

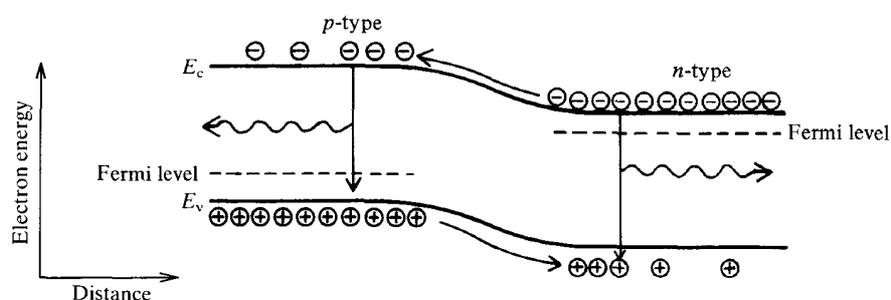
## CAPITOLO 8

### 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.

#### 8.1 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. 8.1.



**Fig. 8.1** – *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:

$$E_C - E_V = hc/\lambda \quad (8.1)$$

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) e  $\lambda$  è la *lunghezza d'onda* della radiazione emessa. Sviluppando i calcoli, la (8.1) si trasforma nella seguente formula di uso più pratico

$$E_r [\text{eV}] = E_G = \frac{1,24}{\lambda [\mu\text{m}]} \quad (8.2)$$

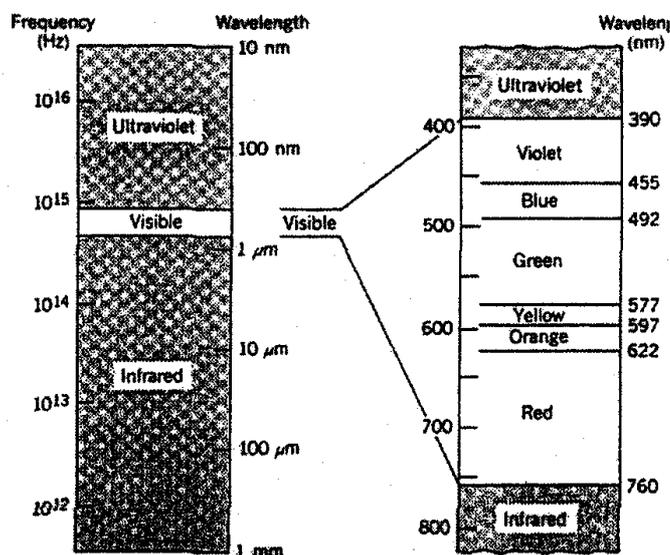
Questa formula esprime il fatto che la luce emessa, in quanto radiazione elettromagnetica, ha una sua lunghezza d'onda  $\lambda$  (e una sua frequenza  $f$ , legata dalla relazione  $f = c/\lambda$ ) e ad essa si può associare un'energia  $E_r$  tanto più elevata, quanto più piccola è la sua lunghezza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

La Tab. 8.1 riporta la suddivisione dello spettro elettromagnetico; è inoltre riportata l'energia relativa alle lunghezze d'onda corrispondenti.

**Tab. 8.1** – *Spettro elettromagnetico*

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

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. 8.2, insieme alle regioni dell'infrarosso e dell'ultravioletto.



**Fig. 8.2** – 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 (8.2), 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).

I diodi bianchi sfruttano il fenomeno della *fluorescenza* di alcuni materiali a base di *terre rare* (granati di ittrio e alluminio, drogati con Cerio). Essi sono costituiti da LED blu che irradiano uno strato sottile di tali materiali; questi ultimi emettono nel giallo, se irradiati da un fascio luminoso avente lunghezza d'onda opportuna (blu o ultravioletto): tale fenomeno prende il nome di *conversione luminosa*. Non tutta la luce blu viene assorbita per effettuare la conversione luminosa

nel giallo, pertanto dal dispositivo provengono due fasci di luce, uno blu ed uno giallo insieme. All'occhio di un osservatore i due fasci luminosi appaiono come un unico fascio di colore bianco.

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. 8.3.

