

## SORGENTI a SEMICONDUCTORE

- Diodi emettitori di luce (LED)
- Diodi laser (LD)

# L'energia degli elettroni è quantizzata e i valori di energia permessi si dicono

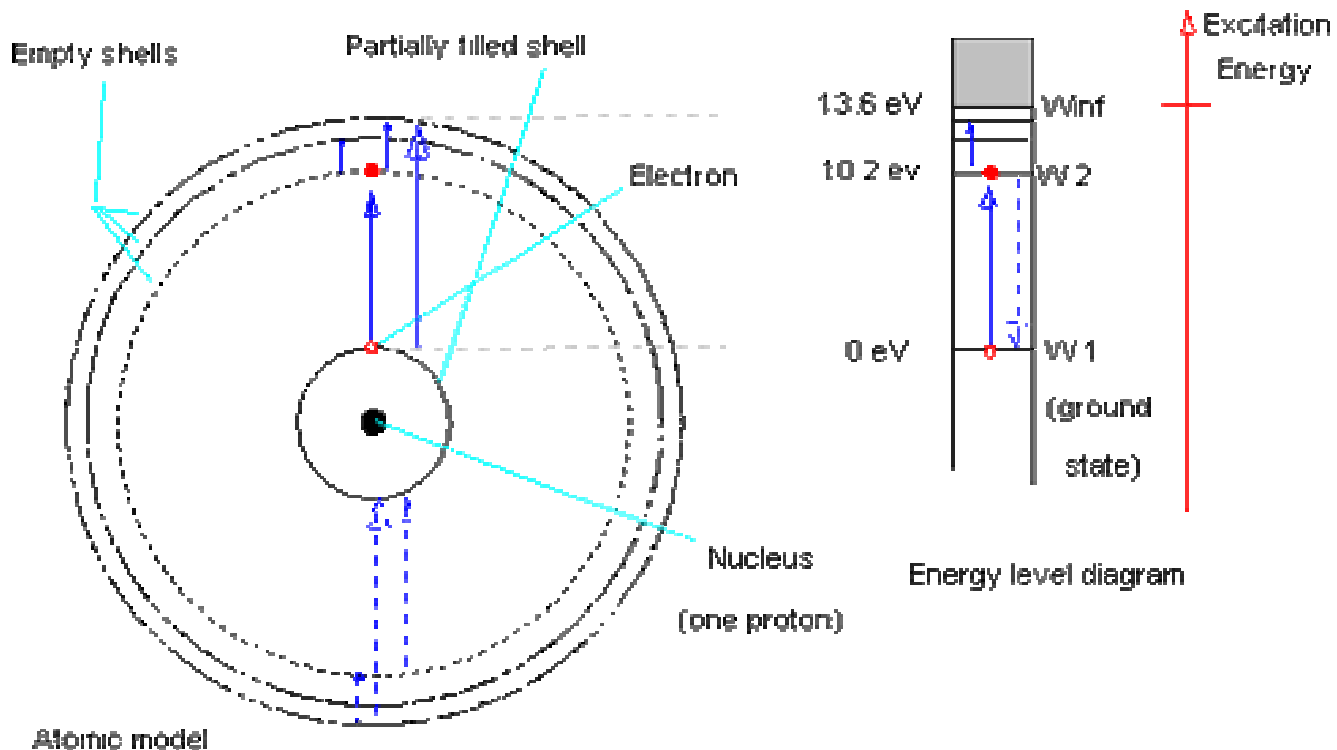
## “livelli di energia”

Niels Bohr (1913):

### Livelli discreti

Transizioni accompagnate da assorbimento o emissione di  
quanti di energia

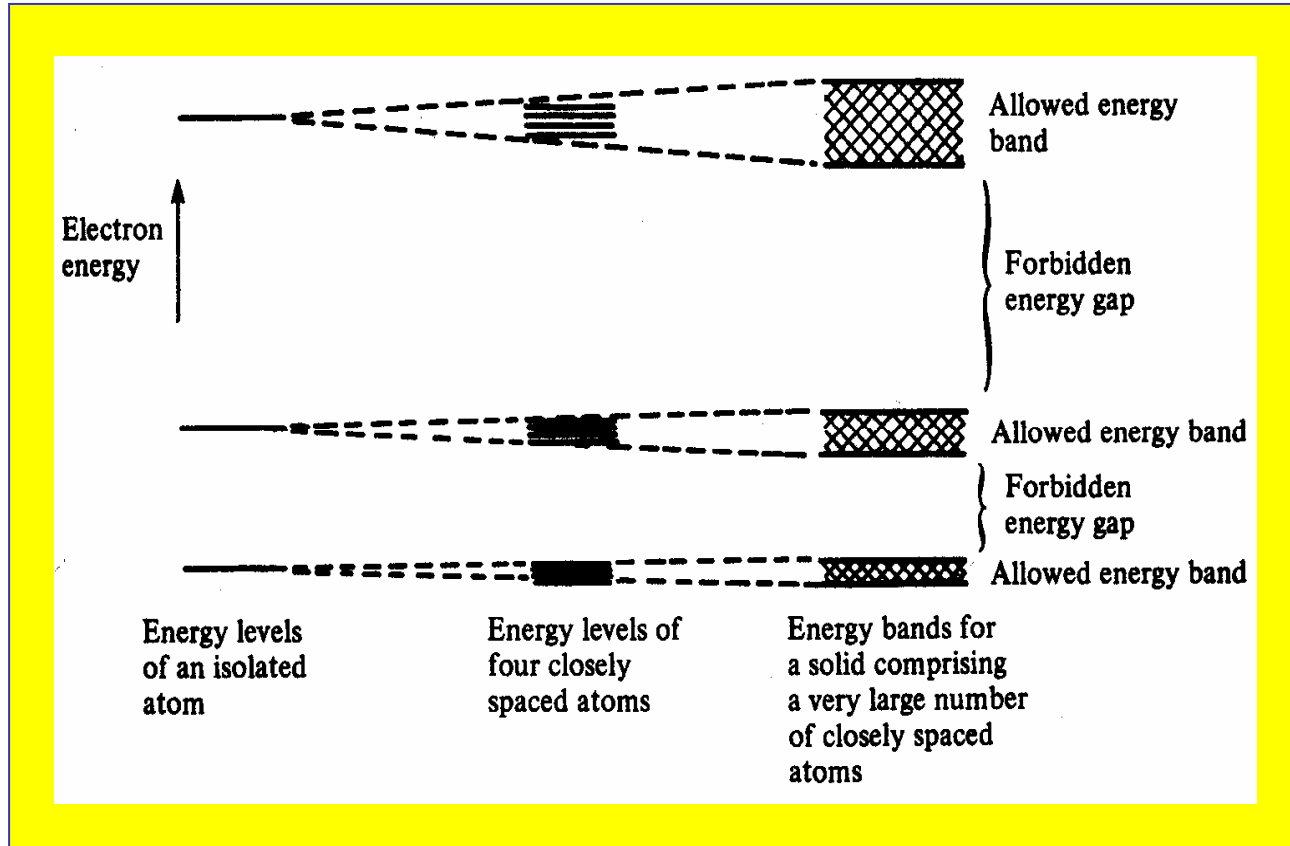
$$h\nu = E_1 - E_2$$



EXCITATION & DE-EXCITATION OF A HYDROGEN ATOM

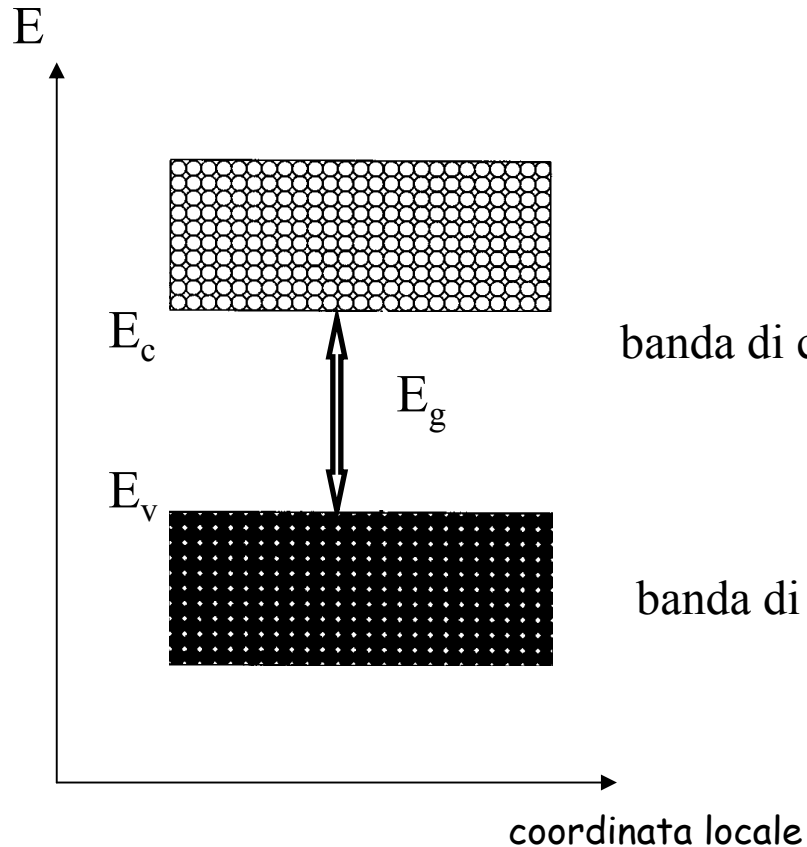
# Livelli e Bande di energia

Rappresentazione schematica di come i livelli di energia di atomi interagenti formino bande di energia al decrescere della distanza interatomica

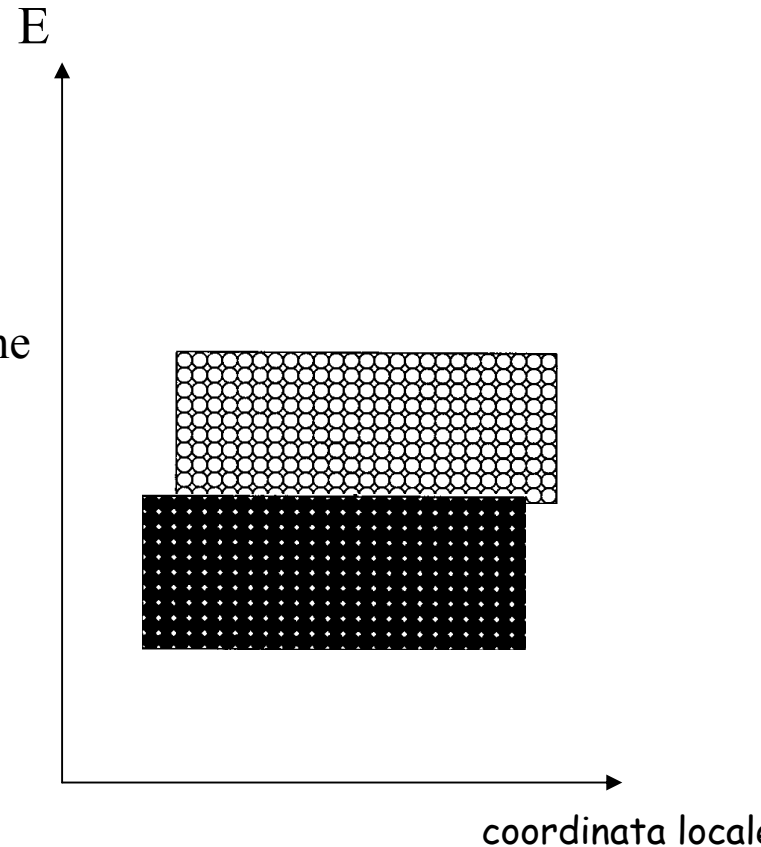


- Banda di valenza : banda con energia più alta fra quelle completamente riempite a  $T = 0^\circ \text{ K}$
- Banda di conduzione: banda vuota (per  $T = 0^\circ \text{ K}$ ) sopra alla banda di valenza

# Diagramma a bande di energia per isoalnti e per conduttori



**isolanti**  
(bande separate da  $E_g$   
grande)



**conduttori**  
(bande parzialmente  
sovrapposte)

# Funzione di Fermi-Dirac $F(E)$

Considerando che gli elettroni obbediscono al Principio di esclusione di Pauli, la **probabilità che un particolare livello di energia sia occupato**, alla temperatura  $T$ , è data dalla statistica di Fermi-Dirac.

La distribuzione di Fermi-Dirac è data da:

$$F(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1}$$

per  $T=0$

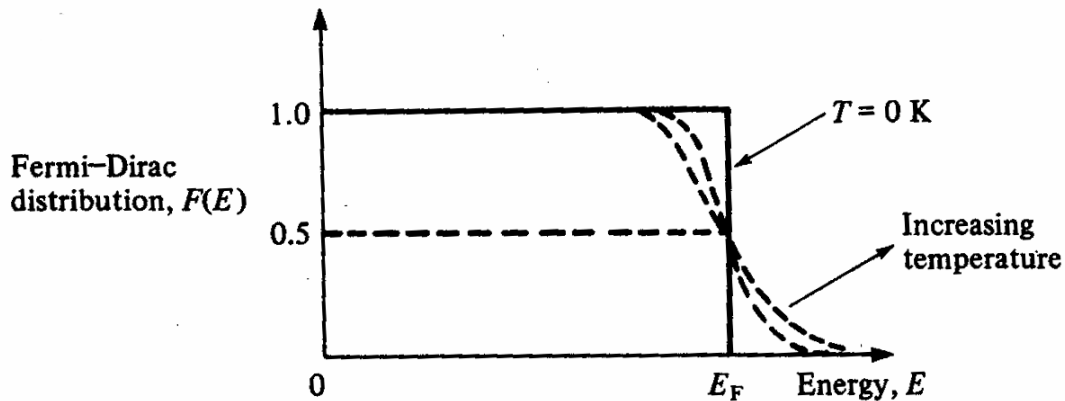
$$F(E) = 1 \text{ per } E < E_F$$

$$F(E) = 0 \text{ per } E > E_F$$

• per  $T > 0$  (*qualsiasi*)

$$F(E) = 0,5 \text{ per } E = E_F$$

$E_F$  = livello di Fermi

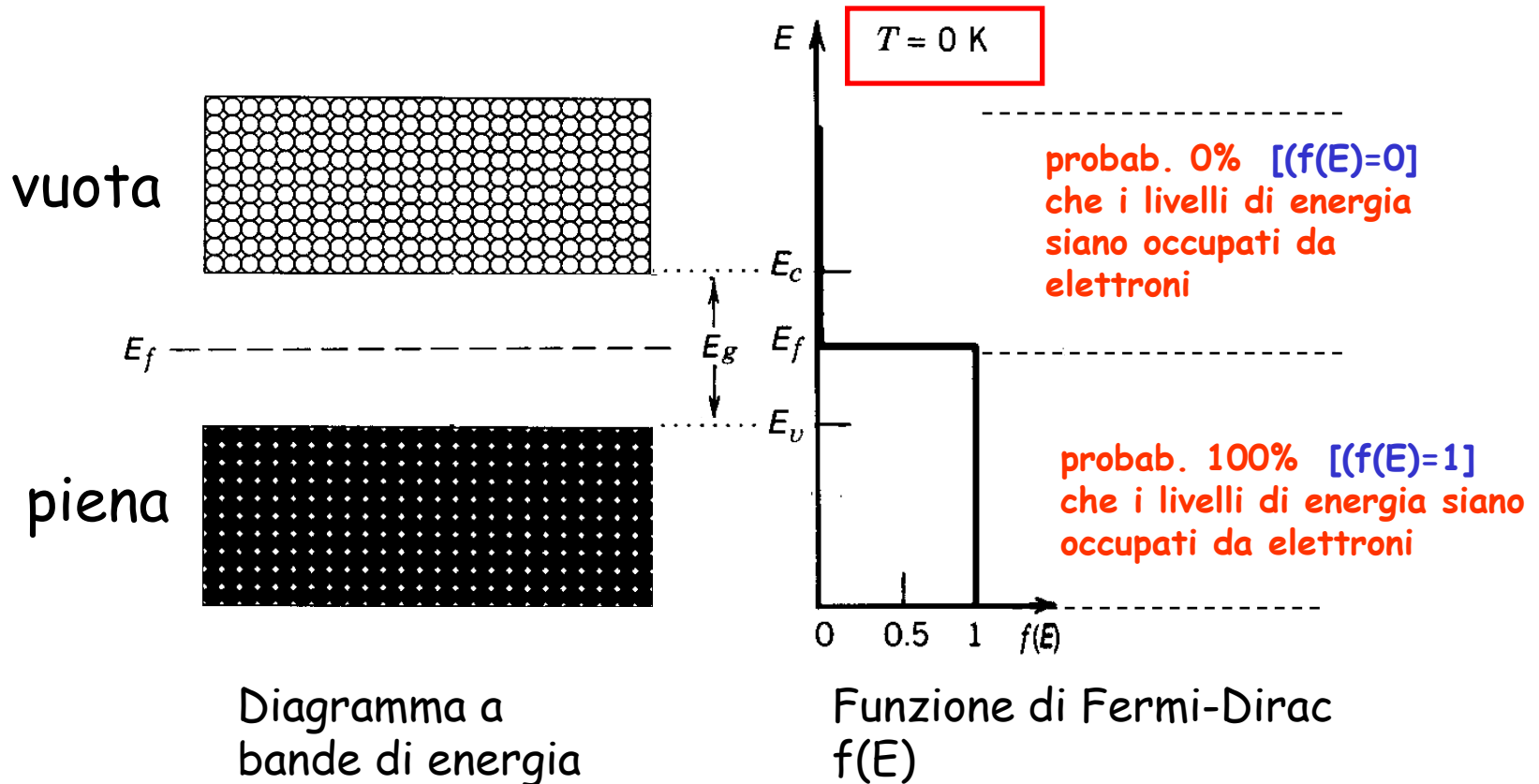


Il livello di Fermi  $E_F$  rappresenta quel livello di energia che ha la probabilità del 50% [  $F(E) = 0,5$  ] di essere pieno (se non cadesse nella banda proibita)

