



LED e Fotodiodi

Lucio Andreani e Franco Marabelli

Dipartimento di Fisica "A. Volta", Università di Pavia

lucio.andreani@unipv.it, franco.marabelli@unipv.it

<http://fisica.dip.unipv.it/it>

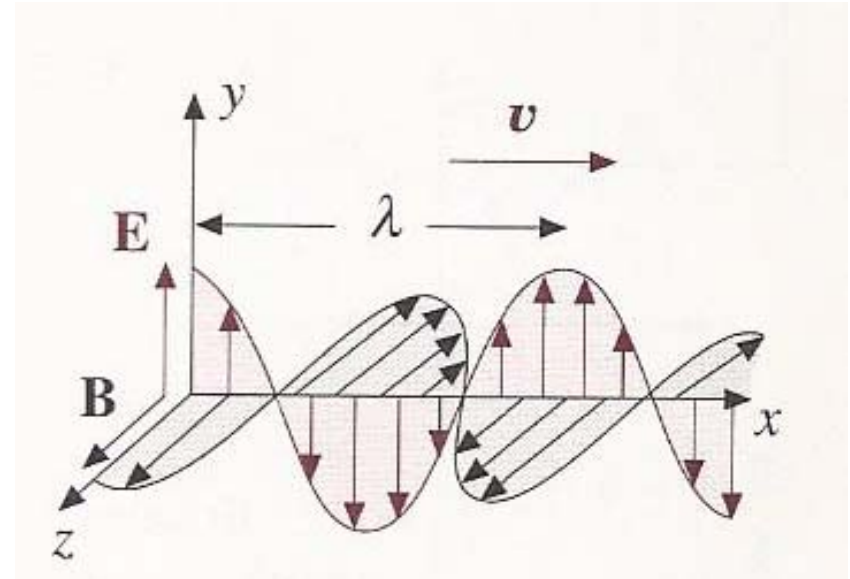
Corso AIF, Pavia, 05-11-2025

Indice

- **Luce: onde elettromagnetiche e fotoni**
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune, assorbimento/emissione di luce
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED e fotodiodi (e celle solari)

Luce e onde elettromagnetiche

L'energia luminosa si propaga sotto forma di **onde elettromagnetiche**, ossia oscillazioni del campo elettrico **E** e magnetico **B**. Le oscillazioni sono perpendicolari alla direzione di propagazione: l'onda elettromagnetica è **trasversale**.



La radiazione elettromagnetica è caratterizzata da:

- lunghezza d'onda λ
- frequenza $\nu = c/\lambda$, dove $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ è la velocità della luce nel vuoto
- frequenza angolare $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$
- energia $E = h\nu = hc/\lambda$, dove $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ è la costante di Planck

Per **luce visibile** si intende la radiazione elettromagnetica con

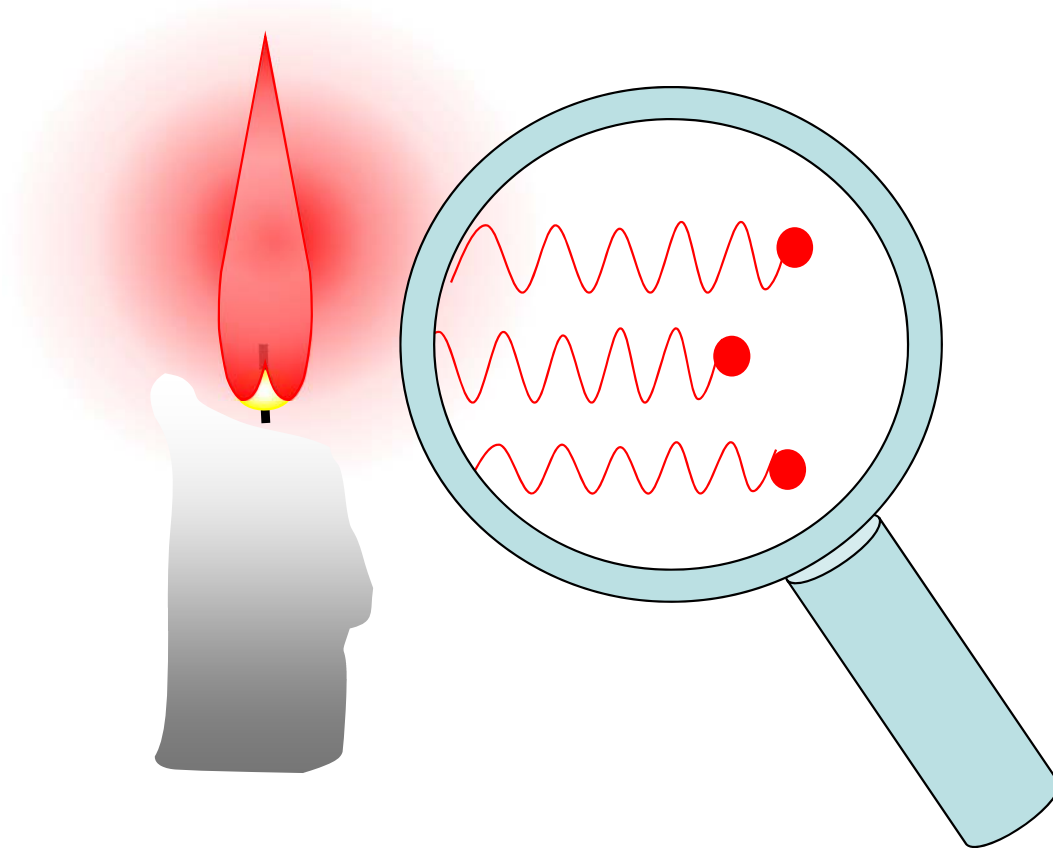
ν : 400-790 THz λ : 380-750 nm E: 1.65-3.3 eV

N.b. 1 elettron-Volt (eV) = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ Volt} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$E \text{ (eV)} = 1240/\lambda \text{ (nm)}$