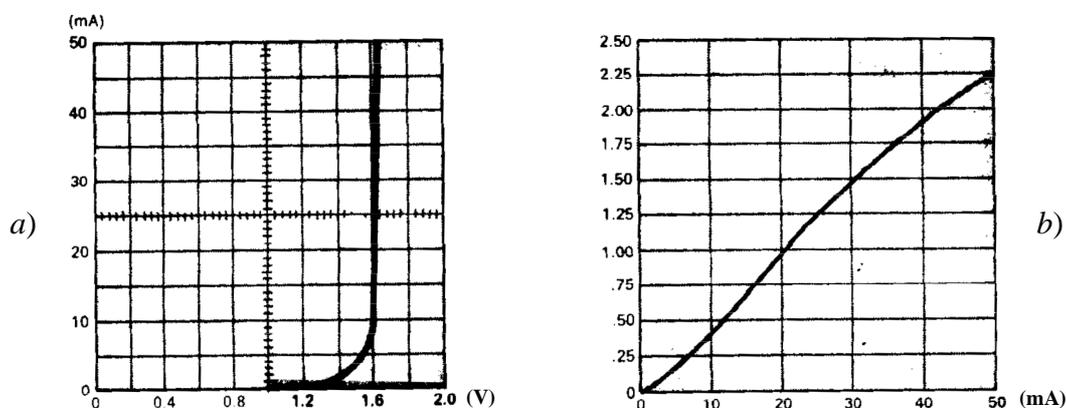


**Fig. 8.3** – Simboli circuitali del LED

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.

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, solo 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).

Curve tipiche di un LED sono quelle riportate sotto in Fig. 8.4.



**Fig. 8.4** – a) Corrente diretta in funzione della tensione. b) Intensità luminosa relativa (normalizzata al valore di 20 mA) in funzione della corrente diretta

La Fig. 8.4a 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. 8.4b 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. 8.5.

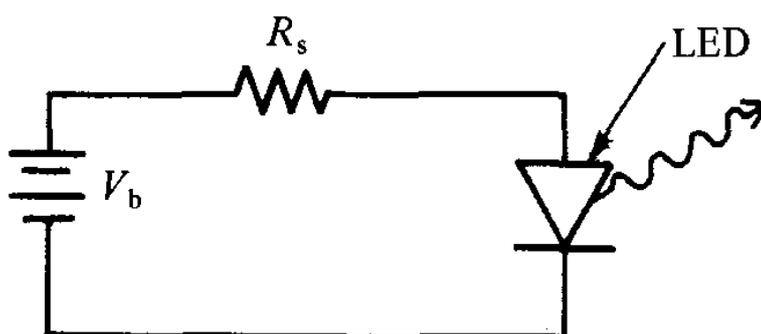


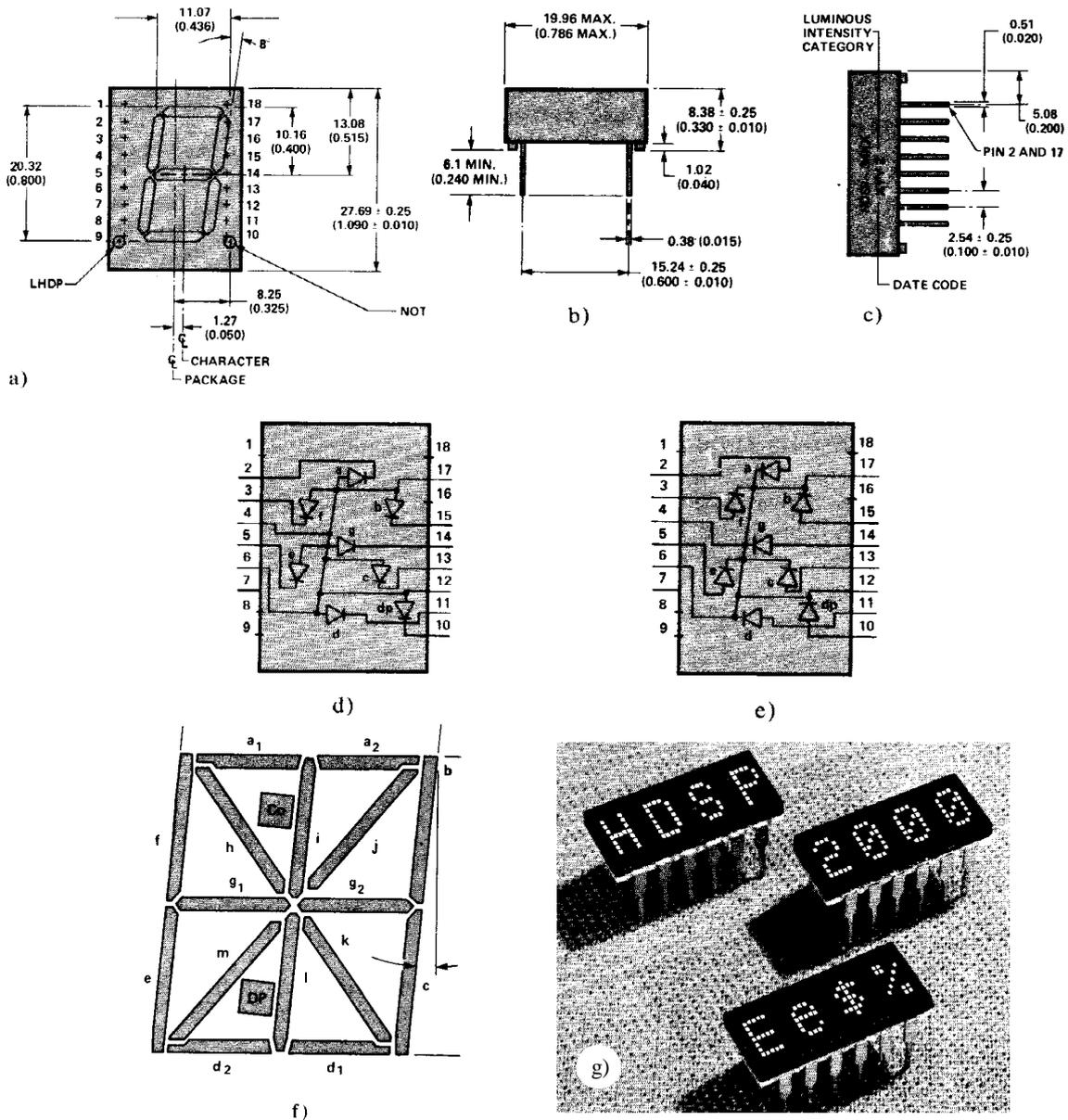
Fig. 8.5 – Semplice circuito di protezione del LED