# Semiconduttori intrinseci ( $T = 0^\circ\text{K}$ )

Per  $T = 0^\circ\text{K}$  tutti gli elettroni stanno nella banda di valenza

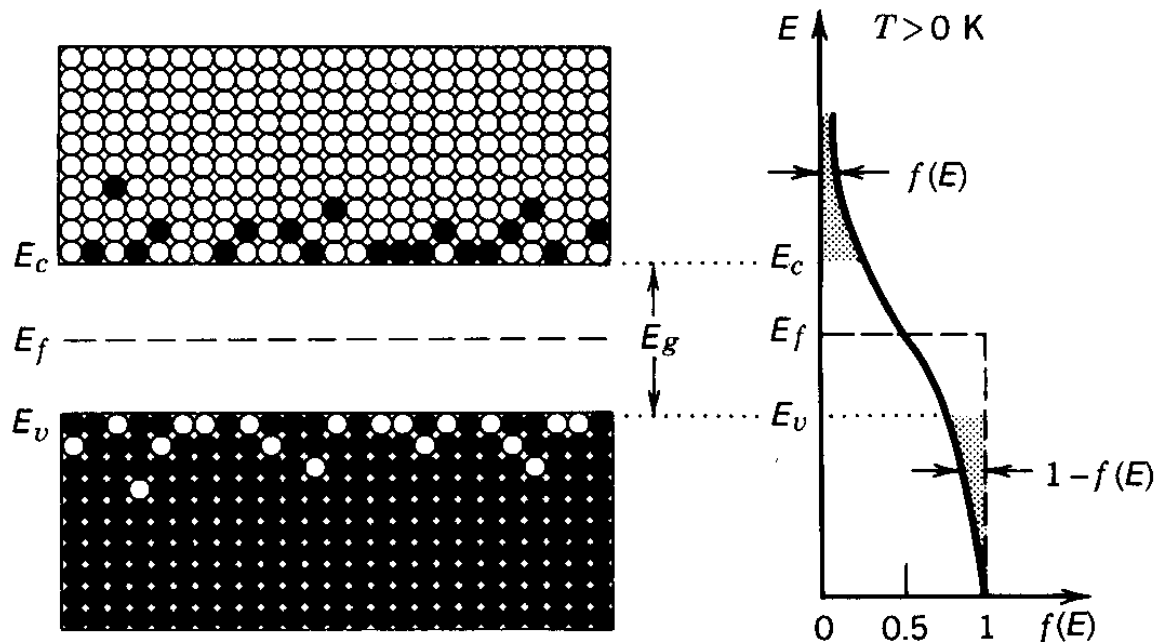
$$F(E) = 1 \text{ per } E < E_F ; F(E) = 0 \text{ per } E > E_F$$



# Semiconduttori intrinseci ( $T > 0^\circ\text{K}$ )

Per  $T > 0$

alcuni elettroni si portano dalla banda di conduzione a quella di valenza perchè hanno acquisito energia termica. Ma poichè **in un semiconduttore intrinseco** la concentrazione degli elettroni è pari a quella delle lacune, **il livello di Fermi sta nel mezzo del gap di energia proibita**

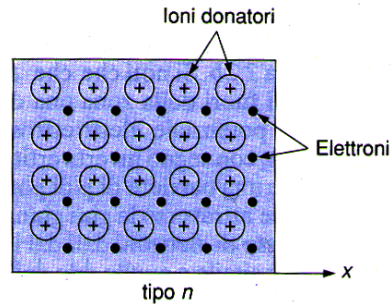


$f(E)$  = funzione di Fermi-Dirac

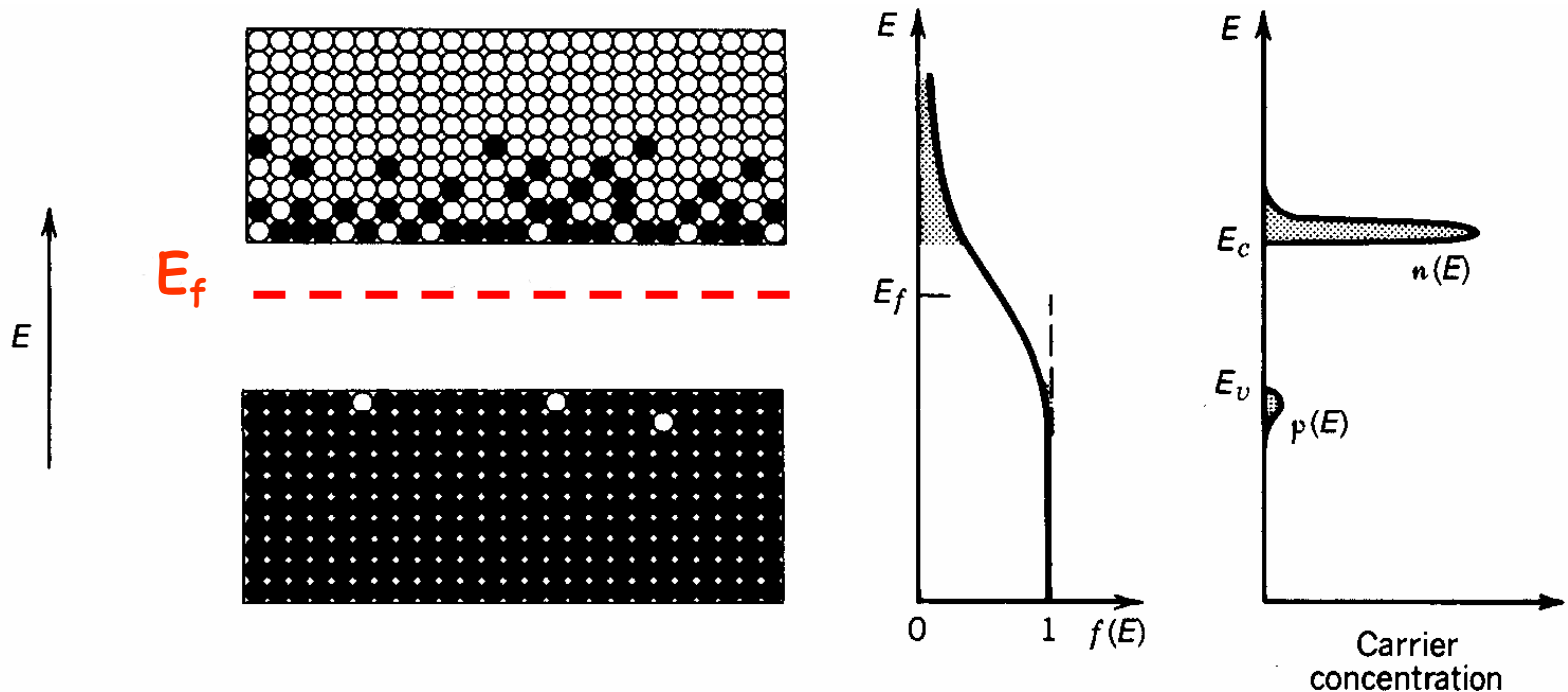
$f(E)$  = probabilità che un certo stato di energia sia riempito

$1 - f(E)$  = probabilità che sia vuoto

# Semiconduttori drogati n



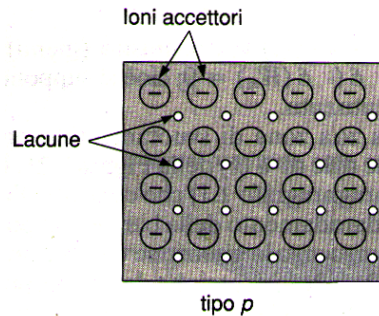
Un semiconduttore drogato n, ha molti elettroni e poche lacune, quindi il livello di Fermi si porta verso la banda di conduzione



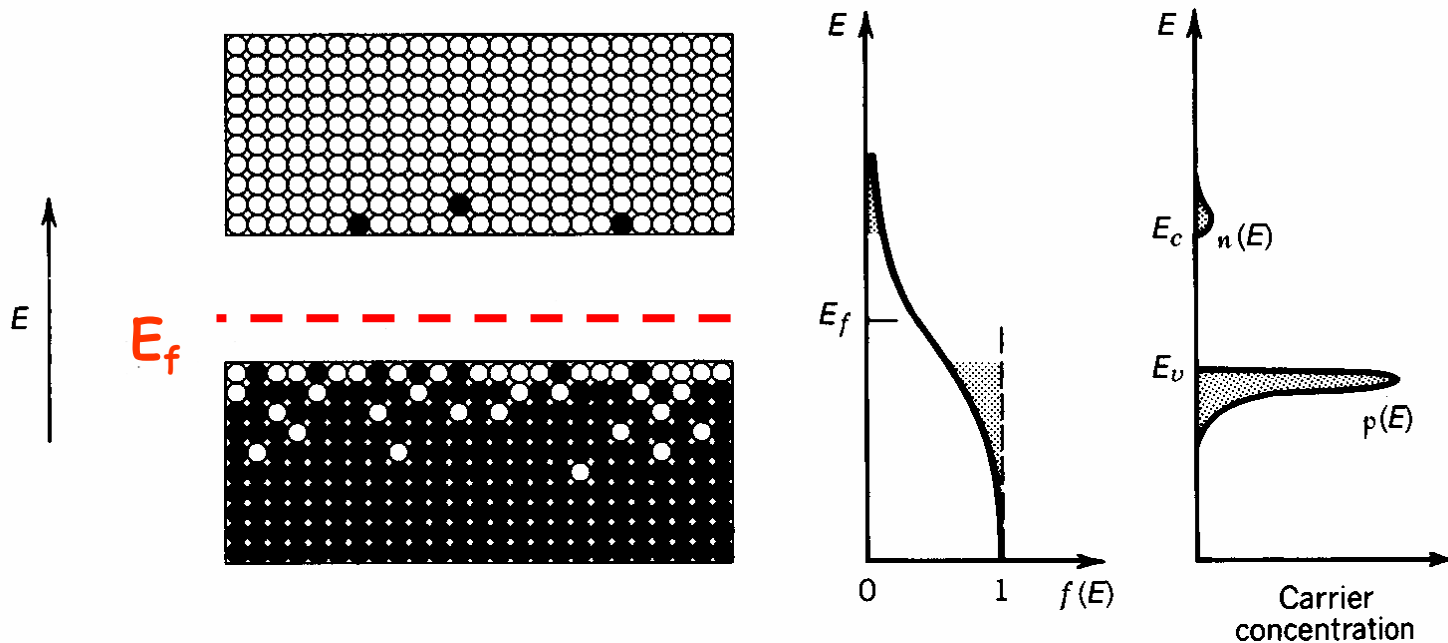
**Figure 15.1-10** Energy-band diagram, Fermi function  $f(E)$ , and concentrations of mobile electrons and holes  $n(E)$  and  $p(E)$  in an  $n$ -type semiconductor.



# Semiconduttori drogati p

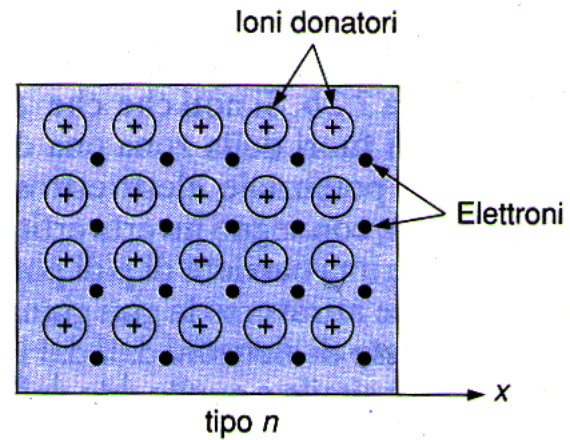
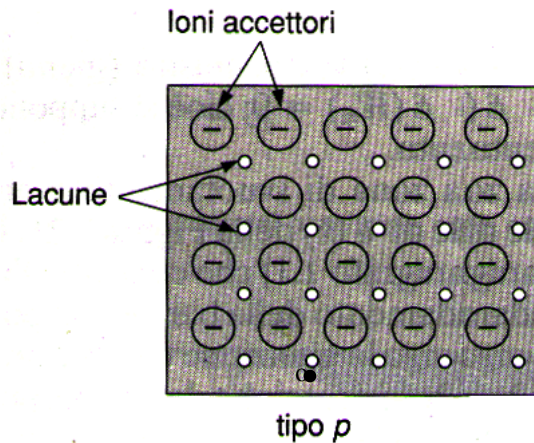


Un semiconduttore drogato p, ha molte lacune ma pochi elettroni, quindi il livello di Fermi si porta verso la banda di valenza

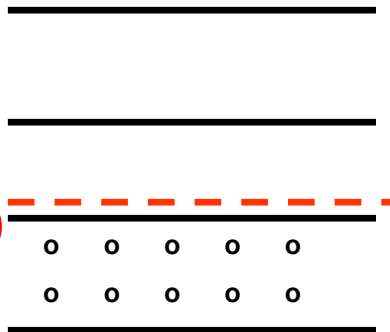


**Figure 15.1-11** Energy-band diagram, Fermi function  $f(E)$ , and concentrations of mobile electrons  $n(E)$  and holes  $p(E)$  in a  $p$ -type semiconductor.

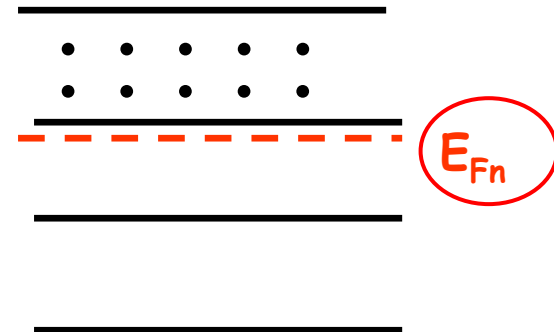
# Semiconduttori drogati



b. di conduz.



b. di valenza



molte lacune libere:

il livello di Fermi è  
spostato verso la banda  
di valenza

molti elettroni liberi:

il livello di Fermi è  
spostato verso la banda di  
conduzione

# Giunzione p-n non polarizzata (a circuito aperto)

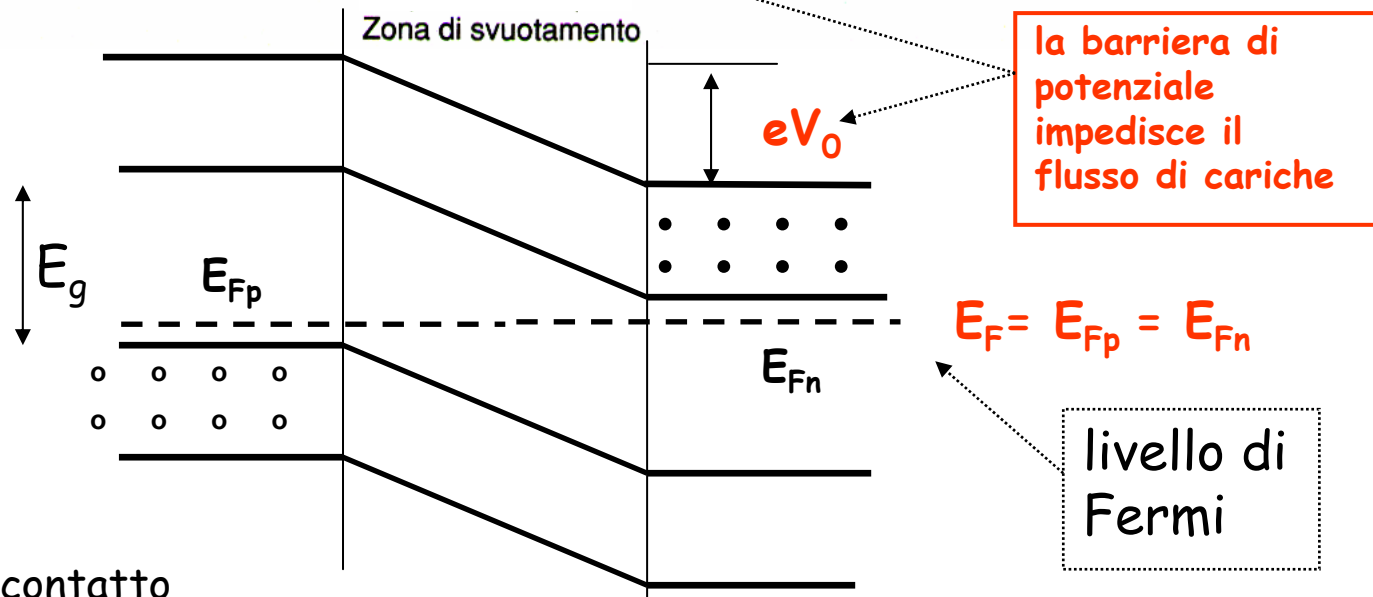
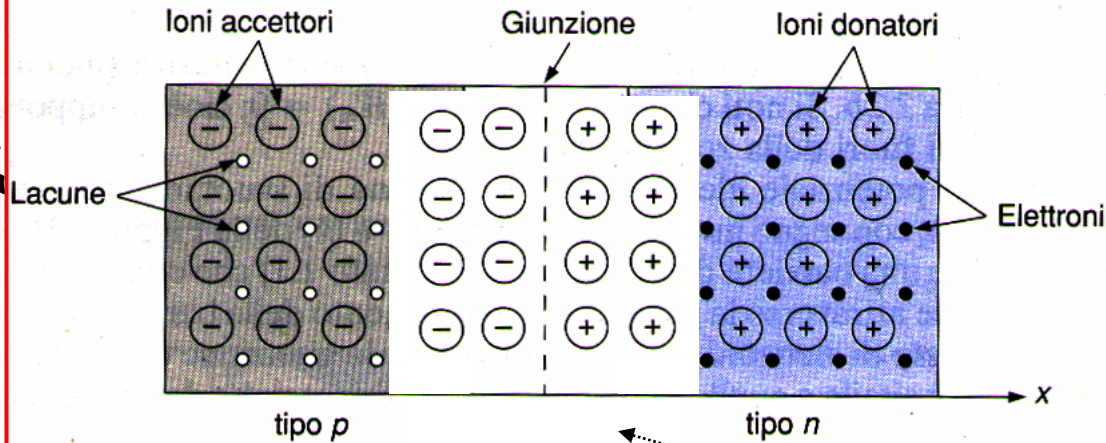
Creando la giunzione, gli elettroni **diffondono** dalla zona n alla zona p, dando luogo ad una assenza di cariche libere attorno alla giunzione (**zona di svuotamento**). La barriera di potenziale ( **$eV_0$** ) che di conseguenza si crea, ostacola e (a regime) **impedisce l'ulteriore diffusione di cariche**

