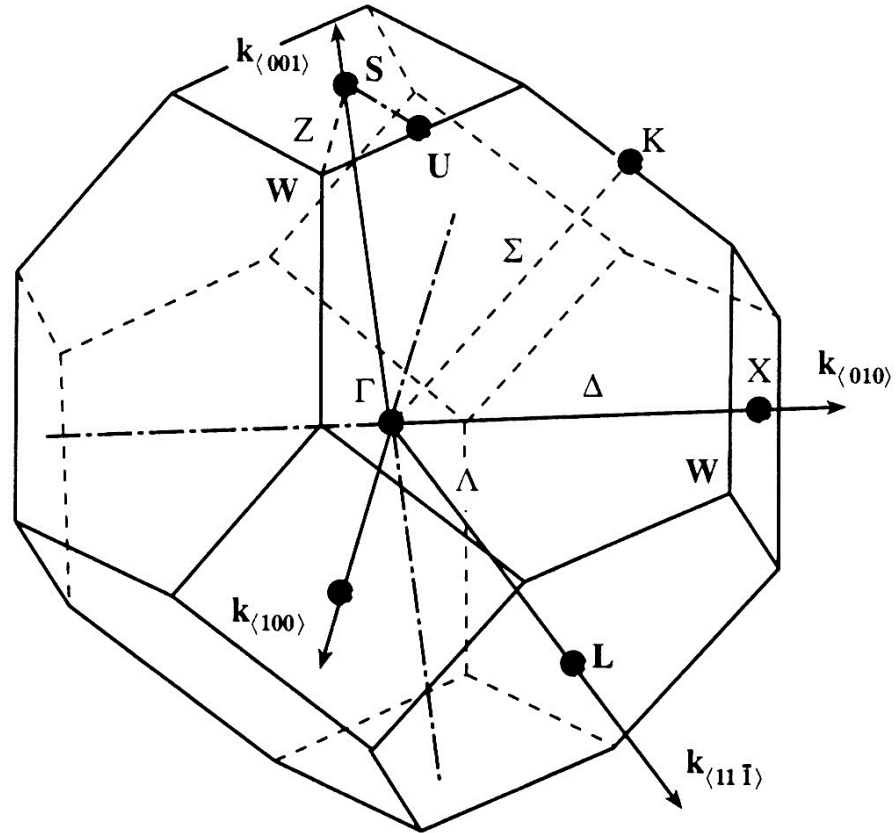


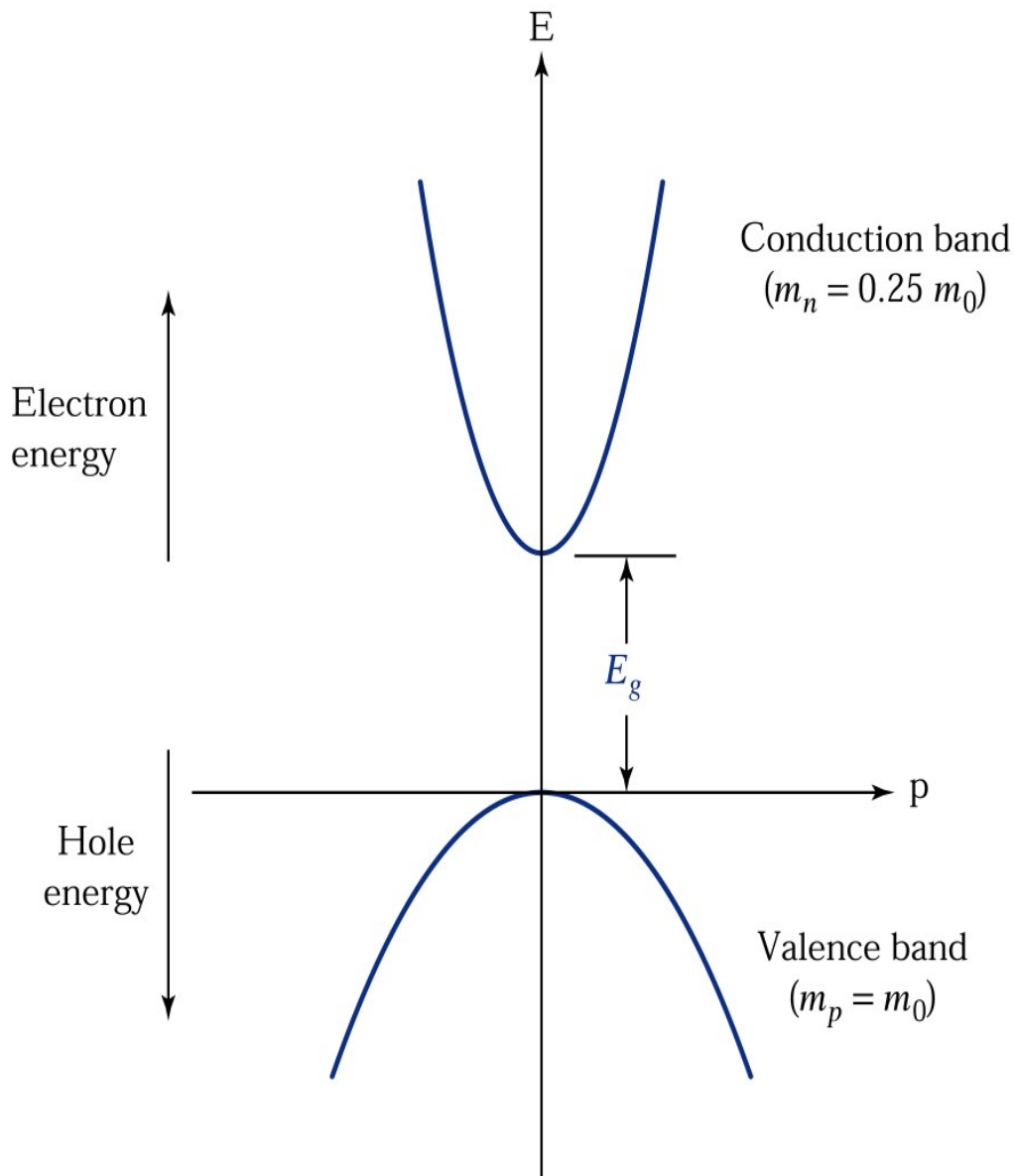
# Semiconductor materials for Lasers and Photoreceivers

Annamaria Cucinotta

Photonic Devices

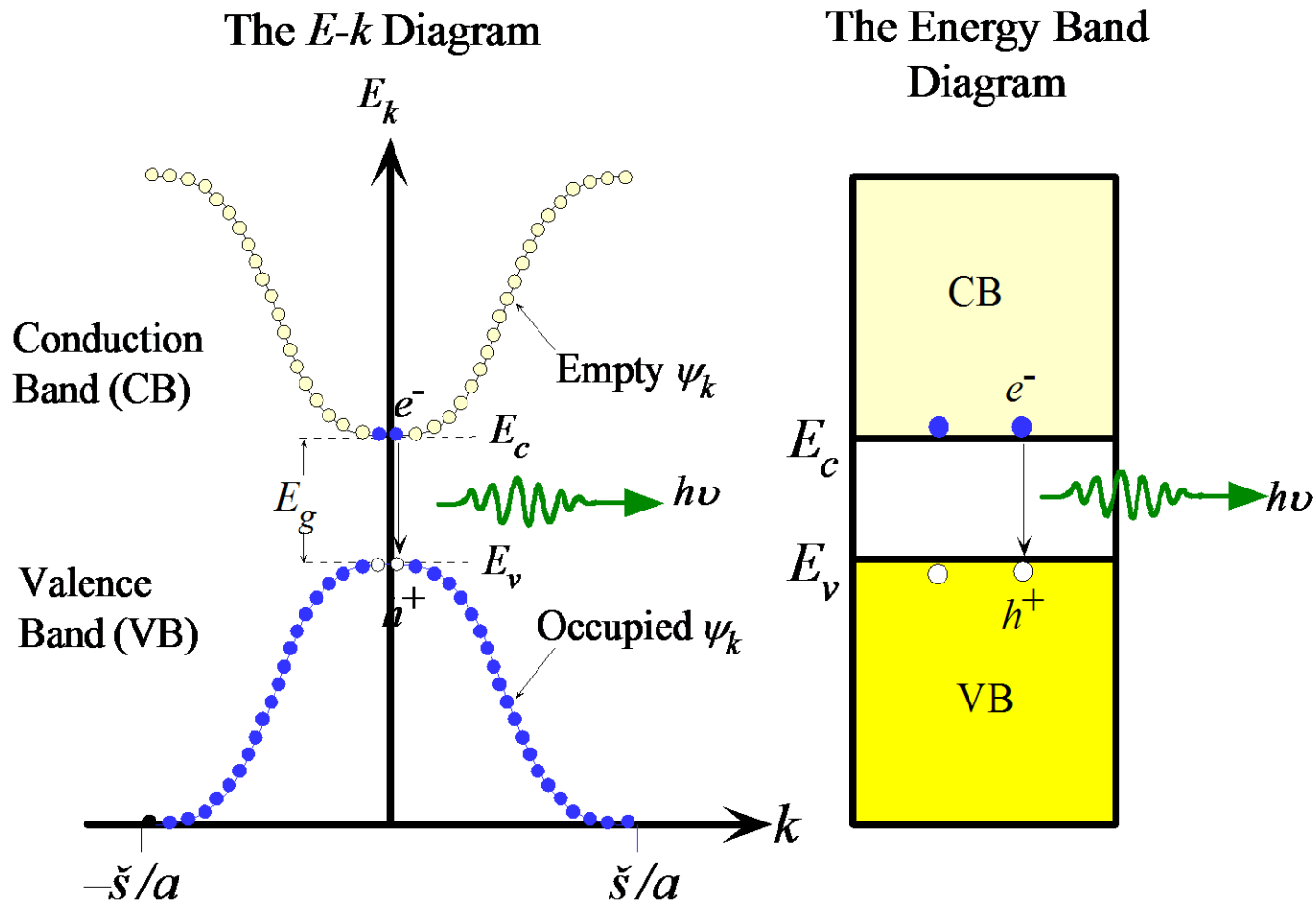
# GaAs Brillouin Zone





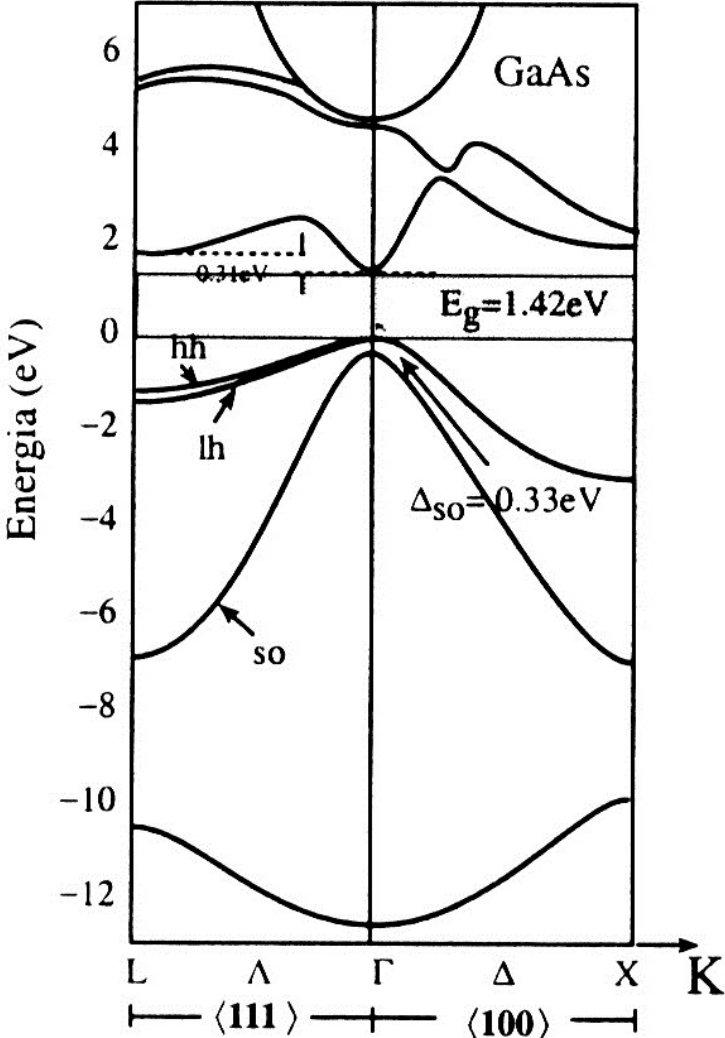
**Figure 2.17.**  
A schematic energy-momentum diagram for a special semiconductor with  $m_n = 0.25 m_0$  and  $m_p = m_0$ .