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

$$R_s = \frac{V_b - V_d}{i_d} . \quad (8.3)$$

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. 8.6.

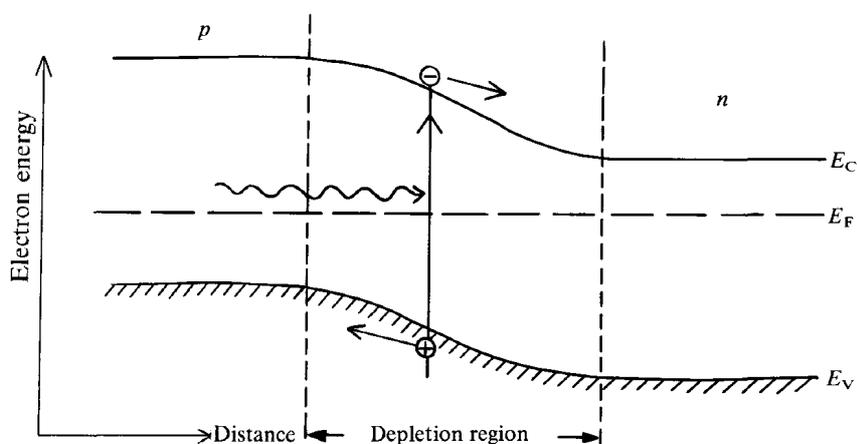


**Fig. 8.6** – a) b) c) *Display a 7 segmenti.* d) *Connessioni interne ad anodo comune.*  
 e) *Connessioni interne a catodo comune.* f) *Display a 16 segmenti in grado di riprodurre qualsiasi carattere alfanumerico.* g) *Display multipli a punti*

## 8.2 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. 8.7.



**Fig. 8.7** – 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. 8.8.



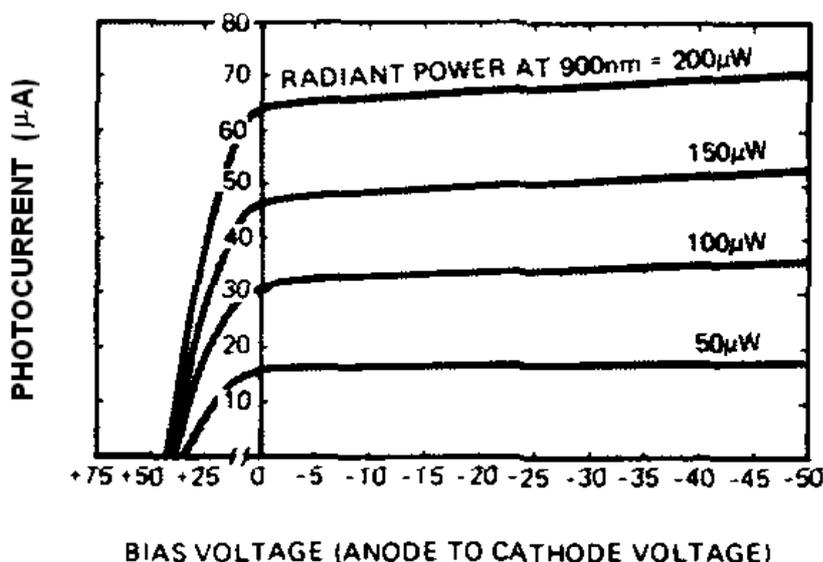
**Fig. 8.8** – Simboli circuitali del fotodiodo

