

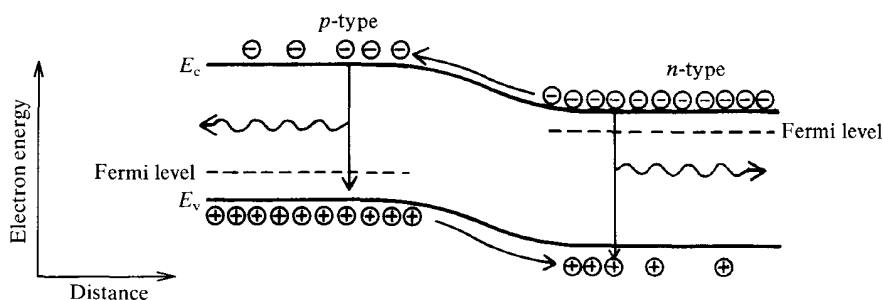
## CAPITOLO 9

### DISPOSITIVI OPTOELETTRONICI

L'*optoelettronica* è una disciplina che prende in esame alcuni aspetti dell'*elettronica* intimamente legati all'*ottica*. In altre parole, essa studia quei particolari dispositivi elettronici in cui il flusso di elettroni (corrente) interagisce con un flusso di *fotoni* (luce). In questa definizione il termine *luce* va inteso in senso lato e include radiazioni non percepibili all'occhio umano. Tale fenomeno regola il funzionamento di numerosi dispositivi, la maggior parte dei quali basati sull'azione di una giunzione *p-n*. I diodi elettroluminescenti, i fotodiodi, gli optoisolatori sono esempi di dispositivi optoelettronici.

#### 9.1 Diodi elettroluminescenti (LED)

In un diodo a giunzione *p-n* polarizzato direttamente, le cariche maggioritarie attraversano la barriera di potenziale ed entrano dall'altro lato del materiale dove diventano portatori minoritari. In altri termini, gli elettroni del lato *n* vengono accelerati in direzione del semiconduttore di tipo *p*, dove entrano e diventano cariche minoritarie, mentre le lacune del lato *p* entrano nella regione *n* divenendo anch'essi portatori minoritari. In prossimità della giunzione, pertanto, vi è un eccesso di concentrazione di elettroni dal lato *p* e di lacune dal lato *n*: questa condizione rende assai elevata la probabilità di *ricombinazione* di coppie elettrone-lacune da entrambi i lati della giunzione, come schematizzato in Fig. 9.1.



**Fig. 9.1** – *Iniezione di cariche minoritarie e conseguente ricombinazione radiativa con le cariche maggioritarie in una giunzione p-n polarizzata direttamente*

Il fatto che un elettrone salti dalla banda di conduzione a quella di valenza o viceversa non è scevro di conseguenze. Come sappiamo tali bande corrispondono ad un insieme di livelli energetici ben definiti, pertanto un elettrone che passi dalla banda di conduzione a quella di valenza, passa da uno stato energetico più elevato ad uno ad energia più bassa. Un *bilancio energetico* di tale fenomeno fisico impone che a tale passaggio di stato venga associata una quantità di energia ceduta all'ambiente esterno. È chiaro che tale *cessione* di energia dipende dalla differenza in termini energetici tra  $E_C$  ed  $E_V$ , cioè dalla *gap* di energia  $E_G$ ; dunque una *gap* più grande corrisponde ad un'energia maggiore ceduta all'esterno.

L'energia può essere ceduta all'esterno in tanti modi, uno dei quali è sotto forma di *calore*. Questa modalità è quella tipica dei diodi ordinari al silicio polarizzati direttamente. In giunzioni effettuate con altri tipi di materiali, questa cessione di energia può avvenire sotto forma *luminosa*: in tal caso si ha *emissione* di luce, la cui lunghezza d'onda è dipendente dal *gap* d'energia secondo la seguente legge di Planck:

$$E_C - E_V = hf = hc/\lambda \tag{9.1}$$

dove  $h$  è la *costante di Planck*, pari a  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s,  $c$  è la *velocità della luce* ( $3 \cdot 10^8$  m/s), mentre  $f$  e  $\lambda$  sono rispettivamente la *frequenza* e la *lunghezza d'onda* della radiazione emessa (frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali e la costante di proporzionalità è la velocità della luce:  $f\lambda = c$ ). Sviluppando i calcoli, la (9.1) si trasforma nella seguente formula di uso più pratico

$$E_{\text{emessa}}[\text{eV}] = E_G = \frac{1,24}{\lambda [\mu\text{m}]} \tag{9.2}$$

Questa formula esprime il fatto che la luce emessa, in quanto radiazione elettromagnetica, ha una sua lunghezza d'onda  $\lambda$  (e una sua frequenza  $f$ , legata dalla relazione  $f = c/\lambda$ ) e ad essa si può associare un'energia  $E_{\text{emessa}}$  tanto più elevata, quanto più piccola è la sua lunghezza d'onda.

La Tab. 9.1 riporta la suddivisione dello spettro elettromagnetico; è inoltre riportata l'energia relativa alle lunghezze d'onda corrispondenti.

**Tab. 9.1 – Spettro elettromagnetico**

Type of radiation	Wavelength	Frequency (Hz)	Quantum energy (eV)
Radio waves	100 km	$3 \times 10^3$	$1.2 \times 10^{-11}$
Microwaves	300 mm	$10^9$	$4 \times 10^{-6}$
Infrared	0.3 mm	$10^{12}$	$4 \times 10^{-3}$
Visible	0.7 $\mu\text{m}$	$4.3 \times 10^{14}$	1.8
Ultraviolet	0.4 $\mu\text{m}$	$7.5 \times 10^{14}$	3.1
X rays	0.03 $\mu\text{m}$	$10^{16}$	40
$\gamma$ rays	0.1 nm	$3 \times 10^{18}$	$1.2 \times 10^4$
	1.0 pm	$3 \times 10^{20}$	$1.2 \times 10^6$

Come si nota, la radiazione visibile occupa una regione piuttosto stretta all'interno dello spettro elettromagnetico. Essa è schematizzata e suddivisa cromaticamente (colori) in Fig. 9.2, insieme alle regioni dell'infrarosso e dell'ultravioletto.

