conditions of maximum photovoltaic efficiency are reported.

Introduzione

Le celle fotovoltaiche al giorno d'oggi sono dispositivi abbastanza comuni: se ne trova una in ogni dispositivo alimentato ad energia solare (ad esempio calcolatori tascabili, orologi, giocattoli...). La figura 1 ne mostra un tipo montato su una base adatta a studiarne il comportamento con un sistema RTL.

La *cella fotovoltaica* è sostanzialmente un diodo, cioè una giunzione PN tra due semiconduttori, uno drogato P ed uno drogato N. Si tratta tuttavia di un diodo particolare, in cui il semiconduttore drogato P ha uno spessore sottile, così da permettere alla luce che incide sulla sua superficie di penetrare nella regione prossima alla giunzione: qui le coppie elettrone-lacuna, create per effetto fotoelettrico interno¹, migrano nel campo elettrico della giunzione e generano in un circuito esterno una *corrente fotovoltaica*.

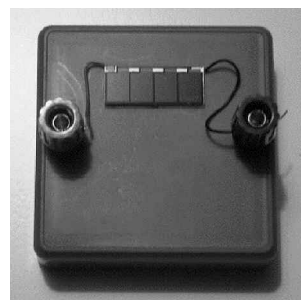


Figura 1. Una cella fotovoltaica recuperata da una calcolatrice tascabile.

Qualche cenno sulle giunzioni a semiconduttore

I materiali semiconduttori possono essere singoli elementi (Germanio, Silicio) o leghe (GaAs, InAs, InP, GaP, InGaAs, GaAsP...) le cui proprietà possono essere modificate introducendo delle impurezze nel reticolo cristallino (bastano pochi atomi per miliardo): si ottengono così semiconduttori *drogati* che si dicono di tipo P o di tipo N a seconda del tipo di impurezze.

Se si costruisce un dispositivo di materiale semiconduttore in cui due regioni adiacenti sono una drogata P e una drogata N, la superficie di separazione tra le regioni costituisce ciò che viene chiamata una *giunzione*² PN. Una giunzione PN si comporta elettricamente come un diodo rettificante, ovvero esibisce conducibilità molto diversa a seconda del segno della sua polarizzazione. Ma le *proprietà rettificanti* della giunzione PN non sono quelle che qui ci interessano: vediamo più in dettaglio le sue *proprietà opto-elettroniche* (Figura 2).

In uno strato sottile adiacente alla giunzione (*strato di svuotamento*) la distribuzione dei portatori di carica (elettroni e lacune) cambia rispetto alla situazione esistente nel volume del semiconduttore P o N: in esso si crea un campo elettrico.

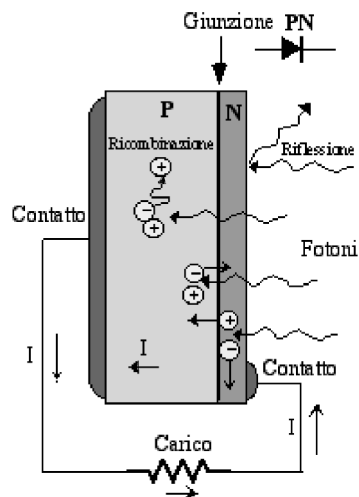


Fig. 2: Schema di una giunzione PN.

Nello strato di svuotamento non ci sono cariche libere e quando esso è colpito dalla luce (fotoni), alcuni elettroni, normalmente *legati* ad un atomo del reticolo cristallino e quindi non disponibili per il trasporto di carica, vengono liberati dal legame e possono muoversi nel cristallo, lasciando carico positivamente l'atomo cui erano legati. Questa carica positiva è una "lacuna". Anche le lacune possono muoversi nel cristallo: se uno degli elettroni legati agli atomi adiacenti si sposta nel sito lasciato libero, la lacuna si sposta in direzione opposta. Il moto di queste cariche è un moto browniano dato che la maggior parte della loro energia è termica e quindi la loro velocità istantanea ha valor medio nullo e valor quadratico medio dell'ordine di $\sqrt{(kT/m)}$. I due tipi di portatori di carica (elettroni e lacune) possono *ricombinarsi* durante la migrazione nel volume del semiconduttore, e cessare così di contribuire alla fotocorrente.