Il fotodiodo per poter funzionare in modo corretto deve essere sempre polarizzato *inversamente*. La corrente inversa aumenta con l'intensità luminosa e, tipicamente, è dell'ordine di qualche  $\mu A$ . 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 fotodiodi 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.

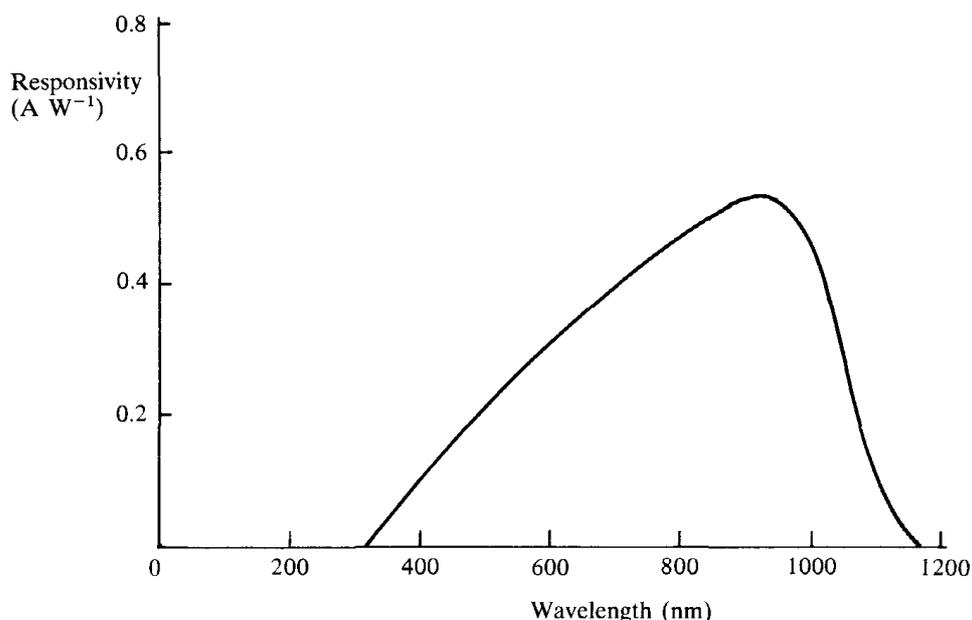
Per evitare la ricombinazione dei portatori la giunzione dovrebbe essere il più vicino possibile alla superficie e la zona di svuotamento la più larga possibile. Quest’ultima condizione può essere efficacemente ottenuta con dei fotodiodi *pin*, dove cioè le regioni drogate *p* e *n* della giunzione sono 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. 8.9. 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. 8.9** – 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. 8.10.



**Fig. 8.10** – Tipica curva di responsivity per un fotodiode al silicio

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.

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 ridurne il più possibile le dimensioni.

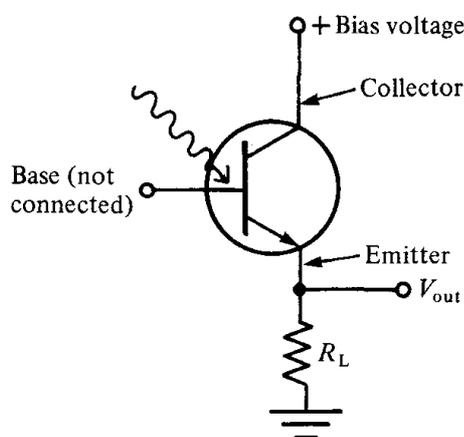
Si badi, infine, a non confondere i fotodiodi con le *fotoresistenze*; queste ultime fanno anch'esse parte della categoria dei *fotorivelatori*, tuttavia a differenza dei fotodiodi che forniscono una corrente costante se illuminati, le fotoresistenze variano la loro resistenza con l'illuminazione. Esse 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.

### 8.3 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. 8.11 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. 8.11** – 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  $\mu\text{s}$ .

#### 8.4 Fotoresistenze

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. 8.12a)



**Fig. 8.12** – *Fotoresistenza: a) foto; b) simbolo circuitale*

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

$$R = A \cdot L^{-\alpha} , \quad (8.4)$$

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.