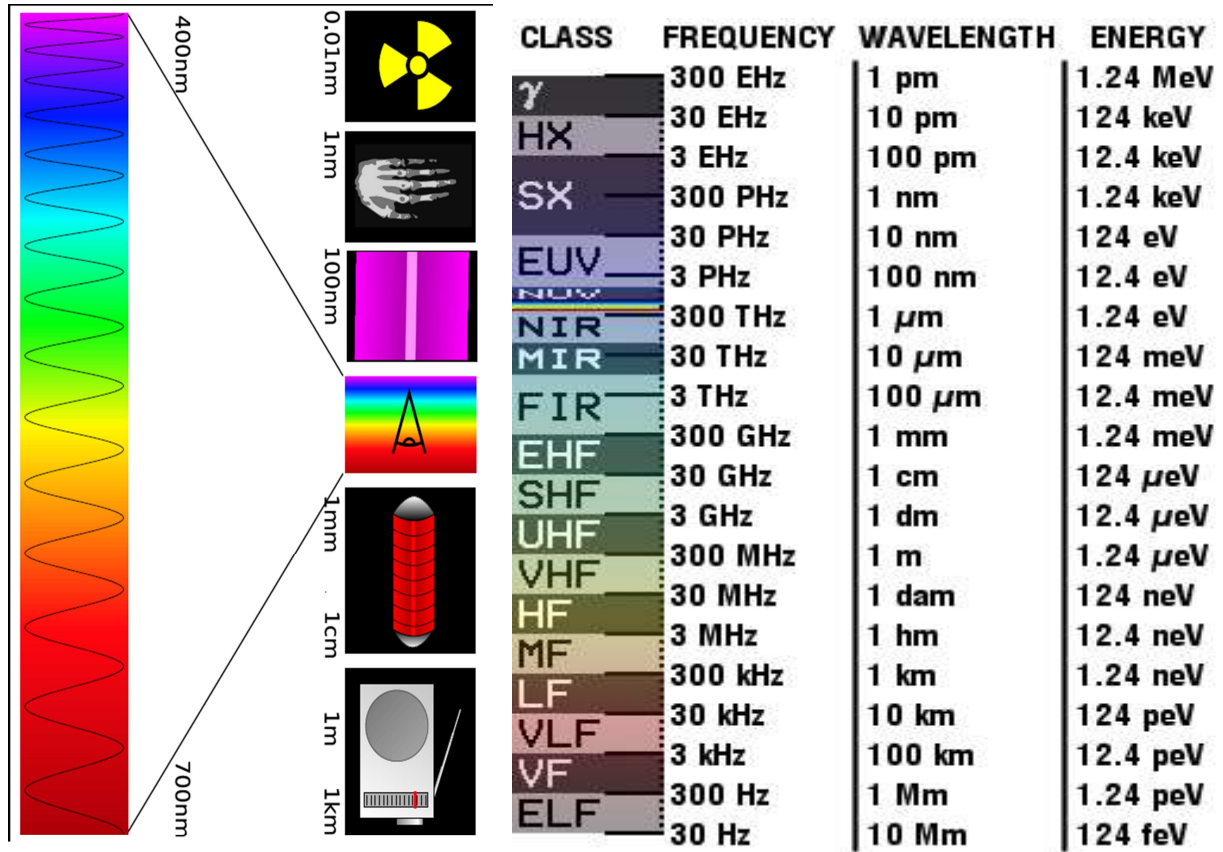


Fig. 9.2 – Lunghezze d'onda e frequenze per lo spettro di radiazioni dall'infrarosso all'ultravioletto

Possiamo pertanto dire che, per avere emissione nel rosso, la lunghezza d'onda deve essere compresa tra 622 nm e 760 nm (al variare di  $\lambda$ , cambiano le tonalità di rosso); ad esempio per  $\lambda = 700$  nm, ciò corrisponde ad un salto energetico che si calcola tramite la (9.2), cioè 1,77 eV. Per avere emissione nel violetto, ad esempio a  $\lambda = 420$  nm, deve essere  $E_r = 2,95$  eV. Dunque, per avere emissione verso il rosso (o addirittura nell'infrarosso) la gap del semiconduttore deve essere più piccola di quella che si ha nel caso di emissione verso il blu. Si possono avere pertanto diodi che emettono differenti colori, semplicemente scegliendo il semiconduttore opportuno (si noti, tuttavia, che è più difficile ottenere dispositivi che emettono verso il blu, o perfino nell'ultravioletto, perché il materiale assume sempre meno le caratteristiche di un semiconduttore e sempre più quelle di un isolante, con conseguenti difficoltà di conduzione elettrica e di drogaggio).

Un dispositivo a semiconduttore basato su una giunzione  $p-n$  polarizzata direttamente, ad emissione di luce visibile, o nell'infrarosso, o nell'ultravioletto, prende il nome di *diodo ad emissione di luce* o *LED* (*Light-Emitting Diode*). I suoi simboli circuitali sono riportati in Fig. 9.3.

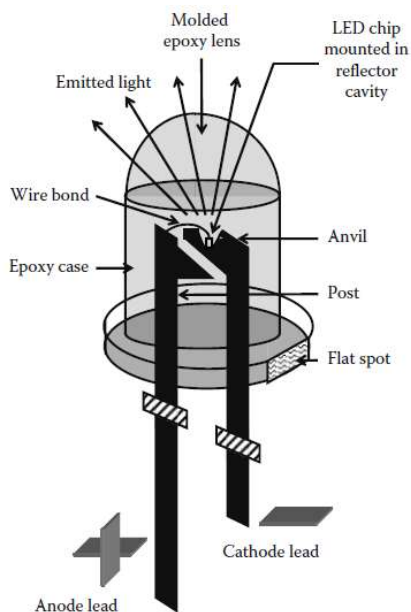


Fig. 9.3 – Simboli circuitali del LED

Materiali usati per la fabbricazione dei LED sono: il GaAs ( $E_G = 1,44 \text{ eV} \Rightarrow \lambda = 860 \text{ nm}$ ), il GaP ( $E_G = 2,26 \text{ eV} \Rightarrow \lambda = 549 \text{ nm}$ ), il GaN ( $E_G = 3,40 \text{ eV} \Rightarrow \lambda = 365 \text{ nm}$ ). Esistono inoltre altri composti ternari come il GaAsP e il GaAlAs, con i quali, dosando opportunamente le percentuali in peso di ciascun elemento, è possibile variare l'ampiezza della gap e quindi la lunghezza d'onda di emissione.

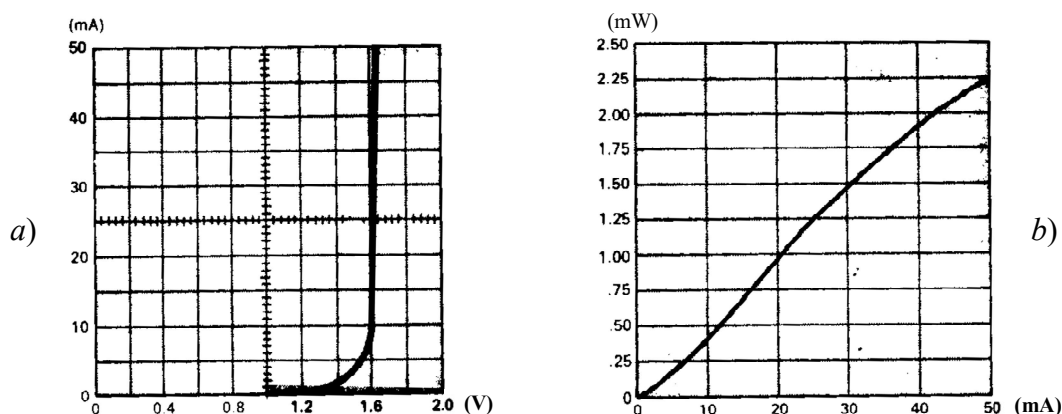
I LED sono montati su un riflettore e incapsulati all'interno di una resina epossidica trasparente sagomata in modo semisferico alla sommità, come mostrato in Fig. 9.4; questa provvede non solo a dare robustezza meccanica al componente, ma migliora le perdite ottiche per riflessione all'interfaccia semiconduttore-aria (la riflessione tra semiconduttore e resina è minore) e provvede a focalizzare la radiazione come in una lente. Questa è la ragione per cui il LED appare più luminoso alla sommità della semisfera.

Le applicazioni di LED con emissione nel visibile sono numerose e svariate: dai semplici display, all'illuminazione vera e propria (semafori, fari posteriori delle autovetture, ecc.). I LED nell'ultravioletto, da poco disponibili sul mercato, sono utilizzati in spettroscopia e per la sterilizzazione. Infine, le applicazioni più tipiche dei LED nell'infrarosso sono nelle comunicazioni in aria (telecomandi) e in fibra ottica (nell'infrarosso le fibre ottiche hanno un assorbimento molto basso che consente al segnale luminoso di propagarsi per più di 100 km senza attenuarsi).



**Fig. 9.4** – Vista interna di un diodo LED. Si noti che il terminale del catodo è vicino al lato piatto della base (flat spot). Un altro modo per distinguere i due terminali è che l'anodo è normalmente più lungo del catodo

Curve tipiche di un LED sono quelle riportate sotto in Fig. 9.5.



**Fig. 9.5** – a) Corrente diretta in funzione della tensione. b) Intensità luminosa relativa (normalizzata al valore di 20 mA) in funzione della corrente diretta

La Fig. 9.5a riporta la caratteristica tensione-corrente: essa è logicamente uguale a quella di un diodo a giunzione *p-n* tranne che per la tensione di soglia, che in questo caso è più alta di quella del diodo ordinario al silicio, a causa del differente semiconduttore utilizzato. La tensione di soglia tipicamente può variare da 1,3 V a 3,3 V.