Lo strato di vuotamento si origina appunto per effetto della ricombinazione di elettroni (portatori di carica maggioritari nel semiconduttore tipo N) e lacune (portatori di carica maggioritari nel semiconduttore tipo P) per effetto della loro diffusione indotta dal gradiente di densità nel momento in cui si fa la giunzione. Tale ricombinazione lascia non compensate le cariche fisse degli atomi droganti (negative nel materiale P e positive nel materiale N) e quindi si genera un campo elettrico interno, dovuto a questo doppio strato di carica, diretto da N a P. Si capisce quindi che, se una coppia elettrone-lacuna viene generata entro lo strato di svuotamento, tale campo elettrico spinge la lacuna nella regione P e l'elettrone nella regione N: questo trasporto di carica dovuto al fotone è detto fotocorrente.

È chiaro allora come si possa ottenere un sensore di luce da un fotodiodo o un fototransistor: è sufficiente che la giunzione PN sia esposta alla luce perché attraverso di essa si stabilisca una corrente elettrica proporzionale al flusso luminoso. Se poi si utilizza la fotocorrente, non come misura della luce incidente ma per qualche altro scopo, il fotodiodo viene chiamato cella fotovoltaica, anche se si tratta dello stesso tipo di dispositivo³.

Viceversa, se una giunzione PN è attraversata da corrente elettrica nel verso della polarizzazione positiva, è possibile osservare una emissione di luce (si tratta del dispositivo detto LED = *Light Emitting Diode*)⁴.

Caratteristiche di fotodiodo

Il comportamento di una cella fotovoltaica (o fotodiodo) è descrivibile schematicamente mediante un grafico tensione/corrente come quello di figura 3, che riporta in ordinata la corrente che attraversa la giunzione ed in ascissa la tensione ai capi della giunzione.

Le caratteristiche attraversano 3 quadranti: la curva indicata con 1 è in condizioni di buio, la curva indicata con 2 è in condizioni di illuminamento.

Nel quadrante A il fotodiodo è polarizzato inversamente (elettrodo P negativo rispetto ad elettrodo N nella giunzione PN): nelle condizioni di buio la corrente inversa è trascurabile⁵ come per ogni diodo raddrizzatore, che non conduce se polarizzato inversamente. Nelle condizioni di illuminamento tuttavia si nota che esso è attraversato da una apprezzabile corrente inversa. La pendenza di tale curva è prossima a zero: la corrente è praticamente indipendente dalla tensione di polarizzazione.

Nel quadrante C il fotodiodo è polarizzato direttamente, e la corrente diretta, che scorre dall'elettrodo P a quello N, cresce esponenzialmente con la

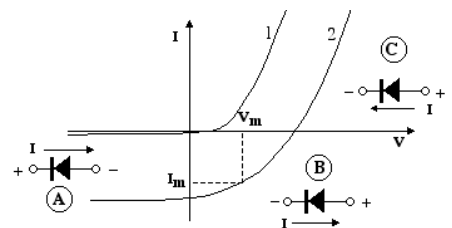


Figura 3. Caratteristiche tensione/corrente di una cella fotovoltaica: 1 al buio, 2 con luce.

tensione applicata, come in ogni diodo (anche se spesso nei diodi si usa approssimare l'esponenziale con una retta, che intercetta l'asse delle tensioni ad un valore che viene chiamato "tensione di ginocchio del diodo" V_f).

Nel quadrante B (quello normalmente utilizzato nella produzione fotovoltaica di energia elettrica), pur essendo il fotodiodo polarizzato direttamente, esso è attraversato da una corrente inversa e si comporta come se avesse resistenza negativa. Di conseguenza, se si pone una resistenza tra gli elettrodi P e N il fotodiodo si comporta come una sorgente di forza elettromotrice.

