

## Cenni di optoelettronica

Proprietà elettro-ottiche della giunzione:

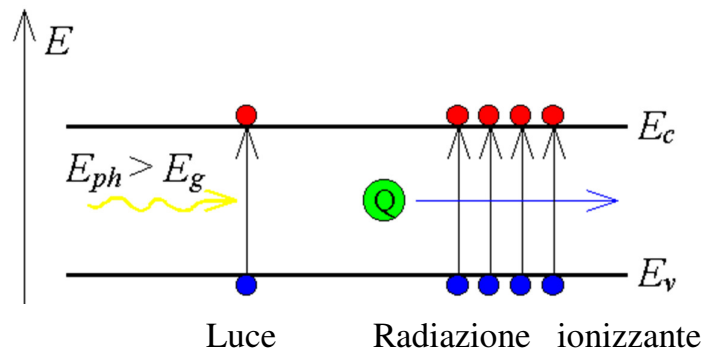
Assorbimento/Emissione di fotoni

→ Realizzazione di dispositivi con proprietà utili

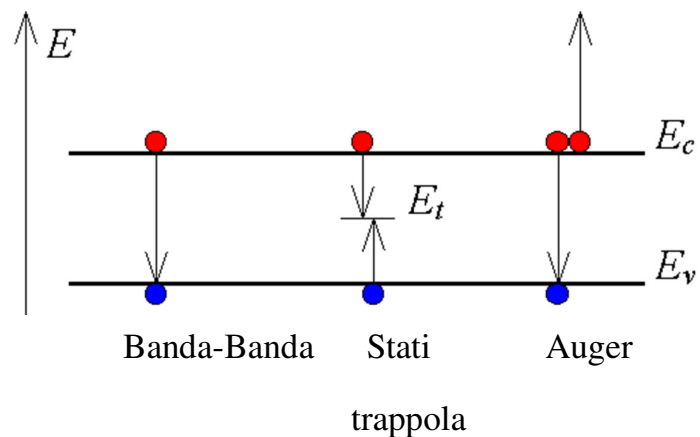
Interazione giunzione-luce/campo elettromagnetico:

Processi di *generazione / ricombinazione* di coppie  $e - h$

Generazione:



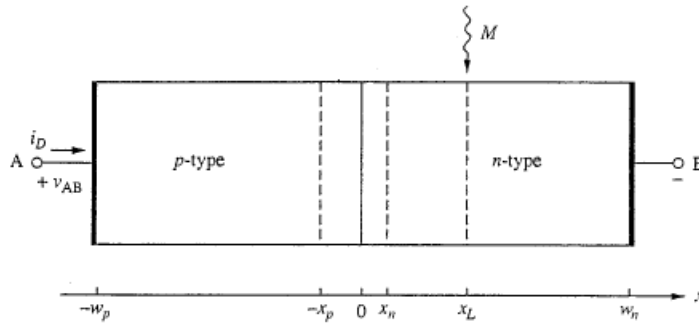
Ricombinazione:



Processi radiativi/non radiativi in competizione

Effetto della struttura a bande: Gap diretto / indiretto (v. dopo)

Luce incidente su giunzione: Processi di generazione



→ Generalizzazione della relazione corrente/tensione:

$$i_D = I_S \left( e^{\frac{v}{V_T}} - 1 \right) - I_L$$

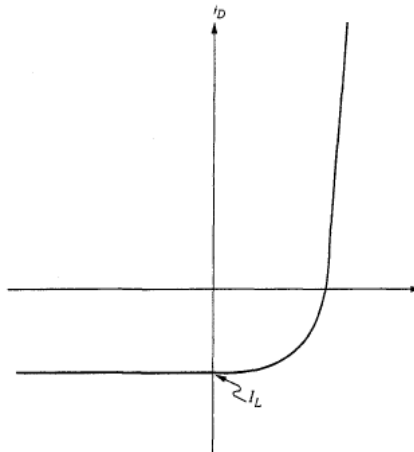
→ Incremento corrente inversa a causa della generazione di coppie  $e-h$

$$I_L = -qAMf$$

$A$  area giunzione

$M$  n. coppie  $e-h$  generate dalla luce per  $cm^2 \cdot s$

$f$  fattore numerico fra 0 e 1 dipendente dalla posizione del punto illuminato



→ Contributo aggiunto alla corrente inversa, sottratto a quella diretta

Due modi fondamentali di utilizzo delle proprietà optoelettroniche della giunzione:

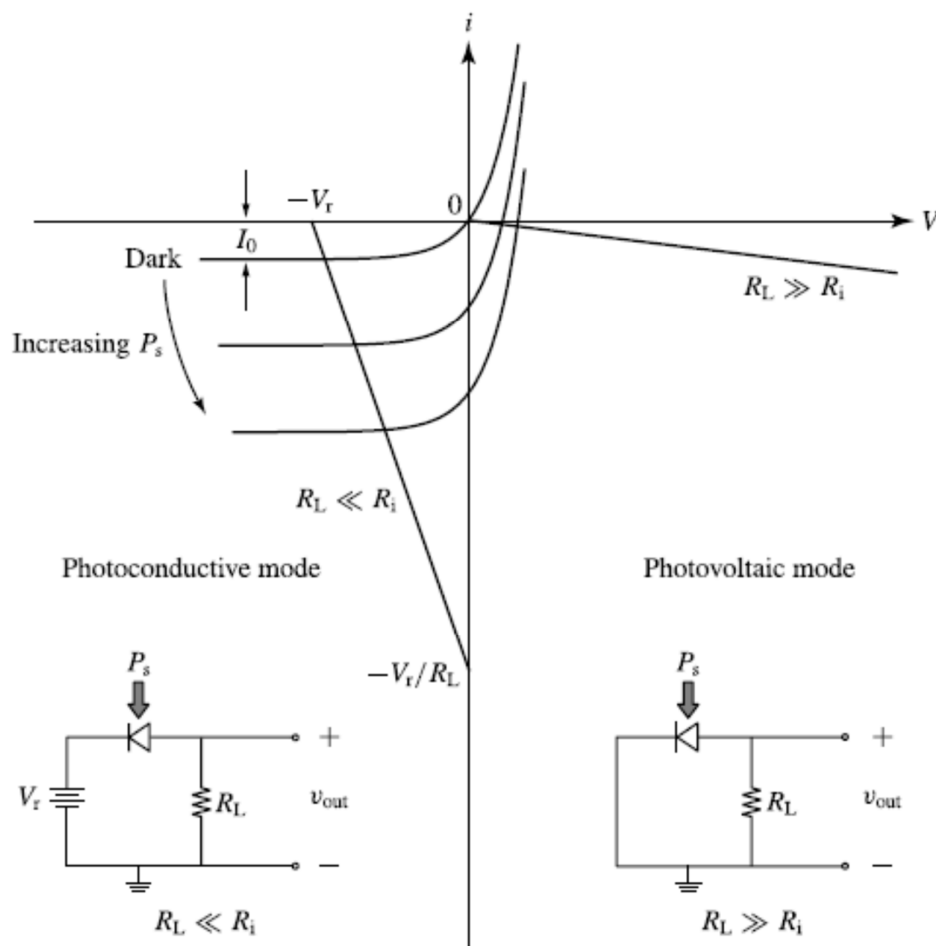
Fotoconduttivo

Fotovoltaico

$R_L$  res. di carico

$R_i$  res. equivalente della giunzione in pol. inversa

$P_s$  pot. ottica incidente



Tipica applicazione fotoconduttiva: Fotodiodo

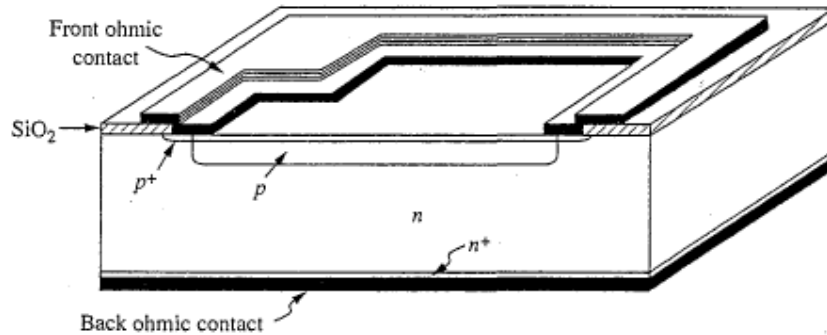
Tipica applicazione fotovoltaica: Cella solare

Fotodiodi:

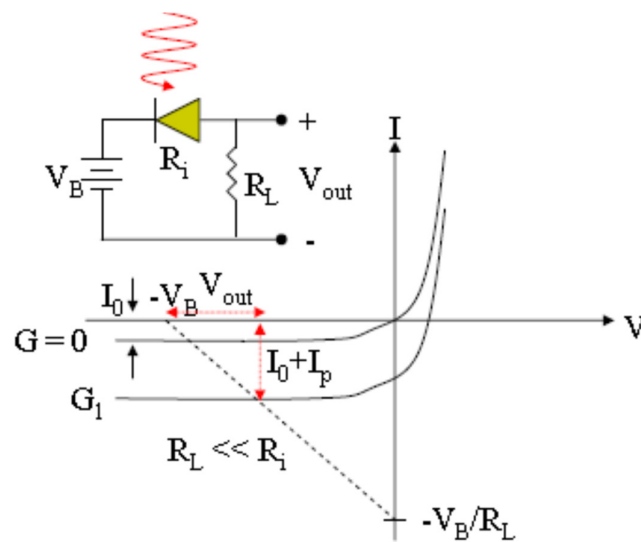
Giunzione polarizzata inversamente

→ Incremento della corrente inversa di saturazione in presenza di luce

Qualsiasi giunzione e' fotosensibile: Accorgimenti particolari migliorano la risposta



Tipica configurazione di utilizzo:



Diverse varianti (fotodiodi *p-i-n*, a valanga, ..)

Configurazione usata anche per rivelatori di radiazioni ionizzanti:

Interesse per risposta impulsiva, che da' informazioni su

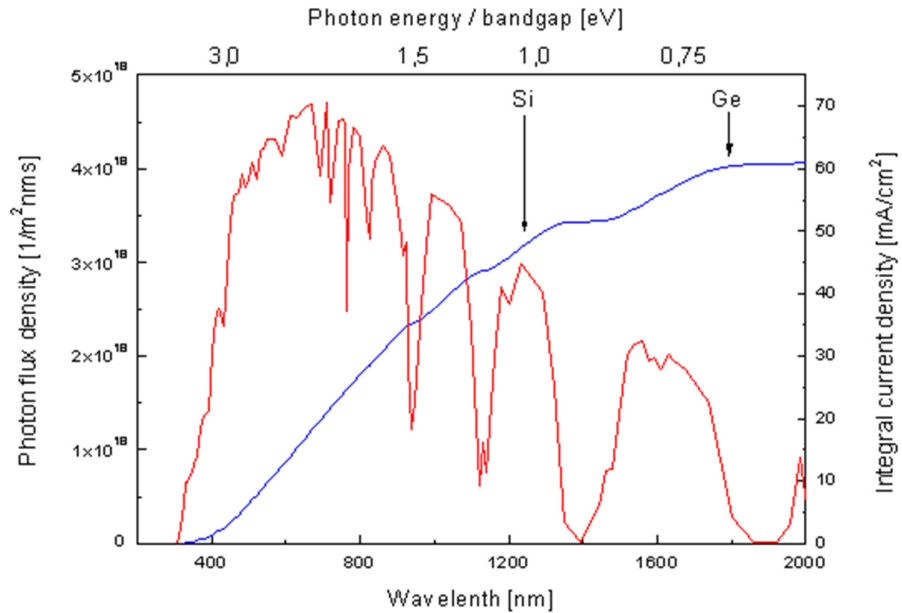
*Energia rilasciata*

*Posizione*

*Tempo*

## Celle solari

Spettro della radiazione solare incidente ed en. minima del fotone per produrre  $e-h$



### Giunzione non polarizzata

→ Incremento della corrente inversa in presenza di luce

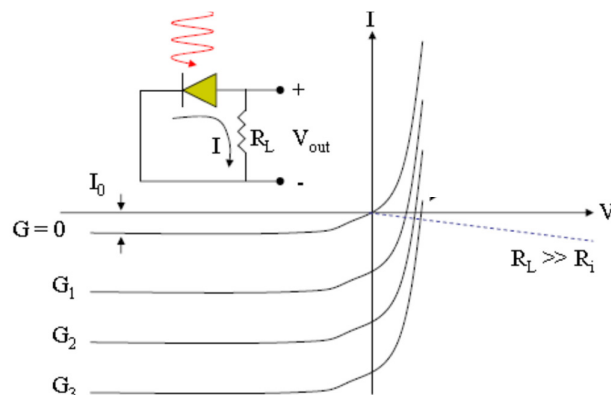
→ Sviluppo di una tensione diretta

Infatti: campo interno  $n \rightarrow p$  nello strato di svuotamento causa separazione dei portatori liberati dalla radiazione luminosa: lacune lato  $p$ , elettroni lato  $n$

→ ddp (diretta) a circuito aperto, tipo batteria

→ Corrente (inversa) a circuito chiuso → Corrente inversa & Tensione diretta !