*A causa della natura ondulatoria dell'elettrone, e della periodicità del potenziale nel cristallo, anche i valori di  $p$  possibili sono periodici e dipendono dalla direzione*

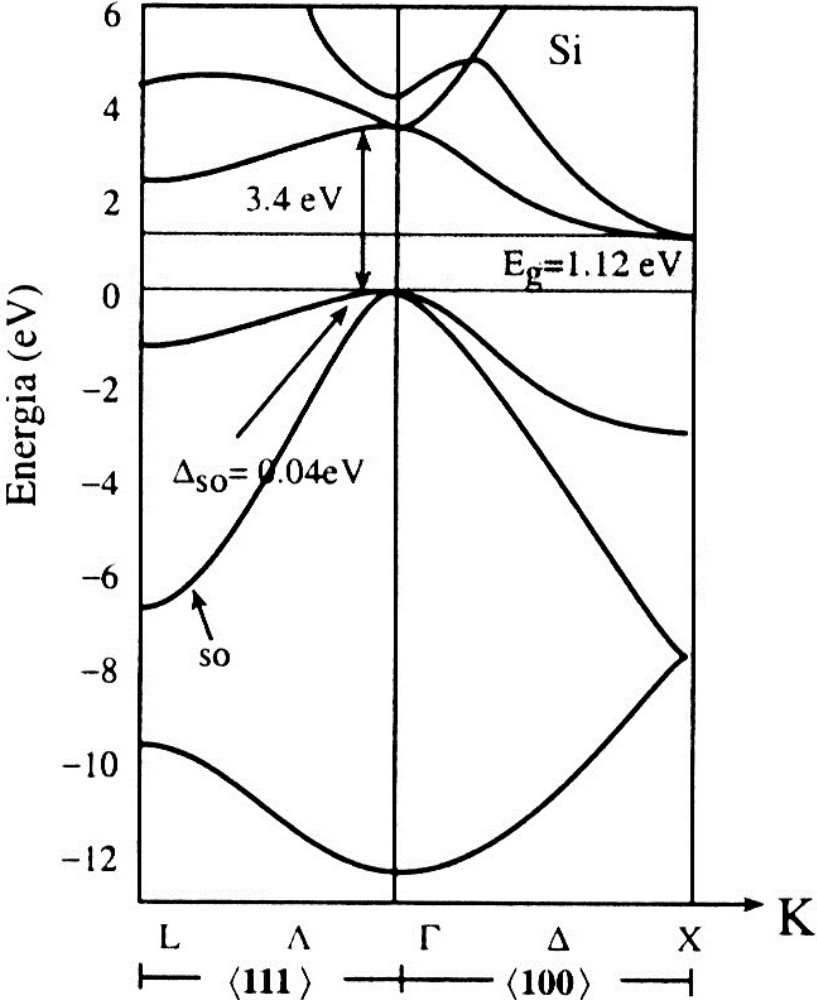


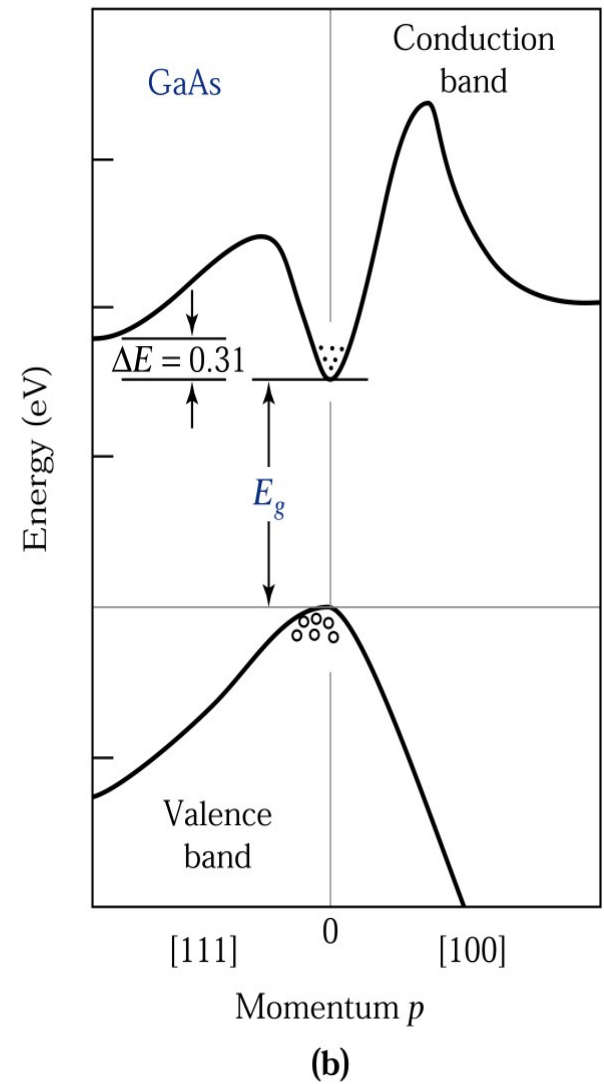
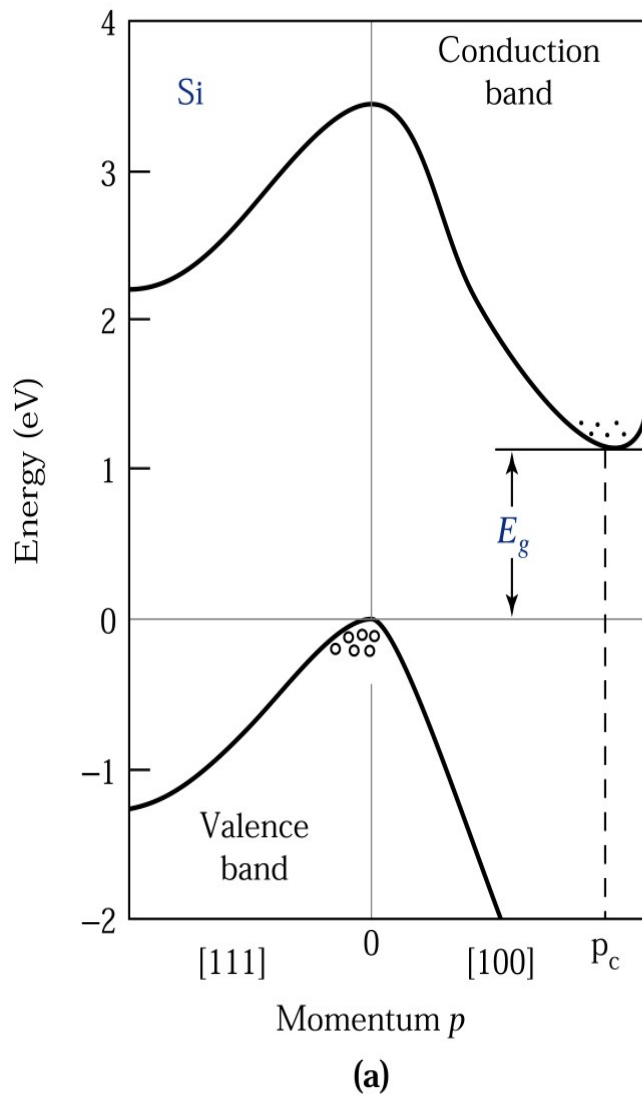
The  $E$ - $k$  diagram of a direct bandgap semiconductor such as GaAs. The  $E$ - $k$  curve consists of many discrete points with each point corresponding to a possible state, wavefunction  $\psi_k(x)$ , that is allowed to exist in the crystal. The points are so close that we normally draw the  $E$ - $k$  relationship as a continuous curve. In the energy range  $E_v$  to  $E_c$  there are no points ( $\psi_k(x)$  solutions).

# GaAs direct bandgap

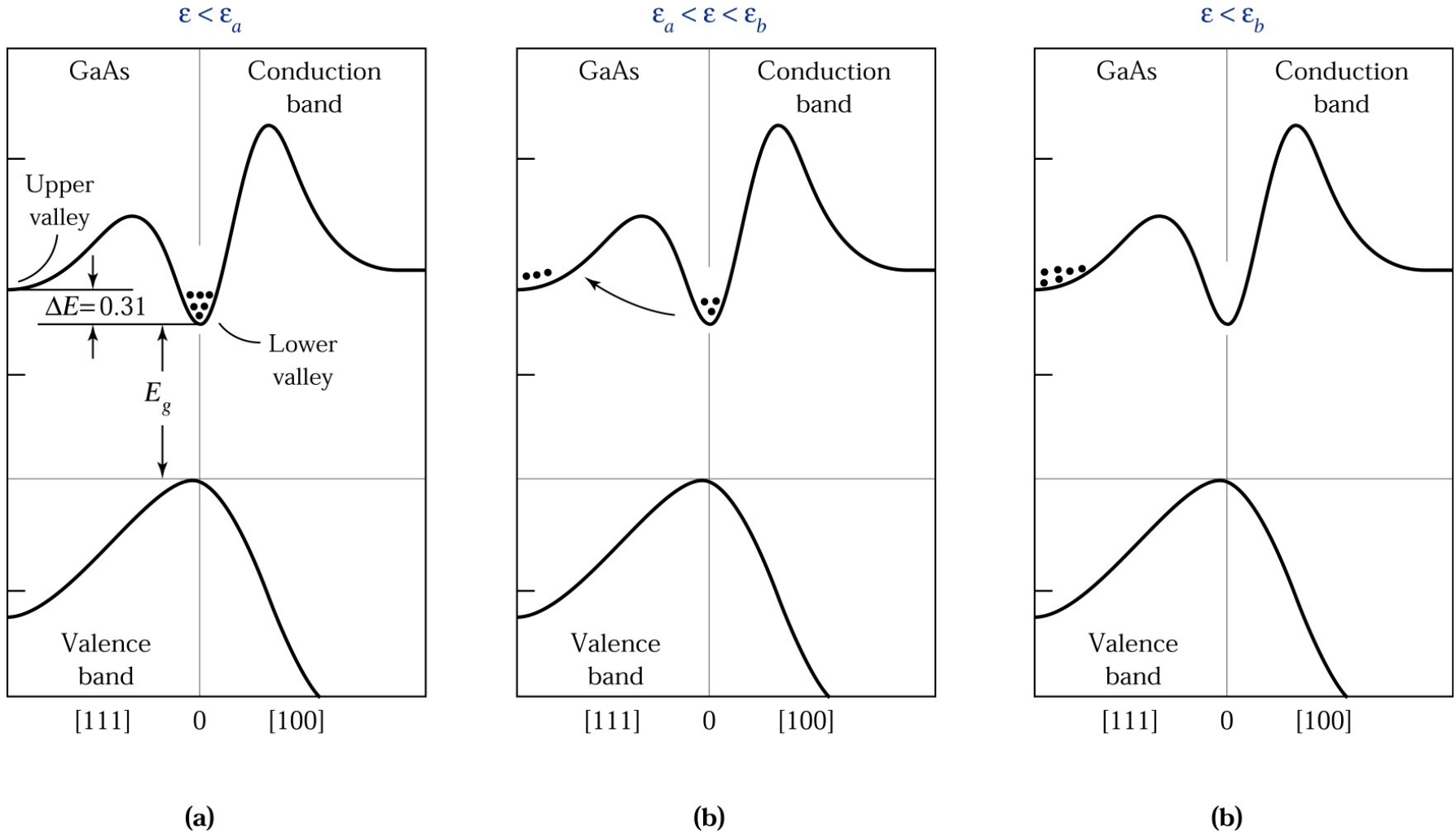


# Si indirect bandgap

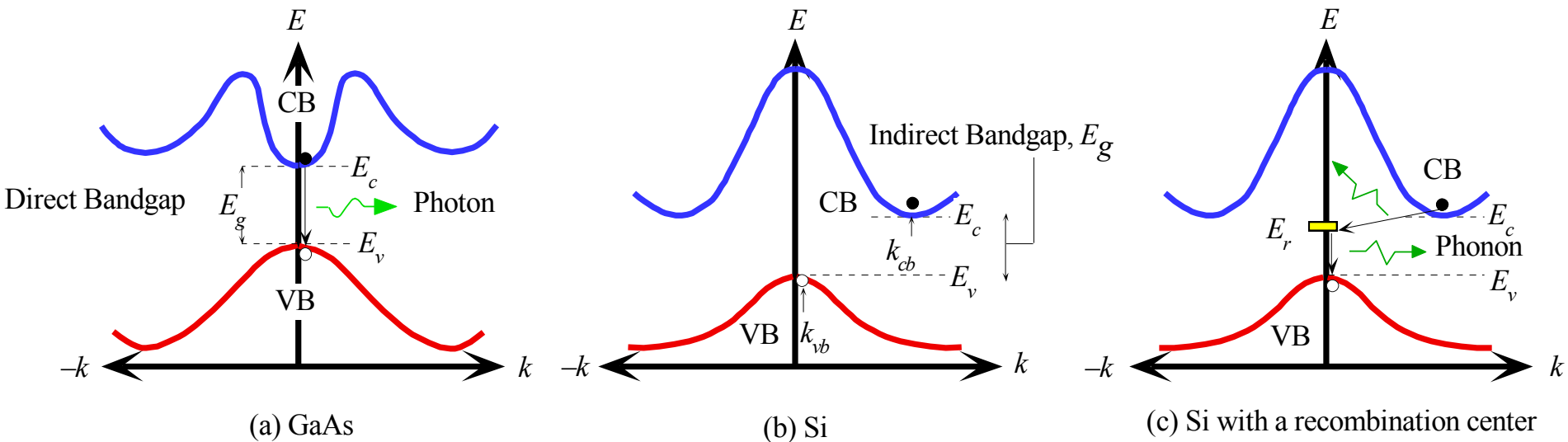




**Figure 2.18.** Energy band structures of Si and GaAs. Circles ( $\circ$ ) indicate holes in the valence bands and dots ( $\bullet$ ) indicate electrons in the conduction bands.



**Figure 3.23.** Electron distributions under various conditions of electric fields for a two-valley semiconductor.



(a) In GaAs the minimum of the CB is directly above the maximum of the VB. GaAs is therefore a direct bandgap semiconductor. (b) In Si, the minimum of the CB is displaced from the maximum of the VB and Si is an indirect bandgap semiconductor. (c) Recombination of an electron and a hole in Si involves a recombination center.