Il punto della curva 2 con coordinate I_m e V_m nella figura 3 è quello in cui la cella fotovoltaica produce la massima potenza a parità di illuminazione, perché il prodotto $W = IV$ ivi è massimo.

Caratterizzazione di una fotocella con sistema RTL

Utilizzando una sonda di tensione ed una sonda di corrente (o una sonda di tensione differenziale) connesse ad una interfaccia (ad esempio CBL) controllata da una calcolatrice grafica, è abbastanza facile ottenere una caratterizzazione di celle fotovoltaiche come descritta nei grafici di figura 3. È utile impiegare anche un generatore di tensione alternata (sinusoidale o triangolare) per poter misurare rapidamente tensioni e correnti sia positive che negative.

Conviene connettere in serie alla fotocella una resistenza (per limitare la corrente), e alimentare il circuito con un segnale alternato, utilizzando una delle due configurazioni mostrate in figura 4.

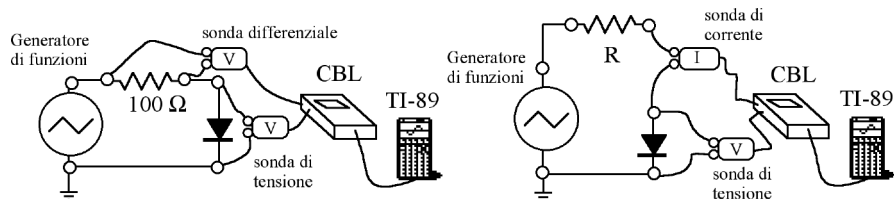


Figura 4. Schemi di due configurazioni sperimentali.

Se si usa lo schema a sinistra nella figura 4, le correnti (che saranno riportate sull'asse Y) saranno in *centesimi* di ampere (dato che si misura la tensione con sonda differenziale ai capi di una resistenza da 100 ohm), e se si usa lo schema a destra saranno invece in ampere. Le tensioni misurate ai capi della fotocella (che saranno riportate sull'asse X) sono in volt. Una foto dell'apparato è riportata in figura 5, per dare una idea della compattezza del sistema quando si usa RTL portatile.

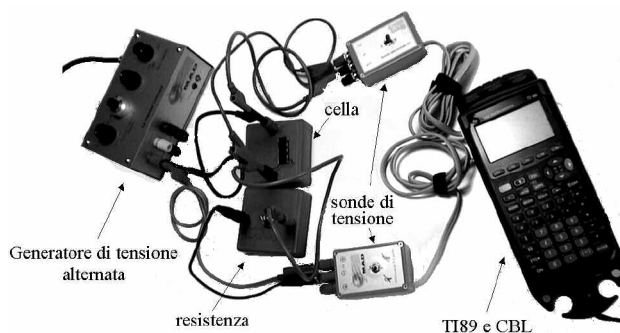


Figura 5. Foto dell'apparato sperimentale.

In figura 6 sono riportate misure ottenute utilizzando la sonda di tensione differenziale, in condizioni di buio, con una cella fotovoltaica costituita da 4 fotodi in serie e posta in serie ad una resistenza $R = 100 \text{ ohm}$.

Il circuito è stato qui alimentato da una tensione variabile linearmente nel tempo (onda triangolare) tra circa +5V e -5V.

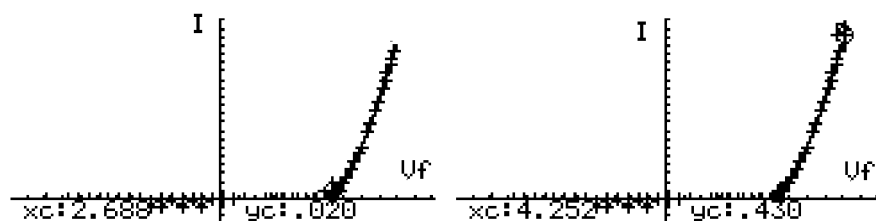


Figura 6. Curva caratteristica in condizioni di buio.