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right)$$

$V_0$  = potenziale di contatto

$n_p$  = concentrazione di elettroni nella b. di conduzione del tipo p

$n_e$  = concentrazione di elettroni nella b. di conduzione del tipo n



## Osservazione sul livello di Fermi nel diagramma a bande precedente:

**All'equilibrio** (cioè quando non c'è più scambio di cariche attraverso la giunzione) **il livello di Fermi deve essere uniforme attraverso i 2 materiali.**

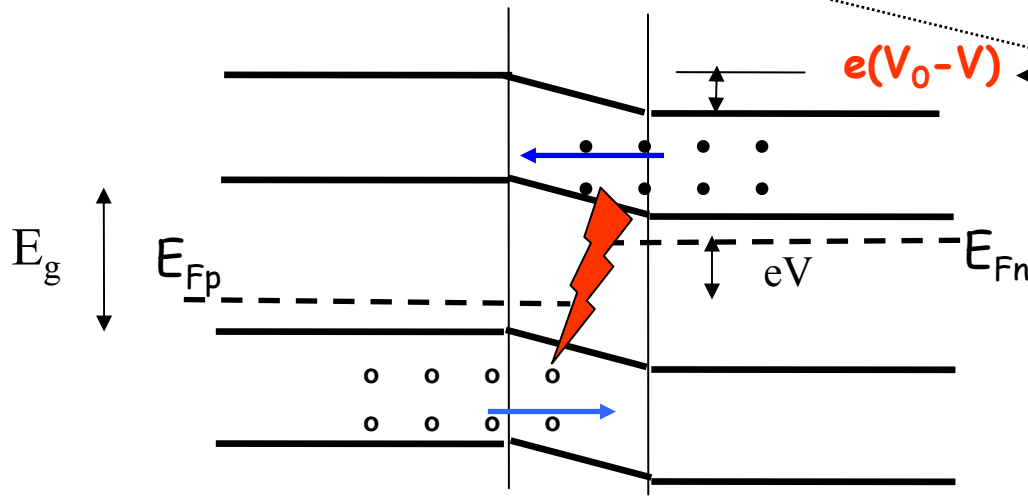
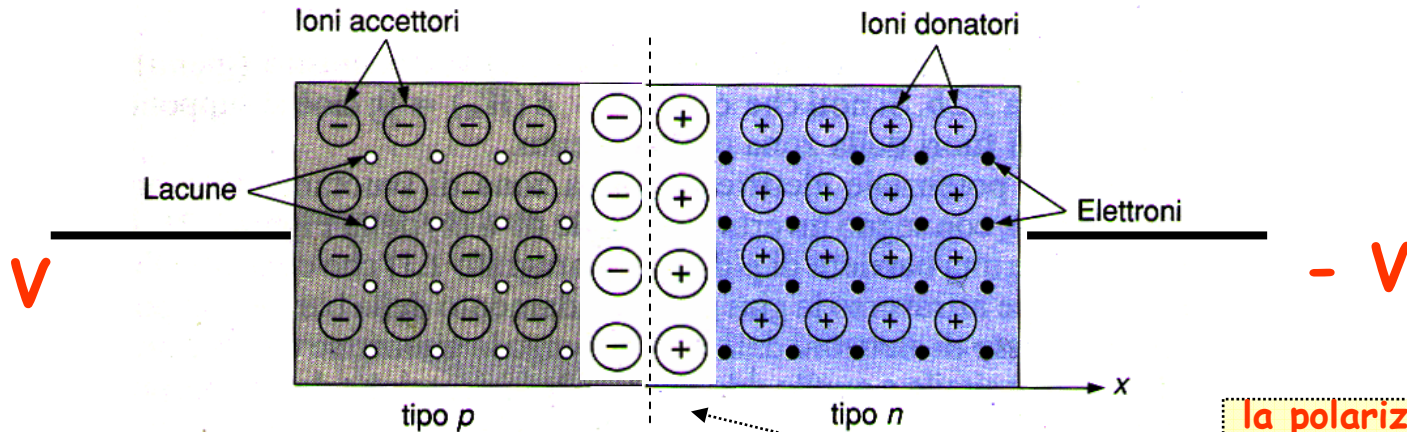
Infatti, all'equilibrio, la probabilità di riempimento di un certo livello dovrà essere uguale sia a destra che a sinistra della giunzione (altrimenti non si avrebbe l'equilibrio).

D'altra parte, lontano dalla giunzione, la posizione del livello di Fermi in ciascun materiale rimarrà la stessa rispetto a quando il materiale era isolato (cioè prima di formare la giunzione).

Quindi, per tracciare il diagramma a bande di energia, sarà necessario **sfalzare la banda di conduzione rispetto a quella di valenza** in modo che i livelli di Fermi dei due materiali coincidano.

# Giunzione p-n polarizzata direttamente

## LED (Light Emitting Diode)



la polarizzazione diretta fa diminuire la barriera di potenziale.

Le cariche hanno ora energia sufficiente per superare la barriera e diffondono attraverso la giunzione. Cioè si stabilisce una corrente elettrica attraverso la giunzione.

$$\nu = E_g / h$$

## Osservazione sul livello di Fermi nel diagramma a bande precedente:

Se applichiamo una d.d.p. ai capi della giunzione, si altera la situazione di equilibrio ai capi della giunzione: la barriera di potenziale diminuisce ed inizia una diffusione di cariche ai capi della giunzione.

I due livelli di Fermi ( $E_{fn}$  e  $E_{fp}$ ) non coincidono più

## Principio di funzionamento del LED (Light Emitting Diode)

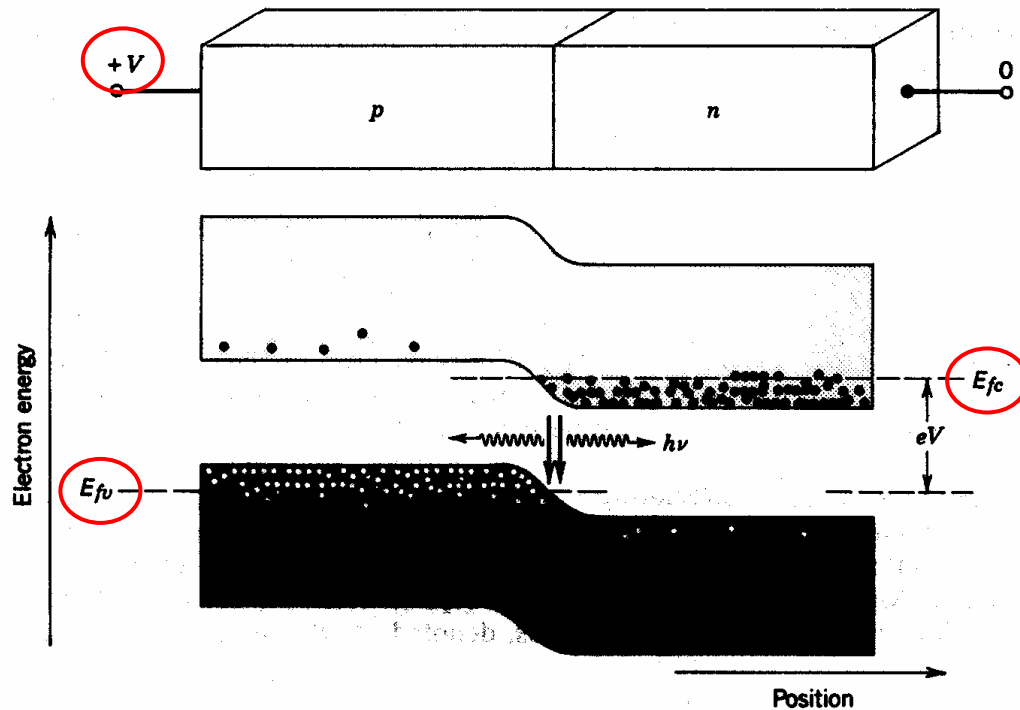
Polarizzando direttamente la giunzione, la barriera di potenziale **diminuisce** ed inizia una diffusione di cariche attraverso la giunzione.

Nella giunzione, quindi, si crea la presenza di **elettroni nella banda di conduzione e di lacune nella banda di valenza** (inversione di popolazione)

In tali condizioni, alcuni elettroni della banda di conduzione **possono ricombinarsi** con alcune coppie della banda di valenza **dando luogo all'emissione spontanea di fotoni** (emissione di luce incoerente)

## Giunzione p-n fortemente drogata

Se i semiconduttori sono fortemente drogati, il livello di Fermi (quasi Fermi level) va a trovarsi all'interno della banda di conduzione per i semiconduttori di tipo n ( $n^+$ ) e all'interno della banda di valenza per i semiconduttori di tipo p ( $p^+$ ). *Si usano alti drogaggi per aumentare la probabilità di ricombinazione radiativa delle coppie elettrone-lacuna.* La figura sottostante mostra il diagramma di energia di una giunzione  $p^+n^+$ , polarizzata in modo diretto.



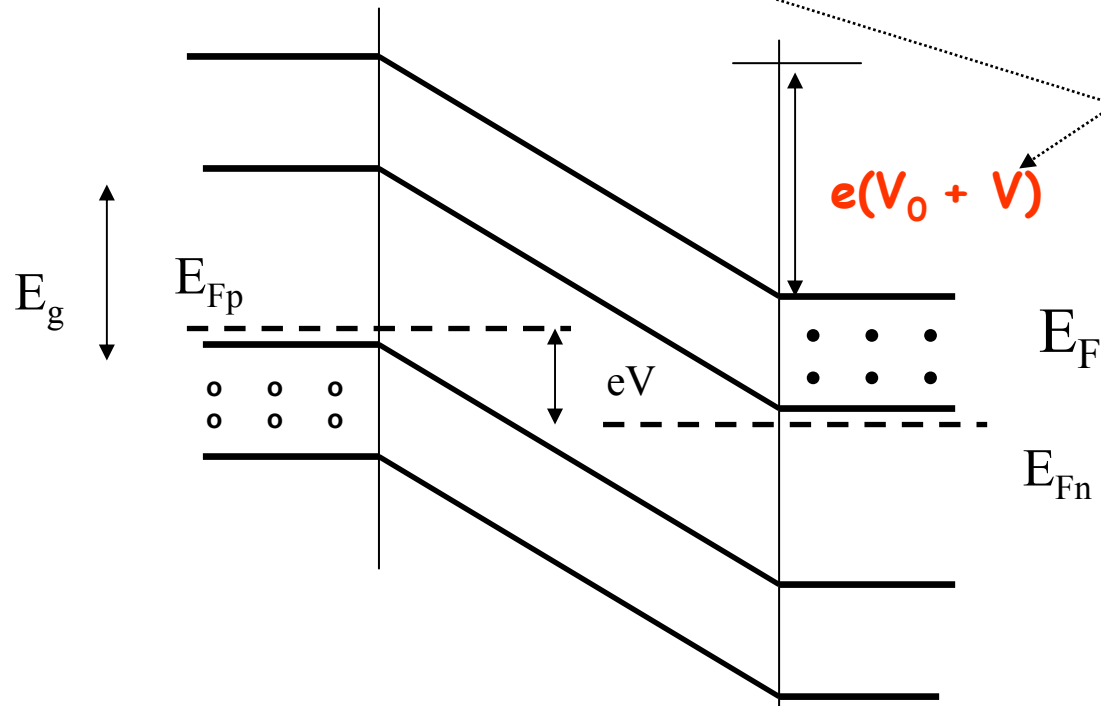
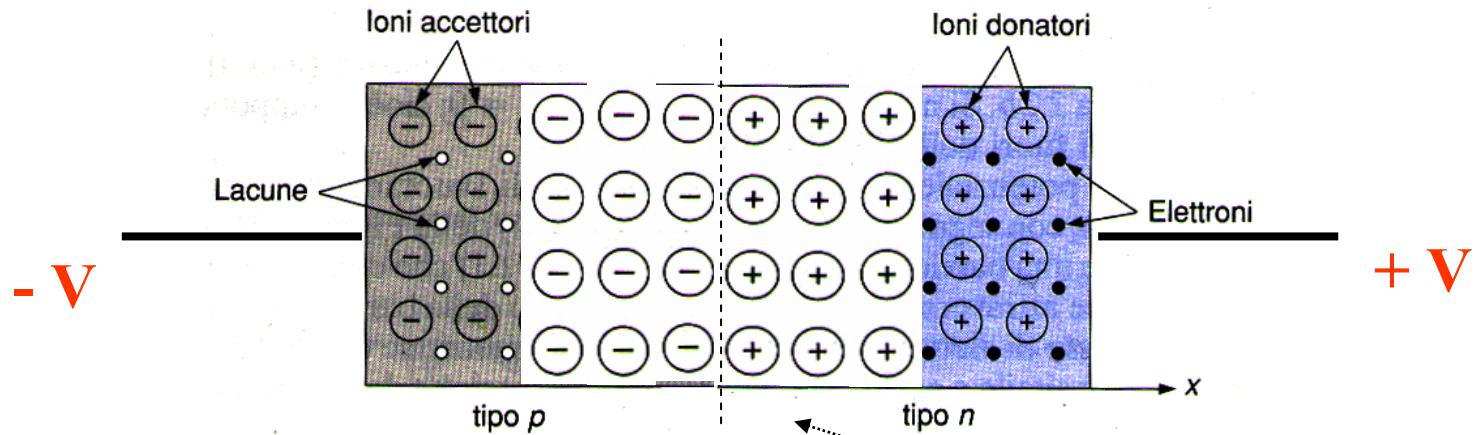
**Figure 16.1-5** Energy diagram of a heavily doped  $p-n$  junction that is strongly forward biased by an applied voltage  $V$ . The dashed lines represent the quasi-Fermi levels, which are separated as a result of the bias. The simultaneous abundance of electrons and holes within the junction region results in strong electron-hole radiative recombination (injection electroluminescence).

da:

B.E.A. Saleh, M.C. Teich,  
"Fundamental of  
Photonics", p.601



# Giunzione p-n polarizzata inversamente

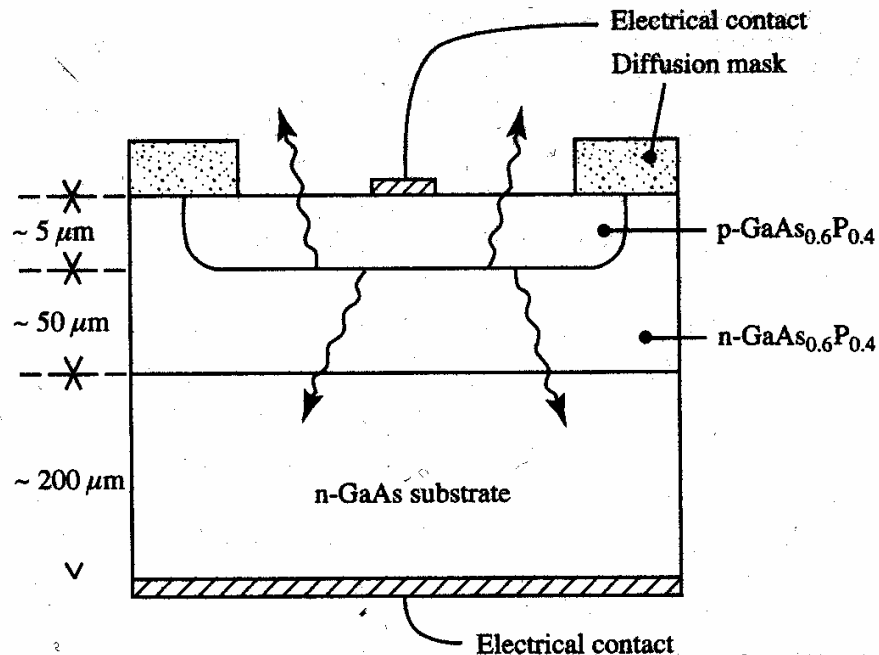


la polarizzazione  
inversa aumenta  
la barriera di  
potenziale

# Diodi Emettitori di Luce (LED)

- Giunzione p-n polarizzata *direttamente*
- La luce è generata per *emissione spontanea*

Tipica  
configurazione  
di un LED:



**FIG. 4.16** Cross-section of a standard red-emitting LED chip based on GaAsP. A layer of n-type GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> (using tellurium as a dopant) is deposited by vapour phase epitaxy on a GaAs substrate. A p-n junction is then formed by diffusing in Zn through a surface mask. The small aluminium contact on the upper surface allows as much of the radiation to escape as possible; any radiation flowing downwards is almost completely absorbed by the GaAs.