Quantizzazione dell'energia

L'energia viene emessa, trasportata ed assorbita in “pacchetti” detti **quanti**



quanto di energia
elettromagnetica (fotone):

$$E = h\nu = hc/\lambda$$



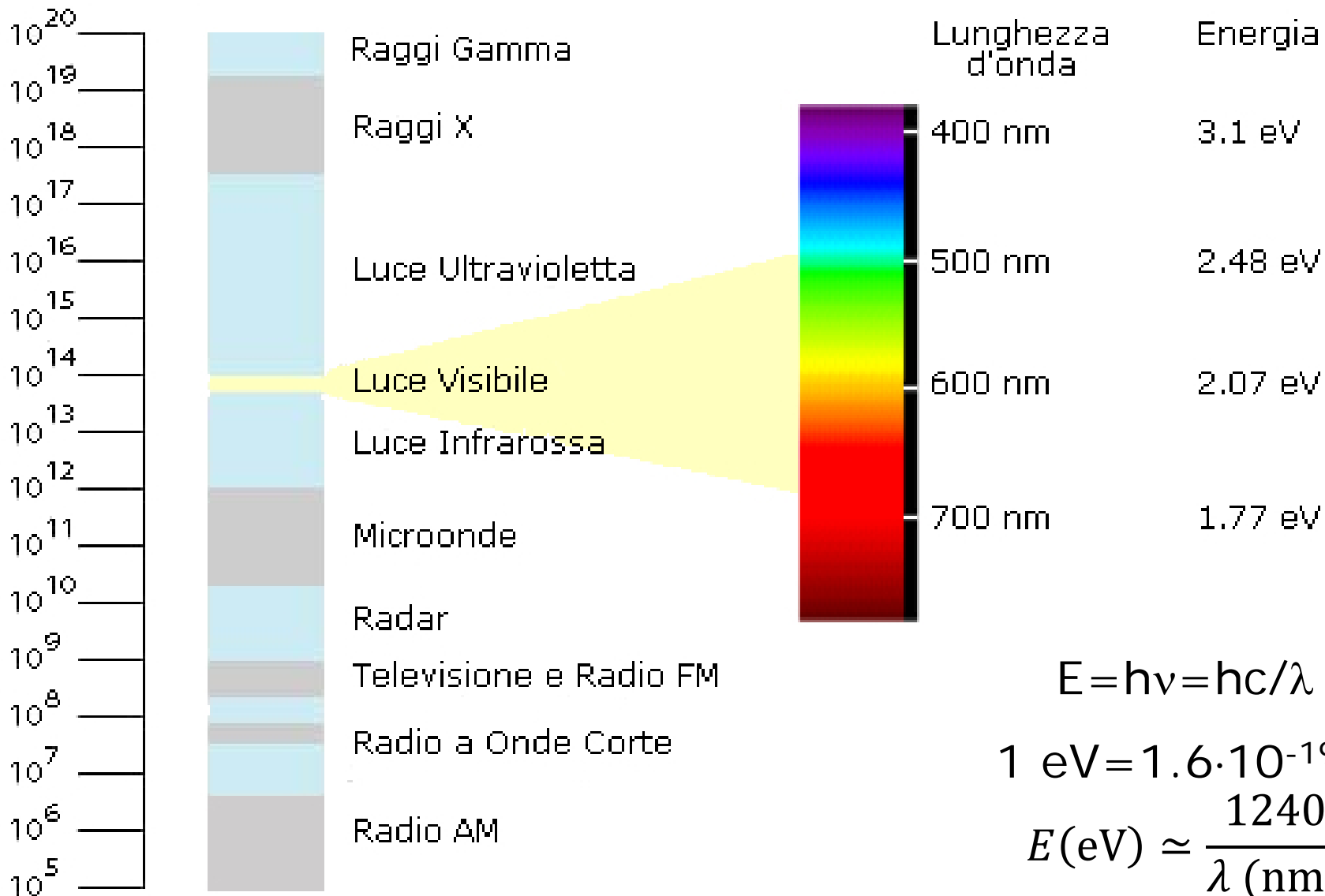
anche la luce (così come la
materia) è onda/particella!

La **radiazione elettromagnetica** ha simultaneamente natura

- ondulatoria: *onde elettromagnetiche* (interferenza, diffrazione, ...)
- corpuscolare: *fotoni* (effetto fotoelettrico, gap di energia, ...)

Lo spettro delle onde elettromagnetiche

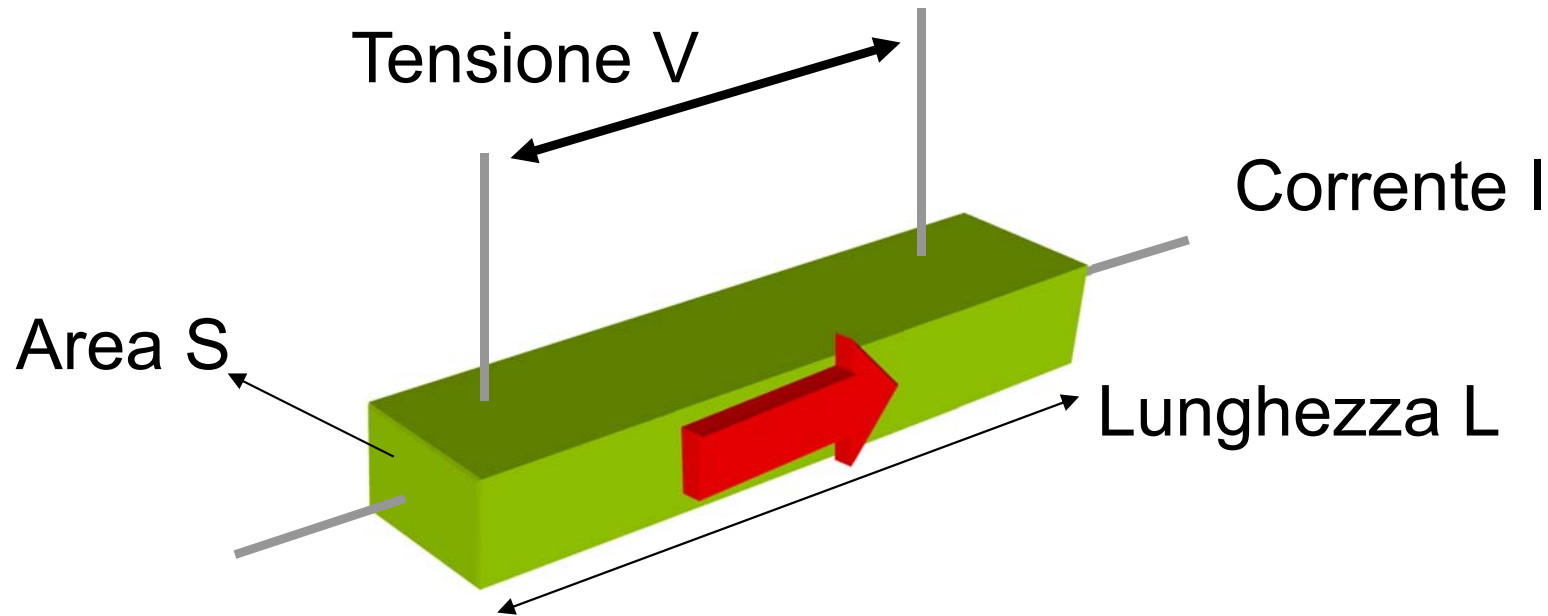
Frequenza, HZ



Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune, assorbimento/emissione di luce
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED e fotodiodi (e celle solari)