# Semiconduttori ternari e quaternari

- formati da leghe di tre o quattro elementi
- conservano in genere la struttura cristallina dei composti binari da cui derivano
- si modifica leggermente il parametro reticolare
- cambia drasticamente il valore (e talora la natura) dell'energy-gap

# Semiconduttori ternari e quaternari

Da GaAs a AlAs :  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  con  $0 \leq x \leq 1$

$$E_g = 1.424 + 1.247x \quad \text{gap diretta, } x < 0.45$$

$$E_g = 1.900 + 0.125x + 0.143x^2 \quad \text{gap diretta, } x \geq 0.45$$

## Legge di Vegard

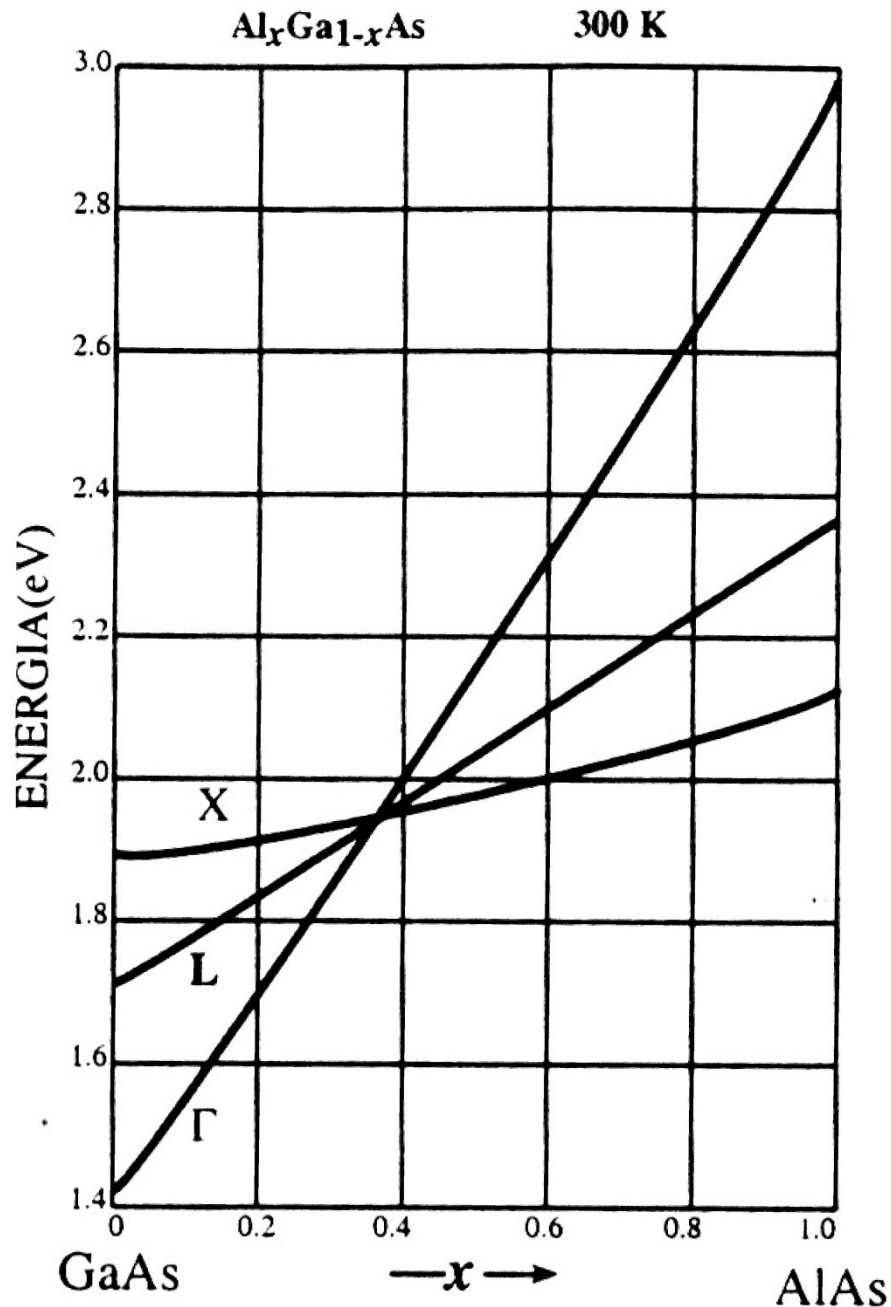
I valori dei parametri  $P(A_xB_{1-x}C)$  dei composti ternari e quaternari possono essere ottenuti per interpolazione lineare da quelli dei composti binari  $P(AC)$  e  $P(BC)$

$$P(A_xB_{1-x}C) = xP(AC) + (1-x)P(BC)$$

Composti quaternari

$$P(A_{1-x}B_xC_yD_{1-y}) = (1-x)yP(AC) + (1-x)(1-y)P(AD) + x(1-y)P(BD)$$

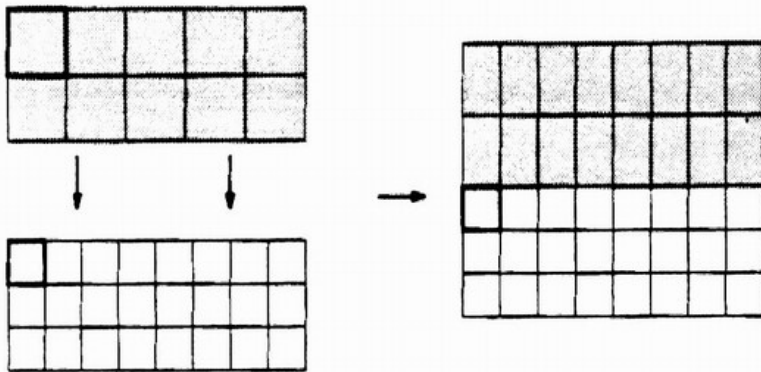
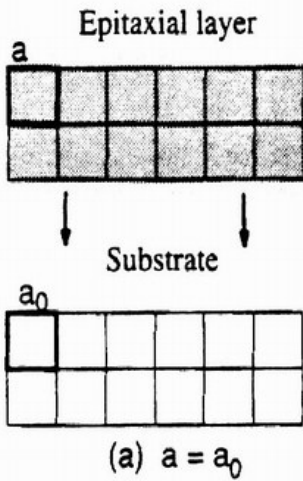
$P$  = energy gap, costante reticolare, ecc.



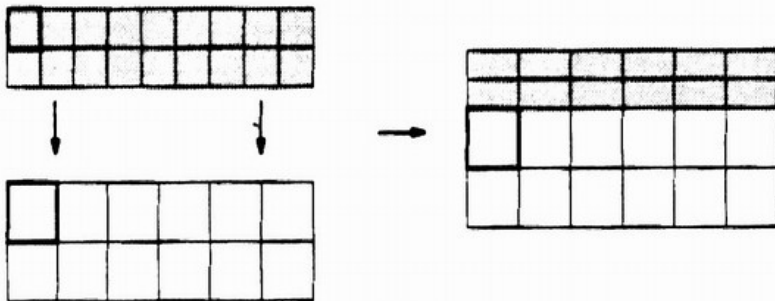
Energia del minimo della banda di conduzione in funzione di  $x$  in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  a 300 K

Si possono creare *eterogiunzioni* tra materiali con energy gap diverso

Si possono quindi ottimizzare le proprietà elettriche e ottiche dei dispositivi



(b)  $a > a_0$



(c)  $a < a_0$

Purtroppo anche il parametro reticolare può cambiare

Disaccordo reticolare

Lattice mismatch  $\Delta a/a = (a - a_0)/a$

$a_0$  = costante reticolare del sub.

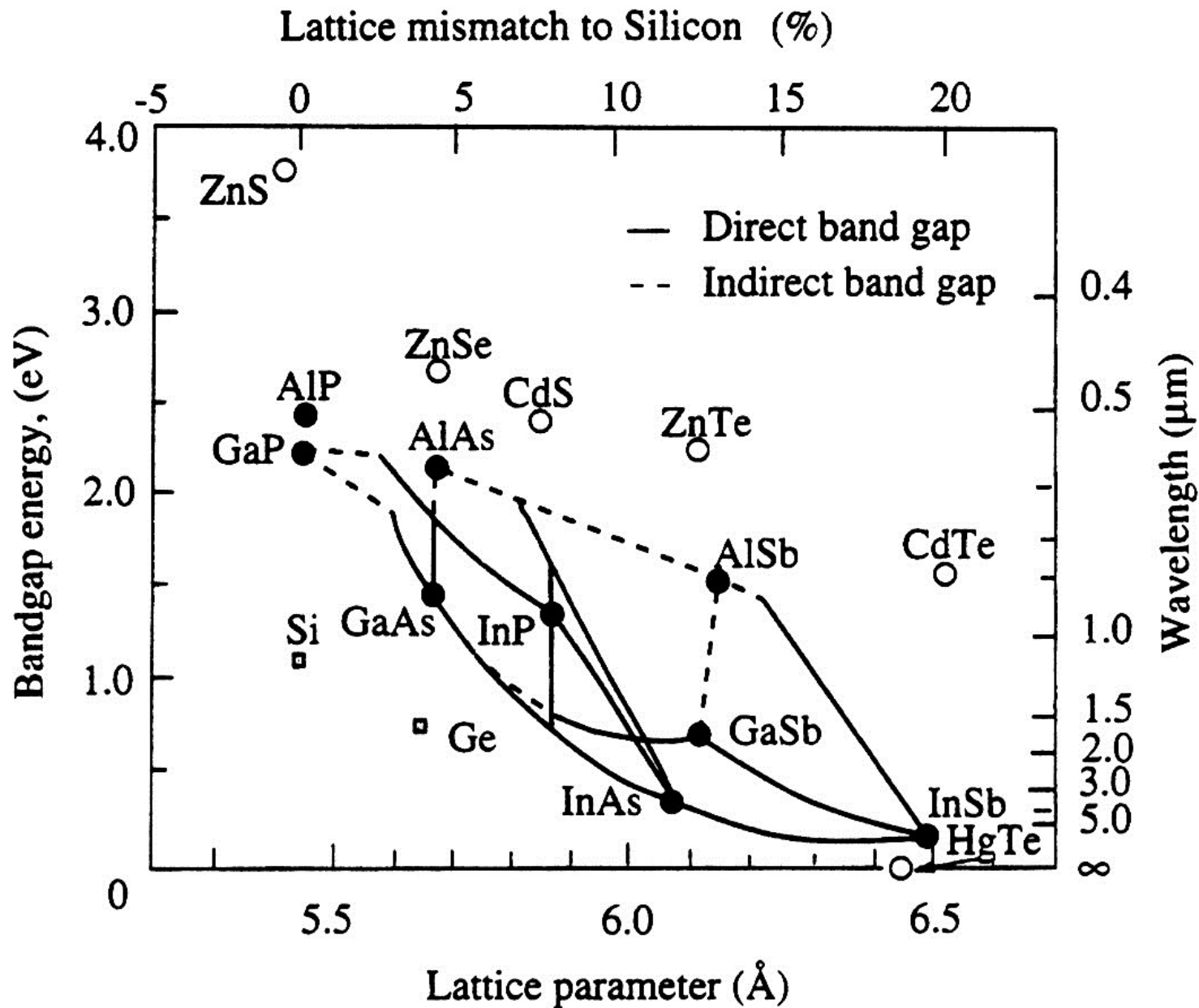
$a$  = costante reticolare del film cresciuto

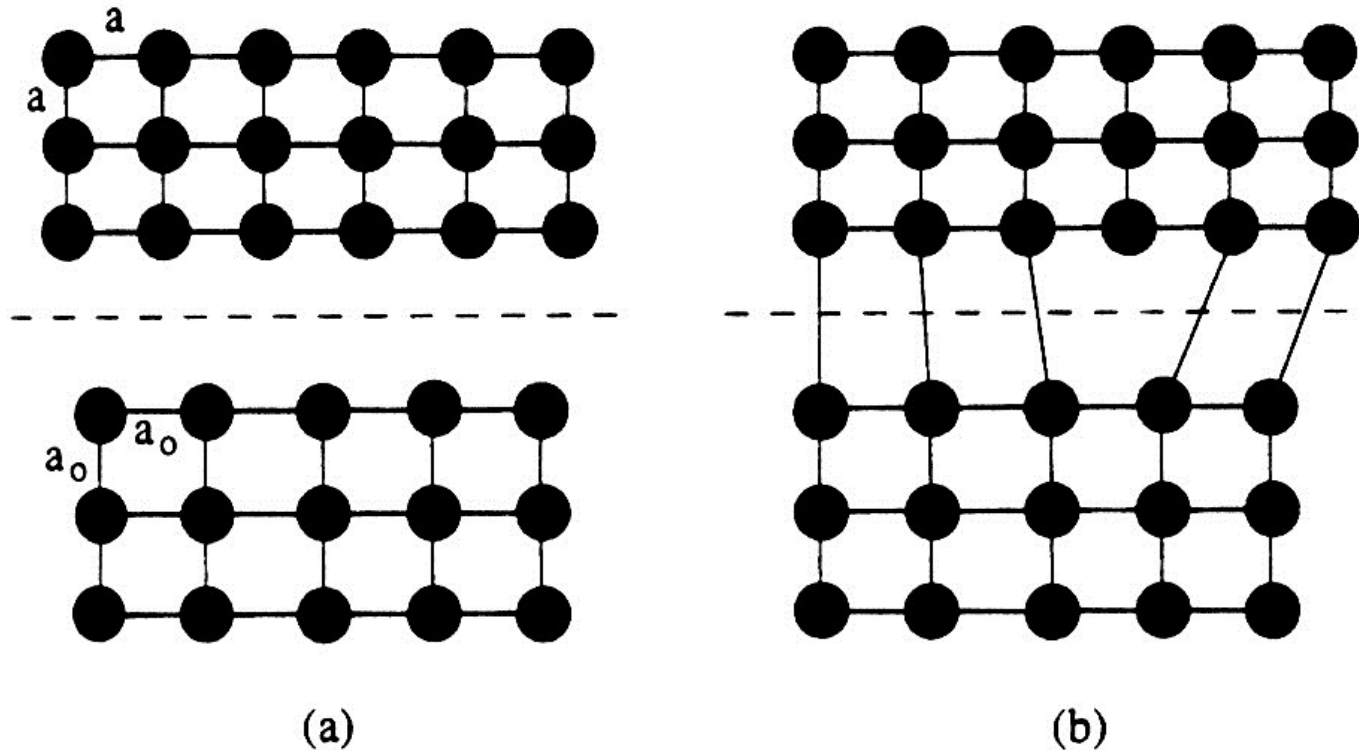
Deve essere entro il 5%

(a)  $a = a_0$  "lattice-matched"

(b)  $a > a_0$  strain compressivo

(c)  $a < a_0$  strain tensile





Se il mismatch è troppo grande, oltre un certo spessore dello strato cresciuto si creano dei difetti nel cristallo che permettono di "rilassare" lo strain

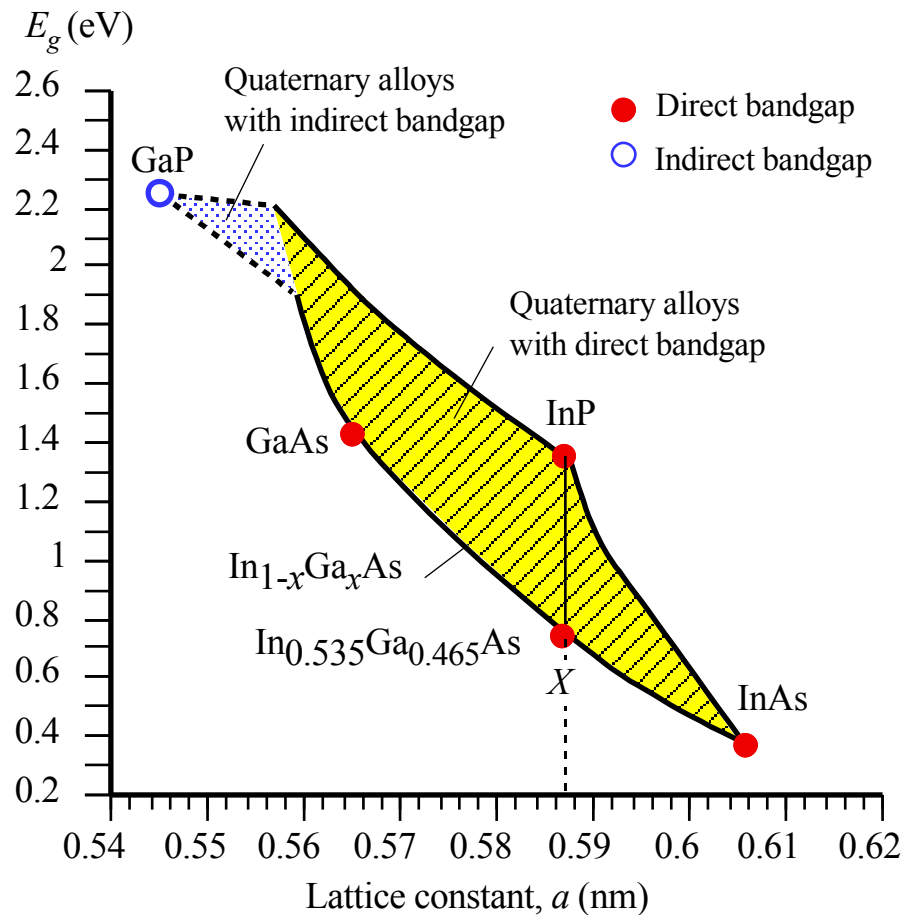
L'evoluzione dei materiali per optoelettronica segue l'evoluzione dei sistemi per telecomunicazione su fibra ottica.