L'intensità dell'emissione aumenta con l'aumentare della corrente diretta, visto che in questo modo vi sono più portatori disponibili per la ricombinazione. La Fig. 9.5b mostra come l'intensità luminosa aumenti con l'aumentare della corrente diretta. I valori tipici della corrente diretta per una buona luminosità sono compresi tra 10 e 20 mA (ovviamente con tensioni dirette superiori a quella di soglia) e per l'accensione la corrente deve essere superiore a circa 5 mA.

I LED non sopportano né tensioni *inverse* troppo elevate (3 ÷ 5 V al massimo), né correnti *dirette* troppo elevate (in genere, 30-40 mA al massimo). È per questo motivo che bisogna sempre proteggere il diodo con una resistenza in serie al fine di limitare la corrente, come mostrato in Fig. 9.6.

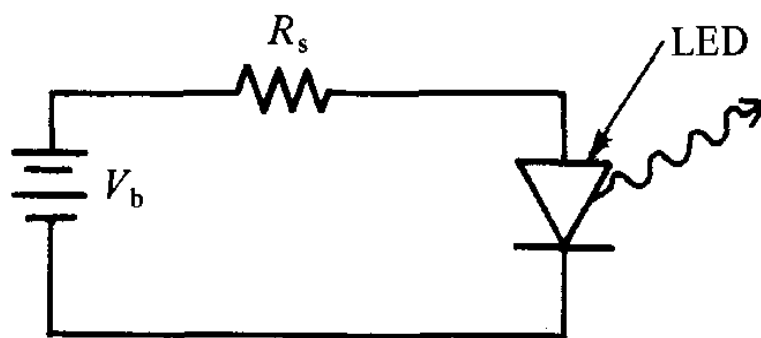


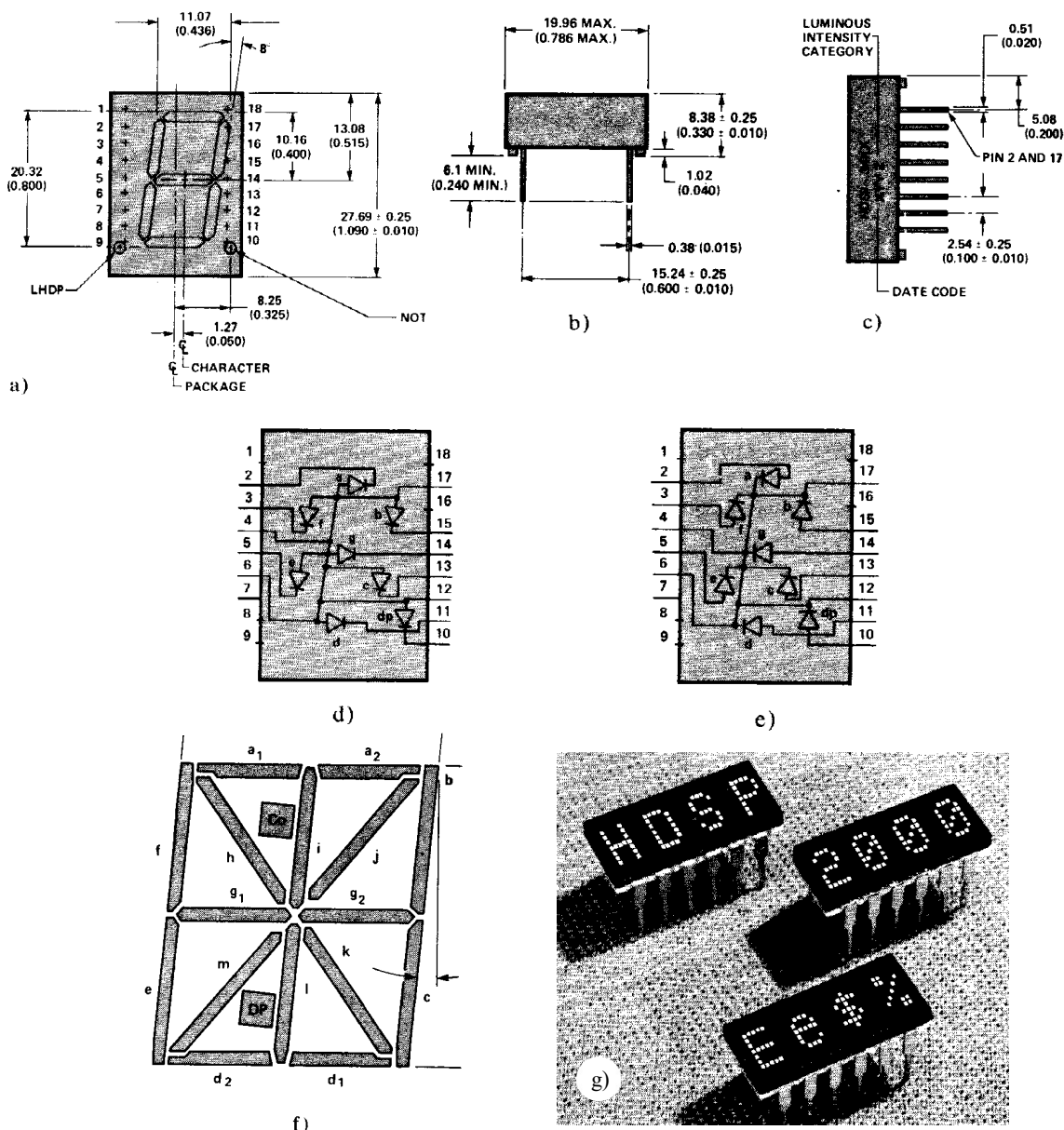
Fig. 9.6 – Semplice circuito di protezione del LED

Indicando con  $V_d$  la tensione diretta alla quale lavora il diodo (che in pratica coincide con la tensione di soglia) e con  $i_d$  la corrente che vi scorre in esso, si ricava dal circuito

$$R_s = \frac{V_b - V_d}{i_d} . \quad (9.3)$$

Imponendo il valore di  $i_d$  desiderato, si ricava immediatamente il valore della resistenza di protezione  $R_s$ .

Disponendo dei LED sotto forma di piccoli segmenti o di punti in modo opportuno si ottengono dei display nei quali ciascuno dei diodi può essere acceso individualmente, in modo da fare apparire numeri e lettere. Si possono così realizzare *display a 7 segmenti*, *display a 16 segmenti*, *display a punti (o a matrice)*. Questi sono riportati in Fig. 9.7.



**Fig. 9.7** – a) b) c) Display a 7 segmenti. d) Connessioni interne ad anodo comune. e) Connessioni interne a catodo comune. f) Display a 16 segmenti in grado di riprodurre qualsiasi carattere alfanumerico. g) Display multipli a punti

**9.2 LED bianchi e di potenza: lampade a LED**

I valori di corrente riportati nel precedente paragrafo si riferiscono a LED utilizzati per display o come indicatori. I colori disponibili per queste applicazioni sono tipicamente rosso, giallo e verde. I primi LED di potenza, in grado cioè di lavorare con correnti di centinaia di mA – e talvolta di superare anche 1 A – vennero sviluppati nei primi anni '80 del secolo scorso per applicazioni di tipo *automotive*. Essi sono limitati al colore rosso in quanto il materiale utilizzato è l'AlGaAs (cresciuto su substrati di GaAs) che ha una gap compresa tra 1,4 eV e 2 eV (dipendente dalla quantità di



alluminio e di gallio); dalla (9.2) si ricava il relativo intervallo di lunghezze d'onda: 620-885 nm, che corrisponde alla regione compresa tra il rosso e il vicino infrarosso. Successivamente, ad opera dell'HP e della Philips Lumileds negli anni '90 vennero sviluppati i LED in AlGaInP. Questa lega quaternaria permette di raggiungere lunghezze d'onda più corte (sino al verde), di ottenere elevate potenze d'uscita ( $> 1$  W) e non presenta alcuni problemi tecnologici che invece affliggevano l'AlGaAs. Attualmente i LED di potenza rossi, gialli e (talvolta) verdi vengono realizzati con tale materiale.