Tipica configurazione di utilizzo:



Corrente totale: Fotocorrente + Corrente diretta

$$I = -I_{ph} + I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right), \quad V \text{ tensione ai capi della cella}$$

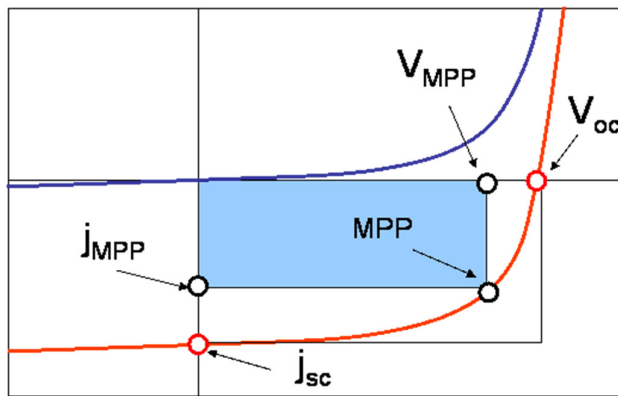
Cella in corto circuito:

$$V = 0 \rightarrow I_{sc} = -I_{ph}$$

Cella in circuito aperto:

$$I = 0 \rightarrow -I_{ph} + I_s \left( e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1 \right) = 0 \rightarrow V_{oc} = V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

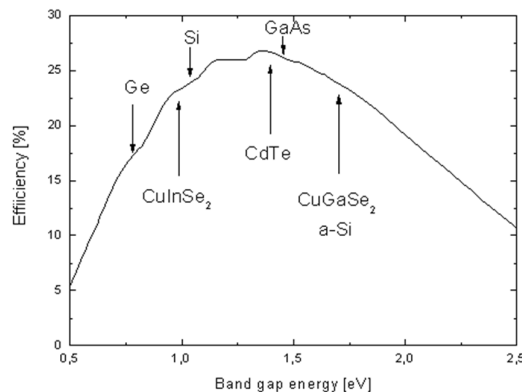
Scelta del punto di lavoro che massimizza la resa elettrica



Rendimento:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{\Phi_{light}}$$

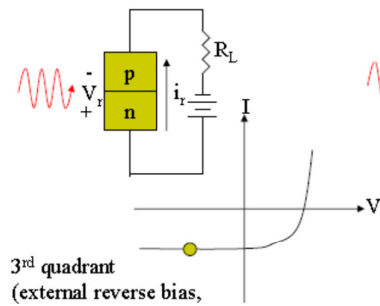
Rendimento max. teorico per alcuni semiconduttori:



Confronto:

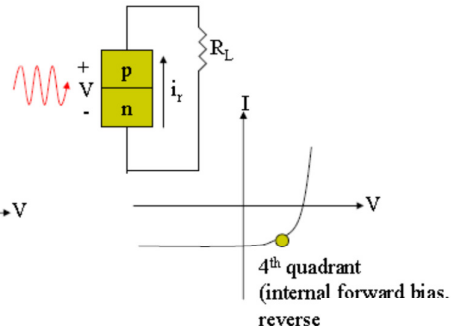
Modo fotoconduttivo:

Potenza fornita al dispositivo  
dal circuito esterno



Modo fotovoltaico:

Potenza fornita dal dispositivo  
al circuito esterno



-

Fotoconduttivo: Applicazioni alla rivelazione di radiazione luminosa

Estensione: Rivelazione di radiazioni ionizzanti tramite interazione radiazione-materia

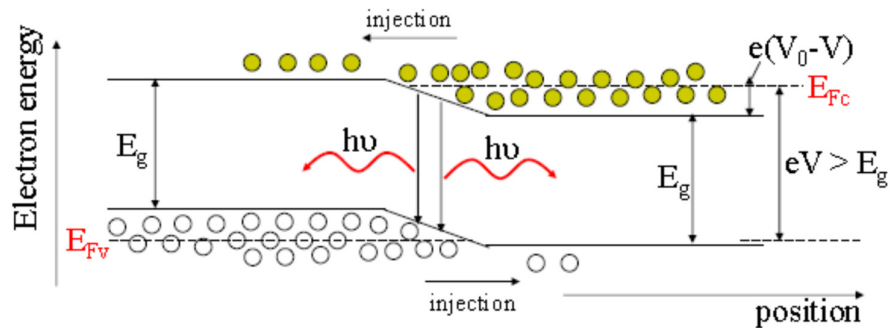
Fotovoltaico: Applicazioni alla generazione di potenza elettrica

## Light Emitting Diodes (LED):

Giunzioni usate in modo inverso rispetto a fotodiodi

→ Potenza elettrica trasformata in potenza luminosa

Emissione spontanea causata da ricombinazione  $e-h$  nella giunzione in polarizzazione diretta