Fine anni '70: fibre multimodo in silice  
emettitori a 850 nm, sistema AlGaAs/GaAs

Anni '80: sfruttamento del minimo di dispersione cromatica a 1300 nm e del minimo di assorbimento a 1550 nm delle fibre in silice monomodo, si usa il sistema quaternario InGaAsP

Oggi la maggior parte dei sistemi opera a 1550 nm con amplificatori ottici a fibre drogate Er (erbio)





Bandgap energy  $E_g$  and lattice constant  $a$  for various III-V alloys of GaP, GaAs, InP and InAs. A line represents a ternary alloy formed with compounds from the end points of the line. Solid lines are for direct bandgap alloys whereas dashed lines for indirect bandgap alloys. Regions between lines represent quaternary alloys. The line from X to InP represents quaternary alloys  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  made from  $\text{In}_{0.535}\text{Ga}_{0.465}\text{As}$  and InP which are lattice matched to InP.

## Sistemi lattice-matched

GaP e  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$  cresciuti su GaAs o GaP per LED che emettono luce visibile (ma sono a  $E_g$  indiretto!)

$\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  ( $E_g=1.96$  eV) e  $\text{Al}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$  ( $E_g=2.45$  eV) sono lattice-matched su GaAs per rivelatori ed emettitori nel visibile

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  e GaAs sono lattice-matched per ogni valore di  $x$  ad esempio per i laser a 780 nm utilizzati per i lettori CD

## Sistemi lattice-matched

Alle lunghezze d'onda elevate tipiche delle comunicazioni su fibra ottica (1.3-1.6  $\mu\text{m}$ ), dominano i sistemi basati sui composti ternari e quaternari "lattice-matched" su InP  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  (0.74 eV) e  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  (1.45 eV) cresciuti su InP, e i composti quaternari InGaAlAs e InGaAsP che coprono il range di  $E_g$  compreso tra questi estremi

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$  ( $y=2.2x$  per avere lattice matching)

Le eterogiunzioni  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{(1-x-y)}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  sono ampiamente utilizzate per LED, laser, rivelatori, modulatori, celle solari ad alta efficienza

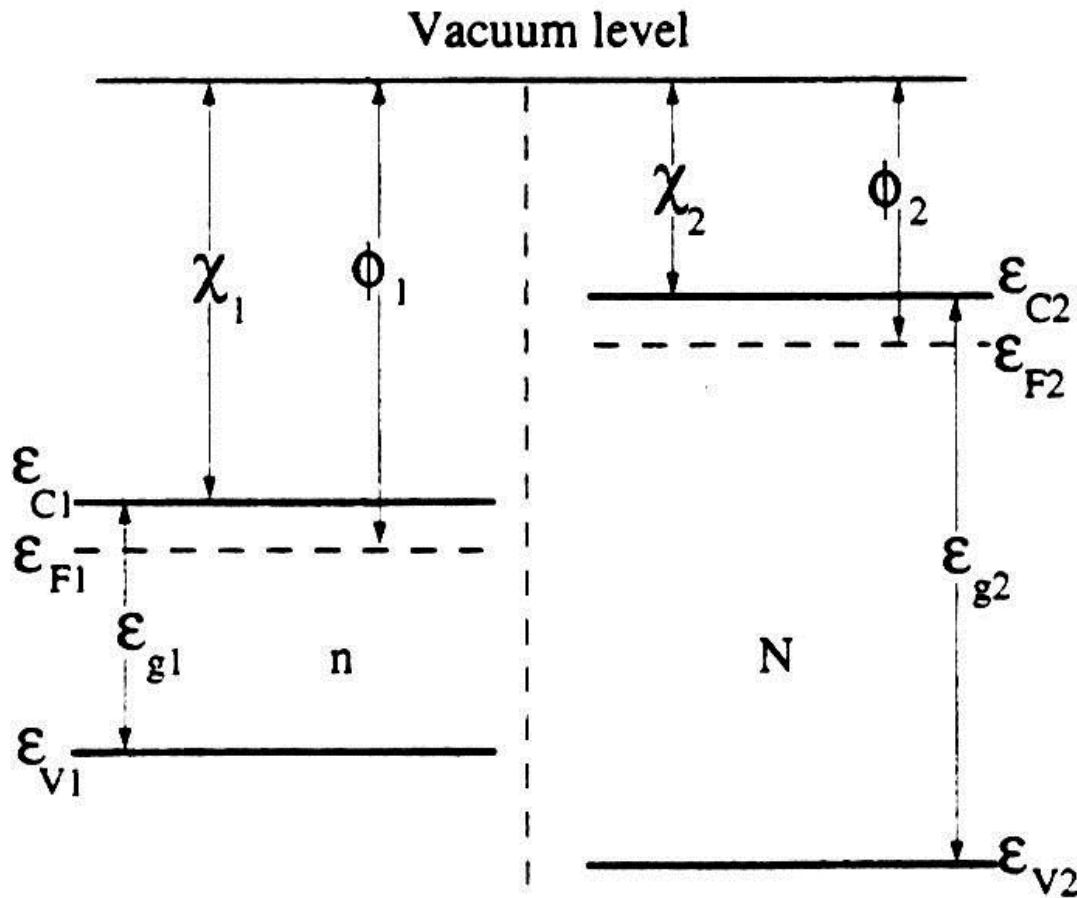
## Eterogiunzioni

Giunzione tra due materiali con energy gap (e altre proprietà) diversi

Permettono di ottenere proprietà elettriche e ottiche particolari (ad esempio attraverso il "confinamento" elettrico e ottico)

Sono alla base di nuovi dispositivi (transistor bipolari e ad effetto di campo ad eterogiunzione, dispositivi "quantici", LED, laser, rivelatori e altri dispositivi ancora da inventare)

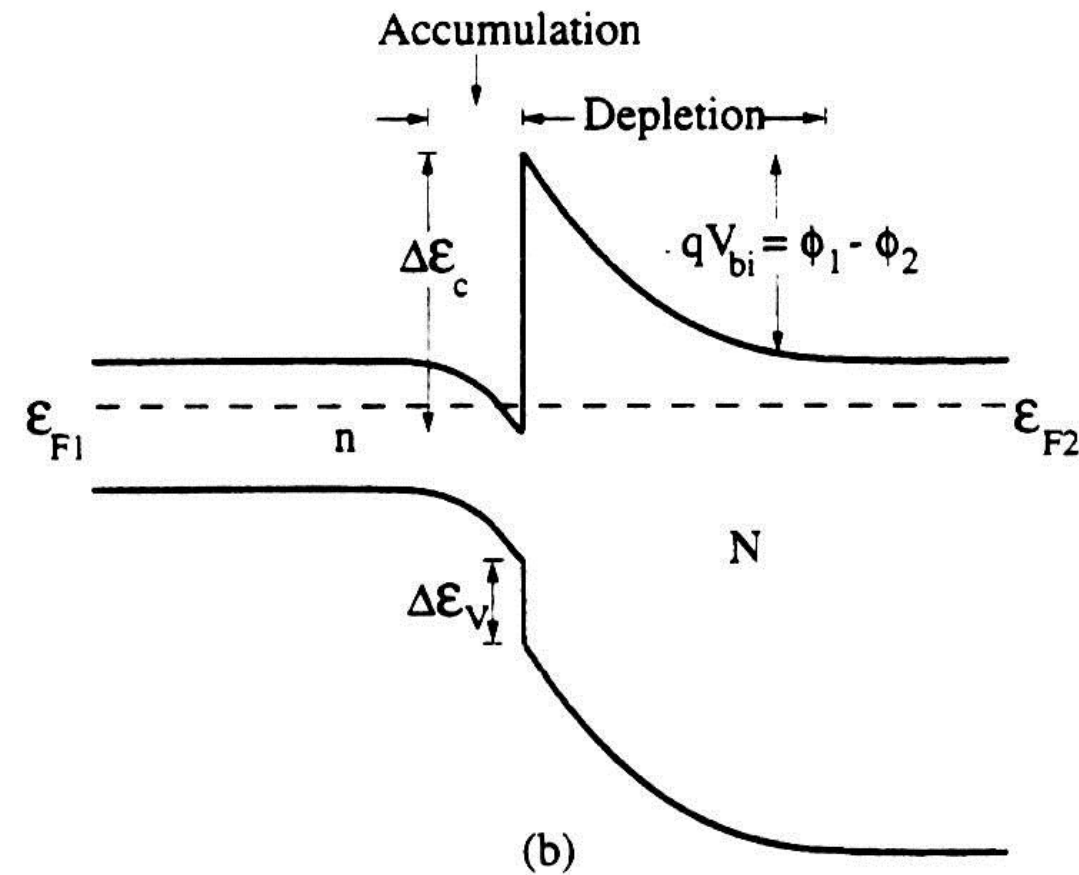
# Eterogiunzione ideale (teoria di Anderson)



I materiali A e B hanno la stessa costante reticolare, ma **diverso energy-gap  $E_g$  e affinità elettronica  $\chi$** ; sono entrambi drogati n

Quando la giunzione si forma, gli elettroni passano **dal materiale con più bassa  $\chi$  a quello a più alta  $\chi$**

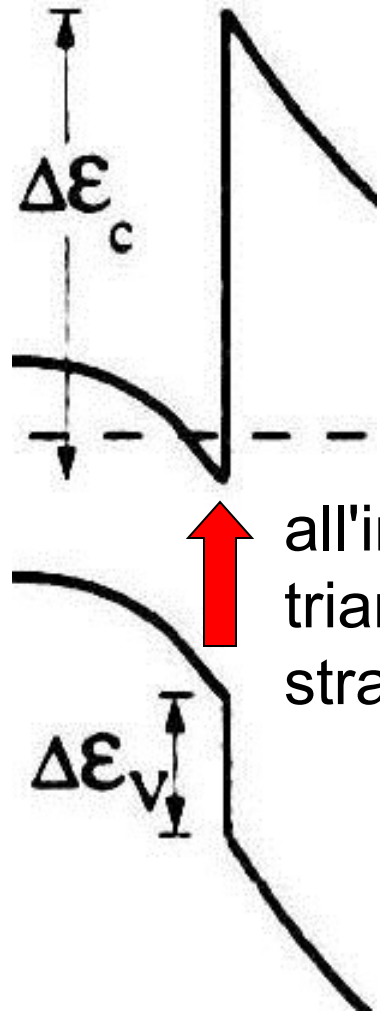
# Eterogiunzione ideale (teoria di Anderson)



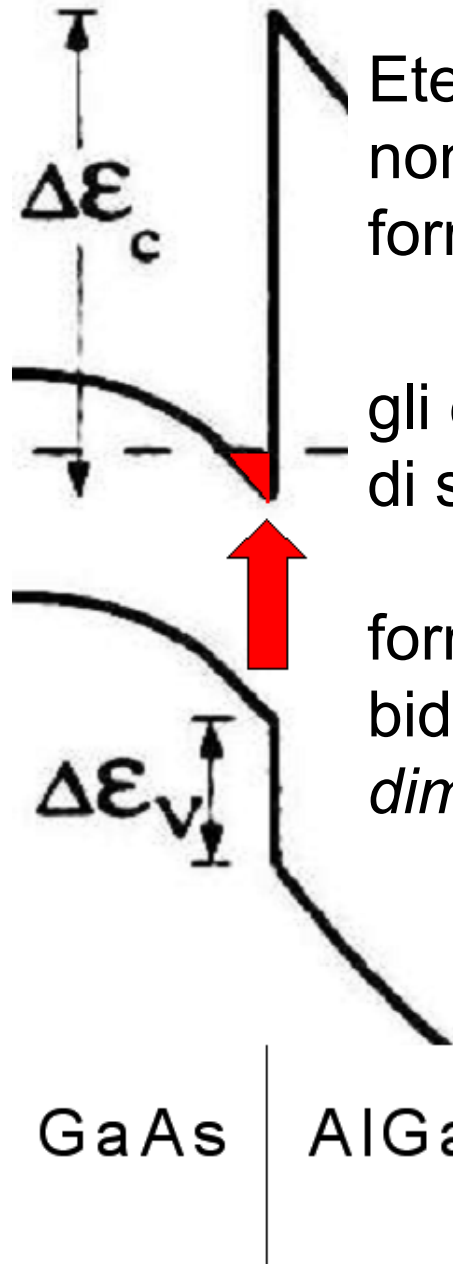
Si crea un accumulo di elettroni nel GaAs e uno svuotamento nell'AlGaAs.