## Lunghezza d'onda di emissione dei LED

La lunghezza d'onda di emissione di un LED dipende dal tipo di materiali costituenti la giunzione, cioè dal "gap" di energia  $E_g$  fra banda di conduzione e banda di valenza

$$\lambda = h c / E_g$$

es:

$$\text{GaAs } (E_g = 1.443 \text{ eV}) \quad \rightarrow \lambda = 0.86 \text{ } \mu\text{m}$$

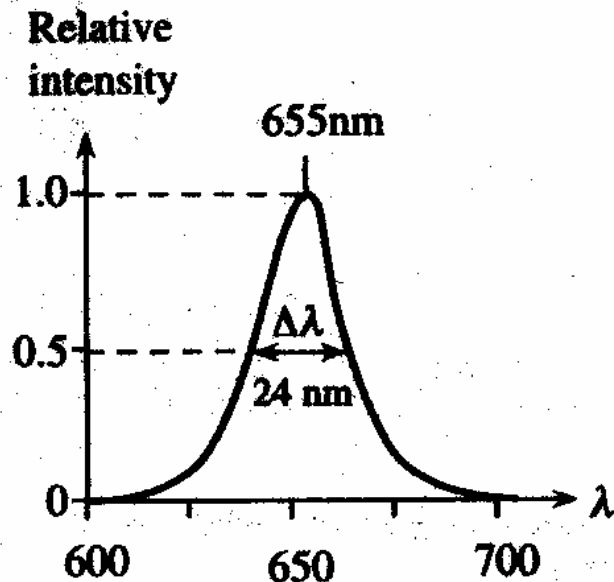
$$\text{InGaAs } (E_g \approx 1 \text{ eV}) \quad \rightarrow \lambda = 1.25 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{GaP } (E_g 2.26 \text{ eV}) \quad \rightarrow \lambda = 549 \text{ nm}$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

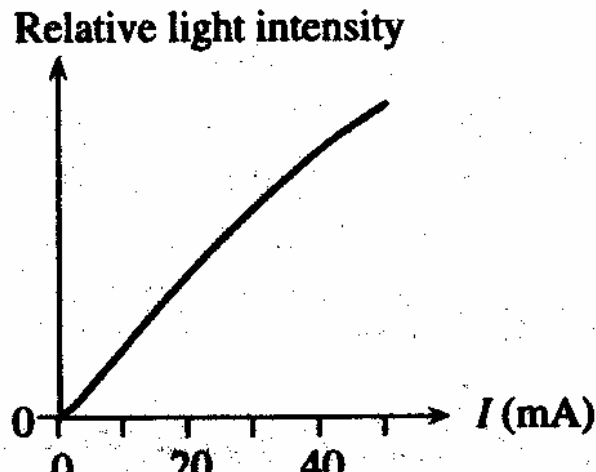
$$h c = 1.24 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}$$

In pratica, poichè le transizioni che danno luogo all'emissione di fotoni avvengono fra due bande di energia (e non fra due livelli precisi) il LED non emetterà su una lunghezza d'onda, ma su uno spettro di lunghezze d'onda, del tipo:

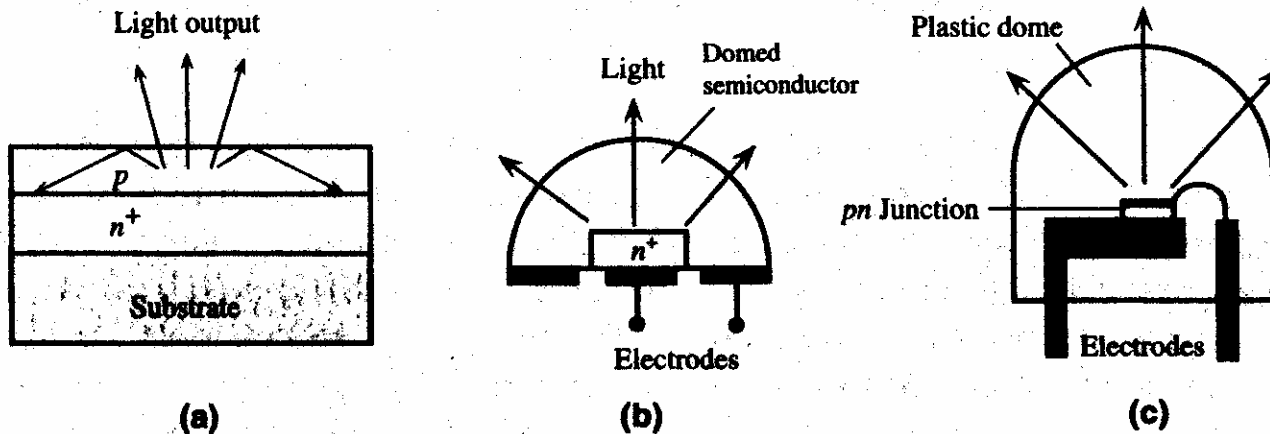


Tipico spettro di un LED (GaAsP, emissione nel rosso) : intensità luminosa vs. lunghezza d'onda

Tipica curva caratteristica di un LED : andamento della intensità luminosa vs. corrente diretta

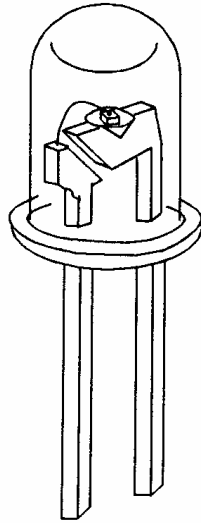


not all light rays reaching the semiconductor-air interface can escape because of total internal reflection (TIR). Those rays with angles of incidence greater than the critical angle  $\theta_c$  become reflected as depicted in Figure 3.23 (a). For the GaAs-air interface, for example,  $\theta_c$  is only  $16^\circ$ , which means that much of the light suffers TIR. It is possible to shape the surface of the semiconductor into a dome, or hemisphere, so that light rays strike the surface at angles less than  $\theta_c$  and therefore do not experience TIR as illustrated in Figure 3.23 (b). The main drawback, however, is the additional difficult process in fabricating such domed LEDs and the associated increase in expense. An inexpensive and common procedure that reduces TIR is the encapsulation of the semiconductor junction within a transparent plastic medium (an epoxy) that has a higher refractive index than air and, further, also has a domed surface on one side of the  $pn$  junction as shown in Figure 3.23 (c). Many individual LEDs are sold in similar types of plastic bodies.

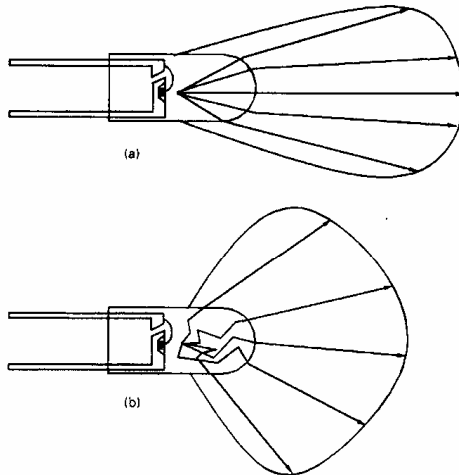


**FIGURE 3.23** (a) Some light suffers total internal reflection and cannot escape. (b) Internal reflections can be reduced and hence more light can be collected by shaping the semiconductor into a dome so that the angles of incidence at the semiconductor-air surface are smaller than the critical angle. (c) An economic method of allowing more light to escape from the LED is to encapsulate it in a transparent plastic dome.

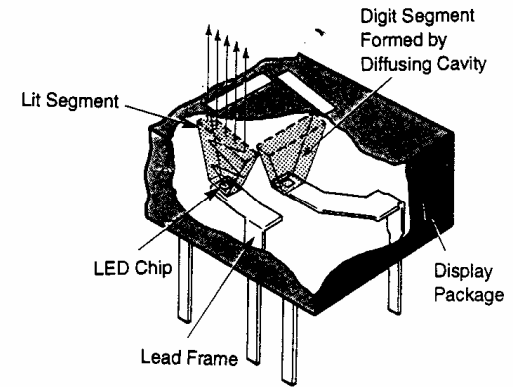
# Vari tipi di LED



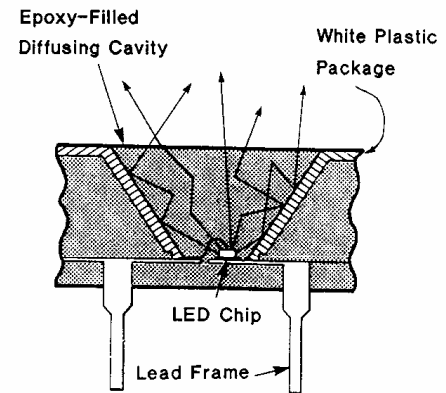
**FIGURE 21** Plastic indicator lamp. The LED chip is placed in a reflector coined into the end of one electrode lead. The top of the chip is connected with a gold wire to the second electrode. The electrodes are encapsulated in plastic to form a mechanically robust package.



**FIGURE 22** Radiation pattern of two types of LED indicator lamps: (a) lamp with clear plastic package with a narrow beam; (b) lamp with a diffusing plastic package (glass powder added) with a broader radiation pattern.



**FIGURE 23** Cutaway of a seven-segment numeric LED display, showing how light from a small LED chip is stretched to a large character segment using a diffusing cavity. Characters 0–9 are created by turning on appropriate combinations of segments.

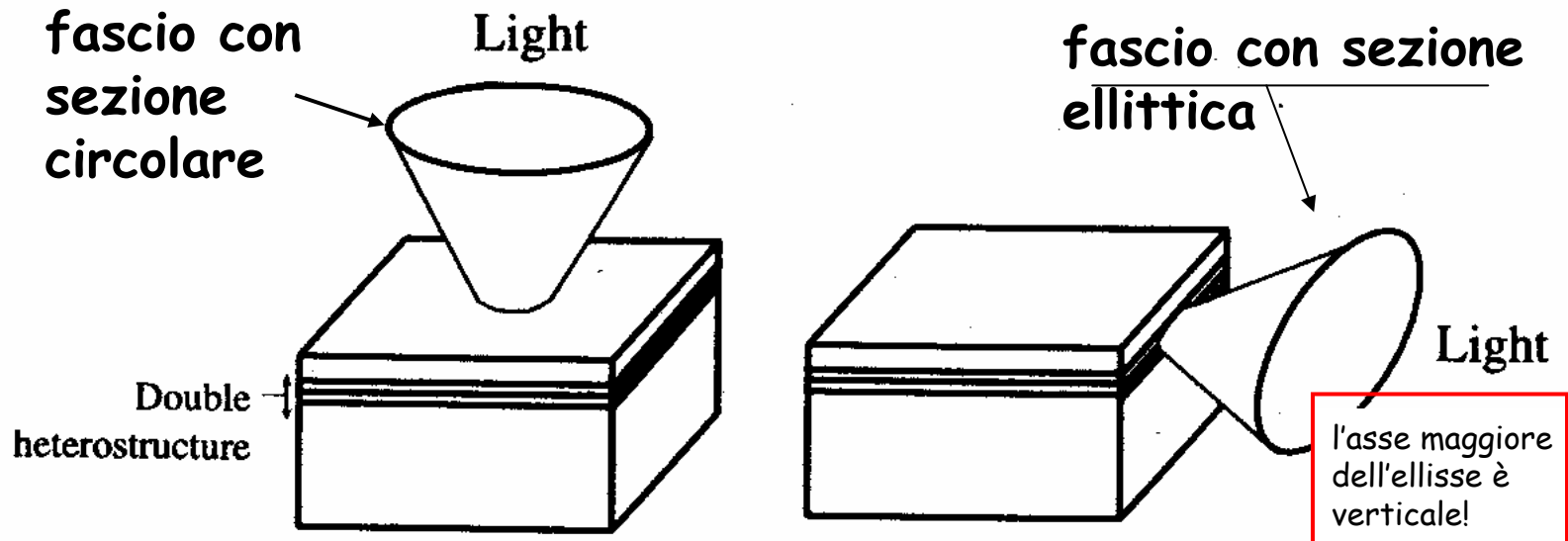


**FIGURE 24** Cross section through one segment of the seven-segment numeric display shown in Fig. 23. A LED chip is placed at the bottom of a highly reflective, white plastic cavity which is filled with clear plastic containing a diffusant. Light is scattered within the cavity to produce uniform emission at the segment surface.



## LEDs per comunicazioni ottiche

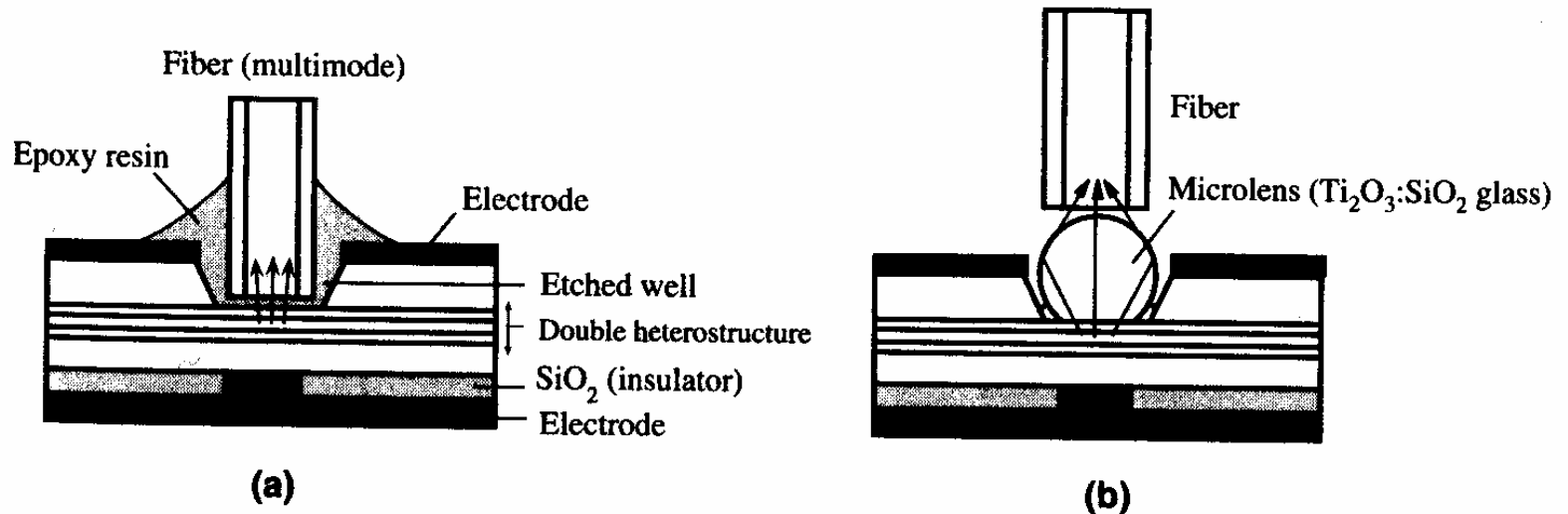
- SLED emittenti dalla superficie (tipo Burrus)
- ELED emittenti dal bordo



**FIGURE 3.29** (a) Surface emitting LED. (b) Edge emitting LED.

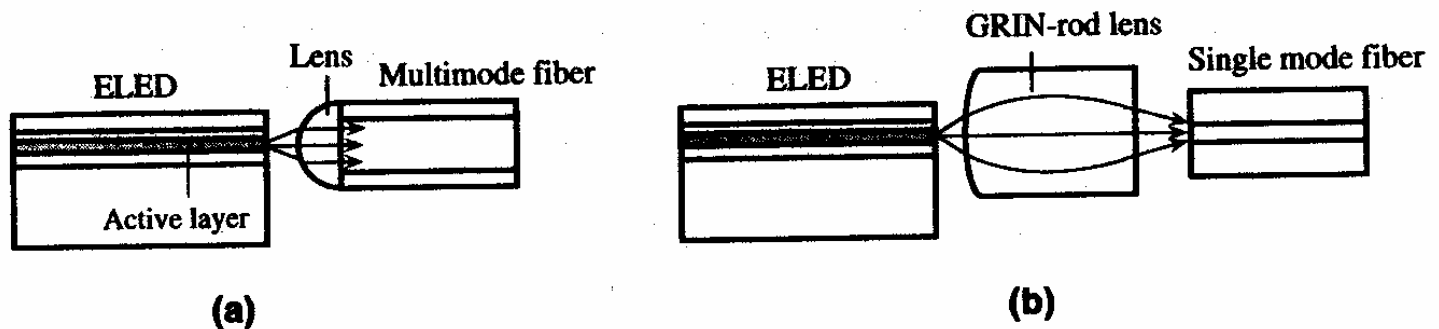


## Accoppiamento con fibre ottiche nei SLED



**FIGURE 3.30** (a) Light is coupled from a surface emitting LED into a multimode fiber using an index matching epoxy. The fiber is bonded to the LED structure. (b) A microlens focuses diverging light from a surface emitting LED into a multimode optical fiber.