Il “grande assente” tra i colori spettrali dei LED citati è il blu. In effetti i LED blu iniziarono ad essere ampiamente disponibili in commercio verso la fine degli anni '90. Questi LED utilizzano un ulteriore materiale: il nitruro di gallio (GaN) cresciuto su substrati di zaffiro. In realtà il GaN avendo una gap piuttosto ampia (3,2 eV) emetterebbe piuttosto nel vicino ultravioletto, ma sostituendo atomi di gallio con atomi di indio (InGaN) è possibile ottenere il violetto, il blu e anche il verde, sebbene quest'ultimo con minore efficienza.

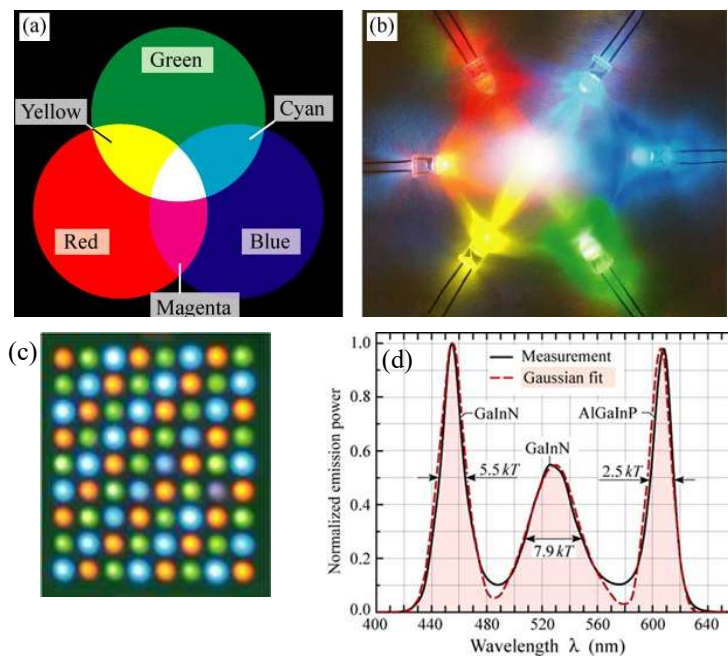
L'invenzione dei LED blu è uno dei traguardi scientifici fondamentali della fine del secolo scorso: infatti i tre scienziati responsabili della sua invenzione (*Shuji Nakamura, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano*) sono stati insigniti del Premio Nobel per la Fisica nel 2014 (cfr. Fig. 9.8). La produzione a larga scala di sorgenti LED blu ad alta potenza non ha reso solo possibile lo sviluppo di ulteriori tecnologie, quale la *Blu-ray*, o lo sviluppo di display multicolore ad alta efficienza per tablet e smartphone, ma ha, a sua volta, permesso la realizzazione dei LED bianchi per l'illuminazione domestica ed esterna.



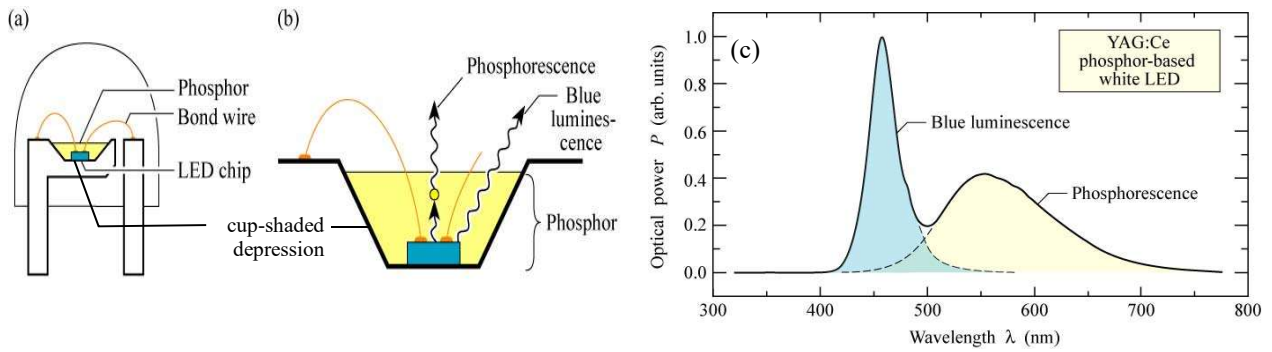
**Fig. 9.8** – *Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura (da sinistra verso destra) durante la cerimonia di consegna del Premio Nobel a Stoccolma (Svezia) il 10 dicembre 2014*



Esistono principalmente due modi per generare luce bianca tramite LED: il primo (più costoso e, in genere, limitato ad applicazioni particolari) consiste nell'effettuare la sintesi additiva di tre colori complementari – rosso, verde e blu (RGB) – utilizzando tre (talvolta quattro) LED di colore diverso (*multichip LED* - cfr. Fig. 9.9); il secondo approccio, che prende il nome di *frequency down-conversion*, consiste invece nell'utilizzare la luce prodotta da un LED blu per “pompare” (ossia irradiare) uno strato sottile di un materiale fluorescente nel giallo, che viene genericamente indicato come fosforo (*phosphor-conversion LED* - cfr. Fig. 9.10). La radiazione blu non viene completamente assorbita dal fosforo ma in parte fuoriesce e giunge all'osservatore insieme alla luce gialla prodotta dal fosforo. È curioso notare che, mentre l'orecchio umano è in grado di distinguere le diverse frequenze (ad esempio, le note di un accordo), l'occhio non ha questa capacità ma effettua una semplice integrazione della componente blu e di quella gialla, comunicando al cervello la sensazione di una luce bianca. In pratica la luce blu è “convertita” ad una frequenza più bassa (una lunghezza d'onda più alta), cioè quella del giallo. Generalmente, i fosfori più utilizzati sono basati su terre rare: il più utilizzato è un granato di ittrio e alluminio, drogato con Cerio (Ce:YAG). Lo stesso tipo di conversione luminosa si può ottenere utilizzando un LED che emette nell'ultravioletto e che pompa due o tre tipi di fosfori che emettono a differenti lunghezze d'onda (differenti colori).



**Fig. 9.9** – a) Principio della sintesi additiva. b) Sintesi additiva con LED di colore diverso. c) Multichip RGB LED a 72 LED. d) Spettro di emissione di un multichip LED: i LED blu e verde sono realizzati in InGaN, mentre quello rosso in AlGaInP: La luce prodotta appare bianca