Legge di Ohm, resistenza, resistività



$$V = RI$$

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$$\sigma = \rho^{-1}$$

Legge di Ohm, R = resistenza: si misura in Ω (Ohm)

ρ = resistività: si misura in $\Omega \cdot m$

È una proprietà specifica del materiale
(non dipende dalla geometria)

σ = conducibilità: si misura in $\Omega^{-1}m^{-1}$

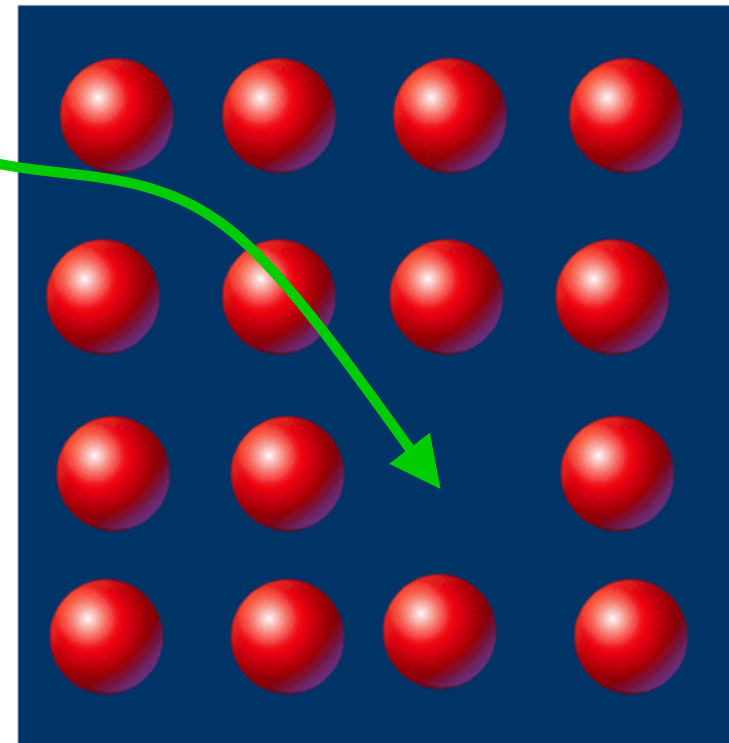
Qual è l'origine della resistenza elettrica?

La meccanica quantistica ci dice che gli elettroni urtano SOLO contro ioni “fuori posto” a causa di:

Difetti del reticolo
(vacanze, dislocazioni, ...)

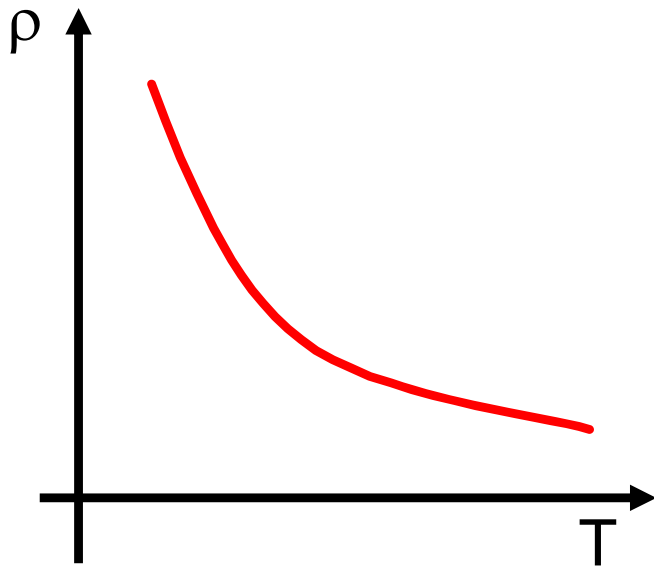
Vibrazioni degli ioni
(agitazione termica)

questi urti sono la causa fisica della resistenza elettrica, che nei metalli aumenta all'aumentare della temperatura



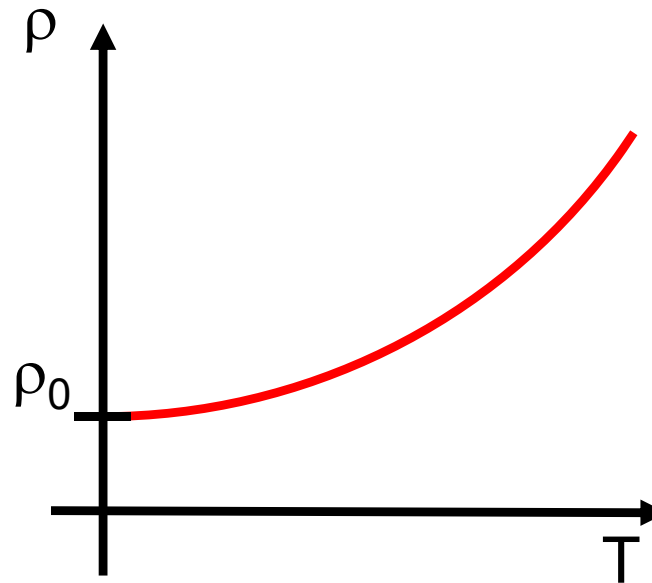
Semiconduttori e metalli: resistività

Semiconduttori:
Resistività elevata
(Si: $3 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$)
che diminuisce con T