La differenza tra gli energy-gap si ripartisce nelle due discontinuità alla banda di conduzione  $\Delta E_c$  e  $\Delta E_v$

# Eterogiunzione ideale (teoria di Anderson)



all'interfaccia, si forma una buca quantica triangolare, che confina gli elettroni dello strato di accumulazione



Eterogiunzione ideale (teoria di Anderson)  
non c'e' carica all'interfaccia prima della  
formazione della giunzione

gli elettroni sono confinati in uno strato  
di spessore inferiore a 100 Å

formano uno strato di carica  
bidimensionale, detto 2DEG = *Two-*  
*dimensional Electron Gas*

GaAs

AlGaAs



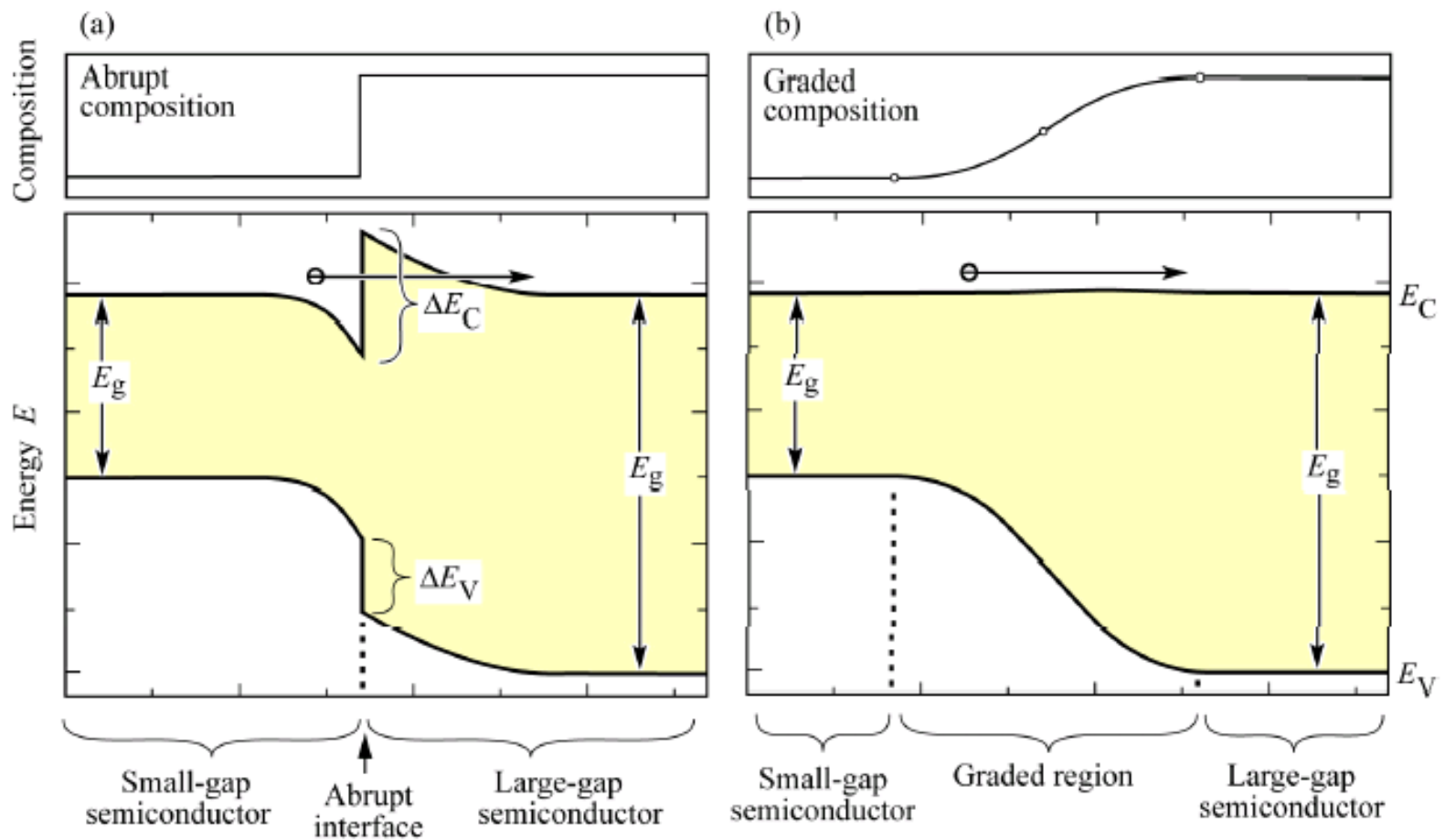
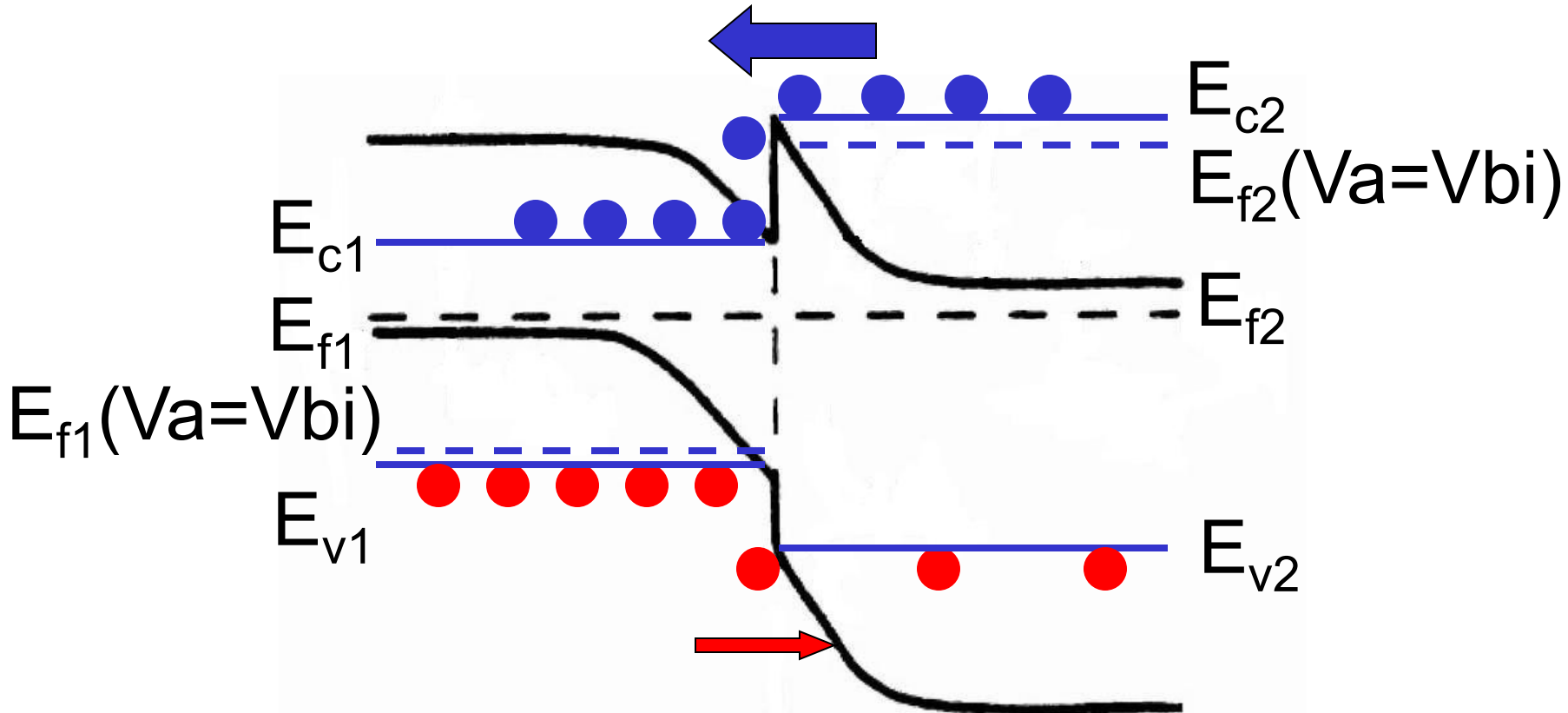


Fig. 4.9. Band diagram of (a) an abrupt n-type–n-type heterojunction and (b) a graded heterojunction of two semiconductors with different bandgap energy. The abrupt junction is more resistive than the graded junction due to the electron barrier forming at the abrupt junctions (after Schubert *et al.*, 1992).

# Effetto di confinamento dell'eterogiunzione

$\Delta E_C$  non ostacola il passaggio di elettroni !

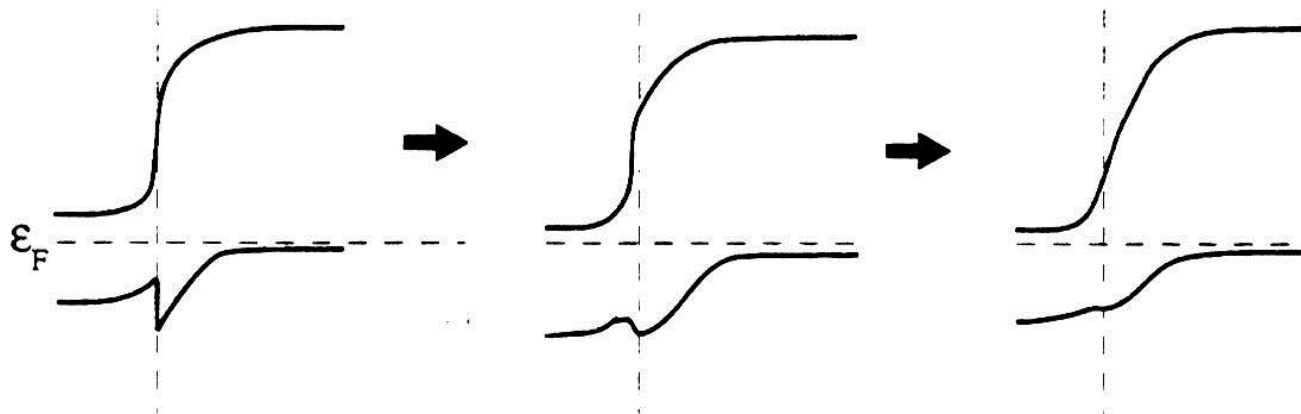


$\Delta E_V$  diminuisce il passaggio di lacune !

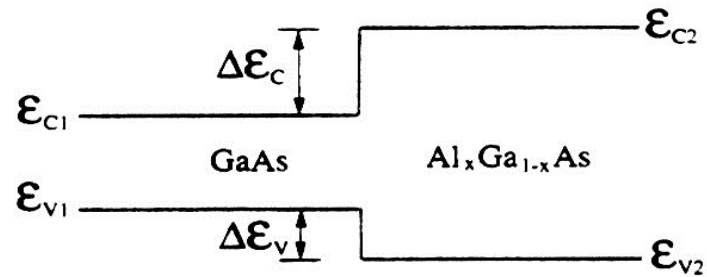
nell'ipotesi  $\Delta E_C=0$ ;  $\Delta E_V=\Delta E_g$

$$\frac{I_n}{I_p} = \exp\left(\frac{-\Delta E_g}{kT}\right)$$

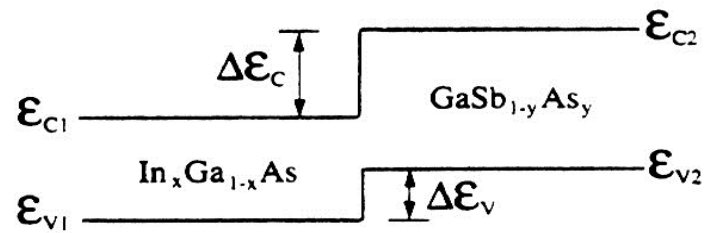
Eliminazione delle discontinuità nelle bande tramite gradiente di composizione



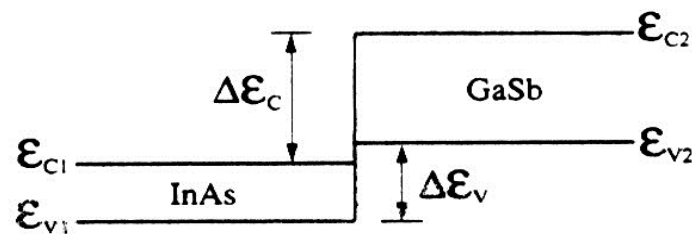
# Altri tipi di eterogiunzione



(a) Type I

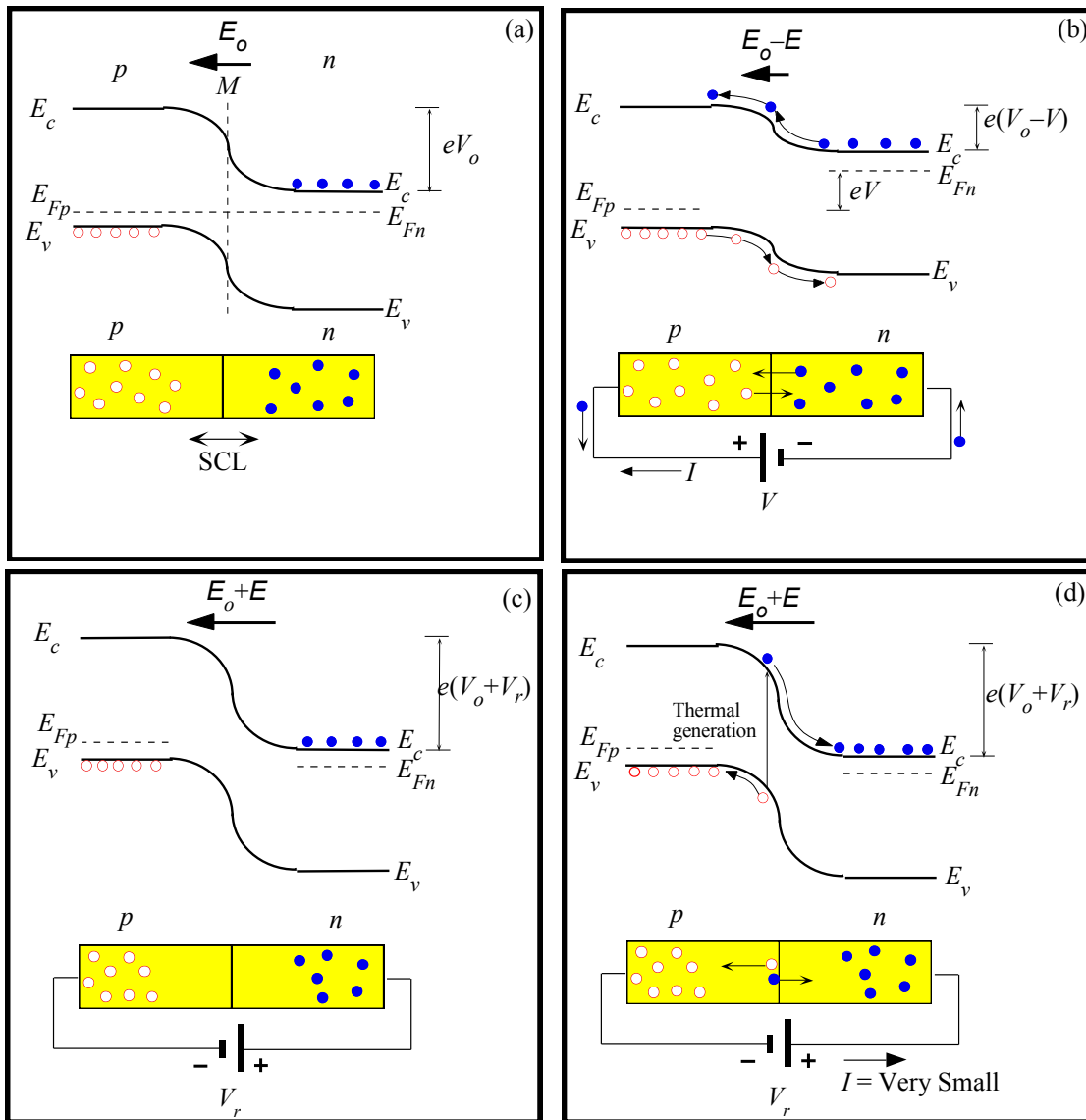


(b) Type I'