## 8.5 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. 8.13 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.

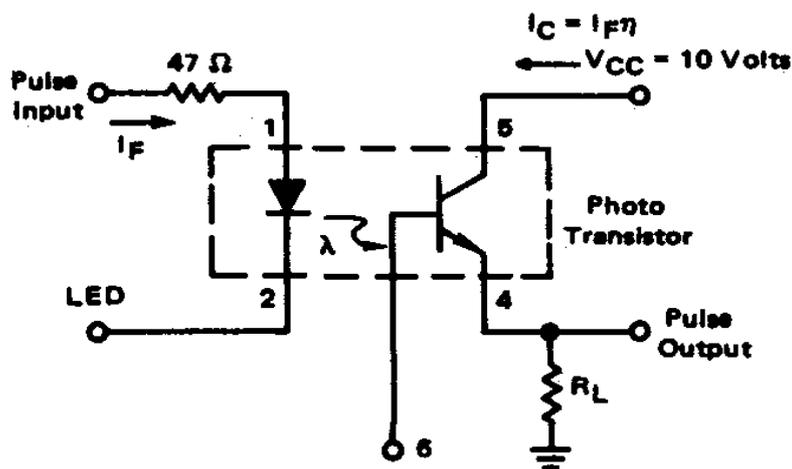


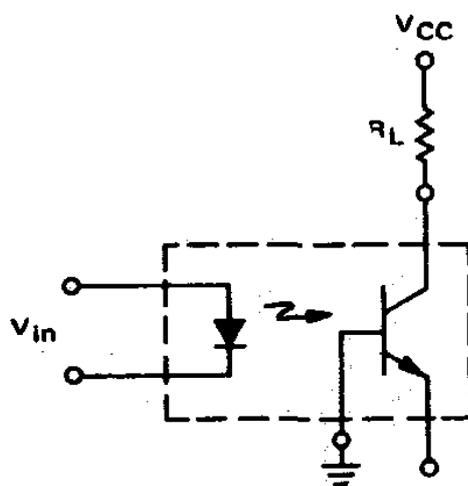
Fig. 8.13 – Optoisolatore in funzionamento ON-OFF

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. 8.13) 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. 8.14. Sebbene il CTR di questa configurazione sia molto più basso ( $< 1\%$ ), 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. 8.14** – Connessione circuitale per l'impiego dell'optoisolatore come diodo-diode

## 8.6 Display a cristalli liquidi (LCD)

Contrariamente ai LED, i *display a cristalli liquidi*, altrimenti detti *LCD* (*Liquid Crystal Displays*), non producono alcuna luce: le cifre appaiono scure su fondo chiaro a condizione di osservarle sotto la luce ambiente.

L'interesse principale di questo tipo di display risiede nel suo *consumo* di corrente *praticamente nullo*. Pertanto esso trova largo impiego in tutti quei dispositivi miniaturizzati, alimentati con pile di bassa capacità: orologi, calcolatrici tascabili, ecc.

Il principio fisico sul quale si basa il funzionamento degli LCD è quello della *polarizzazione della luce*, attraverso i *cristalli liquidi*. Apriamo una piccola parentesi per spiegare cosa si intende per *luce polarizzata*. La luce è un'onda elettromagnetica e, come tale, è costituita da un campo elettrico e uno magnetico i cui vettori  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  sono disposti perpendicolarmente l'uno rispetto all'altro (e rispetto alla direzione di propagazione della luce). I moduli di questi vettori non sono costanti ma variano sinusoidalmente a delle frequenze date da  $c/\lambda$  (corrispondenti a  $375 \cdot 10^{12}$  Hz per la luce rossa e  $750 \cdot 10^{12}$  Hz per la luce violetta). Si dice che la luce è *polarizzata* se i vettori  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$ , benché variabili in modulo, mantengono una direzione *fissa*. In realtà, la luce naturale cambia costantemente e aleatoriamente la direzione dei suddetti vettori (sebbene, istante per istante, essi risultino sempre perpendicolari tra loro e rispetto alla direzione di propagazione della luce): essa *non è polarizzata*. Se si intercetta la luce naturale attraverso un *polarizzatore* (come il vetro degli occhiali da sole di tipo polaroid), in questo caso passano soltanto le componenti dei vettori incidenti lungo una direzione fissa, legata a quella del polarizzatore e che prende il nome di *direzione di polarizzazione*. È chiaro che se a valle del primo polarizzatore si interpone un secondo polarizzatore, la cui direzione di polarizzazione è ortogonale a quella del primo, alcuna luce può uscire dal sistema.