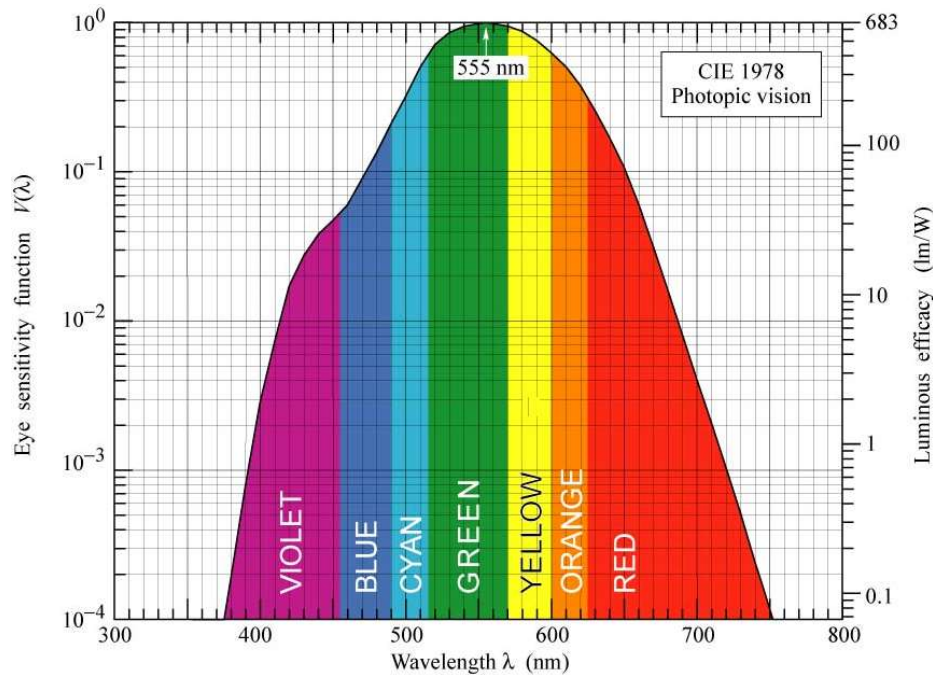


**Fig. 9.10** – a) Vista interna di un phosphor-conversion LED. b) Particolare dell'alloggio all'interno del quale viene sistemato il chip e il fosforo. c) Spettro di emissione di un phosphor-conversion LED a Ce:YAG. La luce bianca prodotta è la composizione degli spettri del LED blu di pompa e della radiazione emessa dal fosforo: l'intensità di quest'ultima dipende dalla concentrazione di fosforo e dal suo spessore

L'applicazione più tipica dei LED bianchi sono le lampade a LED per l'illuminazione. Per indicare la potenza ottica emessa dalla lampada i costruttori utilizzano un'unità di misura diversa dal watt, che tiene conto della sensibilità dell'occhio umano alle diverse frequenze. Quest'unità di misura, (nota a chiunque abbia almeno una volta letto i dati indicati sulla confezione di una lampada...senza capirci un granché), è il *lumen* (lm). In particolare, il lumen è l'unità di misura del *flusso luminoso*  $\Phi_{lum}$  che è definito dalla formula:

$$\phi_{lum} = 683 \int_{\lambda} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (9.4)$$

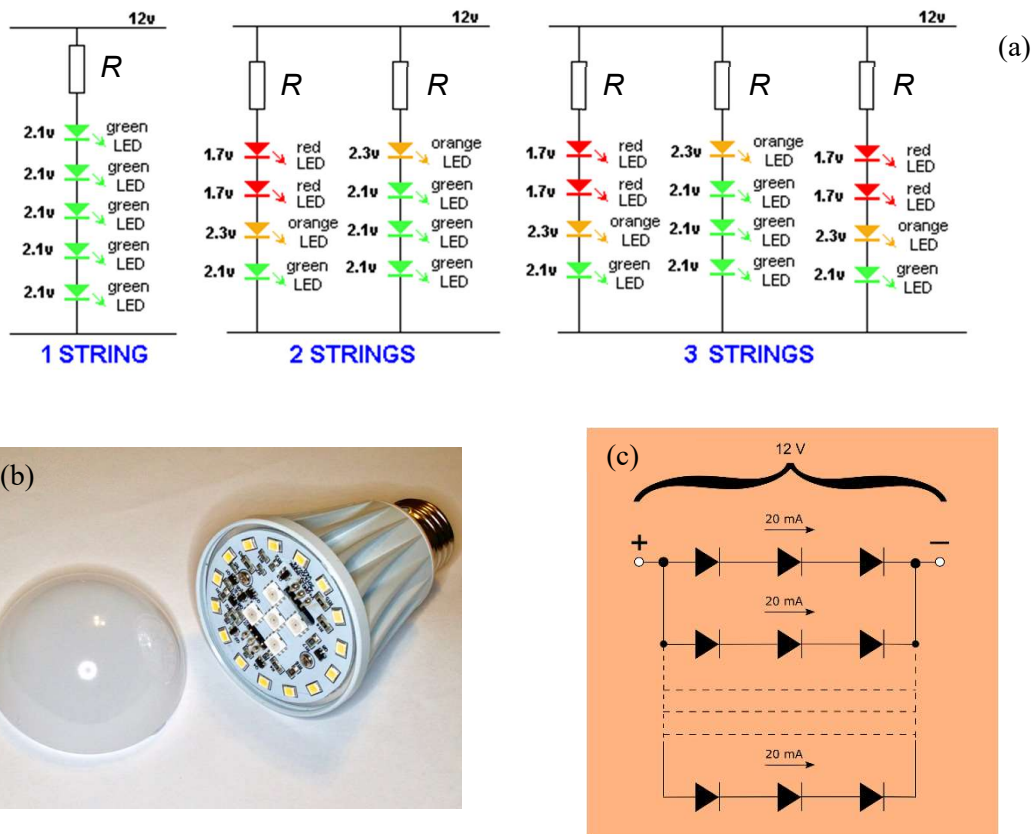
dove  $P(\lambda)$  è la densità spettrale di potenza e  $V(\lambda)$  è la curva di sensibilità dell'occhio umano definita in Fig. 9.11. L'intervallo di integrazione  $\lambda$  è la regione del visibile, dove è definita la curva di sensibilità dell'occhio umano. Tale curva mostra che l'occhio ha il suo massimo di sensibilità nel giallo-verde a 555 nm (valore = 1), mentre andando verso il blu e il rosso la sensibilità diminuisce drasticamente sino ad annullarsi. Pertanto, mentre il semplice integrale  $\int_{\lambda} P(\lambda)d\lambda$  fornisce semplicemente la potenza ottica, in quanto area sottesa dalla curva  $P(\lambda)$  nel piano  $P$ - $\lambda$ , la (9.4) calcola l'area "pesandola" in base alla diversa sensibilità dell'occhio umano con le diverse lunghezze d'onda. In pratica, a parità di potenza ottica emessa, una radiazione di colore verde emetterà più lumen rispetto ad una rossa o ad una blu. Nel caso di un LED che emetta solo nell'ultravioletto o nell'infrarosso, il suo flusso luminoso sarà sempre pari a zero lumen, qualunque sia la potenza ottica emessa, in quanto l'occhio non è sensibile a tali lunghezze d'onda (e infatti la  $V(\lambda)$  è pari a zero in tali regioni).



**Fig. 9.11** – Curva di sensibilità dell'occhio umano  $V(\lambda)$  definita dalla CIE – Commission Internationale de l'Éclairage – nel 1978

In generale una lampada LED è fabbricata connettendo in parallelo, un certo numero di diodi posti in serie tra loro, come riportato in Fig. 9.12a. L'alimentatore è posto sulla base della lampada stessa, cosicché essa può essere tranquillamente inserita nei portalampade connessi alla rete a 220 V. I LED sono disposti sulla base della lampada e chiusi da un bulbo in plastica trasparente (Fig. 9.12b). Ovviamente, più alta è la potenza emessa dal singolo LED, minore sarà il numero di LED da interconnettere tra loro per ottenere il flusso luminoso voluto. Nonostante ciò, il punto di forza della tecnologia LED per l'illuminazione è il consumo estremamente più basso rispetto alle tecnologie tradizionali basate su filamento ad incandescenza (lampade alogene comprese). Un semplice calcolo può essere... "illuminante". Si consideri, a titolo di esempio, una lampada a incandescenza da 100 W, 220 V: essa fornisce un flusso luminoso di 1200 lm, mentre un singolo LED bianco di bassa potenza a 20 mA fornisce approssimativamente 5 lm. In una lampada realizzata con tali LED, varie serie di tre LED ciascuna saranno poste in parallelo come in Fig. 9.12c. Poiché la tensione di polarizzazione diretta di ognuno di questi LED è all'incirca compresa tra 3,2 e 3,5 V (ovviamente è la stessa di un LED blu), la lampada potrà essere alimentata agevolmente con un alimentatore da 12 V. Per produrre lo stesso flusso luminoso (1200 lm) di una lampada a incandescenza da 100 W, saranno necessari  $1200/5 = 240$  LED, il che significa 80 serie di tre LED messi in parallelo. Poiché ogni serie consuma 20 mA (la corrente è comune ad ognuno dei tre LED in una connessione in serie), la corrente totale