A sinistra in figura 6 il cursore è posizionato alla tensione di "ginocchio" $V_f = 2.7 \text{ V}$, a destra alla massima polarizzazione diretta $V_f = 4.25 \text{ V}$ corrispondente ad una corrente $I = 4.3 \text{ mA}$ (tensione differenziale di 0.43 V).

Nei grafici creati con questo tipo di calcolatrici la scala degli assi non è numerata, dato che i valori sulla curva possono essere letti spostando il cursore, ed evidenziando così i valori dell'ascissa x_c e dell'ordinata y_c corrispondente. Tuttavia con un po' di lavoro sulla tastiera della calcolatrice si possono ottenere (per poterli stampare e passare ad altri) anche grafici in formato più standard come quello mostrato in figura 7, ove è riportata la curva caratteristica misurata con fotocella illuminata da una lampadina.

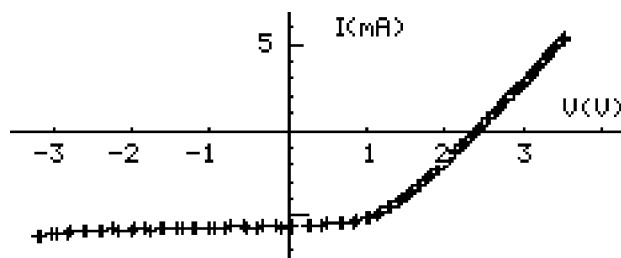


Figura 7. Curva caratteristica in condizioni di luce.

Studio della potenza fotovoltaica erogata

Il rendimento massimo teorico⁶ della trasformazione di energia solare in energia elettrica è del 32%. Le celle fotovoltaiche attualmente disponibili hanno un rendimento del 10% circa. Le vere e proprie batterie solari (*pannelli fotovoltaici*) sono costituite di solito da molti fotodi in serie e in parallelo tra loro per fornire elevate correnti (fino a qualche ampere) ed elevate tensioni (fino a decine di volt).

Utilizzando un piccolo pannello fotovoltaico⁷ montato in serie ad un potenziometro, si può facilmente studiare il comportamento di una cella fotovoltaica come convertitore di energia luminosa in energia elettrica, e determinare le condizioni per utilizzarlo con *massima efficienza*.

Il circuito suggerito è mostrato in figura 8. Il canale 1 dell'interfaccia misura la corrente erogata I ed il canale 2 la tensione V_f ai capi del pannello.

La potenza erogata è il prodotto $W = V_f I$.



Figura 8. Circuito per lo studio della potenza erogata e foto dell'apparato.

È ovvio che, se la resistenza interna del sensore di corrente è trascurabile, la medesima tensione V_f appare ai capi del potenziometro P.

Di conseguenza il valore della resistenza (variabile) del potenziometro può essere calcolata come rapporto $R = V_f / I$. Ciò consente di ottenere anche un grafico della potenza erogata in funzione del carico R.

Un esempio dei risultati ottenuti sotto illuminazione da lampada da 60 W posta a circa 50 cm di distanza, con cella chiusa su potenziometro con $R_{max} = 5 \text{ k}\Omega$, al variare di R, è riportato in figura 9, ove la corrente è in ordinata (Y) e la tensione in ascissa (X); la massima corrente è 14 mA e la massima tensione poco più di 8 V. Il grafico di figura 9 corrisponde ai grafici delle figure 3, 6 e 7, ma con *corrente cambiata di segno*, dato che ora siamo interessati a studiare corrente e tensione ai capi del carico resistivo.

Nella figura 9 a destra si vede che i valori di resistenza si calcolano dai valori tabulati all'incirca come in Excel, scrivendo l'operazione da eseguire tra colonne nella intestazione della colonna da calcolare.