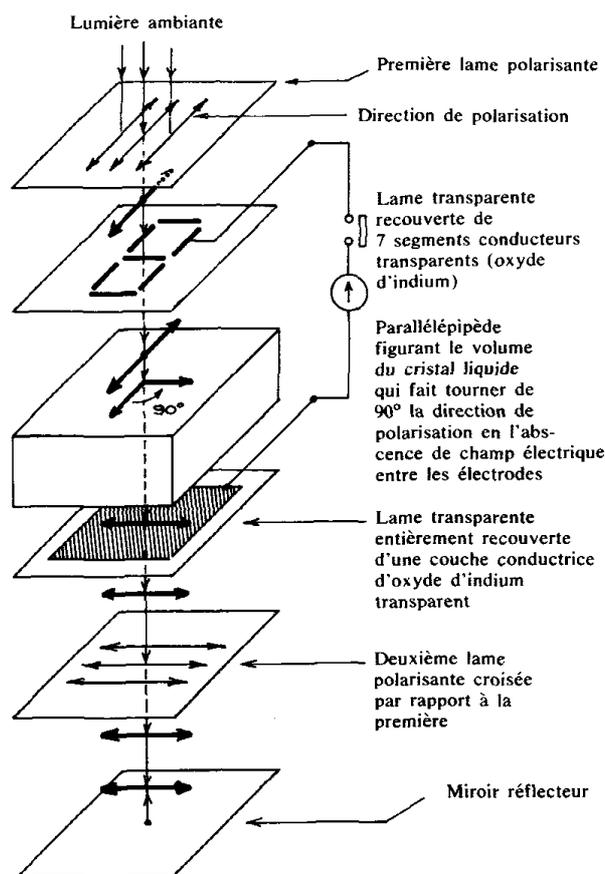
Resta adesso da esaminare cosa si intende per “cristalli liquidi”. Essi sono un prodotto della chimica organica che possiede le proprietà ottiche dei cristalli solidi sebbene siano liquidi. Essi sono formati da molecole allungate, suscettibili ad orientarsi secondo la direzione di un qualsiasi campo elettrico applicato. In assenza di campo elettrico esterno, queste molecole si orientano aleatoriamente in tutte le direzioni dello spazio. In questo stato, i cristalli liquidi acquistano una proprietà importante: *essi fanno ruotare la direzione di polarizzazione della luce incidente di un angolo che dipende dallo spessore del liquido attraversato*. In un display a cristalli liquidi, questo spessore è calcolato in maniera tale che l'angolo di rotazione risulti esattamente pari a  $90^\circ$ .

Un LCD è formato da una cavità riempita di cristalli liquidi, di cui il fondo e il coperchio sono delle lamelle di vetro ricoperte di *elettrodi conduttori trasparenti* in ITO (ossido di indio e stagno, in inglese *indium-tin oxide*). Lo schema di principio è mostrato in Fig. 8.15.

Mentre l'elettrodo di fondo è unico (e interamente ricoperto di un film di ITO), i diversi elettrodi del coperchio hanno la forma dei bastoncini e dei punti che generano le cifre e le lettere del display. Ogni elettrodo è provvisto di un terminale, che può essere connesso ad una sorgente di tensione. Da una parte e dall'altra delle due lamelle a contatto col liquido, sono disposti due

polarizzatori *incrociati*, le cui direzioni di polarizzazione, cioè, sono perpendicolari tra loro. L'insieme è poi posto "a sandwich" tra un pannello in vetro rigido davanti e uno specchio riflettore dietro.

In Fig. 8.15 si possono osservare i diversi stati di polarizzazione della luce all'interno del sistema. Se nessuna tensione viene applicata tra gli elettrodi, i cristalli liquidi fanno ruotare la direzione di polarizzazione di  $90^\circ$ : ciò permette alla luce ambiente di arrivare sino allo specchio, di riflettersi, poi di uscire dal sistema. Il display ha allora l'aspetto di uno specchio chiaro e uniforme. Non appena una tensione è applicata tra uno dei bastoncini della matrice e l'elettrodo di fondo, il campo elettrico applicato al liquido orienta le molecole in direzione parallela a quella dei raggi luminosi; in queste condizioni, il liquido perde *localmente* la capacità di far ruotare la direzione di polarizzazione della luce, pertanto la luce ambiente non può più arrivare allo specchio sottostante (né ritornare) perché dovrebbe passare attraverso due polarizzatori incrociati. Il bastoncino sotto tensione appare allora scuro poiché la maggior parte della luce che vi arriva non viene poi riflessa.