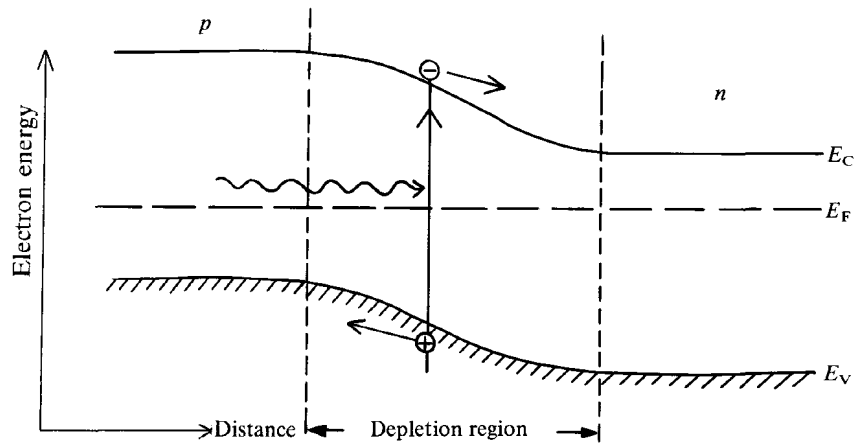
assorbita dalla lampada sarà  $80 \times 20 = 1600 \text{ mA} = 1,6 \text{ A}$  che, in termini di potenza elettrica, è equivalente a  $12 \text{ V} \times 1600 \text{ mA} = 19,2 \text{ W}$ . Ciò equivale ad un risparmio di circa 80% di energia rispetto ad una lampada ad incandescenza!



**Fig. 9.12** – (a) Connessione tra LED in una lampada a LED; (b) foto di una lampada a LED aperta; (c) esempio per il calcolo della potenza dissipata da una lampada

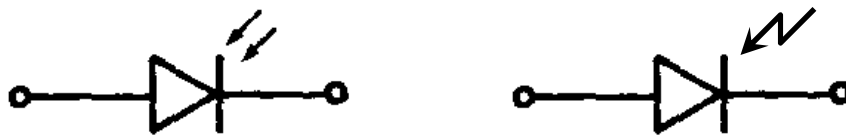
### 9.3 Fotodiodi

Supponiamo di avere una giunzione *p-n* e di polarizzarla inversamente: come è noto, la (debole) corrente inversa che ivi scorre è dovuta al flusso dei portatori minoritari. L'esistenza di tali portatori è dovuta all'energia termica che continua a scalzare elettroni di valenza dalla loro orbita e a mandarli nella banda di conduzione. Se adesso si irradia la giunzione (e in particolare, la zona svuotata) con un fascio luminoso, questi produce lo stesso effetto o, in altri termini, crea una coppia elettrone-lacuna. Dentro la regione di svuotamento, questa coppia è immediatamente separata dal campo elettrico che accelera l'elettrone verso la zona *n* e la lacuna verso la zona *p*, come mostrato in Fig. 9.13 creando una *fotocorrente*. Le cariche prodotte dalla radiazione fuori dalla zona di svuotamento tendono invece a ricombinarsi e, pertanto, non contribuiscono alla fotocorrente.



**Fig. 9.13** – Generazione e separazione di una coppia elettrone-lacuna in seguito all'irradiazione con energia luminosa della zona svuotata di una giunzione p-n

In conclusione, la quantità di luce che incide sulla giunzione “comanda” la corrente inversa del diodo. Un dispositivo funzionante secondo questo principio prende il nome di *fotodiodo*; i suoi simboli circuitali sono mostrati in Fig. 9.14.



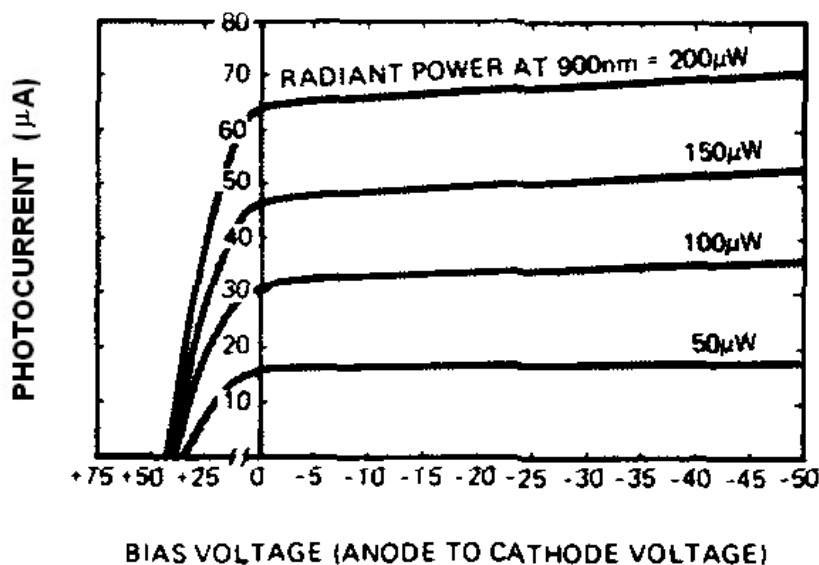
**Fig. 9.14** – Simboli circuitali del fotodiodo

Il fotodiodo per poter funzionare in modo corretto deve essere sempre polarizzato *inversamente* (o, al limite, non polarizzato). La corrente inversa aumenta con l'intensità luminosa e, tipicamente, è dell'ordine di qualche  $\mu\text{A}$ . Se il fotodiodo non è irradiato, esso lascia passare lo stesso una corrente ancora più debole, detta *corrente di buio* (*dark current*), dovuta al flusso di portatori minoritari generati termicamente. Questa corrente “termica”, dell'ordine dei nA, è sempre presente e si aggiunge al segnale utile (cioè quello dovuto all'illuminazione). Poiché in molti casi essa può creare dei problemi, si comprende bene il motivo per il quale molti sistemi di rivelazione – soprattutto militari, funzionanti nell'infrarosso – basati su fotodiodi, vengano raffreddati con azoto liquido.

I contenitori dei fotodiodo hanno ovviamente una “finestra” trasparente per poter fare entrare la luce; spesso essa è costituita da una vera e propria lente che collima la radiazione sulla giunzione.

Per evitare la ricombinazione dei portatori la giunzione dovrebbe essere il più vicino possibile alla superficie e la zona di svuotamento la più larga possibile. Quest'ultima condizione può essere efficacemente ottenuta con dei fotodiodi *pin*, dove cioè le regioni drogate *p* e *n* della giunzione sono separate da una regione di semiconduttore *intrinseco*. In questo caso, il tempo di vita dei portatori nel semiconduttore intrinseco è molto alto e la regione di svuotamento risulta più ampia.

Curve tipiche di *fotocorrente*, ossia di corrente generata tramite illuminazione della giunzione sono mostrate in Fig. 9.15. Esse sono relative ad un fotodiodo *pin* e mostrano come siano sufficienti pochi volt (in polarizzazione inversa) per ottenere una fotocorrente. Questa è pressoché indipendente dalla tensione inversa, mentre dipende dall'intensità d'illuminazione.