## Accoppiamento con fibre ottiche nei ELED



**FIGURE 3.32** Light from an edge emitting LED is coupled into a fiber typically by using a lens or a GRIN rod lens.

# Efficienza quantica di un LED

## efficienza quantica interna ( $\eta_{int}$ )

In una giunzione polarizzata direttamente non tutte le ricombinazioni danno luogo ad emissione di fotoni (ad es. alcune danno luogo ad emissione di fononi, cioè a vibrazioni del reticolo)

Considerando il numero totale di coppie elettrone-lacuna che si ricombinano,  $\eta_{int}$  indica quale frazione di tali coppie dà luogo all'emissione di un fotone.

$$\eta_{int} = [(n^{\circ} \text{ ricombinazioni radiative}) / (n^{\circ} \text{ ricombinazioni totali})] \cdot 100$$

## efficienza quantica esterna ( $\eta_{ext}$ )

$\eta_{ext}$  esprime l'efficienza nella conversione dell'energia elettrica in energia ottica emessa.

(Tiene conto del fatto che alcuni fotoni emessi vengono riassorbiti e, inoltre, del fatto che esistono varie riflessioni alle interfacce. Comprende l'efficienza interna e l'efficienza di estrazione dei fotoni dal dispositivo).

$$\eta_{ext} = [(Potenza \text{ ottica}) / (Potenza \text{ elettrica})] \cdot 100$$

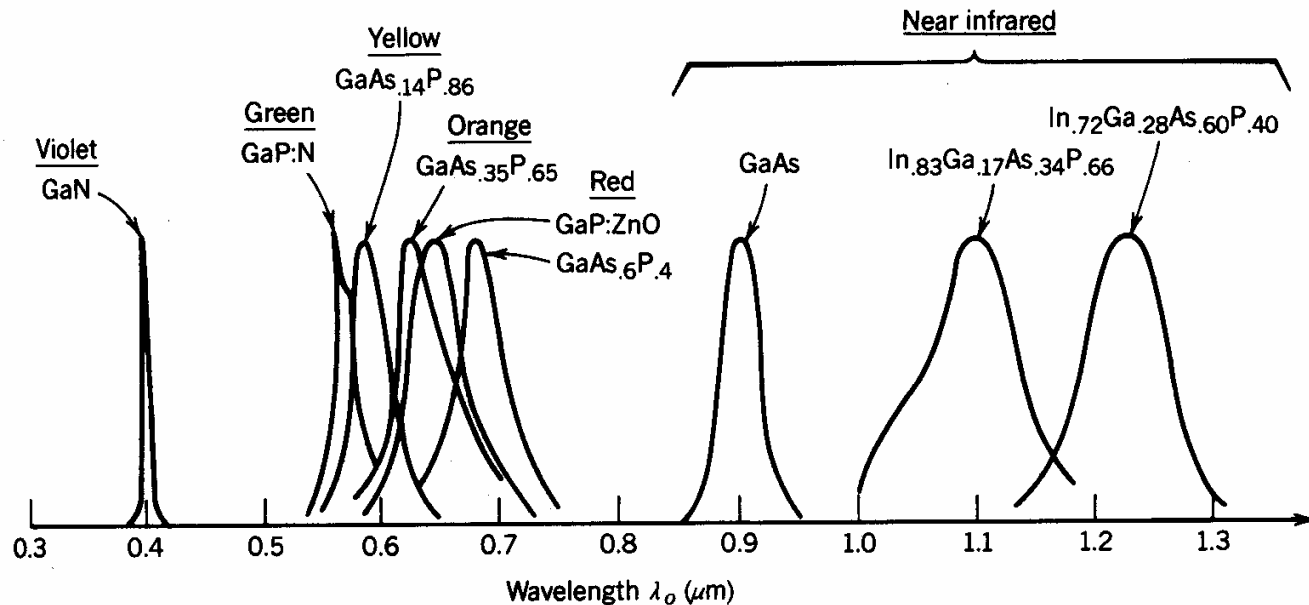
dove:

$$Potenza \text{ elettrica} = V \cdot I$$

## Materials

LEDs have been operated from the near ultraviolet to the infrared, as illustrated in Fig. 16.1-9. In the near infrared, many binary semiconductor materials serve as highly efficient LED materials because of their direct-band gap nature. Examples of III-V binary materials include (as shown in Table 15.1-3 and Fig. 15.1-5) GaAs ( $\lambda_g = 0.87 \mu\text{m}$ ), GaSb ( $1.7 \mu\text{m}$ ), InP ( $0.92 \mu\text{m}$ ), InAs ( $3.5 \mu\text{m}$ ), and InSb ( $7.3 \mu\text{m}$ ). Ternary and quaternary compounds are also direct-gap over a wide range of compositions (see Fig. 15.1-5). These materials have the advantage that their emission wavelength can be compositionally tuned. Particularly important among the III-V compounds is ternary  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $0.75$  to  $0.87 \mu\text{m}$ ) and quaternary  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  ( $1.1$  to  $1.6 \mu\text{m}$ ).

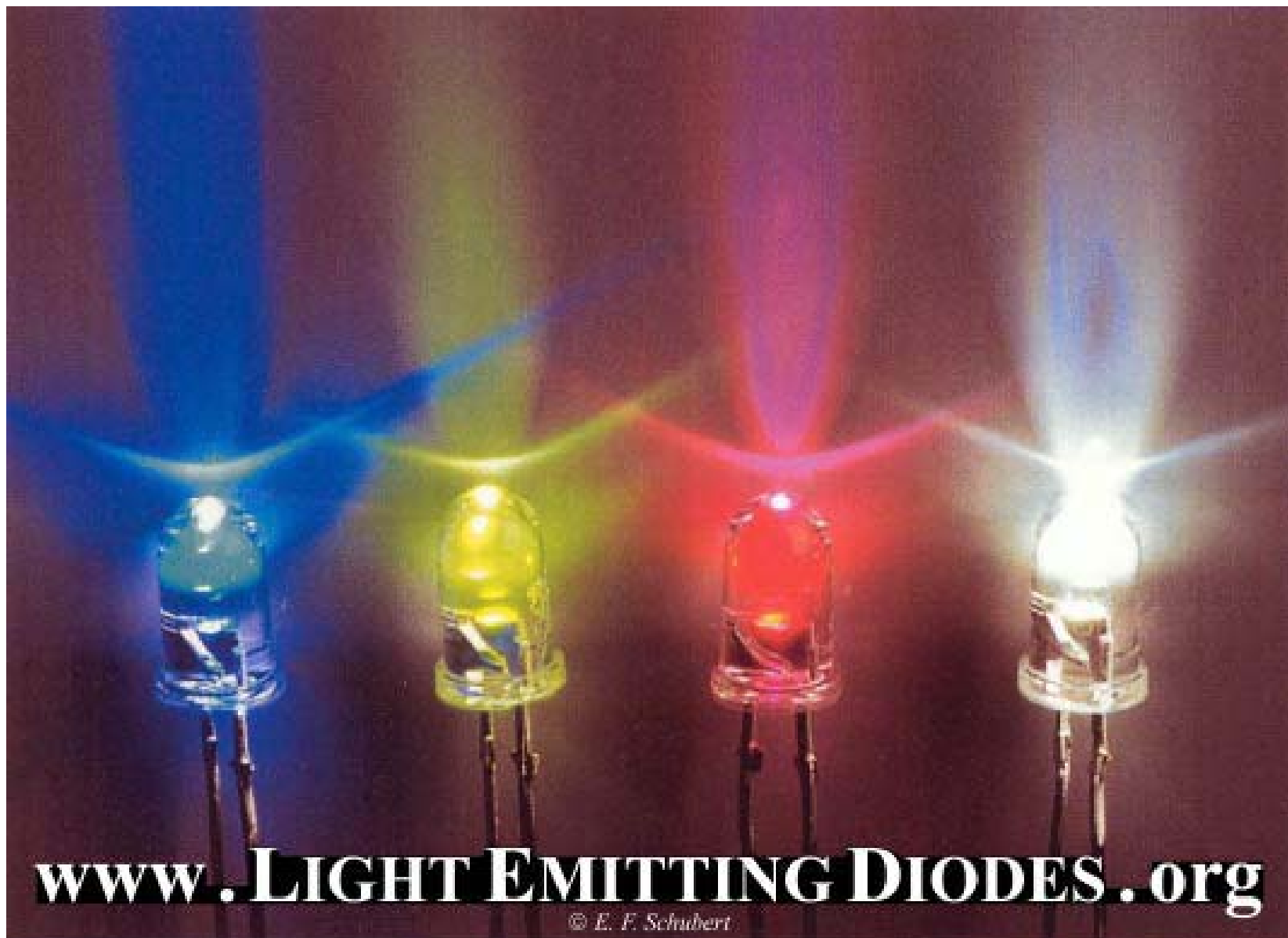
At short wavelengths (in the ultraviolet and most of the visible spectrum) indirect-bandgap materials such as GaN, GaP, and  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  are typically used despite their low internal quantum efficiencies.



da:

B.E.A. Saleh,  
M.C. Teich,  
"Fundamental of  
Photonics", p.605

**Figure 16.1-9** Spectral densities versus wavelength for semiconductor LEDs with different bandgaps. The peak intensities are normalized to the same value. The increasing spectral linewidth is a result of its proportionality to  $\lambda_p^2$ . (Adapted from S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 2nd ed. 1981.)



**[www.LIGHTEMITTINGDIODES.org](http://www.LIGHTEMITTINGDIODES.org)**

*© E. F. Schubert*

**TABLE 4.2** Characteristics of the most commonly used LED materials

Material	Dopant	Peak emission (nm)	Colour	External quantum efficiencies (%)
GaAs	Si	910→1020	Infrared	10
Ga <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> As (1 < x < 0.7)	Si	879→890	Infrared	15
GaP	Zn, O	700	Red	4
GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>		650	Red	0.2
Ga <sub>0.6</sub> Al <sub>0.4</sub> As	Zn	650	Red	15†
GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub>	N	632	Orange	0.2
GaP	N, N	590	Yellow	0.1
AlInGaP		570	Yellow	1†
GaP	N	555	Green	0.1
Zn <sub>0.9</sub> Cd <sub>0.1</sub> Se		489	Blue	1.3†
SiC		470	Blue	0.03
In <sub>0.06</sub> Ga <sub>0.94</sub> As	Zn	450	Blue	3.8†

† Indicates a double heterostructure diode.



## LED a luce bianca

La luce bianca è ottenuta con 3 differenti metodi:

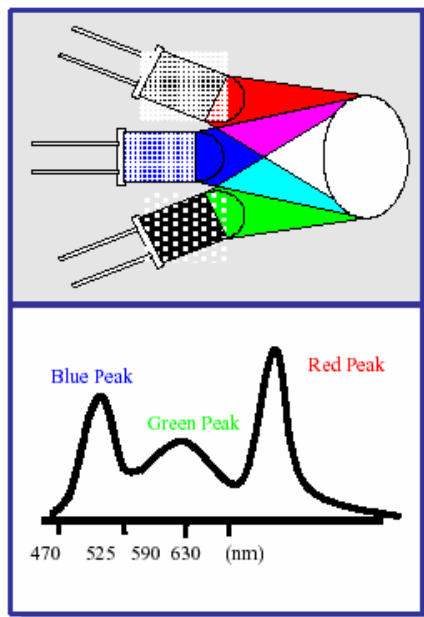
- combinando nelle opportune proporzioni la luce di 3 LEDs RGB (rosso, verde, blu)
- combinando un LED UV (ultravioletto) con fosfori RGB
- combinando un LED blu GaN (nitruro di gallio) emittente a 450-470 nm, con fosfori

# White Light from LEDs

## *Three methods of Generating LED White Light*

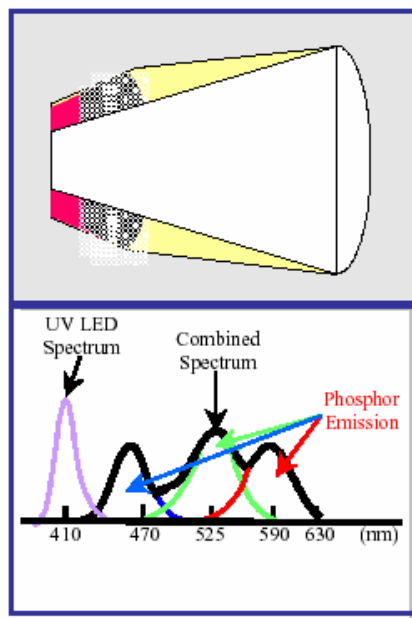
- Each method has potential strengths!

Red + Green + Blue LEDs



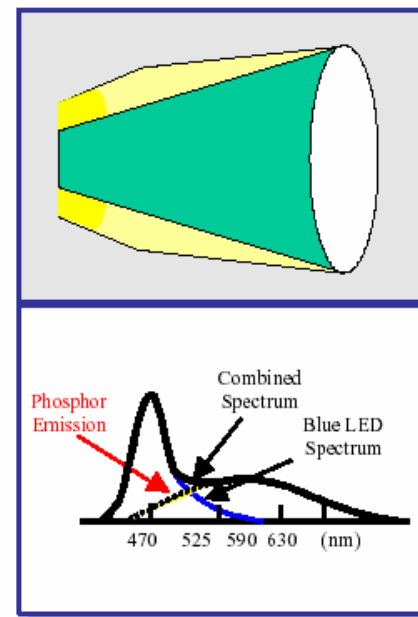
RGB LEDs

UV LED + RGB Phosphor



UV LED + RGB phosphor

Binary Complimentary



Blue LED  
+  
Yellow phosphor



#### 4.6.6 LED drive circuitry

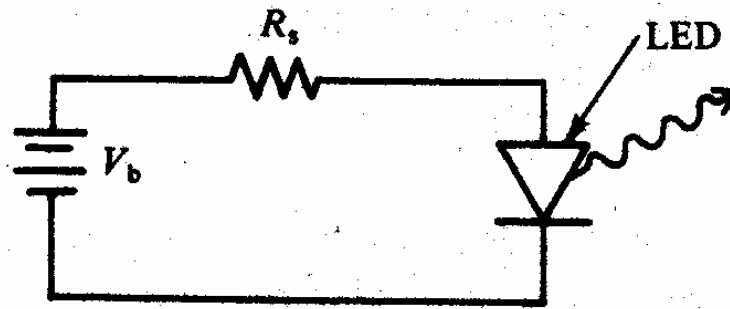
As we have seen, the electrical characteristics of LEDs are essentially those of ordinary rectifying diodes. Typical operating currents are between 20 mA and 100 mA, whilst the forward equal to the built-in diode potential, which in turn is slightly less than the energy gap expressed in eV.) Simple drive circuits for d.c. and a.c. voltage operation are shown in Figs 4.19(a) and (b) respectively. The current through the diode is limited by a series resistance  $R_s$  whose value may be calculated from

$$R_s = \frac{V_b - V_d}{i_d} \quad (4.20)$$

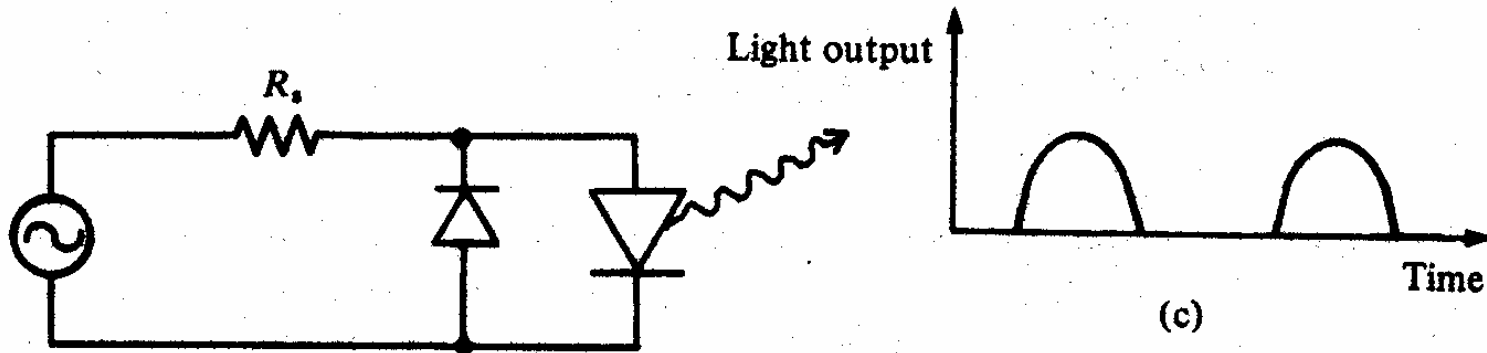
where  $V_b$  is the power source voltage,  $V_d$  the diode operating voltage and  $i_d$  the desired diode current. In the a.c. circuit, a rectifying diode is placed across the LED to protect it against reverse bias breakdown.