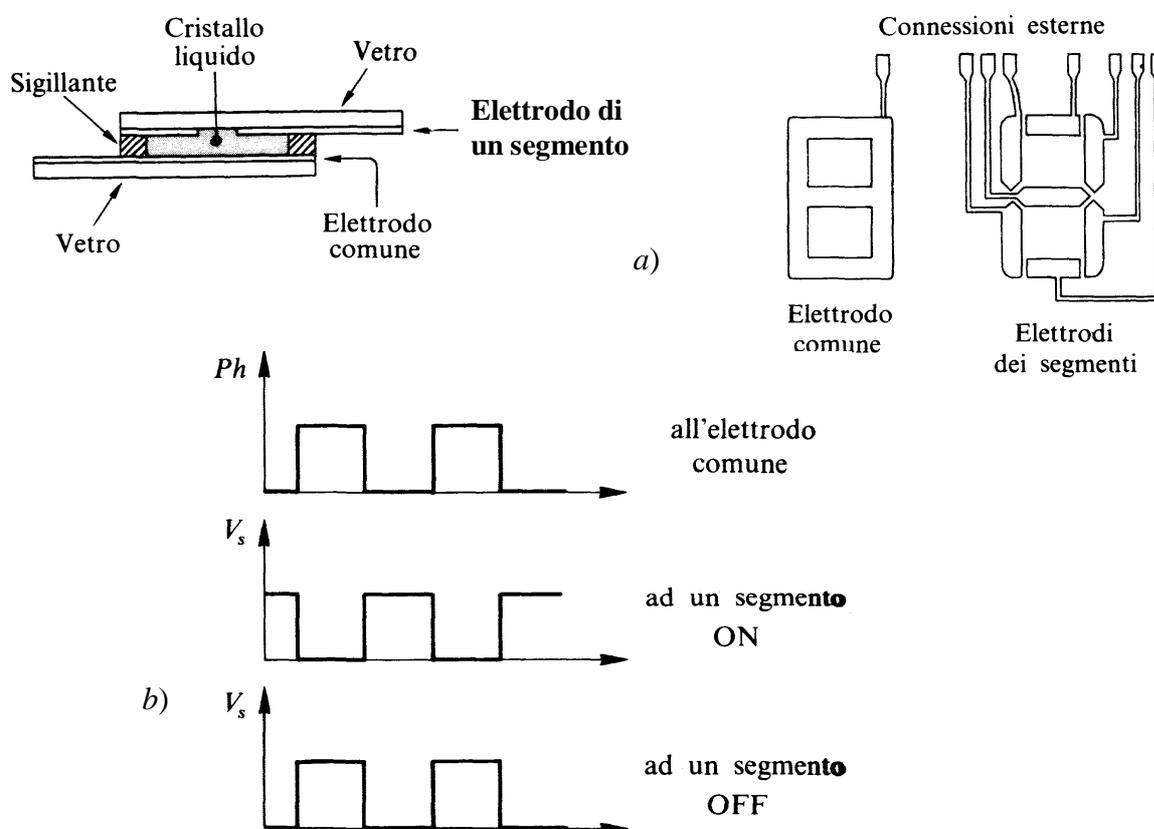


**Fig. 8.15** – Schema di principio di un display a cristalli liquidi

Gli LCD vengono fatti funzionare applicando una tensione *alternata* per prolungare il tempo di vita dei cristalli liquidi. La frequenza della tensione deve essere superiore a 30 Hz (per evitare l'effetto di sfarfallio) e in genere non supera 1 kHz. Si deve evitare di usare un multiplo della frequenza della rete elettrica (50 Hz) perché questo crea dei *battimenti* fastidiosi da guardare quando il display viene osservato sotto la luce di una lampadina alimentata dalla stessa rete.

In Fig. 8.16a è illustrata la struttura di un tale display; sono inoltre messe in evidenza le zone conduttive di un LCD a sette segmenti: la prima zona, realizzata su una delle pareti di vetro, costituisce l'elettrodo comune, le altre, realizzate sulla parete opposta e allineate con l'elettrodo comune, costituiscono gli elettrodi propri di ciascun segmento. Applicando una differenza di potenziale fra l'elettrodo comune e l'elettrodo proprio di una data zona, o segmento, si alterano le caratteristiche ottiche della zona stessa che, ad esempio, da trasparente diventa opaca e contrasta quindi con lo sfondo trasparente di colore uniforme.

Ricordiamo ancora che se fra gli elettrodi viene applicata una tensione continua il cristallo liquido subisce un deterioramento; pertanto i dispositivi LCD devono essere pilotati con tensioni alternate con frequenza compresa fra 30 Hz e qualche kHz e con valori efficaci dell'ordine di  $3 \div 15$  V.