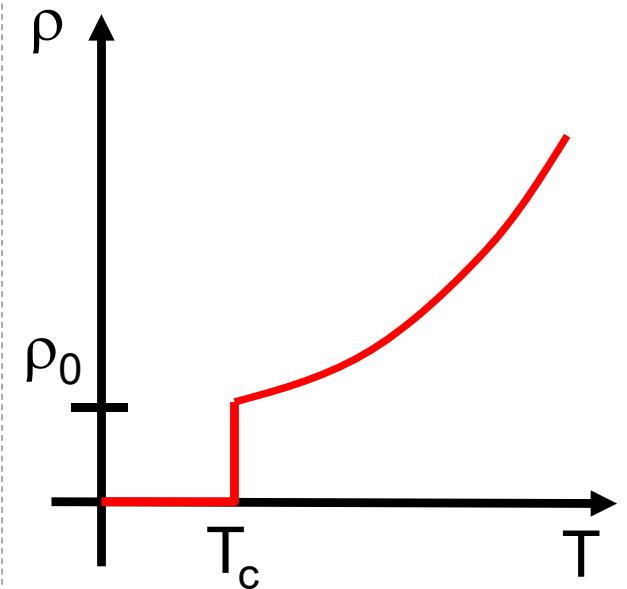
⇒ Molto sensibile a:
illuminazione
Impurezze (pochi atomi)

Metalli:
Resistività bassa
(Cu: $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)
che aumenta con T



⇒ Poco sensibile a:
illuminazione
impurezze

Superconduttori:
Resistività nulla
al di sotto della
temperatura critica T_c

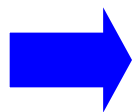
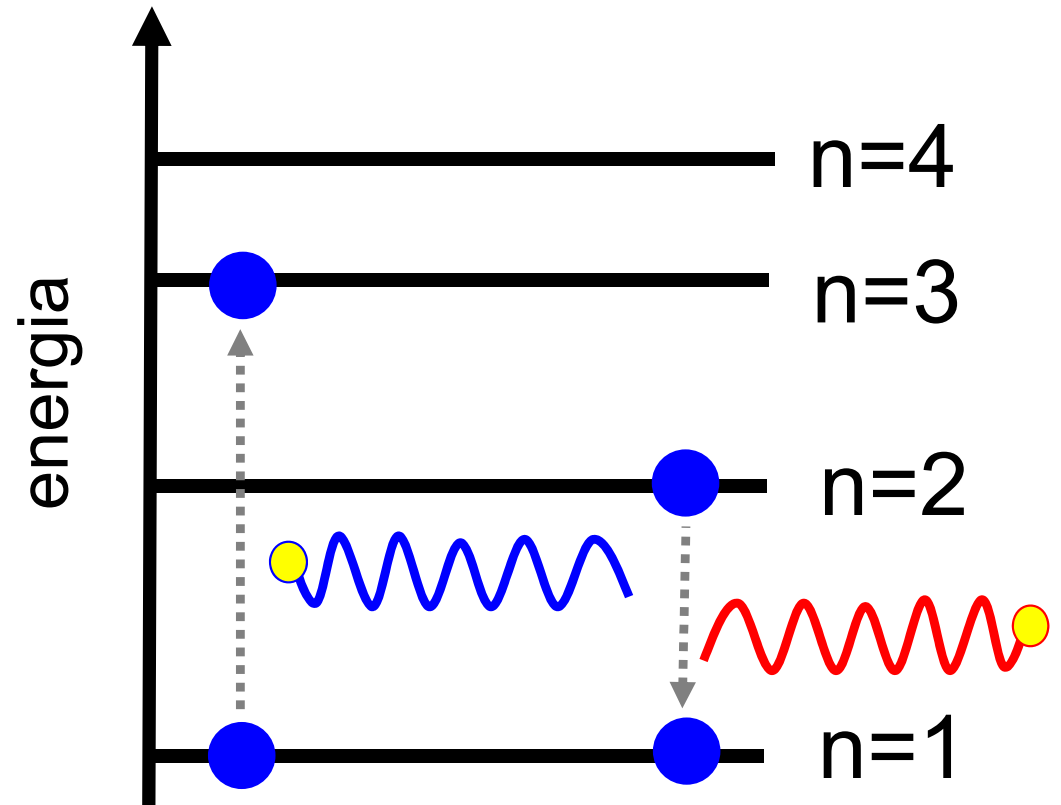
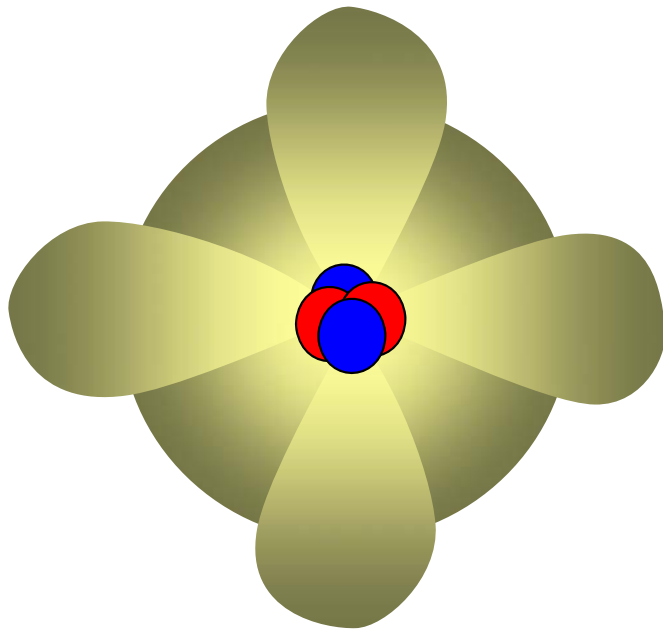


⇒ Molto sensibile al
campo magnetico
⇒ espulsione

Livelli di energia negli atomi

Secondo i principi della meccanica quantistica, in sistemi legati, l'energia può assumere solo valori discreti detti *livelli*.