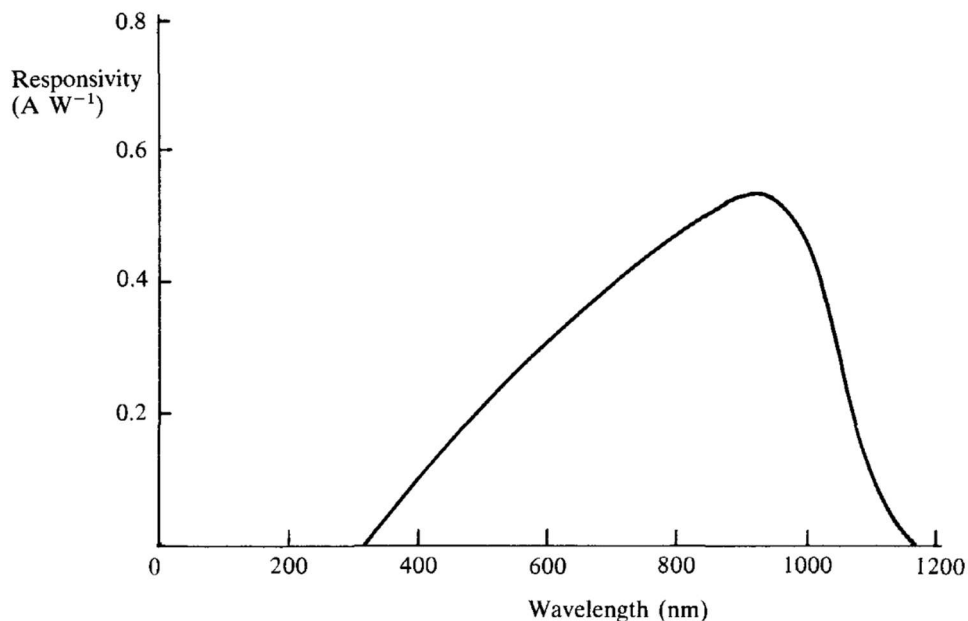


**Fig. 9.15** – Fotocorrente in funzione della tensione inversa e della potenza radiante incidente

Il materiale di uso più comune per la fabbricazione di fotodiodi è il *silicio*. Avendo una gap di 1,1 eV, esso permette di realizzare fotodiodi con elevate efficienze, in particolare con lunghezze d'onda comprese tra 800 e 900 nm. La tipica curva di risposta di un fotodiodo al silicio è mostrata in Fig. 9.16. Sull'asse delle ordinate è riportata la cosiddetta *responsivity*, misurata in A/W, che fornisce un'indicazione quantitativa della risposta del diodo, ossia quanti ampere di corrente vengono forniti per ogni watt di potenza irradiata. Responsabile del taglio alle alte lunghezze d'onda della curva di *responsivity* è ovviamente la gap del silicio: infatti per potere scalzare un elettrone di valenza dalla sua orbita e portarlo in banda di conduzione è necessario fornire un'energia pari almeno a quella della gap. Il taglio alle basse lunghezze d'onda è invece causato dal fatto che le radiazioni a più alte energie vengono assorbite solo dalla superficie del semiconduttore; quest'ultima, ricca di difetti, è sede di



“trappole” che catturano le cariche generate, le quali pertanto si ricombinano prima di essere spazzate dal campo elettrico inverso applicato.



**Fig. 9.16** – Tipica curva di responsivity per un fotodiode al silicio

Grazie a *matrici di fotodiodi* è possibile convertire un’immagine ottica in un segnale elettrico. Le moderne telecamere e le macchine fotografiche digitali utilizzano matrici di fotodiodi, realizzati con una particolare struttura detta *CCD (Charge-Coupled Device)* al posto della pellicola fotografica. Per avere una buona risoluzione è importante massimizzare il numero di dispositivi per unità di superficie, ossia ridurre il più possibile le dimensioni.

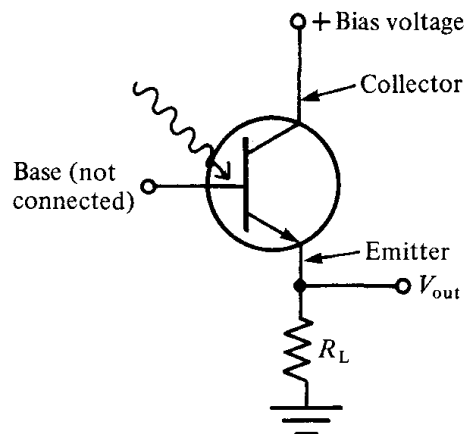
Si badi, infine, a non confondere i fotodiodi con le *fotoresistenze* (par. 9.5); queste ultime fanno anch’esse parte della categoria dei *fotorivelatori*, tuttavia a differenza dei fotodiodi che forniscono una corrente costante se illuminati, le fotoresistenze variano la loro resistenza con l’illuminazione. Esse hanno tempi di risposta assai più lenti rispetto a quelli dei fotodiodi; inoltre per la loro fabbricazione si utilizzano altri tipi di materiali, come il CdS, il CdSe, il HgCdTe.

#### 9.4 Fototransistor

Un *fototransistor* è fabbricato essenzialmente allo stesso modo di un normale BJT. La differenza è che la regione di base può essere esposta ad una radiazione incidente. Pertanto, come in un fotodiode, il contenitore è provvisto di una lente trasparente che permette alla base di essere illuminata. Normalmente, la base è lasciata flottante ma in alcuni circuiti può anche essere connessa esternamente.

Il funzionamento del fototransistor è simile a quello del fotodiode, ma la corrente che in questo caso ne risulta è molto più elevata di quella di un fotodiode, in quanto subisce l'effetto moltiplicativo tipico del transistor. Infatti, polarizzando il transistor in modo che la giunzione CB risulti polarizzata inversamente, la corrente d'uscita che scorre dal collettore verso l'emettitore (in un dispositivo *npn*) sarà data dalla corrente di base  $i_b$  (più la corrente inversa di origine termica dovuta alla polarizzazione inversa della giunzione CB) moltiplicata per il guadagno del transistor  $\beta$ . Se consideriamo che  $i_b$  è una fotocorrente generata nella regione di base, ciò vuol dire che la corrente d'uscita  $i_e$  è circa  $\beta$  volte più grande di quella di un fotodiode.

In Fig. 9.17 è riportato il simbolo circuitale di un *fototransistor npn*, inserito in un circuito tipico di funzionamento. La luce assorbita dalla base genera una corrente di emettitore che scorre sulla resistenza di carico  $R_L$  e produce una caduta di tensione ( $V_{out}$ ) su essa.



**Fig. 9.17** – Simbolo circuitale di un *fototransistor npn* e sue connessioni esterne

La *sensibilità* del dispositivo si può regolare connettendo una resistenza variabile tra base e massa, ma abitualmente si lascia la base flottante per massimizzare la sensibilità alla luce.

La contropartita di una migliore sensibilità è una minore velocità. I fototransistor sono più sensibili dei fotodiode, ma i loro tempi di risposta sono decisamente più lenti, a causa della costante di tempo associata alla capacità e alla resistenza della regione di base. La corrente d'uscita tipica di un fotodiode è di qualche  $\mu\text{A}$  mentre i tempi di commutazione saturazione-interdizione sono dell'ordine di qualche ns. In un fototransistor invece, la corrente d'uscita è di qualche mA ma i tempi di commutazione sono dell'ordine dei  $\mu\text{s}$ .

### 9.5 Fotoresistenze (LDR)

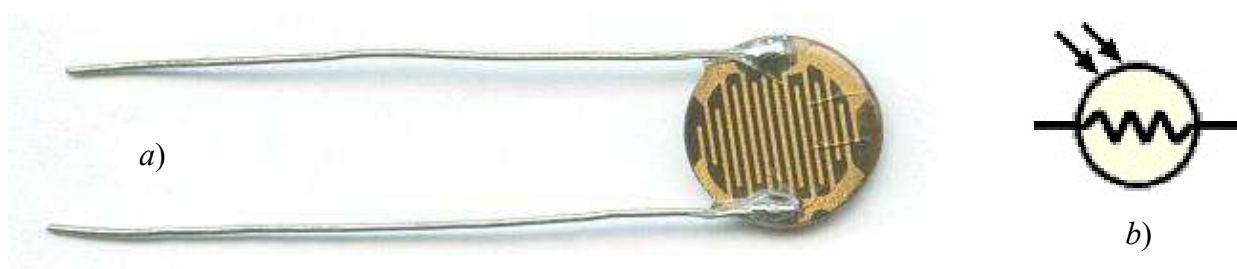
Una radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda opportuna che penetra all'interno di un cristallo semiconduttore può cedere ad esso un'energia sufficiente per fare passare alcuni elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione. Ne risulta, ovviamente, che la resistenza elettrica del semiconduttore diminuisce, grazie all'aumentata densità di elettroni liberi.