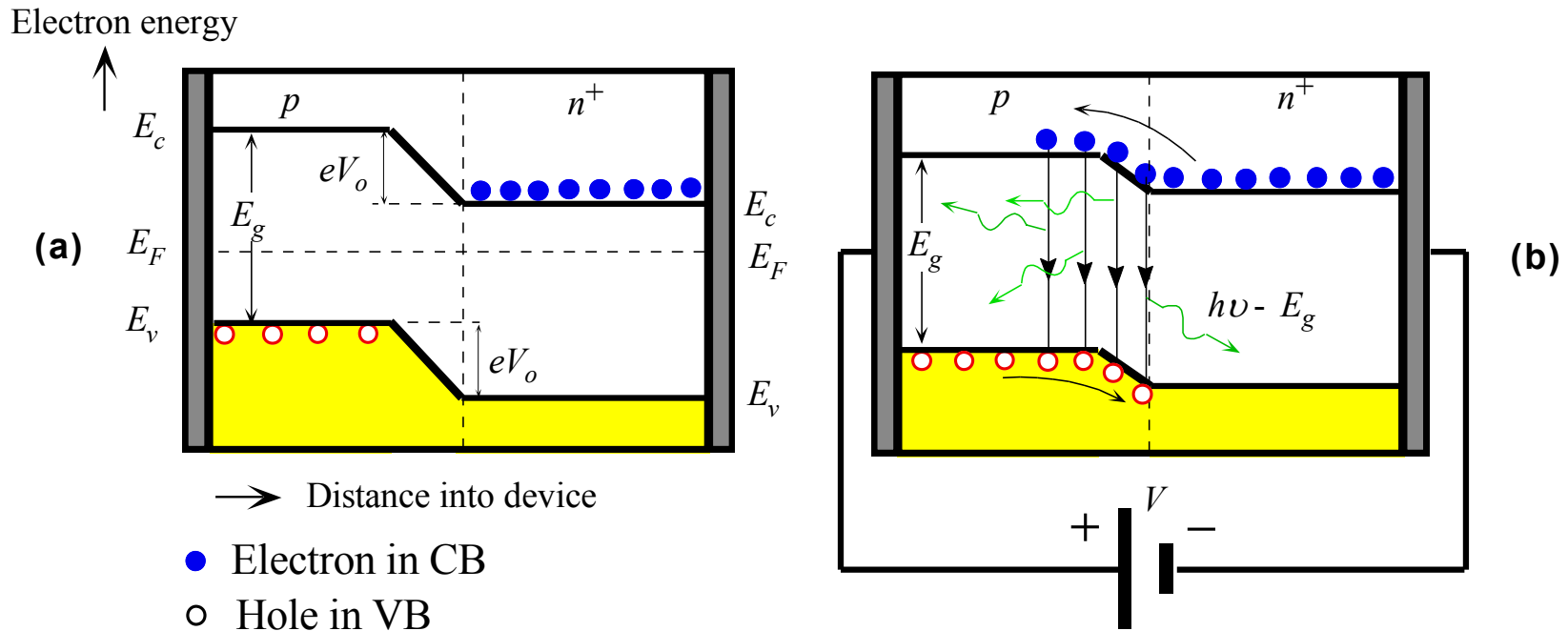


(c) Type II

Diodi emettitori di luce (Light Emitting Diodes, LED):  
giunzioni p-n con qualche complicazione



Energy band diagrams for a  $pn$  junction under (a) open circuit, (b) forward bias and (c) reverse bias conditions. (d) Thermal generation of electron hole pairs in the depletion region results in a small reverse current.

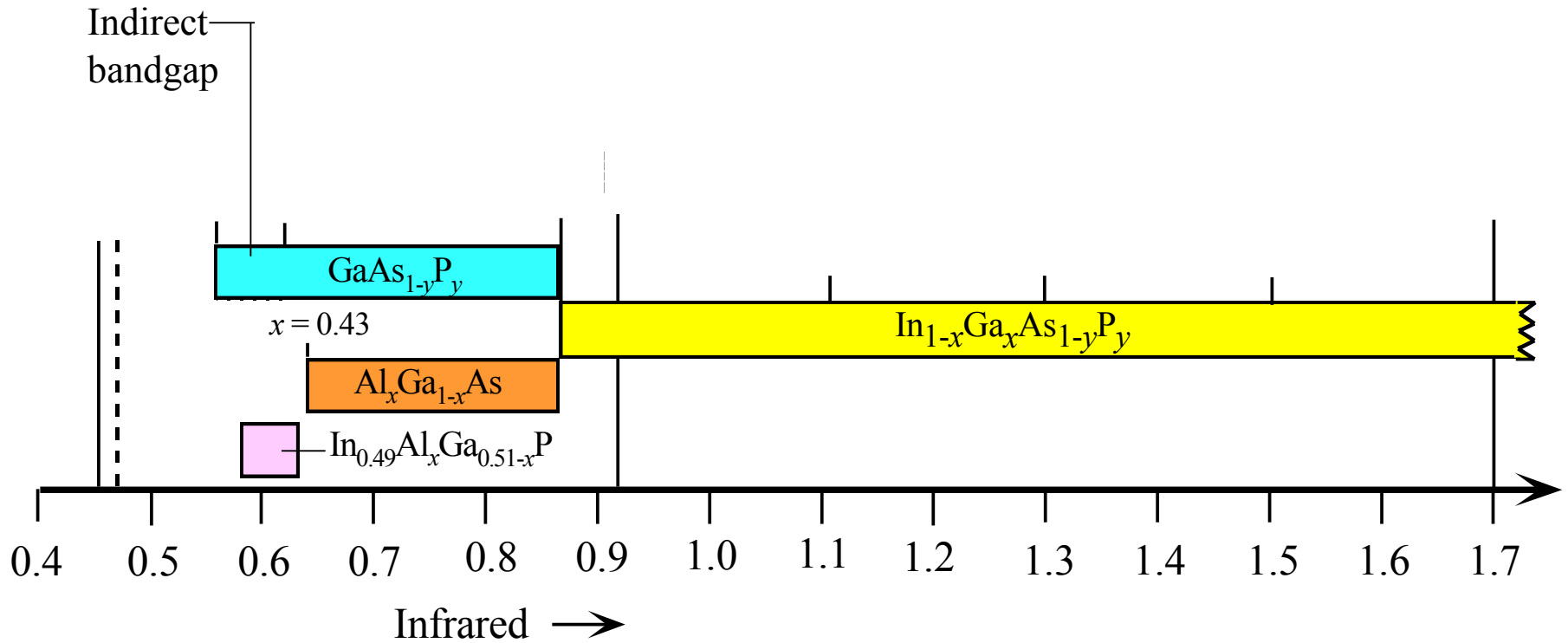


(a) The energy band diagram of  $ap-n^+$  (heavily  $n$ -type doped) junction without any bias. Built-in potential  $V_o$  prevents electrons from diffusing from  $n^+$  to  $p$  side. (b) The applied bias reduces  $V_o$  and thereby allows electrons to diffuse, be injected, into the  $p$ -side. Recombination around the junction and within the diffusion length of the electrons in the  $p$ -side leads to photon emission.

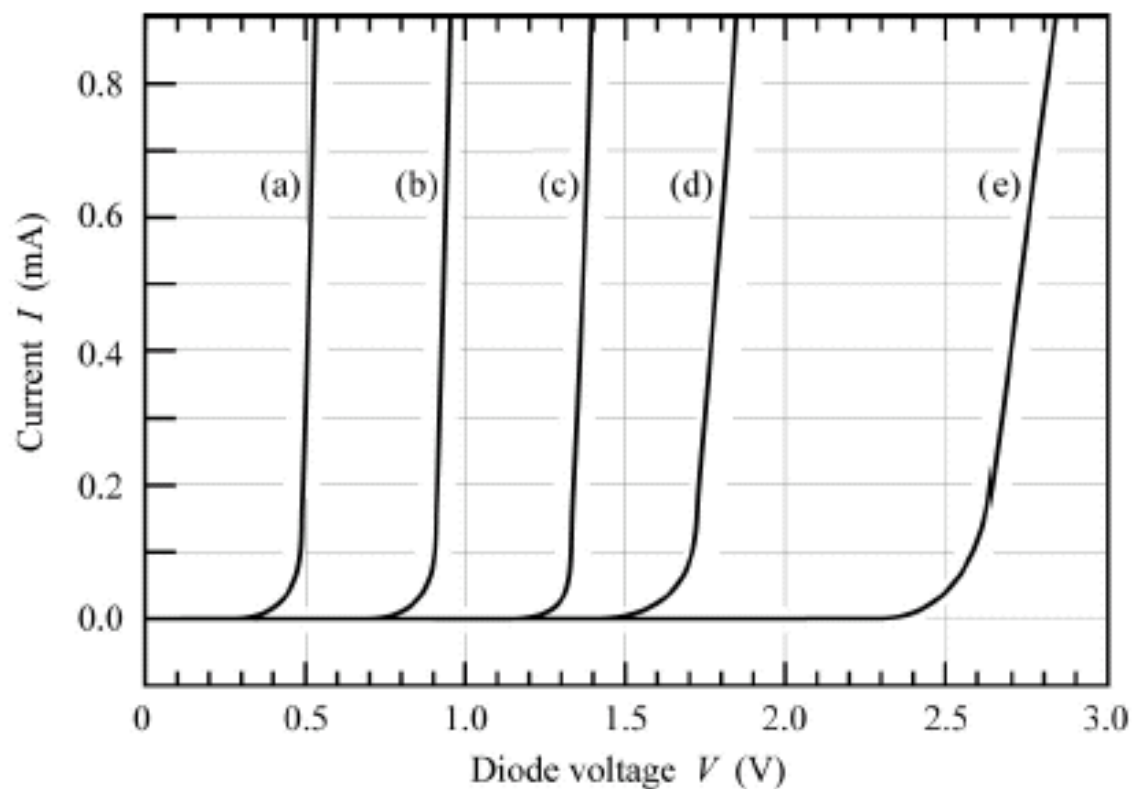
**TABLE 3.1** Selected LED semiconductor materials. Optical communication channels are at 850 nm (local network) and at 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$  (long distance). D = Direct, I = Indirect bandgap, DH = Double heterostructure.  $\eta_{\text{external}}$  is typical and may vary substantially depending on the device structure.

Semiconductor	Substrate	D or I	$\lambda$ (nm)	$\eta_{\text{external}}$ (%)	Comment
GaAs	GaAs	D	870–900	10	Infrared LEDs
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $0 < x < 0.4$ )	GaAs	D	640–870	5–20	Red to IR LEDs. DH
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ( $y \approx 2.20x, 0 < x < 0.47$ )	InP	D	1–1.6 $\mu\text{m}$	>10	LEDs in communications
InGaN alloys	GaN or SiC	D	430–460	2	Blue LED
	Sapphire		500–530	3	Green LED
SiC	Si; SiC	I	460–470	0.02	Blue LED. Low efficiency
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$	GaAs	D	590–630	1–10	Amber, green, red LEDs
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ( $y < 0.45$ )	GaAs	D	630–870	<1	Red–IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ( $y > 0.45$ ) (N or Zn, O doping)	GaP	I	560–700	<1	Red, orange, yellow LEDs
GaP (Zn-O)	GaP	I	700	2–3	Red LED
GaP (N)	GaP	I	565	<1	Green LED





Free space wavelength coverage by different LED materials from the visible spectrum to the infrared including wavelengths used in optical communications. Hatched region and dashed lines are indirect  $E_g$  materials.



$T = 295 \text{ K}$

- (a) Ge  $E_g \approx 0.7 \text{ eV}$
- (b) Si  $E_g \approx 1.1 \text{ eV}$
- (c) GaAs  $E_g \approx 1.4 \text{ eV}$
- (d) GaAsP  $E_g \approx 2.0 \text{ eV}$
- (e) GaInN  $E_g \approx 2.9 \text{ eV}$

Fig. 4.2. Room-temperature current–voltage characteristics of p-n junctions made from different semiconductors.