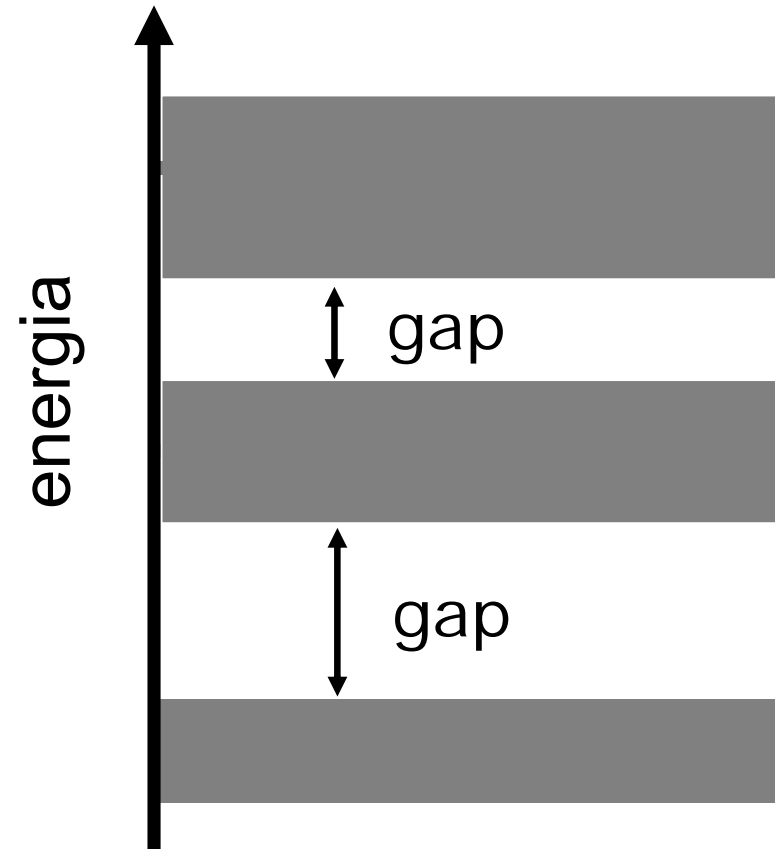
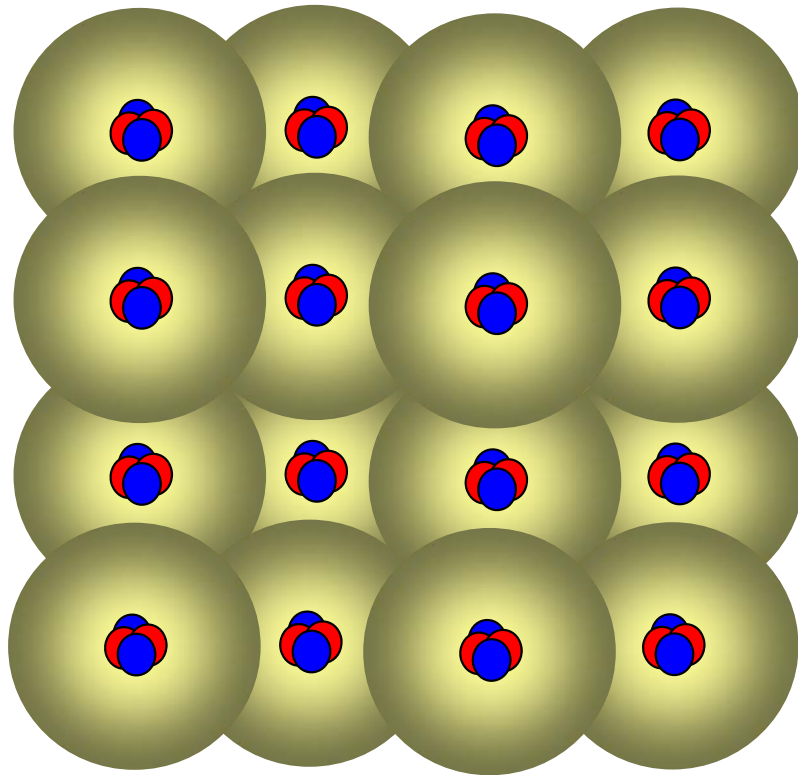
Es. elettroni in un atomo



Un elettrone può saltare da un livello all'altro assorbendo o emettendo un fotone di frequenza proporzionale alla differenza di energia, secondo la relazione $\Delta E = h\nu$.