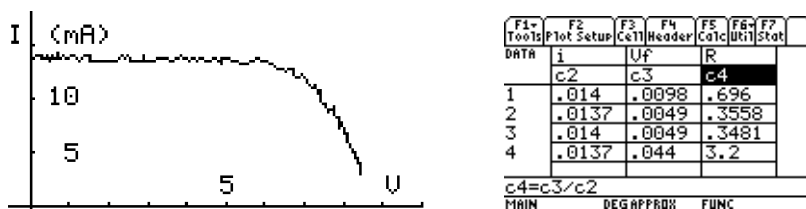


Figura 9. Andamento della corrente in funzione della tensione (illuminamento medio).

In figura 10 sono riportati i grafici della potenza erogata in funzione di V_f (a sinistra) e in funzione di R (a destra)

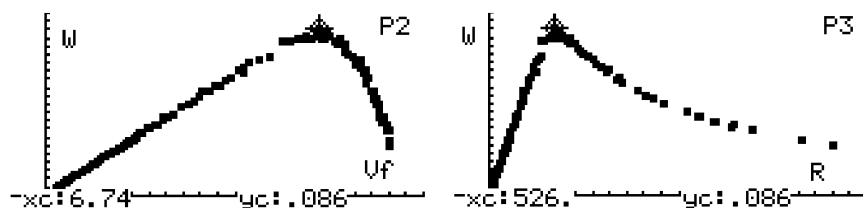


Figura 10. Andamento della potenza in funzione di V_f e di R (illuminamento medio).

Il grafico $W(V_f)$ rivela un massimo $W_m = 86 \text{ mW}$ corrispondente alla tensione $V_f = 6.74 \text{ V}$.

Il grafico della potenza in funzione del carico $W(R)$ mostra che la massima potenza è erogata su un carico di 526 ohm. Risultati analoghi si ottengono aumentando l'illuminazione. Ad esempio riducendo la distanza tra lampada e pannello a soli 10 cm si ottiene il grafico di figura 11, che mostra come l'accresciuto irraggiamento aumenta la massima corrente a 18 mA, mentre la massima tensione resta circa 8.5 V.

Qui il grafico $W(V_f)$ rivela un massimo $W_m = 111 \text{ mW}$ corrispondente alla tensione $V_f = 6.59 \text{ V}$.



Figura 11. Andamento della corrente in funzione della tensione (illuminamento alto).

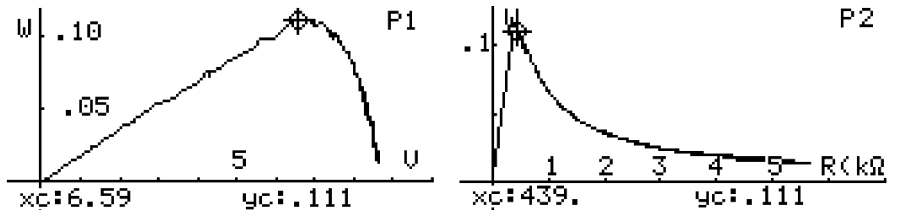


Figura 12. Andamento della potenza in funzione di V_f (P1) e di R (P2) (illuminamento alto).

Il grafico della potenza in funzione del carico $W(R)$ mostra che la massima potenza è erogata su un carico di circa 440 Ω (Figura 12).

Se si ripete lo studio con un diverso pannello solare composto di celle in parallelo⁸ si ottengono risultati analoghi ma con diversi valori per i massimi di corrente e tensione.

Nelle figure 13,14,15 sono mostrati i grafici ottenuti illuminandolo con una lampada da 60 W (a diversi valori della distanza L) e con potenziometro da 200 ohm, al variare di R .

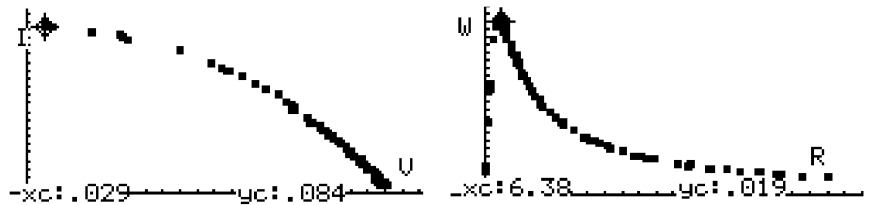


Figura 13. $L=5 \text{ cm}$, $I_m=84 \text{ mA}$, $W_m=19 \text{ mW}$, $V_m=0.53 \text{ V}$, $R_m=6 \Omega$.