**Fig. 8.16** – a) Sezioni trasversale e frontale di un LCD a sette segmenti ed elettrodi relativi.  
b) Segnali applicati agli elettrodi per pilotare ciascun segmento

In Fig. 8.16b è illustrata la tecnica *a commutazione di fase*, che viene generalmente adottata per pilotare visualizzatori LCD a sette segmenti. All'elettrodo comune (*backplane*) viene applicata un'onda quadra  $Ph$  (*phase*); a ciascun segmento viene applicata una forma d'onda  $V_s$  analoga, in opposizione di fase con  $Ph$  se il segmento deve risultare attivato, in fase con  $Ph$  se deve risultare spento.

Interessante è la soluzione proposta per pilotare display LCD tramite il decoder 9368, trattato precedentemente nel par. 2.3 per display a LED. Poiché, come si è detto, agli elettrodi dei display LCD devono essere applicati segnali alternati, l'accensione di un segmento viene attuata applicando un'onda quadra di ampiezza 5 V sia all'elettrodo comune sia all'elettrodo proprio del segmento, come mostrato in Fig. 8.17. Infatti il segnale di eccitazione per l'elettrodo comune ( $Ph$ ), costituito da un'onda quadra, viene utilizzato per controllare la porta EXOR, la cui uscita è poi applicata al terminale del segmento. Se un certo segmento deve apparire acceso, la corrispondente uscita del decoder è alta; pertanto il segnale  $Ph$  applicato all'EXOR viene trasferito al terminale del segmento in forma complementata, infatti un EXOR a due ingressi, uno dei quali posto a 1, presenta un'uscita pari alla negazione dell'altro ingresso:  $0 \oplus 1 = 1$ ,  $1 \oplus 1 = 0$ . Pertanto la tensione applicata all'elettrodo del segmento e al *backplane* sono in opposizione di fase e il segmento si accende.

Se invece il segmento deve rimanere spento, l'uscita del decoder è bassa e al terminale del segmento è applicato lo stesso segnale  $Ph$  inviato all'elettrodo comune, per cui i segnali inviati ai due elettrodi sono in concordanza di fase. Ricordiamo che un EXOR a due ingressi, uno dei quali posto a zero, presenta un'uscita pari all'altro ingresso (onda quadra), cioè:  $0 \oplus 0 = 0$ ,  $1 \oplus 0 = 1$ .

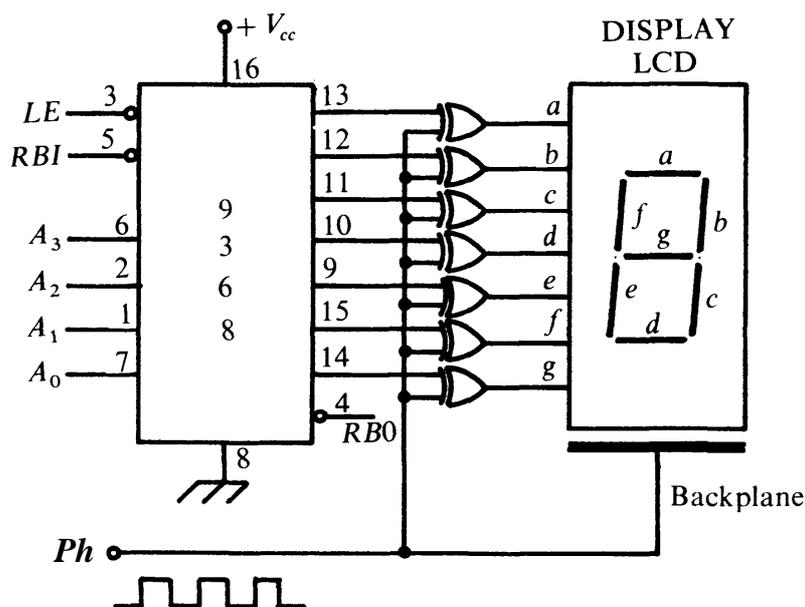


Fig. 8.17 – Collegamento di un decoder 9368 ad un display LCD

Si deve però osservare che esistono in commercio decoder-driver integrati apposti per LCD che ovviamente non richiedono alcuna porta esterna. Ne è un esempio il tipo CMOS 74HC4543. Esso è infatti provvisto di un ingresso  $Ph$ , al quale deve essere inviata un'onda quadra per pilotare l'LCD. Inoltre l'ingresso  $Ph$  consente di commutare le linee di uscita e quindi di utilizzare il circuito anche per pilotare display a LED, sia a catodo comune che ad anodo comune.