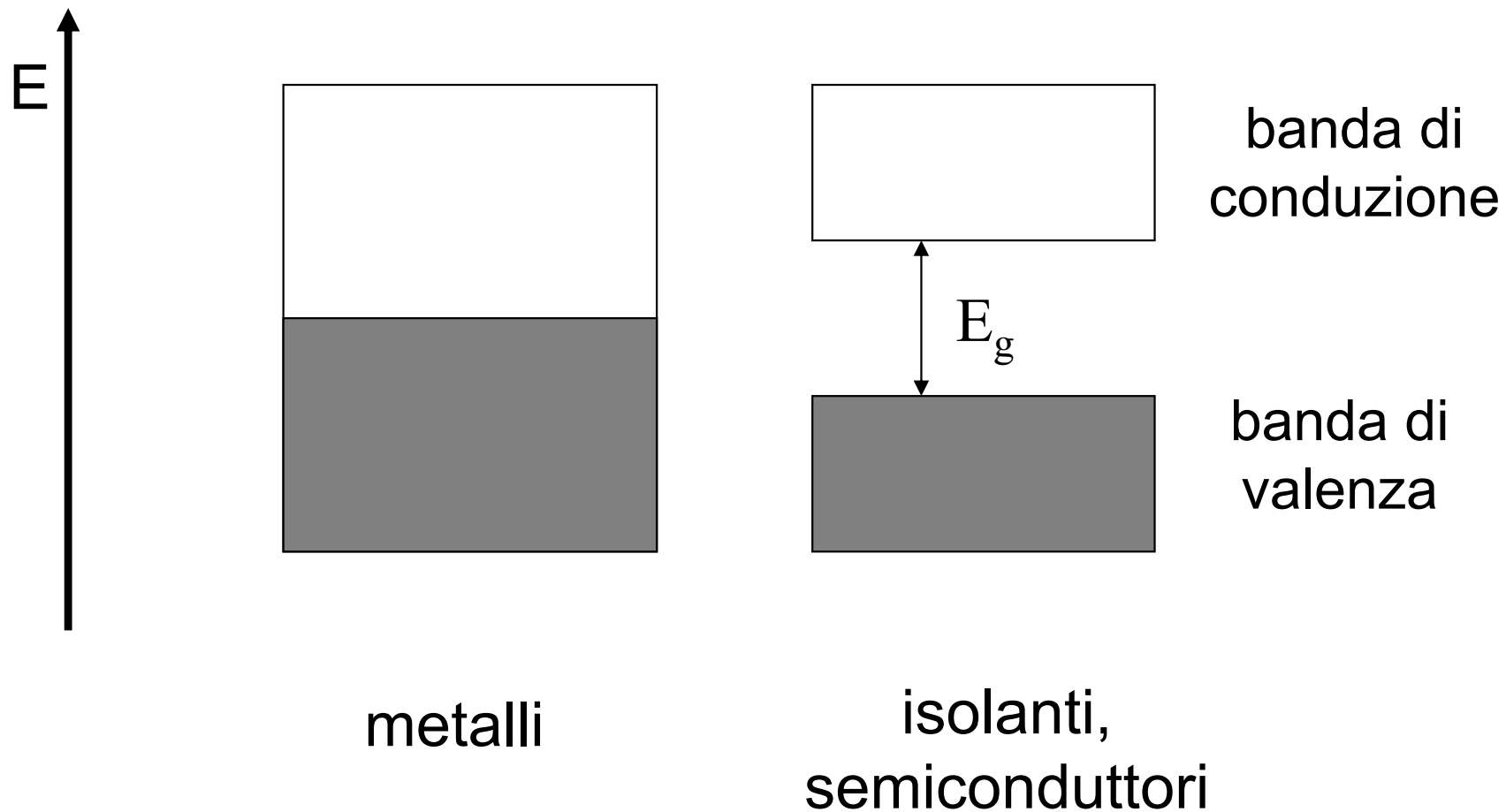
Bande di energia nei solidi

Se molti atomi si legano a formare un solido, i livelli discreti si allargano a formare **bande di energia**.

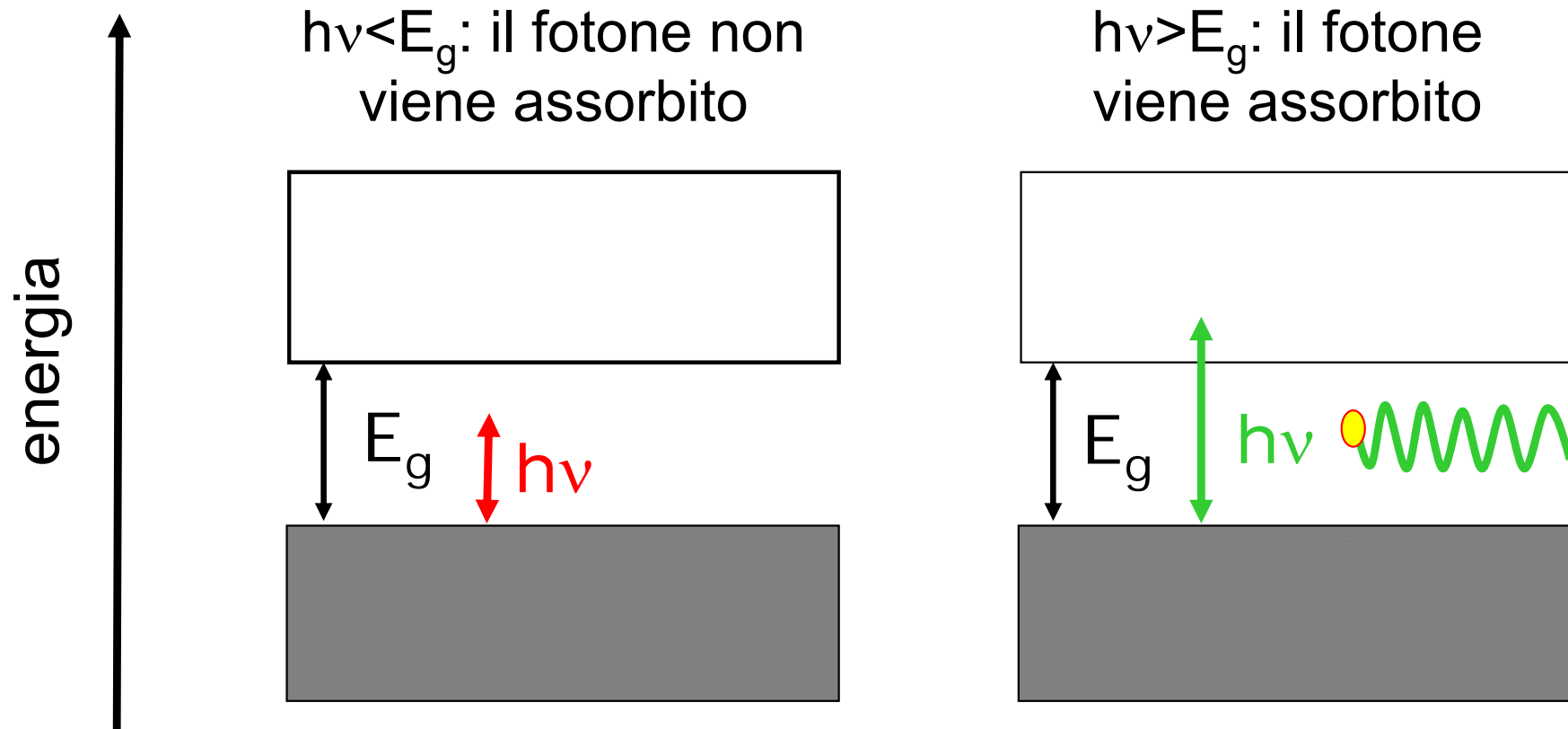


La separazione di energia fra due bande consecutive si dice ***gap di energia***.

Riempimento dei livelli elettronici: il principio di Pauli



Gap di energia e assorbimento ottico



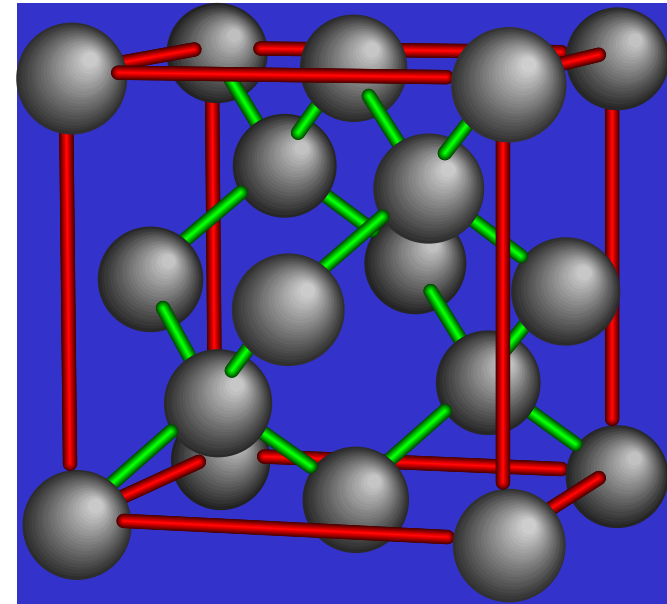
Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione $E_g = h\nu = hc/\lambda$. L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico.

Semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

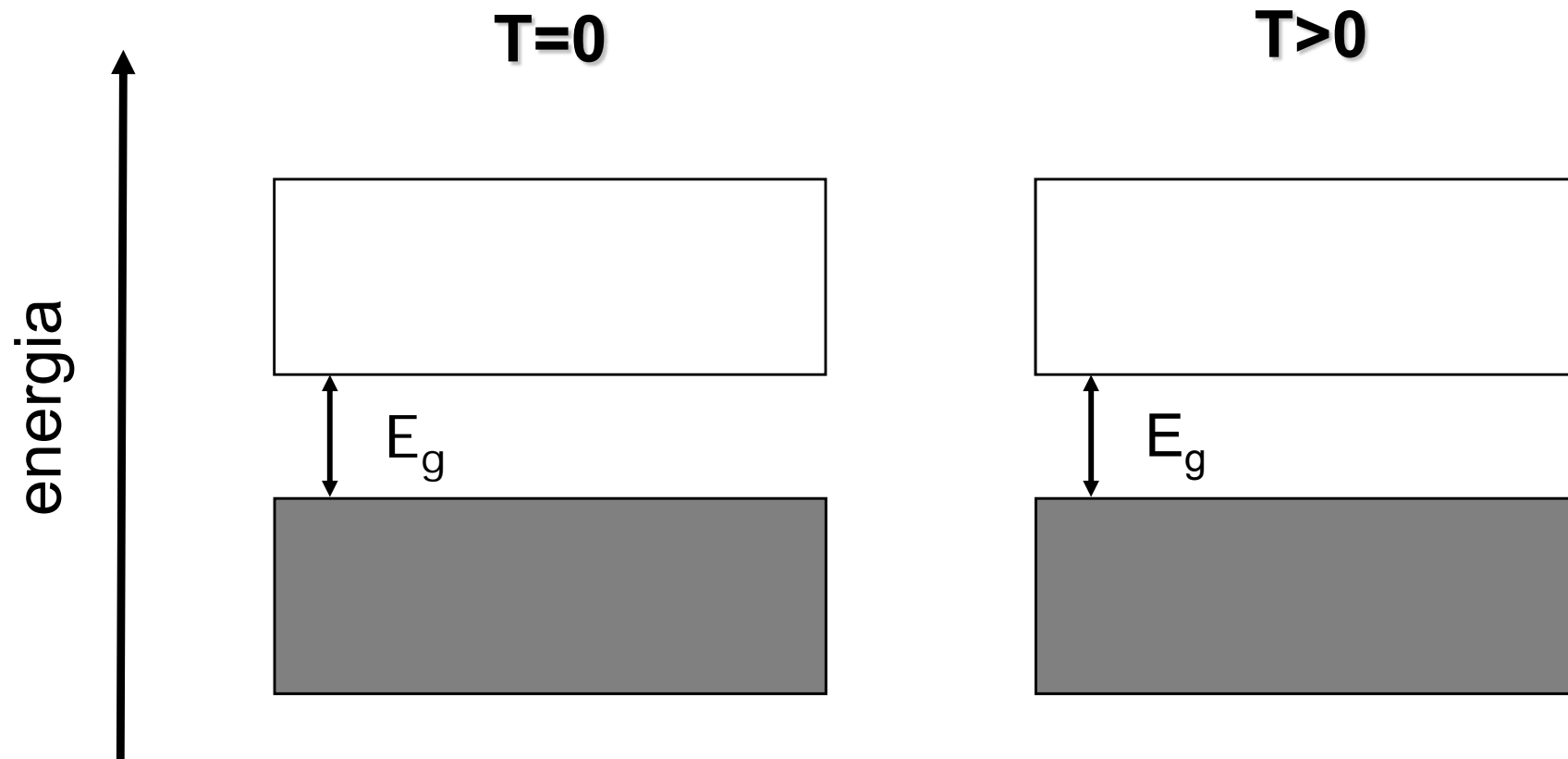
		III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Cella elementare (Si)