Tale fenomeno dipende:

- dal semiconduttore adoperato;
- dalla concentrazione di impurità droganti presenti all'interno del cristallo semiconduttore;
- dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Questo fenomeno fisico viene sfruttato per realizzare le *fotoresistenze*, o *LDR (Light Depending Resistors)*. Per la loro realizzazione, in genere il materiale utilizzato è un film sottile di CdS (solfuro di cadmio) che ha il massimo di sensibilità nel rosso, che viene depositato su un supporto isolante e sul quale vengono realizzati due elettrodi.

Affinché il sensore abbia una elevata sensibilità, esso deve essere in grado di catturare un numero elevato di fotoni e pertanto si tende a realizzare una superficie sufficientemente ampia. Bisogna tuttavia tenere presente che le coppie elettrone-lacuna create dalla radiazione luminosa tendono a ricombinarsi, riportando gli elettroni nella banda di valenza. Per poter sfruttare le coppie di portatori di carica occorre allora far loro percorrere una distanza relativamente breve in modo che non si abbia abbastanza tempo per la ricombinazione. Per ottenere una fotoresistenza di superficie elevata e contemporaneamente un cammino dei portatori di carica abbastanza breve, si realizzano elettrodi metallici a forma di pettine che costituiscono il giusto compromesso tecnico ai due problemi esposti (cfr. Fig. 9.18a). Il simbolo circuitale della LDR è riportato in Fig. 9.18b.



**Fig. 9.18** – Fotoresistenza: a) foto; b) simbolo circuitale

La relazione che sussiste tra la resistenza e la quantità di radiazione incidente è del tipo

$$R = A \cdot L^{-\alpha} , \quad (9.5)$$

dove  $R$  è il valore di resistenza generato dall'illuminazione,  $L$  è la quantità di radiazione incidente misurata in lux,  $A$  e  $\alpha$  sono costanti.

Si noti che questo componente è utilizzato anche per la realizzazione di *crepuscolari* (circuiti che permettono di accendere una o più luci al calare del sole).

Attenzione! Vi è sembrato che la fotoresistenza e il fotodiodo siano due dispositivi identici? Vi è sembrato male!... Risulta evidente che il primo è costituito da una semplice barretta di semiconduttore, mentre il secondo da una giunzione *p-n*; la fotoresistenza, pur polarizzata, non è in grado di erogare una corrente (vi scorre una corrente proporzionale alla tensione applicata), mentre il fotodiodo polarizzato inversamente eroga una corrente, sebbene debole.

## 9.6 Optoisolatori

Un *optoisolatore* (detto anche *fotoaccoppiatore*) contiene un LED infrarosso e un fotorivelatore (di norma, un fototransistor) efficacemente accoppiati e separati da un dielettrico trasparente che garantisca l'isolamento elettrico. La Fig. 9.19 mostra il simbolo circuitale di un optoisolatore, inserito in una tipica configurazione circuitale. Il LED viene pilotato in ON-OFF e il segnale d'uscita, prelevato sull'emettitore, risulta a sua volta impulsivo e in fase con quello d'ingresso.

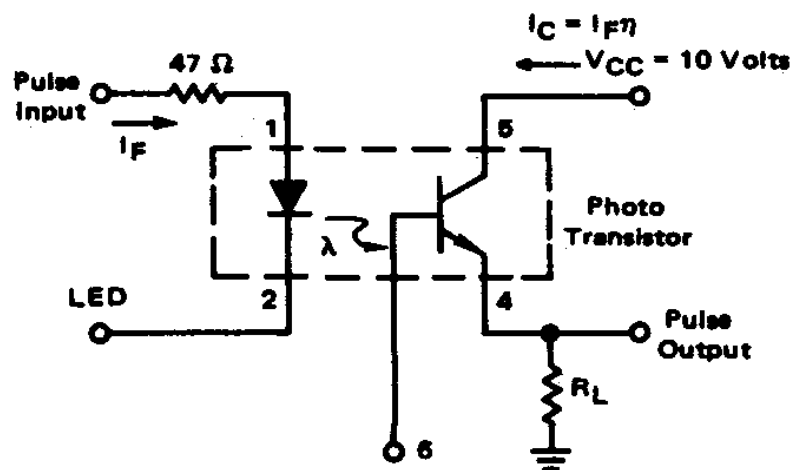


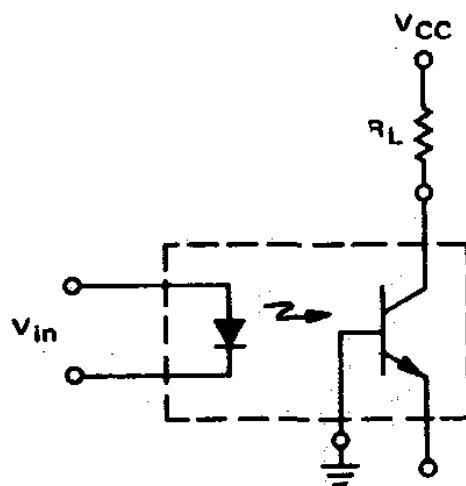
Fig. 9.19 – Optoisolatore in funzionamento ON-OFF

Un optoisolatore effettua, dunque, una conversione elettrica-ottica del segnale (tramite il LED) e successivamente una conversione ottica-elettrica (tramite il fototransistor). A questo punto, è lecito chiedersi quale sia l'utilità di un simile dispositivo visto che l'uscita sembra semplicemente replicare l'andamento del segnale d'ingresso... Il dispositivo offre l'importante vantaggio di isolare elettricamente il circuito d'uscita da quello d'ingresso, giacché il fascio luminoso è il solo contatto tra ingresso ed uscita. Un tale isolamento è molto pratico nelle applicazioni ad alta tensione dove i

potenziali dei due circuiti differiscono talvolta di diverse migliaia di volt. Le tensioni d'isolamento, (indicate con  $V_{ISO}$  nei cataloghi) vanno da 500 V a 7500 V.

L'efficienza di un optoisolatore (indicata con  $\eta$  in Fig. 9.19) nel trasferire il segnale dall'ingresso all'uscita è specificata dal parametro CTR (*current transfer ratio*), vale a dire dal rapporto tra la corrente d'uscita  $I_C$  (che scorre sul collettore) e quella d'ingresso  $I_F$  (che scorre sul LED); esso dipende dall'efficienza radiante del LED, dalla posizione rispettiva dei due elementi, generatore e rivelatore, e dall'efficienza stessa del rivelatore. Normalmente, il CTR varia tra il 20% e il 50%.

Sebbene la base del fototransistor sia lasciata aperta, in genere tale terminale è sempre accessibile: ciò consente di utilizzare il fototransistor come fotodiode sfruttando la sua giunzione CB, semplicemente connettendo la base a massa, come in Fig. 9.20. Il CTR di questa configurazione è molto più basso ( $< 1\%$ ), tuttavia essa offre l'indubbio vantaggio di presentare tempi di risposta più rapidi, compresi tra 50 e 100 ns (contro i  $2 \div 5 \mu s$  della configurazione diodo-fototransistor).



**Fig. 9.20** – Connessione circuitale per l'impiego dell'optoisolatore come diodo-diode