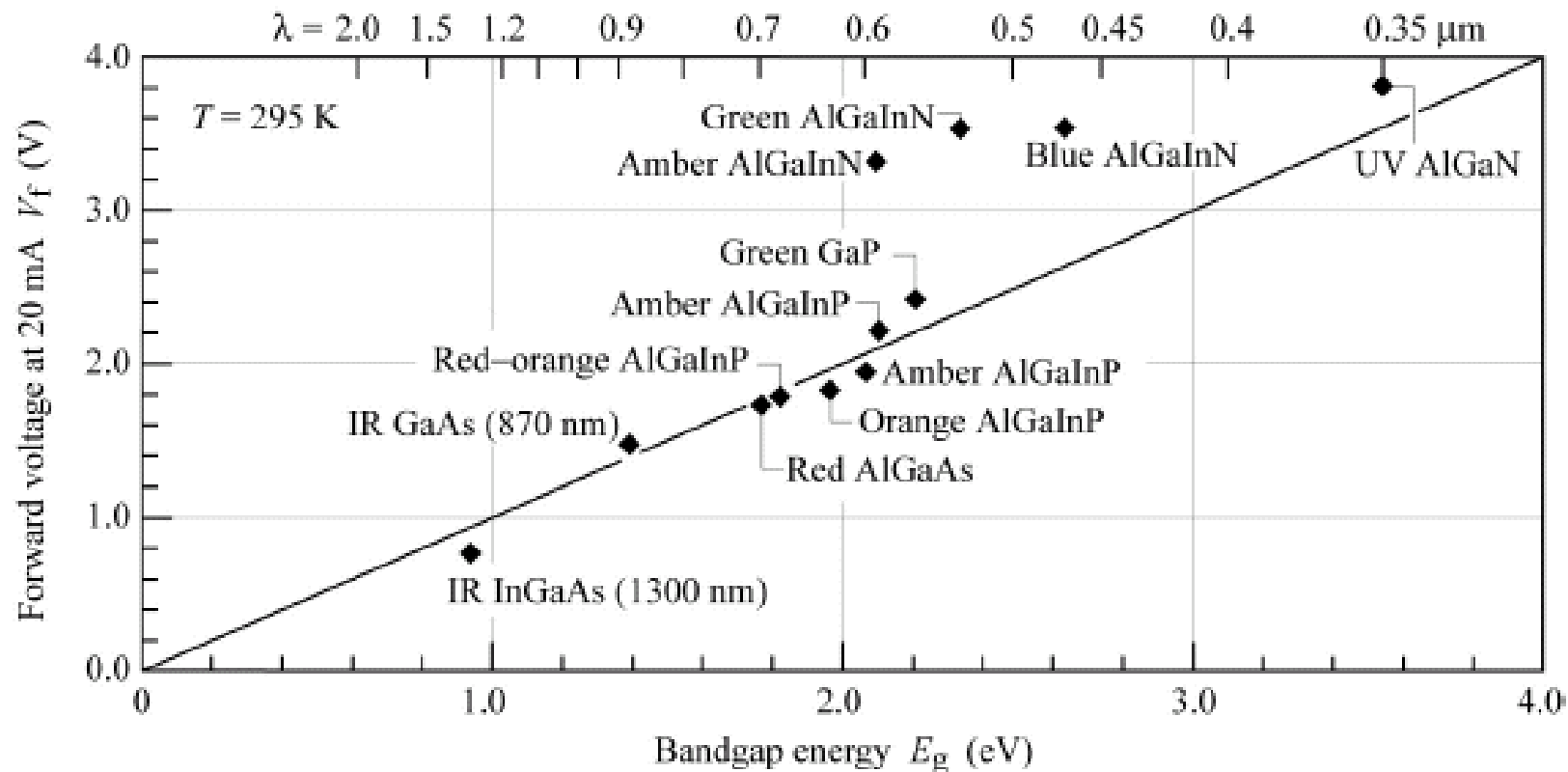
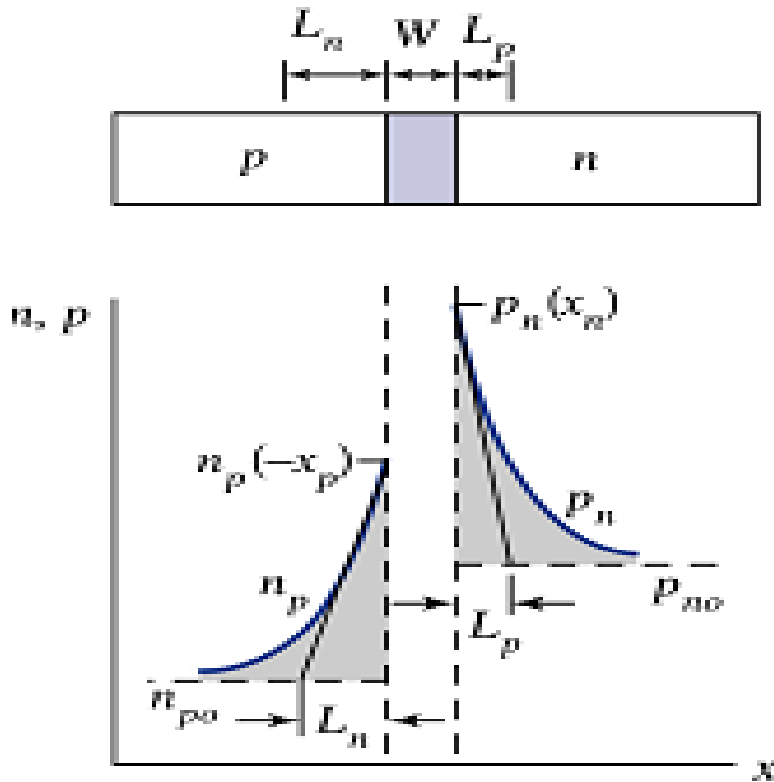


Fig. 4.3. iode forward voltage versus bandgap energy for LEDs made from different materials (after Krames *et al.*, 2000; updated with UV LED data of Emerson *et al.*, 2002).



Se si realizza un LED a omogiunzione, i portatori ricombinano in una regione che si estende su 3-4 lunghezze di diffusione  $L_{p,n}$

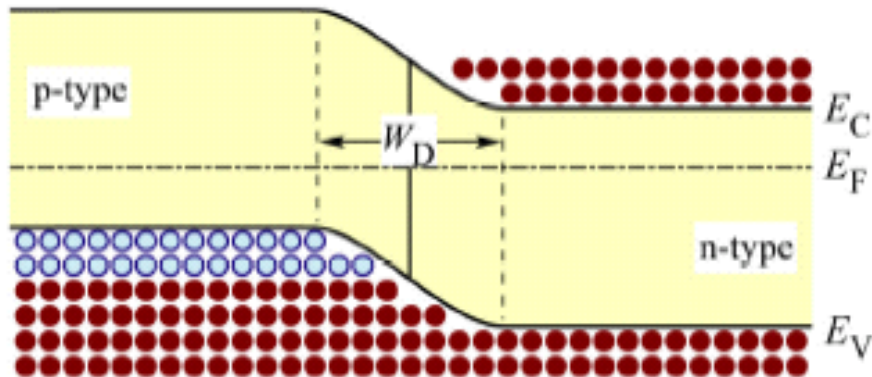
Ad esempio per p-GaAs

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

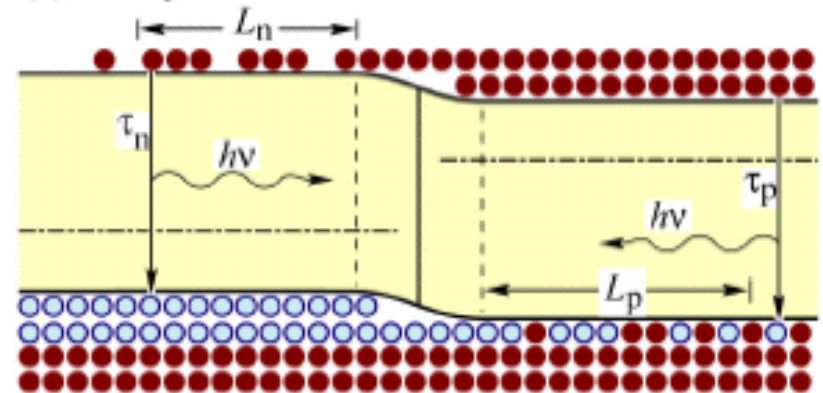
$$= (220 \text{ cm}^2/\text{s} \times 10^{-8} \text{ s})^{1/2} = 15 \text{ } \mu\text{m}$$

Questo non va bene per l'efficienza radiativa perchè  $R = Bnp$   
vogliamo elevate concentrazioni di entrambi i portatori

(a) Homojunction under zero bias



(b) Homojunction under forward bias



(c) Heterojunction under forward bias

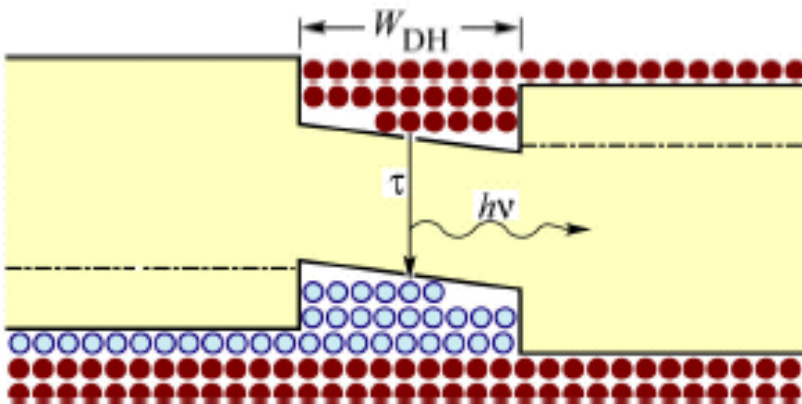
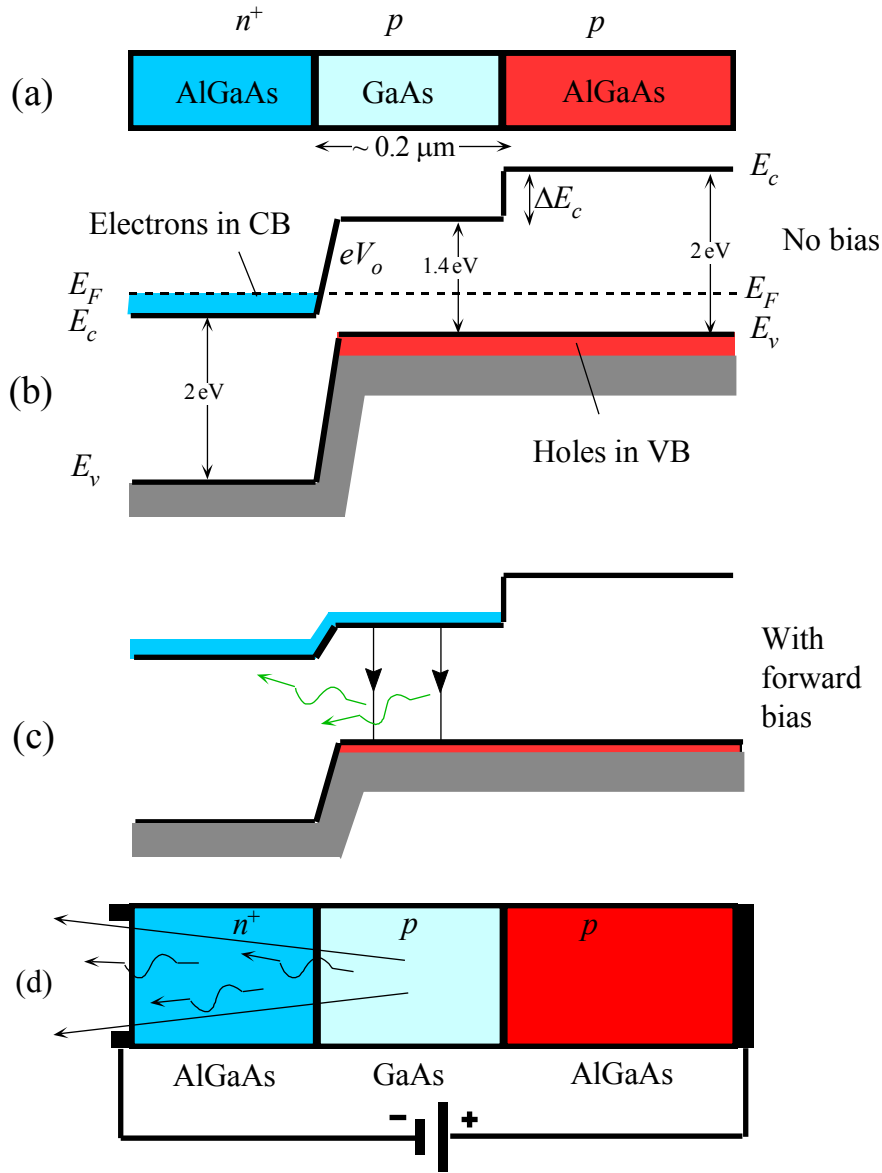


Fig. 4.8. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. (c) P-n heterojunction under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths  $L_n$  and  $L_p$  before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

La doppia eterogiunzione è la soluzione migliore !!!



(a) A double heterostructure diode has two junctions which are between two different bandgap semiconductors (GaAs and AlGaAs)

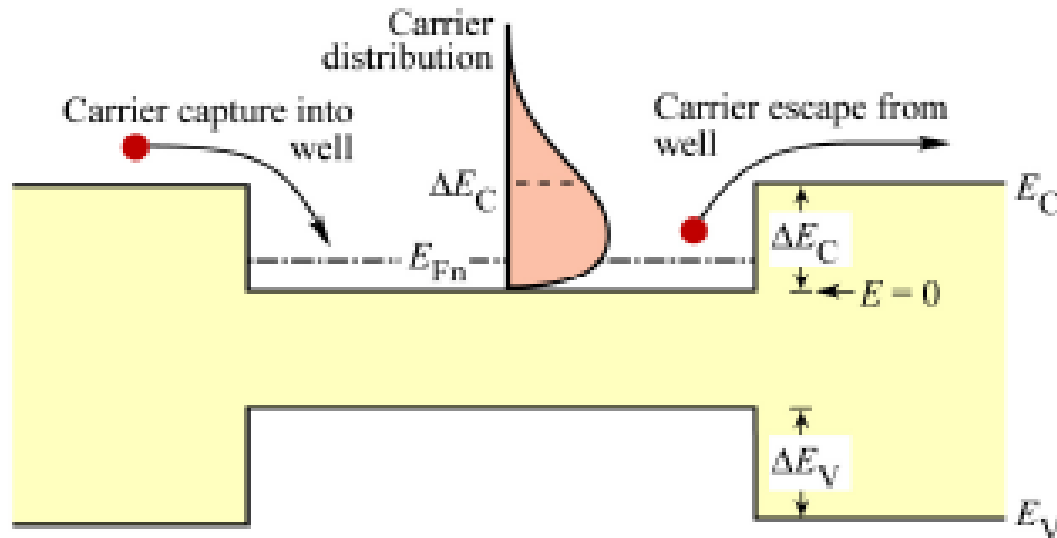
(b) A simplified energy band diagram with exaggerated features.  $E_F$  must be uniform.