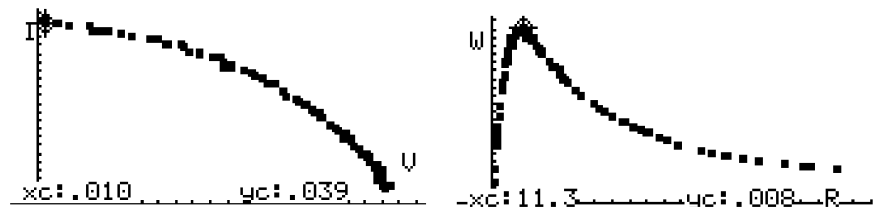


Figura 14. $L=20 \text{ cm}$, $I_m=39 \text{ mA}$, $W_m=8 \text{ mW}$, $V_m=0.42 \text{ V}$, $R_m=11 \Omega$.

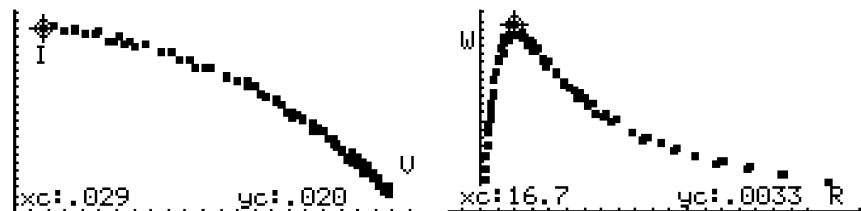


Figura 15. $L=60$ cm, $I_m=29$ mA, $W_m=3$ mW, $V_m=0.35$ V, $R_m=17$ Ω .

Gli stessi grafici (della potenza in funzione del carico R e della tensione V ai capi del carico) sono mostrati sovrapposti ed in scala, per evidenziare l'effetto della variazione del flusso luminoso intercettato dal pannello, che decresce al crescere della distanza tra lampada e pannello. Tale flusso cala circa quadraticamente con la distanza L dalla lampada solo se questa è approssimabile ad una sorgente puntiforme, che non è il caso di queste misure. Pertanto qui non riportiamo misure di illuminamento, che pure sarebbe facile ottenere usando una sonda di luce connessa all'interfaccia, e ci limitiamo ad osservare la dipendenza qualitativa dei grafici dall'illuminamento.

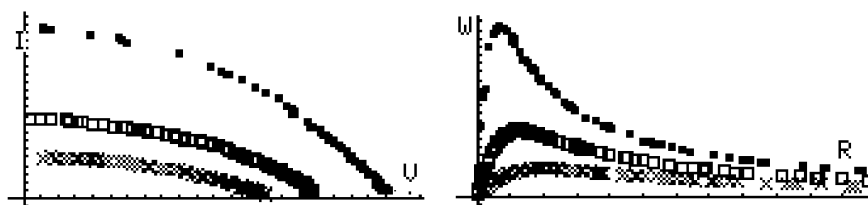


Figura 16. $L=5$ cm: punto, $L=20$ cm: quadrato, $L=60$ cm: croce.

È evidente che la *massima* potenza erogabile diminuisce al calare della luce incidente, ma a parità di illuminamento la potenza *dipende dal valore del carico resistivo*.

Il valore del carico corrispondente a massima efficienza dipende solo debolmente dalla intensità della luce incidente e quindi è possibile, per ciascun pannello fotovoltaico, individuare un intervallo di valori per il carico R che ottimizzi l'efficienza nelle diverse condizioni di illuminamento (in questo caso $6\Omega < R < 17\Omega$, e $440\Omega < R < 530\Omega$ nel caso precedente).