These two circuits provide for continuous 'on' operation. If it is desired to switch the diode on or off, or to modulate the output, then the circuits shown in Figs 4.20(a) and (b) respectively may be used. In Fig. 4.20(a) the transistor is used as a simple switch. With no voltage applied to the base, the transistor has a very high impedance between the collector and emitter and hence no current flows through the LED. If a large enough base voltage is then applied so that the emitter-base junction becomes heavily forward biased, the transistor has a relatively low impedance between emitter and collector and a substantial current can flow, resulting in the LED being turned on. In Fig. 4.20(b) the transistor is biased so that the quiescent diode current is about half its peak value and both the transistor and the LED are biased well into their linear regions. Changes in the current flowing through the LED are then directly proportional to changes in the input voltage.

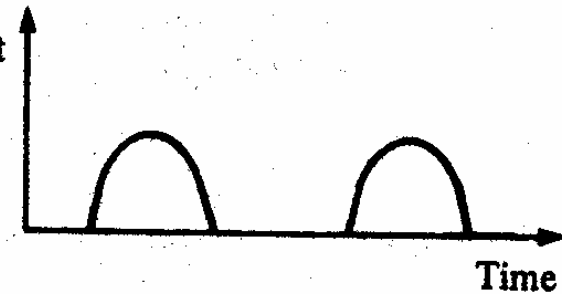
## Schema semplificato per il pilotaggio di un LED



(a)



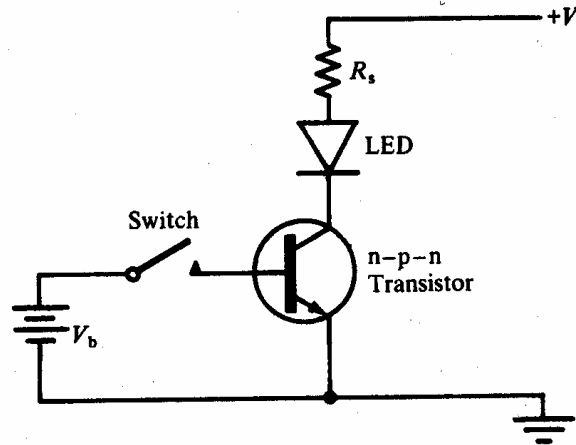
(b)



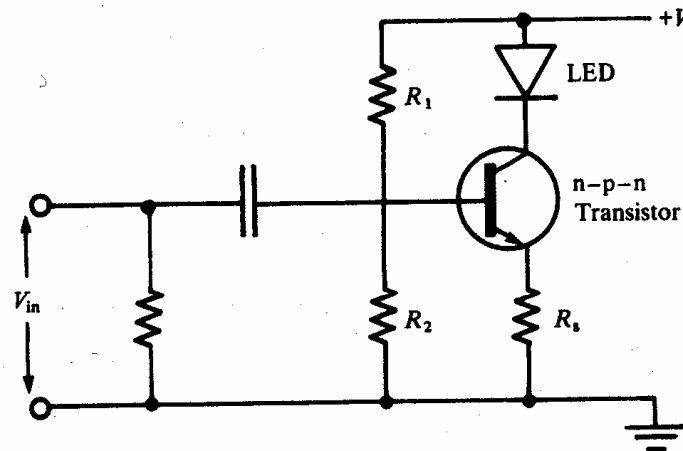
(c)

**FIG. 4.19** Simple LED drive circuits for (a) d.c. operation and (b) a.c. operation. In both cases a series resistor  $R_s$  limits the maximum current flow. In the a.c. circuit a diode is placed with reversed polarity across the LED to prevent damage from excessive reverse bias voltages; (c) shows the light output obtained with the circuit of (b).

## Schemi semplificati per la modulazione di un LED



(a)

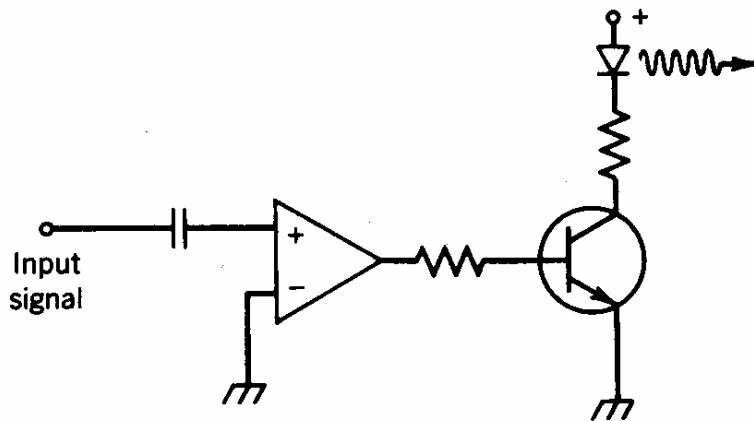


(b)

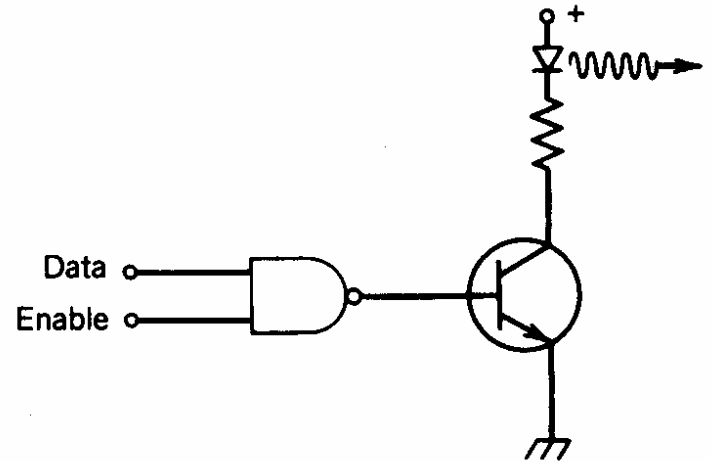
**FIG. 4.20** LED modulation circuits: (a) provides for a simple on/off modulation via a switch. The voltage  $V_b$  is sufficient to switch the transistor on. There is then a low impedance path between the collector and emitter terminals, and the current flowing through the LED is determined by the voltage  $V$  and the series resistance  $R_s$ . In (b) the diode output may be modulated by voltage  $V_{in}$ . The resistors  $R_1$  and  $R_2$  bias the transistor so that the average current through the transistor, and hence through the LED, is about half the maximum value. Both the transistor and the LED are then biased well into their linear regions.

# Schemi semplificati per la modulazione di un LED

The emitted light may be readily modulated (in either analog or digital format) simply by modulating the injected current. Two examples of such circuitry are the analog circuit shown in Fig. 16.1-13(c) and the digital circuit shown in Fig. 16.1-13(d). The performance of these circuits may be improved by adding bias current regulators, impedance matching circuitry, and nonlinear compensation circuitry. Furthermore, fluctuations in the intensity of the emitted light may be stabilized by the use of optical feedback in which the emitted light is monitored and used to control the injected current.



modulazione analogica



modulazione digitale

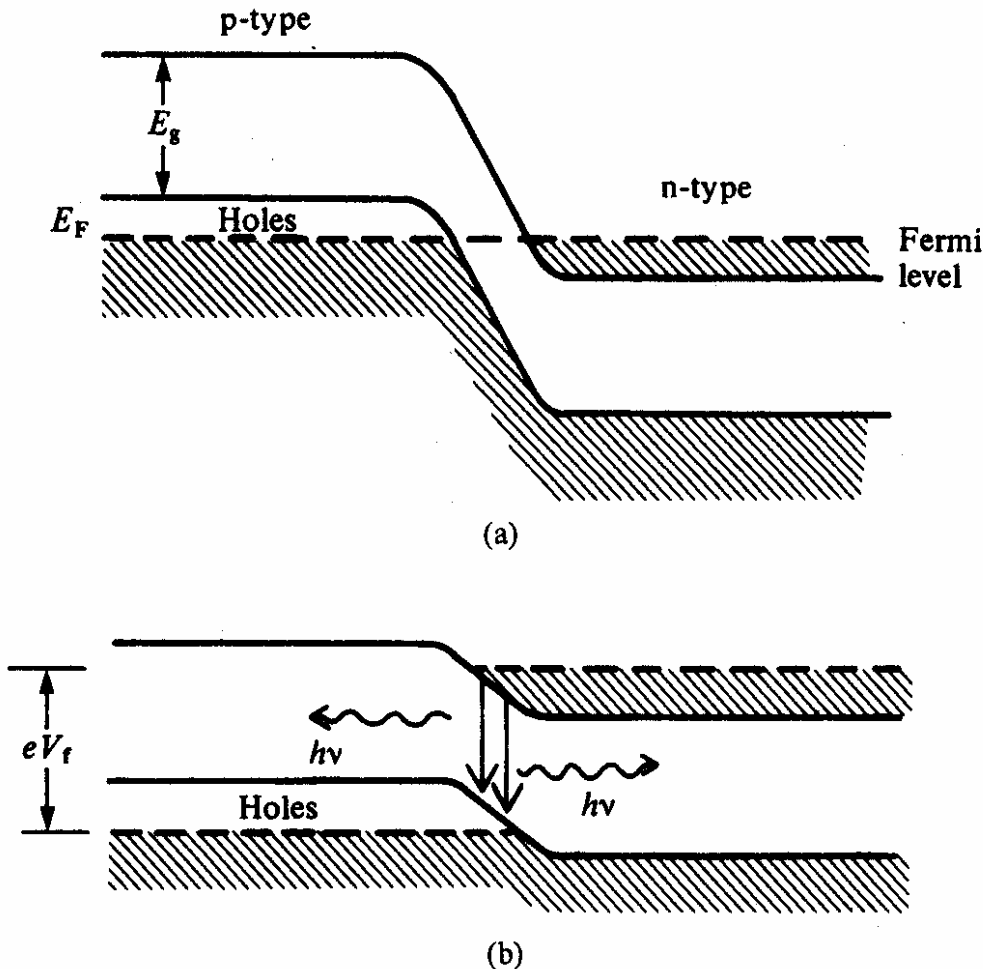
# Laser a semiconduttore (LD)

Principio di funzionamento simile a quello dei LED

La giunzione p-n costituisce il mezzo attivo. Per ottenere l'effetto laser occorrono: inversione di popolazione e feedback ottico (emissione stimolata)

Per aumentare l'inversione di popolazione (e favorire l'emissione stimolata) la giunzione è formata di solito da materiali p e n molto drogati.

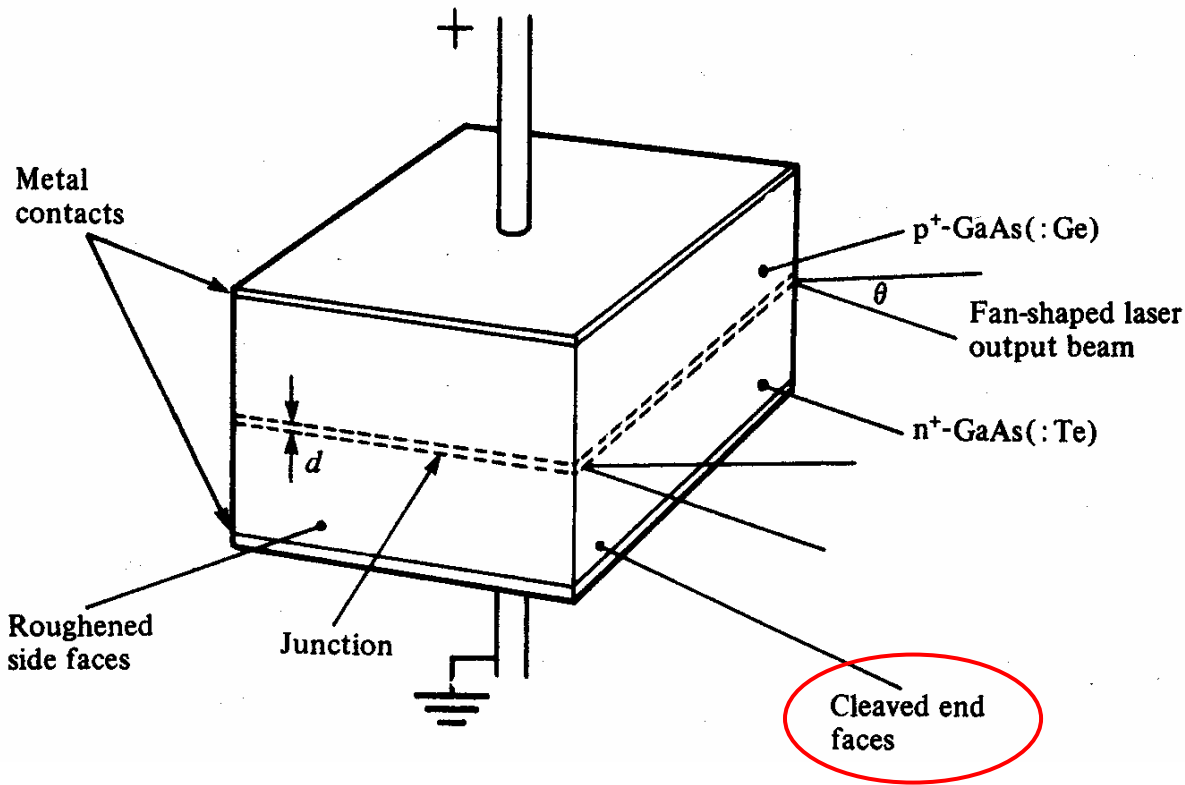
**In un materiale di tipo n molto drogato ( $n^+$ ) il livello di Fermi si trova nella banda di conduzione; per un materiale di tipo p molto drogato ( $p^+$ ) il livello di Fermi si trova nella banda di valenza**



# Feedback ottico nei diodi laser

La cavità risonante dei diodi laser (necessaria per ottenere un feedback ottico positivo) viene realizzata senza inserire specchi, ma semplicemente lavorando otticamente le superfici del cristallo.

L'indice di rifrazione elevato dei semiconduttori (es.  $n=3.6$  per il GaAs) fa in modo che la riflessione all'interfaccia con l'aria sia sufficientemente elevata ( $\approx 32\%$ )



Dall'equaz. di Fresnel, la riflettanza è:

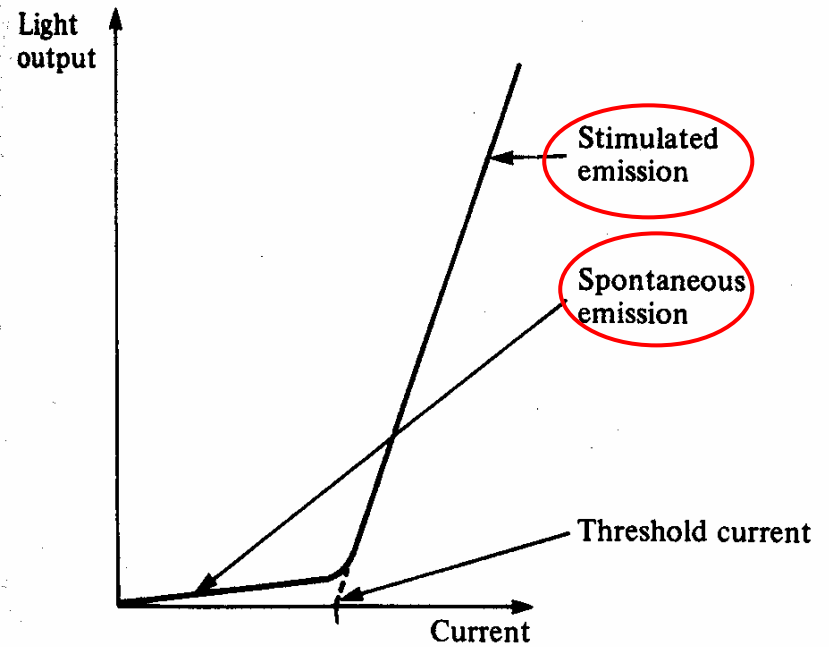
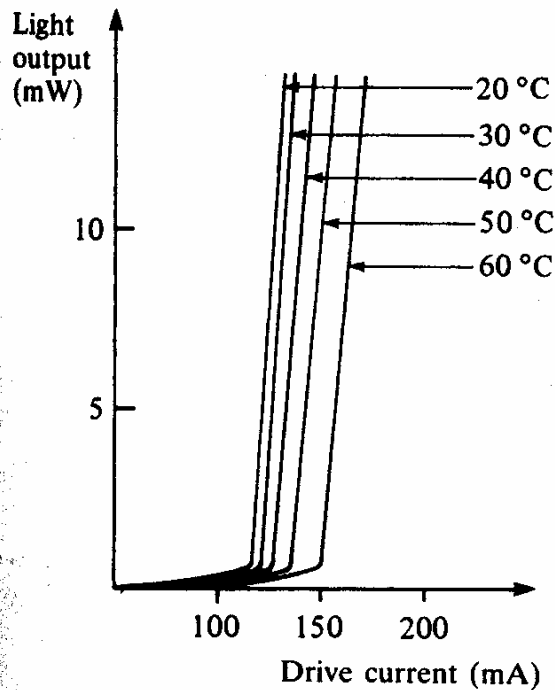
$$R = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$$