(c) Forward biased simplified energy band diagram.

(d) Forward biased LED. Schematic illustration of photons escaping reabsorption in the AlGaAs layer and being emitted from the device.

Problemi:

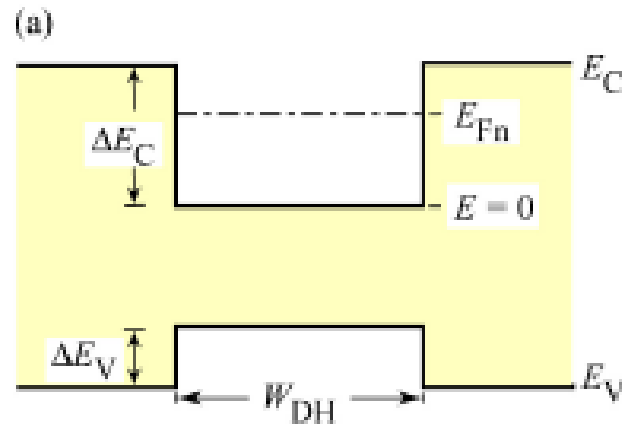
alcuni portatori sono così energetici da sfuggire alla buca di potenziale



La quantità di portatori che riesce a sfuggire dipende dalla temperatura attraverso la statistica di Fermi-Dirac. All'aumentare di  $T$  l'efficienza del LED diminuisce (anche perchè aumenta la ricombinazione Shockley-Read-Hall)

## Problemi - 2:

- all'aumentare della corrente diretta aumenta la concentrazione di portatori nella buca
- i quasi livelli di Fermi corrispondenti di conseguenza si muovono oltre  $E_C$  ed  $E_V$
- quando raggiungono l'estremo della barriera, la concentrazione di portatori smette di aumentare e l'efficienza crolla





Quando lo spessore della buca di potenziale si riduce fino a diventare confrontabile con la lunghezza d'onda associata dalla meccanica ondulatoria (quantistica) all'elettrone, i livelli di energia dentro la buca di potenziale vengono discretizzati, gli elettroni formano un gas bidimensionale, tutti i valori di densità di stati, coefficiente bimolecolare etc. vanno ricalcolati per il caso 2D

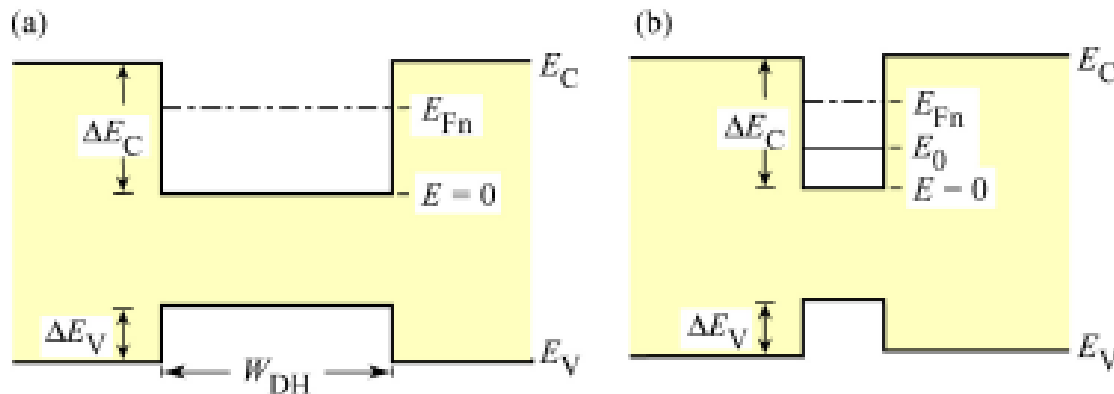
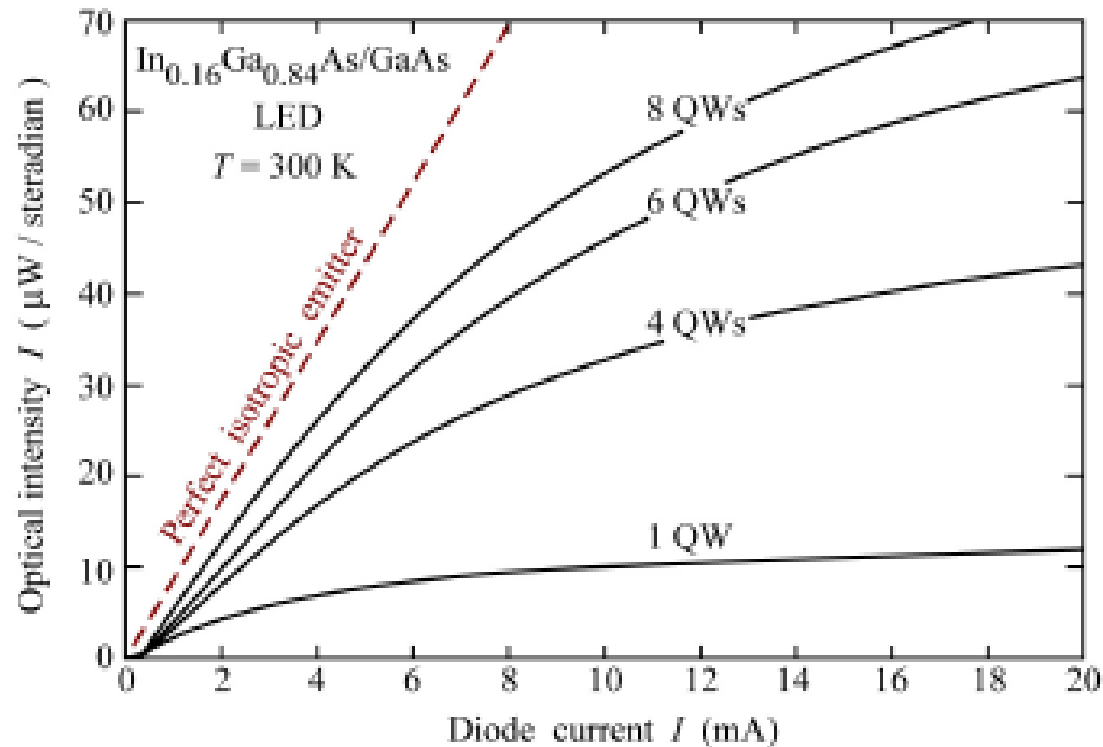


Fig. 4.12. Fermi level ( $E_{Fn}$ ) and subband level ( $E_0$ ) in (a) a double heterostructure and (b) a quantum well structure.

Soluzione 1: usare più buche di potenziale, o “buche quantiche” o “quantum well” (QW)

Struttura “Multi-Quantum-Well” (MQW)



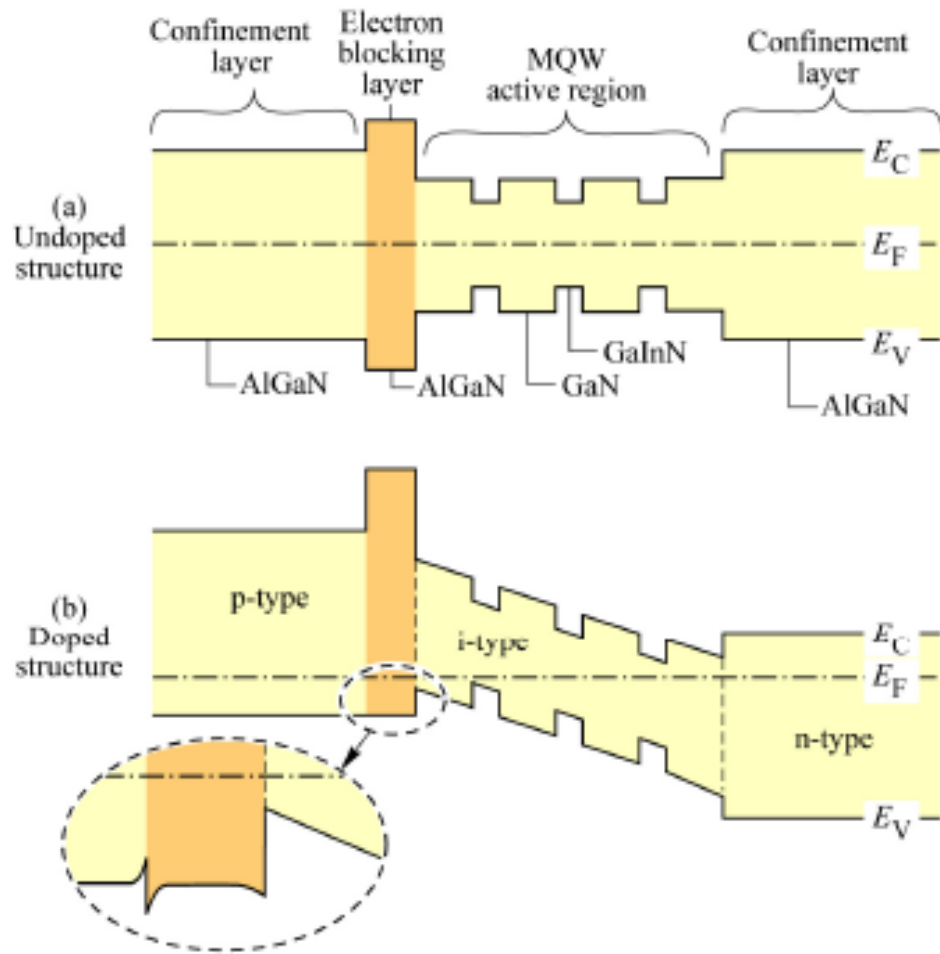
Soluzione 2: evitare la “fuga” di portatori con barriere di energia o “strati di confinamento”

E' importante:

- \* per i LED con barriere basse (es. LED AlGaInP che emettono a 600 – 650 nm)

- \* per migliorare il comportamento in funzione di T

Gli strati di confinamento sono perlopiù usati per gli elettroni  
= costante di diffusione maggior di quella delle lacune



Strato di confinamento in AlGaN in una struttura p-i-n  
 AlGaN/MQW(GaN/InGaN)/AlGaN

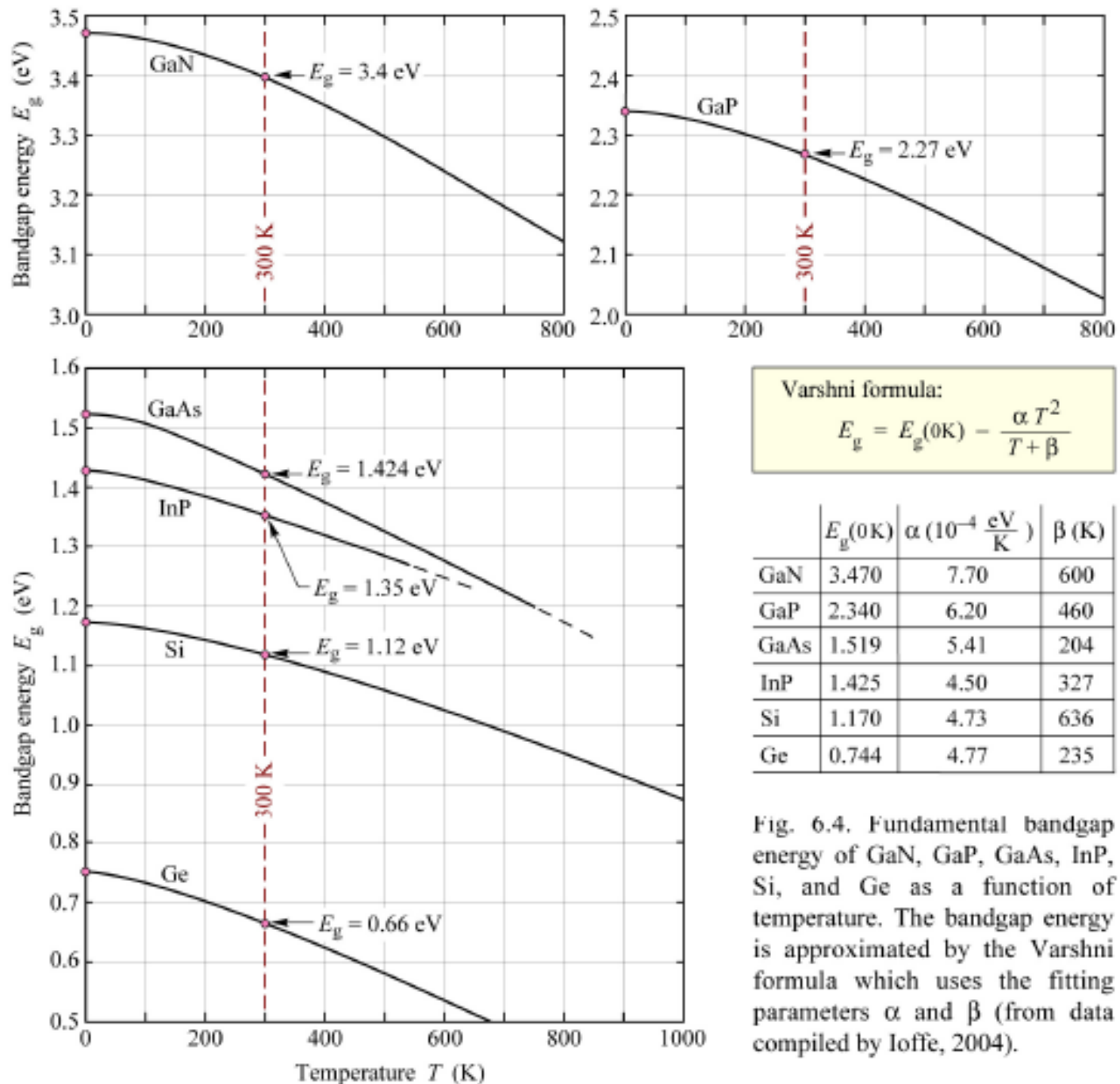


Fig. 6.4. Fundamental bandgap energy of GaN, GaP, GaAs, InP, Si, and Ge as a function of temperature. The bandgap energy is approximated by the Varshni formula which uses the fitting parameters  $\alpha$  and  $\beta$  (from data compiled by Ioffe, 2004).

**Figure 9.5.**  
 Optical absorption coefficients for various semiconductor materials.<sup>2</sup>  
 The value in the parenthesis is the cutoff wavelength.