In altre parole: diversi pannelli fotovoltaici (a seconda del tipo di giunzioni PN impiegate e del numero di giunzioni tra loro in serie) funzionano al meglio se accoppiati a batterie (o a carichi utili) scelti in modo opportuno; ad esempio, il primo dei due pannelli da noi usati è adatto a caricare una batteria da 4.5V o ad azionare un motore c.c. con una resistenza di circa 500 Ω , mentre il secondo rende meglio con un motore la cui resistenza sia di una decina di ohm.

Note ¹ Si distingue qui tra effetto fotoelettrico *interno* (questo, in cui i portatori di carica restano nel volume solido o liquido) e l'effetto fotoelettrico *esterno*, quello cioè in cui elettroni vengono emessi da una superficie libera (anodo) attraverso uno spazio vuoto e migrano verso un altro elettrodo (catodo) nel campo elettrico applicato tra i due elettrodi.

² Due giunzioni PN adiacenti (ovvero giunzioni PNP o NPN) costituiscono un *transistor*.

³ Esistono differenze tra le due categorie di dispositivi: nei fotodiodi si cerca di ottimizzare la sensibilità o la linearità della risposta alla luce, nelle celle fotovoltaiche si cerca di massimizzare la potenza elettrica trasferita al carico a parità di illuminamento.

⁴ Il fenomeno consiste nella ricombinazione elettrone-lacuna con conseguente emissione della energia in eccesso sotto forma di campo elettromagnetico (fotone). L'energia del fotone emesso dipende dalla differenza tra l'energia in banda di conduzione e l'energia in banda di valenza per gli elettroni nel semiconduttore di cui è fatta la giunzione (Energy Gap).

⁵ Si tratta della generazione spontanea di coppie elettrone-lacuna nella prossimità della giunzione PN per effetto termico: cresce con la temperatura.

⁶ Basti pensare al fatto che solo una parte dei fotoni prodotti dal sole possono partecipare alla produzione della fotocorrente: ne vengono esclusi ad esempio quelli con energia inferiore alla Energy Gap della giunzione PN usata, e quelli (con energia troppo elevata) che vengono assorbiti alla superficie del fotodiode, prima di penetrare nello strato di svuotamento.

⁷ Un pannello *SP 60-6V* costituito da 18 celle con diodo 1N58 in serie ($V_{max}=8.5V$)

⁸ Un pannello di produzione cinese reperibile presso la ditta MAD (www.edumad.com)

DA RICHARD, PEARL RIVER, NEW YORK

1° gennaio 1949

Caro professor Einstein,

Mi è dispiaciuto così tanto che sei stato male. Sei un uomo simpatico e spero che presto starai meglio. Ho saputo di te in un libro di fumetti che parlava di atomi e ho sentito che stavi male alla radio.

Tanti auguri a te e alla tua famiglia.

Richard, sei anni

DA HEIDI, HALLE, GERMANIA

14 marzo 1949

Caro Professore,

Oggi abbiamo festeggiato il mio compleanno. Ho compiuto undici anni. Nel pomeriggio, il papà ha letto *Roland di Berlino*, che la postina ci porta ogni settimana. Questa volta c'era scritto che oggi è anche il tuo compleanno, e che hai compiuto 70 anni. E visto che compiamo gli anni nello stesso giorno, ti mando i miei auguri in ritardo da parte di tutti noi. Ho due sorelle. Il mio papà mi ha permesso di scriverti, e mi aiuterà soltanto per l'indirizzo. L'anno prossimo dovrò scriverti in anticipo così la lettera ti arriverà in tempo. Abbiamo una zia che fa la sarta a Hoboken vicino a New York. Ci vogliono 4 settimane per spedire una lettera fin lì. Il mio papà dice che sei famoso e che presto ti studieremo nelle lezioni di fisica, e che dovrei essere lusingata perché festeggiamo il compleanno lo stesso giorno.

I più cari auguri,

la tua Heidi

A. Calaprice (a cura di), *Caro Professor Einstein – Il genio della fisica risponde alle lettere dei bambini*, Archinto, Milano, 2005