Rateo totale di ricombinazione:

$$R = rnp$$

$r$  coeff. di ricombinazione

$n, p$  concentrazioni

Efficienza quantica interna:

$$\eta = \frac{r_R}{r_R + r_{NR}}, \quad r_R, r_{NR} \text{ coeff. di ricombinazione radiativa, non radiativa}$$

Flusso interno di fotoni:

$$\Phi = \eta \frac{i}{q}, \quad \eta \text{ efficienza quantica interna}$$

material	$r_r(\text{cm}^3 \text{s}^{-1})$	$\tau_r$	$\tau_{nr}$	$\tau$	$\eta_{int}$
Si	$10^{-15}$	10 ms	100 ns	100 ns	$10^{-5}$
GaAs	$10^{-10}$	<u>100 ns</u>	<u>100 ns</u>	50 ns	0.5

→ Si materiale inadatto alla realizzazione di LED



Origine delle differenze fra le efficienze quantiche interne:

Transizioni non radiative

→ Importanza molto diversa in semiconduttori diversi

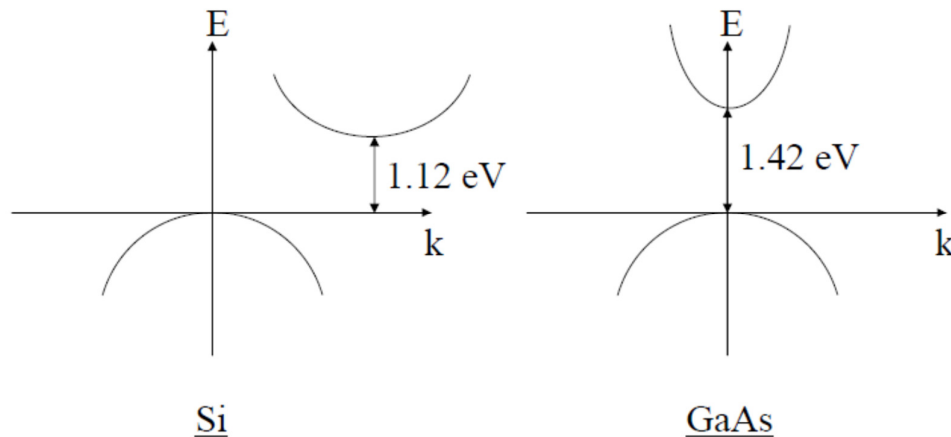
Effetto dominante: Reticolo cristallino reale in 3D

→ Struttura a bande piu' ricca e complicata

Struttura a bande a *gap indiretto* (ex. Si) vs *diretto* (ex. GaAs)

$$k(E_c^{min}) \neq k(E_v^{max})$$

$$k(E_c^{min}) = k(E_v^{max})$$



Struttura a gap indiretto:

Ricombinazione radiativa richiede conservazione di  $E, \mathbf{k}$

→ In aggiunta: Emissione/Assorbimento di *fononi*

Fononi  $\equiv$  Quanti di vibrazione reticolare

Per un fotone:  $\mathbf{k} = \frac{E}{c} \approx 0, E \neq 0$

Per un fonone:  $\mathbf{k} \neq 0, E \propto \frac{k^2}{2M} \approx 0, M = \text{massa atomica} = \text{grande}$

→ OK conservazione dell'impulso cristallino e dell'energia con fotone+fonone

Ma: *Fotone + Fonone* → Transizioni radiative molto piu' lente

→ Resa luminosa piccola

Cristalli piu' comuni usati per fabbricazione di LED:

TABLE 4-1 Optoelectronic-device materials.

	$E_g$ (eV)	Wavelength ( $\mu m$ )	Color
InAs	0.36	3.44	
InN	0.65	1.91	infrared
InP	1.36	0.92	
GaAs	1.42	0.87	↑
GaP	2.26	0.55	red yellow
AlP	3.39	0.51	blue violet
GaN	2.45	0.37	↓
AlN	6.20	0.20	UV

Caratteristiche e applicazioni tipiche dei diversi tipi di LED :

TABLE 4-2 Some common LEDs.

Spectral Range	Material System	Substrate	Example Applications
Infrared	InGaAsP	InP	Optical communication
Infrared-Red	GaAsP	GaAs	Indicator lamps. Remote control
Red-Yellow	AlInGaP	GaP	Optical communication. High-brightness traffic signal lights
Green-Blue	InGaN	Sapphire	High-brightness signal lights. Video billboards
Blue-UV	AlInGaP	GaN or sapphire	Solid-state lighting
Red-Blue	Organic semiconductors	Glass	Displays