Nel caso di GaAs  $n_2 = 3.6$

quindi:

$$R = (3.6 - 1)^2 / (3.6 + 1)^2 = 0.32$$

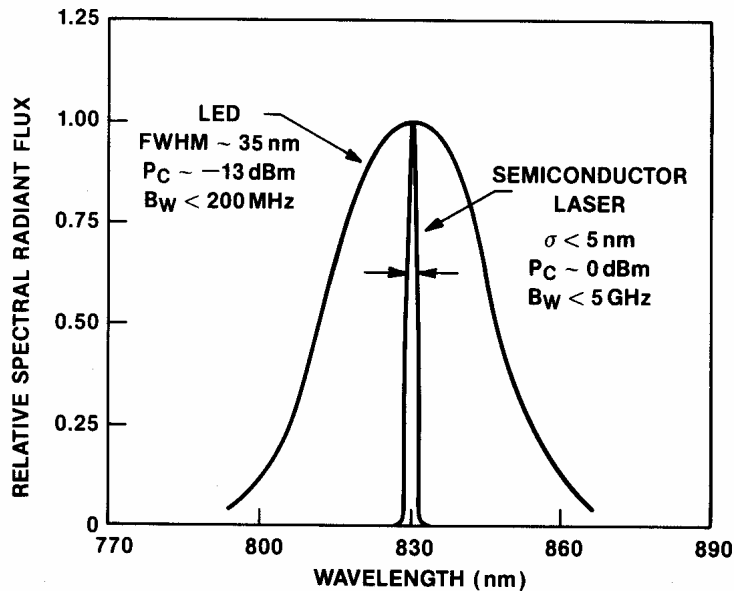
## Caratteristica intensità luminosa - corrente di un diodo laser



sensibilità alla temperatura  
della caratteristica di un  
diodo laser

# Diodo Laser vs. LED

confronto fra la potenza  
ottica di uscita vs. corrente  
di un LD e di un LED



confronto fra lo spettro di  
emissione dei un LD e  
quello di un LED

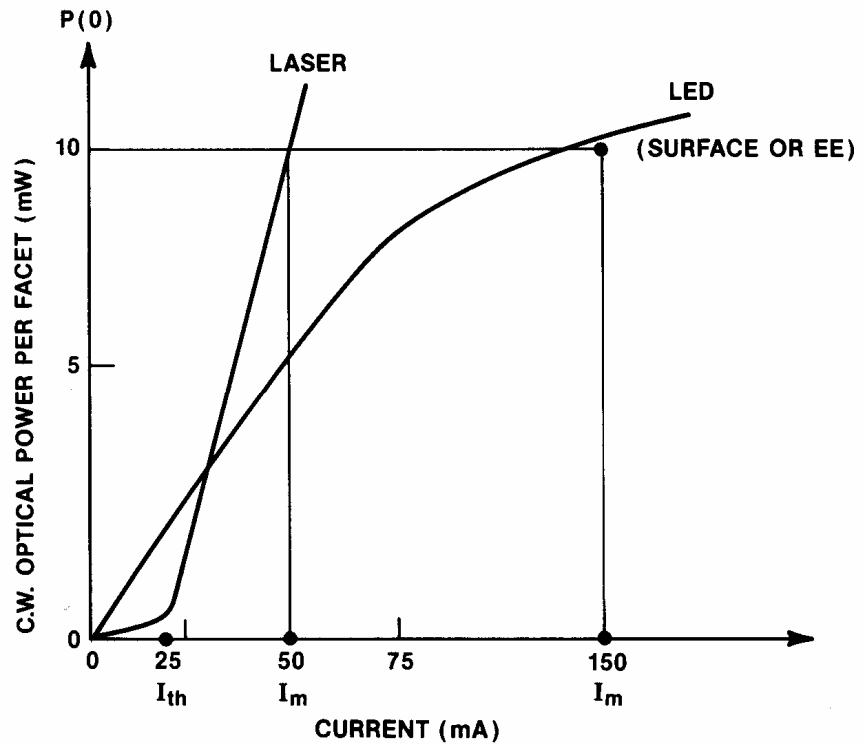
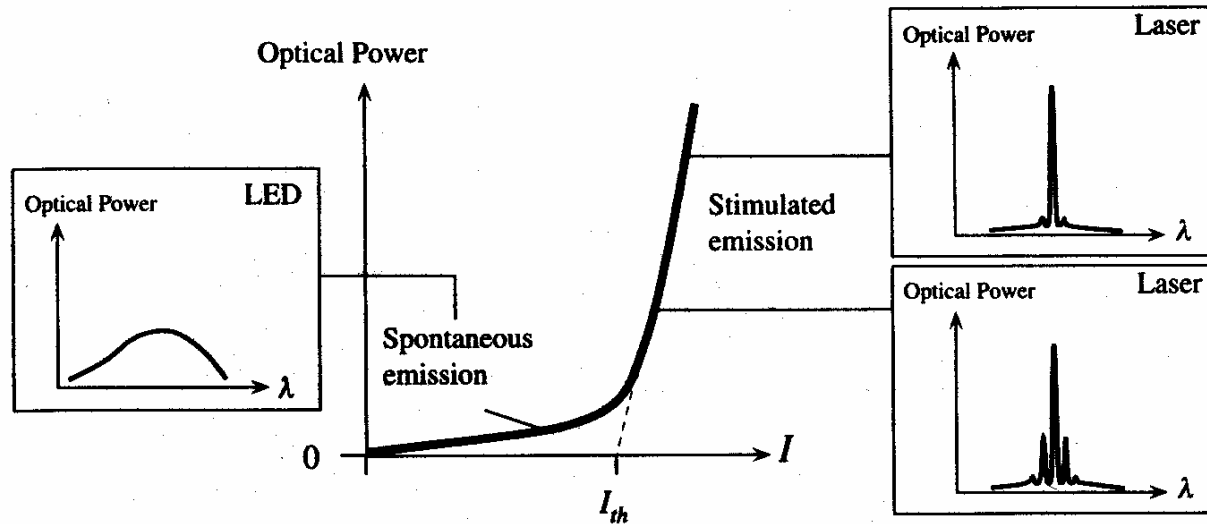


FIG. 12. Typical light-current characteristics of InGaAsP LEDs and lasers.

da: Tinge Li, "Topics in lightwave  
transmission systems", Academic  
Press, 1991



# Laser: potenza ottica vs. corrente



**FIGURE 4.17** Typical output optical power vs. diode current ( $I$ ) characteristics and the corresponding output spectrum of a laser diode.

L'effetto laser si ha solo quando il guadagno ottico del mezzo supera la perdita di fotoni dalla cavità. Ciò richiede che la corrente del diodo sia maggiore della corrente di soglia  $I_{th}$ .

Al di sotto di  $I_{th}$  si ha emissione spontanea. La luce, in questo caso, è composta da fotoni incoerenti emessi in modo casuale (il dispositivo si comporta come un LED).

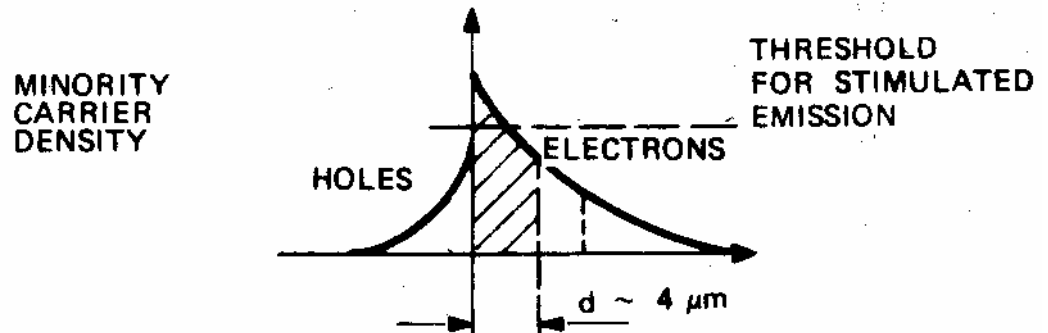
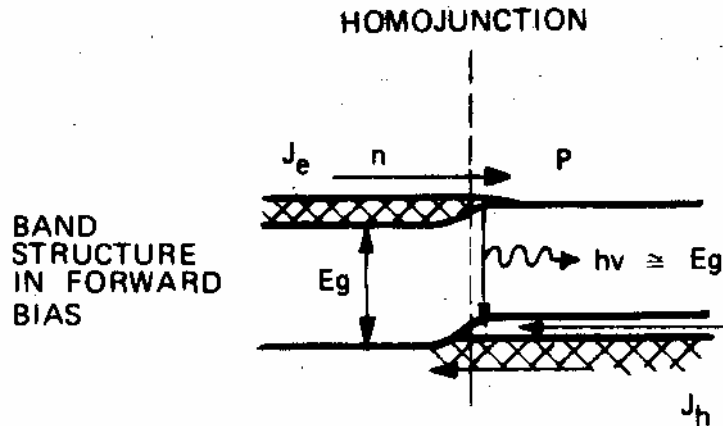
# Singola giunzione (homojunction)

I materiali costituenti la giunzione hanno lo stesso gap di energia  $E_g$

La concentrazione delle cariche iniettate diminuisce secondo una legge esponenziale, determinando una diffusione al di fuori della regione di ricombinazione.

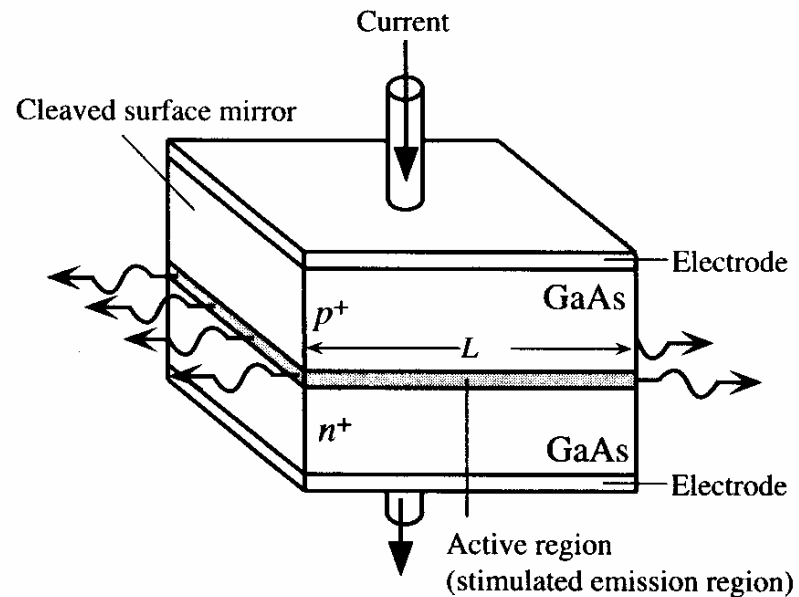
Quindi, una frazione considerevole delle cariche minoritarie, non contribuisce all'emissione stimolata.

Ciò determina la necessità di alte correnti per raggiungere la soglia di emissione stimolata



## Laser a singola giunzione (homojunction laser)

**FIGURE 4.16** A schematic illustration of a GaAs homojunction laser diode. The cleaved surfaces act as reflecting mirrors.



corrente di soglia troppo alta (alta temperatura della giunzione)

# Eterogiunzioni- Confinamento delle cariche

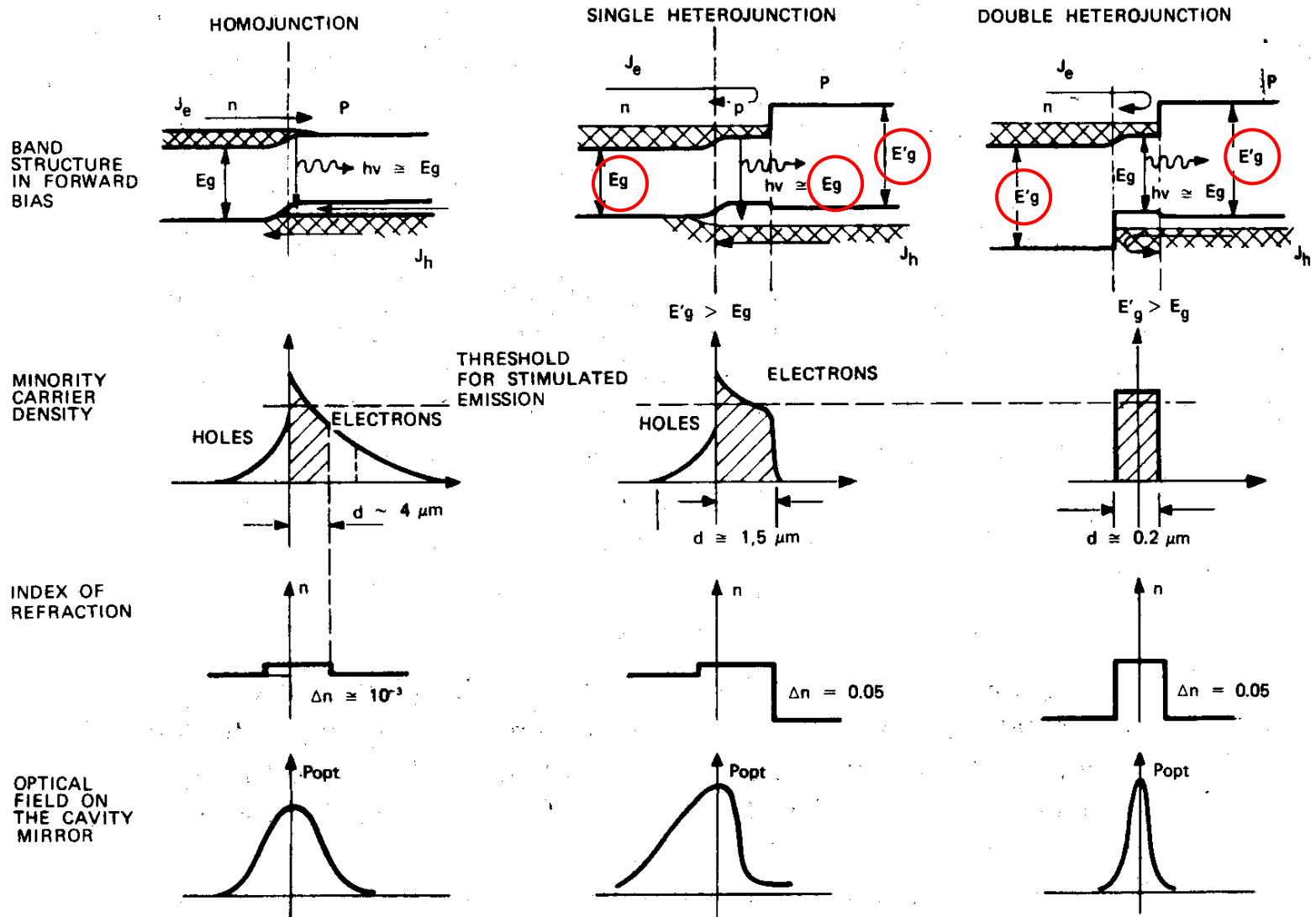
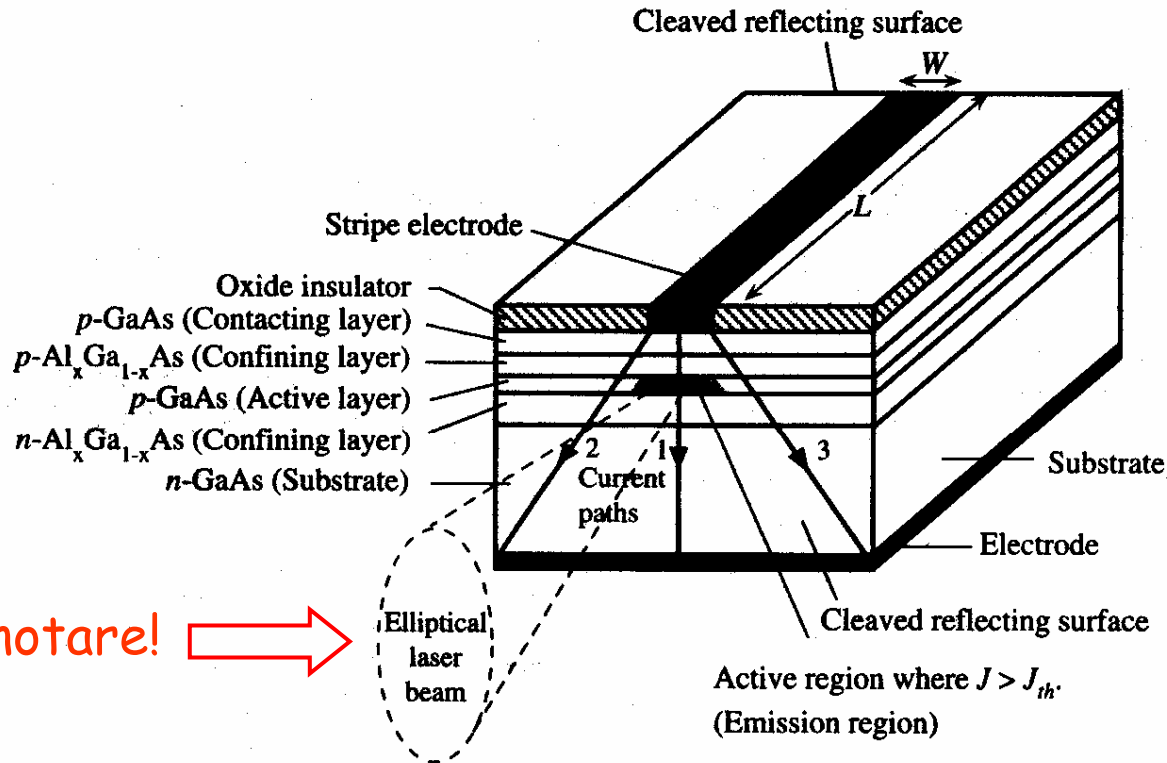


FIG. 19 – Comparison between the basic properties of a  $p$ - $n$  homojunction, a single heterojunction and a double heterojunction.

## Confinamento elettrico e ottico

The active region, having an  $E_g$  gap, inside the so-called double heterojunction structure appears delimited on both sides by material having a gap  $E'_g > E_g$ ; thus both electrons and holes are confined inside the same region, the thickness of which can therefore be reduced by about an order of magnitude as regards the value mentioned above. However, a second substantial advantage is connected to the double heterojunction symmetrical structure and concerns the fact that the refraction index of the central layer of energy gap  $E_g$  is greater than that of the adjacent layers with a gap  $E'_g$ . Consequently, the structure forms a planar dielectric guide, where the radiation is confined inside the central layer, in which the stimulated emission occurs, and does not appreciably penetrate into the external layers, where it would undergo a high attenuation. The combined effect of both electric and optical confinement operating in a double heterojunction allows the threshold current density to be reduced.

# Doppia eterogiunzione



## Confinamento

- elettrico
- ottico

**FIGURE 4.19** Schematic illustration of the structure of a double heterojunction stripe contact laser diode



corrente di soglia bassa

# Struttura interna di un modulo laser per comunicazioni ottiche

diodo laser (LD) + fotodiodo (PD)

Una parte dell'emissione del LD è raccolta dal PD, che fornisce un segnale di feedback utile per regolare la potenza emessa dal LD

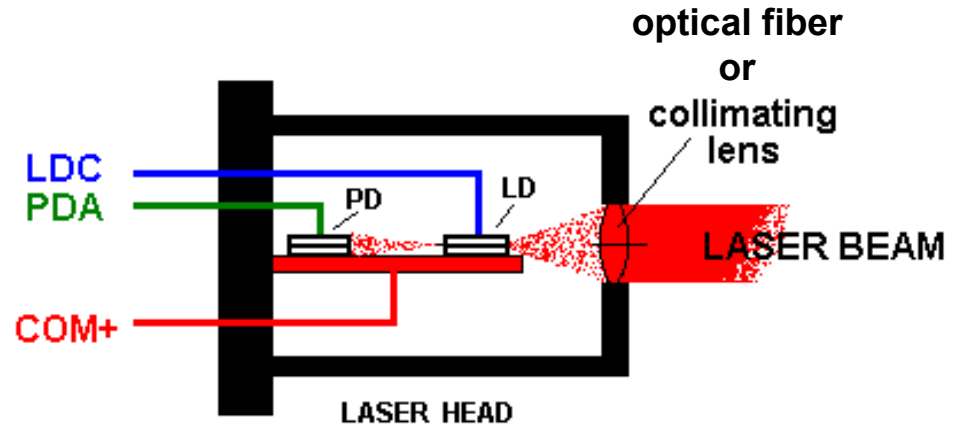


Figure 2

LD polarizzato direttamente

PD polarizzato inversamente

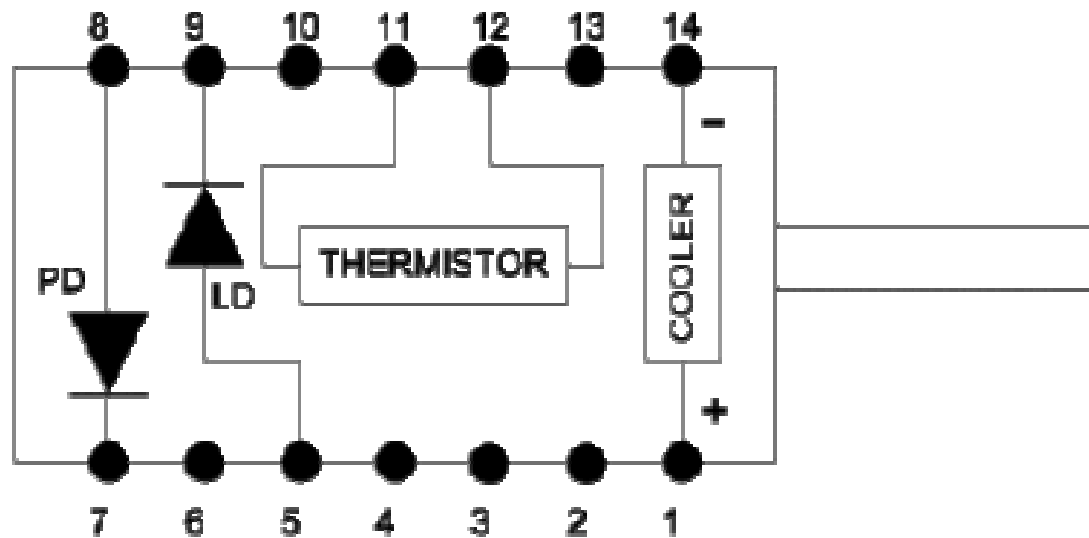
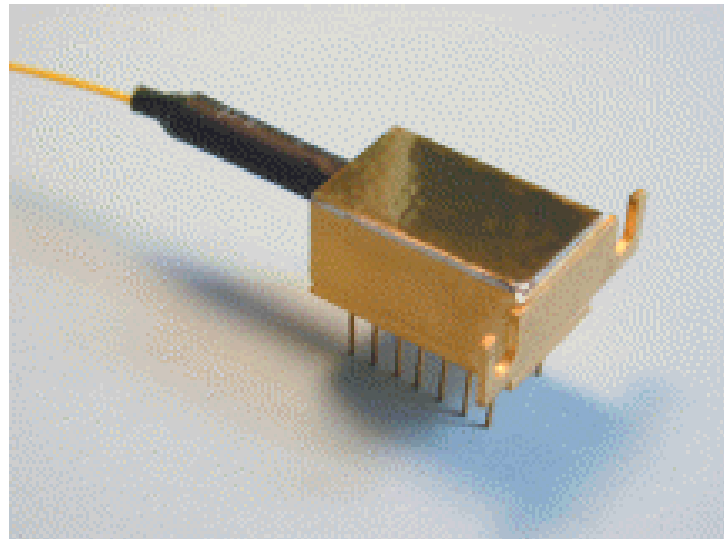
LDC = Laser Diode Cathode

PDA = Photo Diode Anode

COM+ = Common Positive Terminal

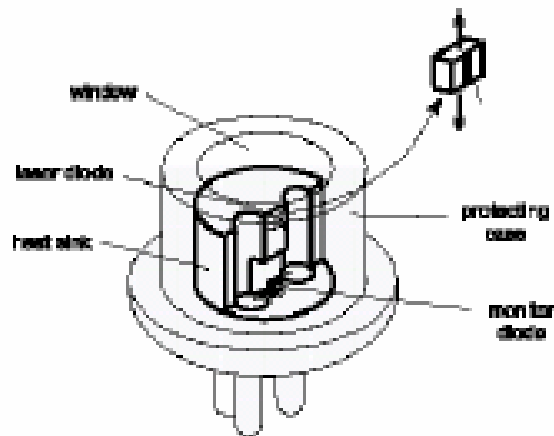
Poichè la risposta dei LD è sensibile alla temperatura, di solito questi moduli includono anche un sistema di termostattizzazione della giunzione del LD, realizzato con celle Peltier. Un tale sistema è detto Termo Electric Cooler (TEC)

Modulo laser  
"DIL-14 package"

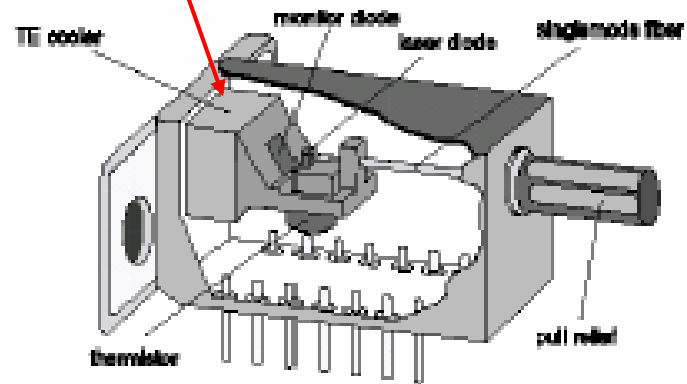




# Thermoelectric Cooler (TEC)

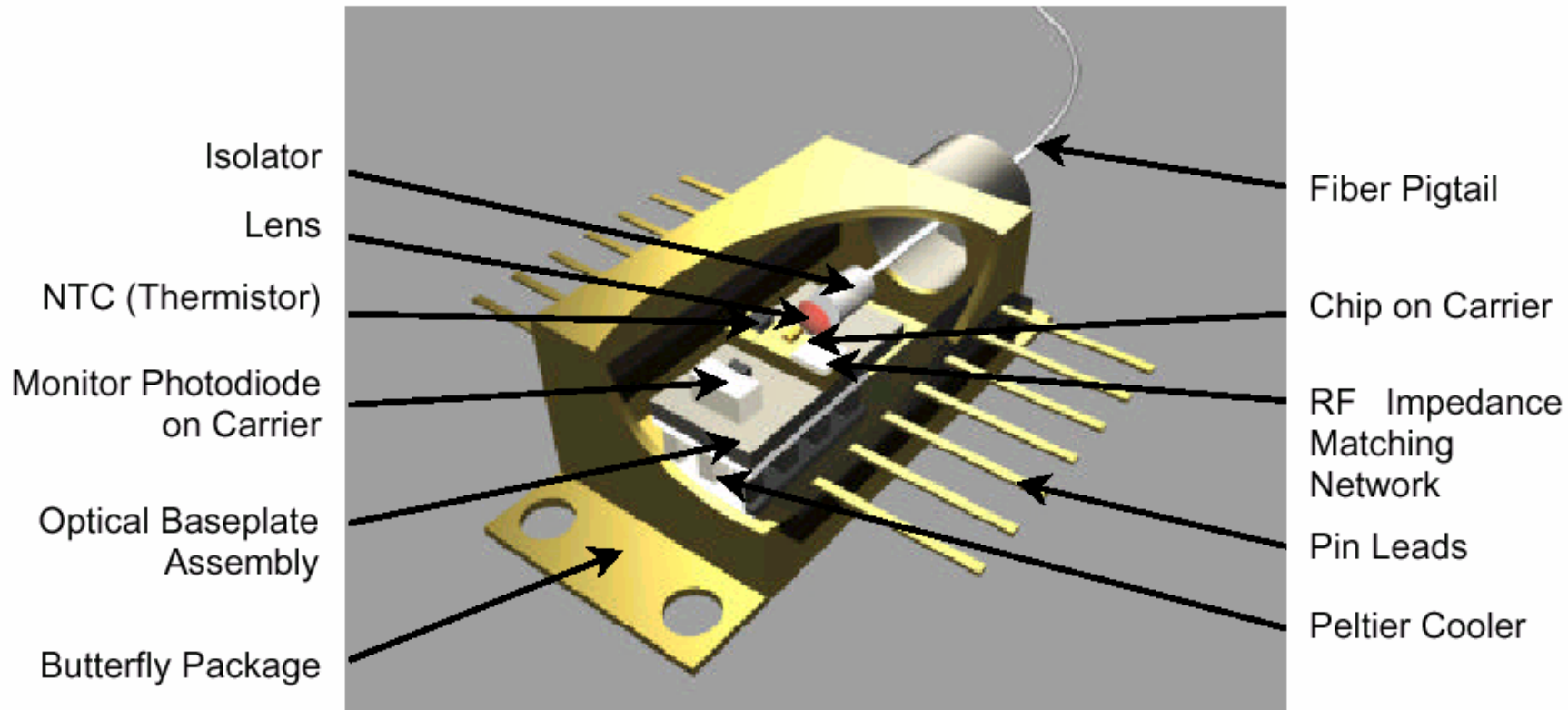


Set-up of a CAN-package  
(TO-18 or TO-46)



DIL-14 package with laser diode, monitor diode  
DIL-14 package with laser diode, monitor diode

# modulo laser "butterfly package"



**Figure 1: Generic Layout of Butterfly Laser Module**

# Schema semplificato di alimentatore per moduli laser

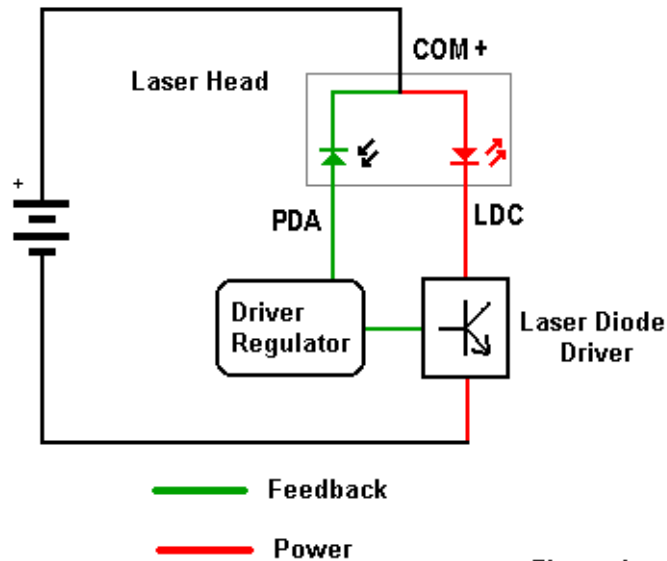


Figure 1

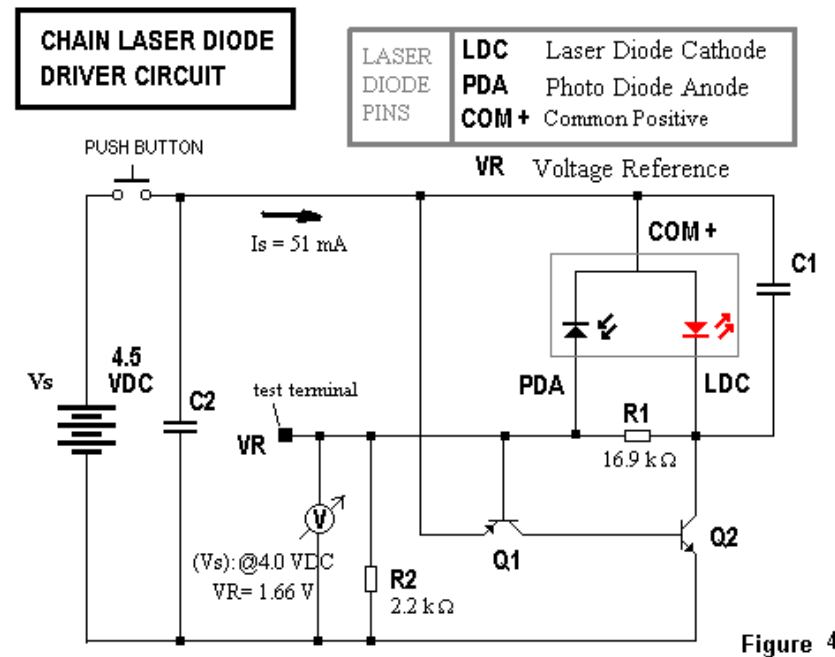


Figure 4

## Esempio di semplice sistema di trasmissione digitale in fibra ottica

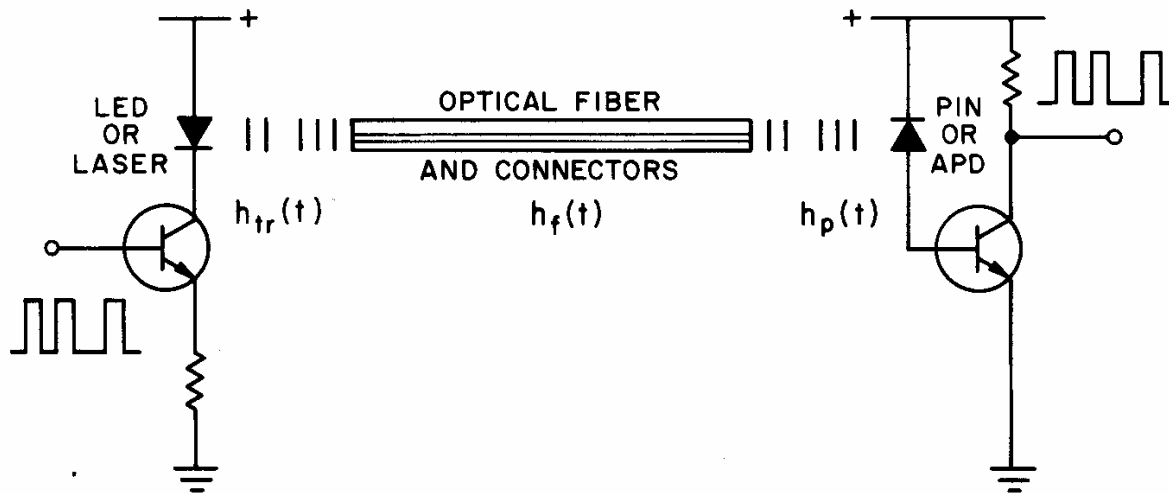


FIG. 5. A simple lightwave system.