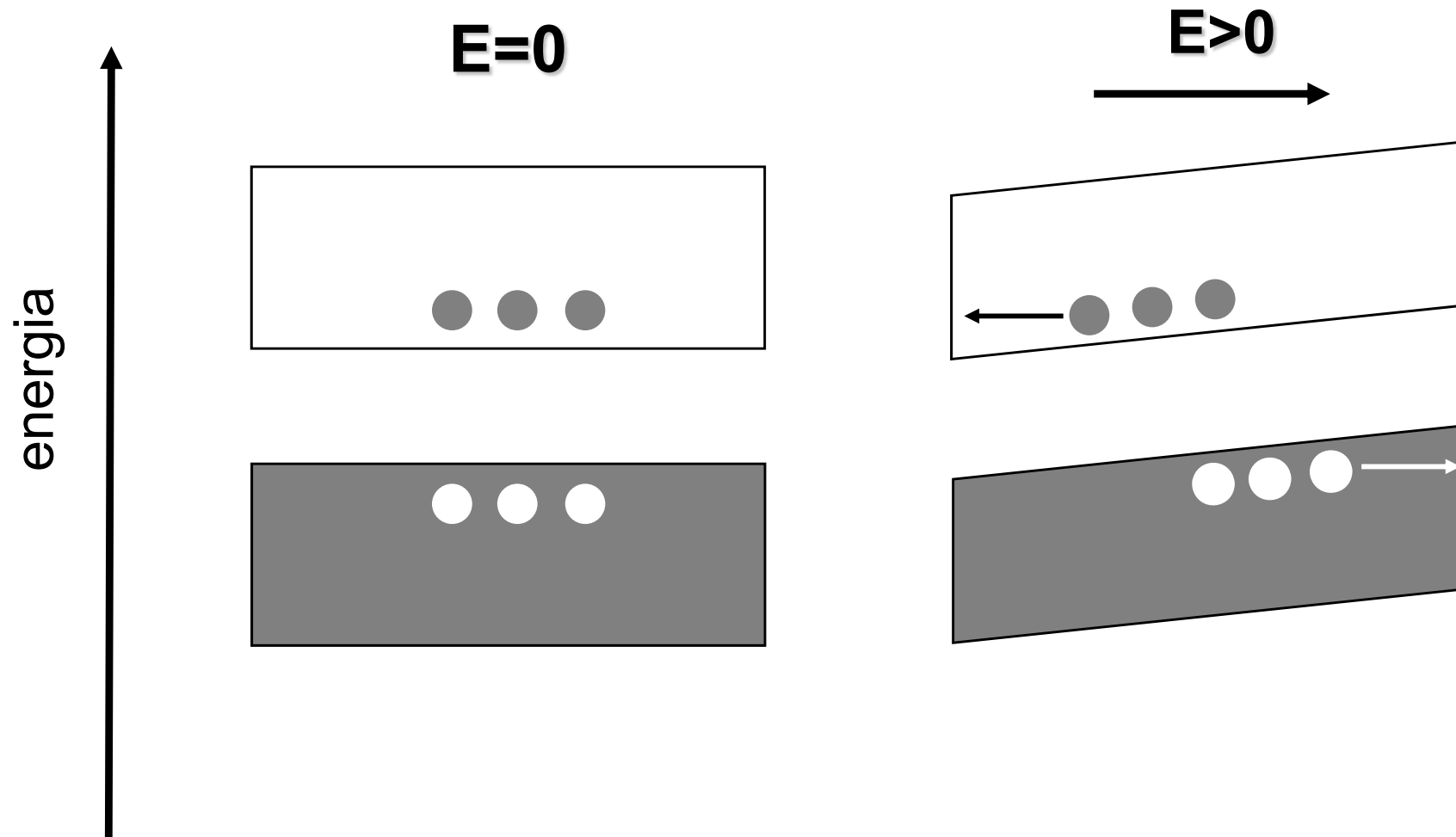
I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente < 4 eV.

Il ruolo della temperatura



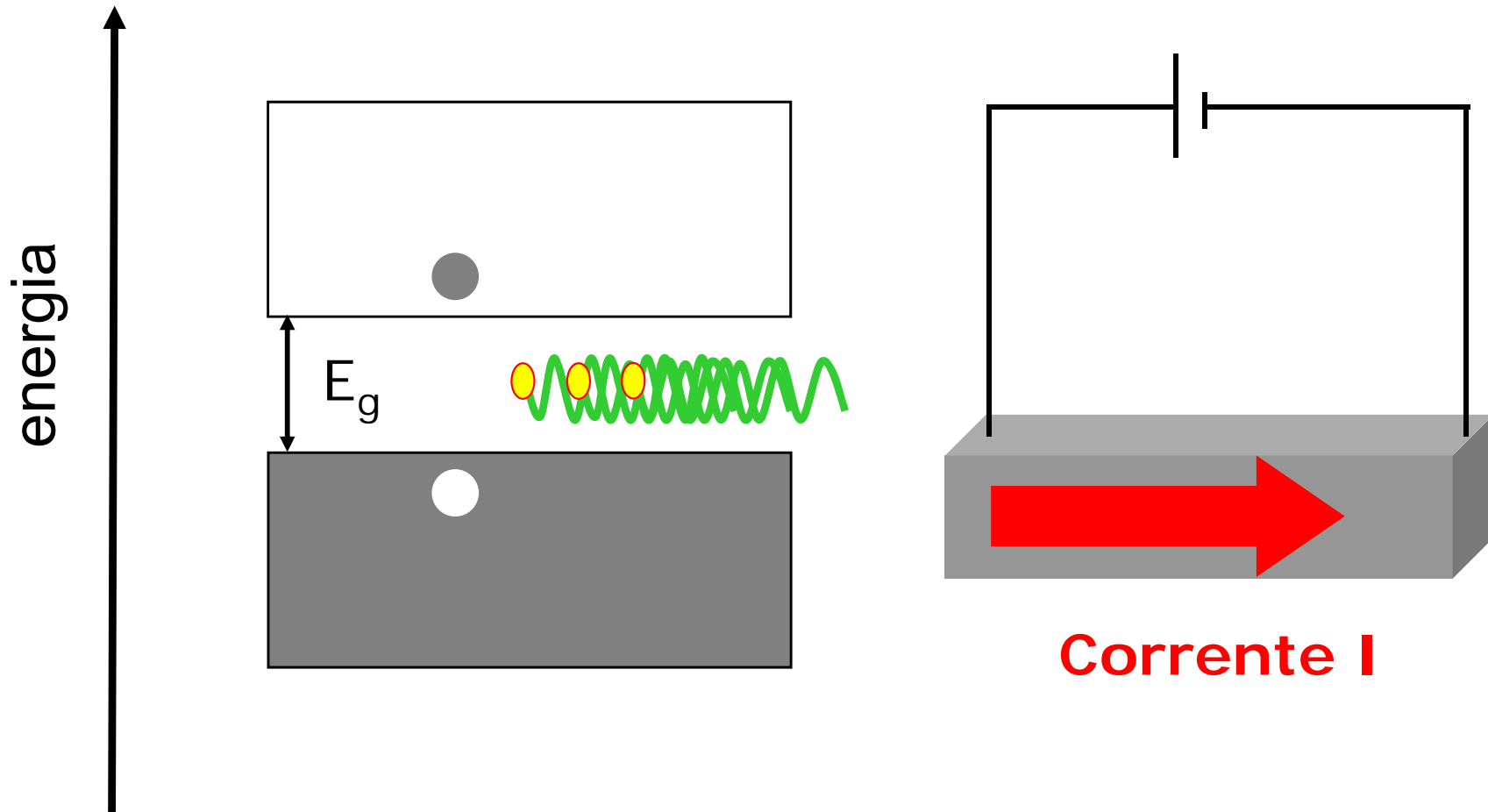
Aumentando la temperatura, a causa dell'agitazione termica, si creano elettroni in banda di conduzione e lacune in banda di valenza: per questo motivo la resistenza elettrica diminuisce.

Elettroni e lacune: effetto di un campo elettrico



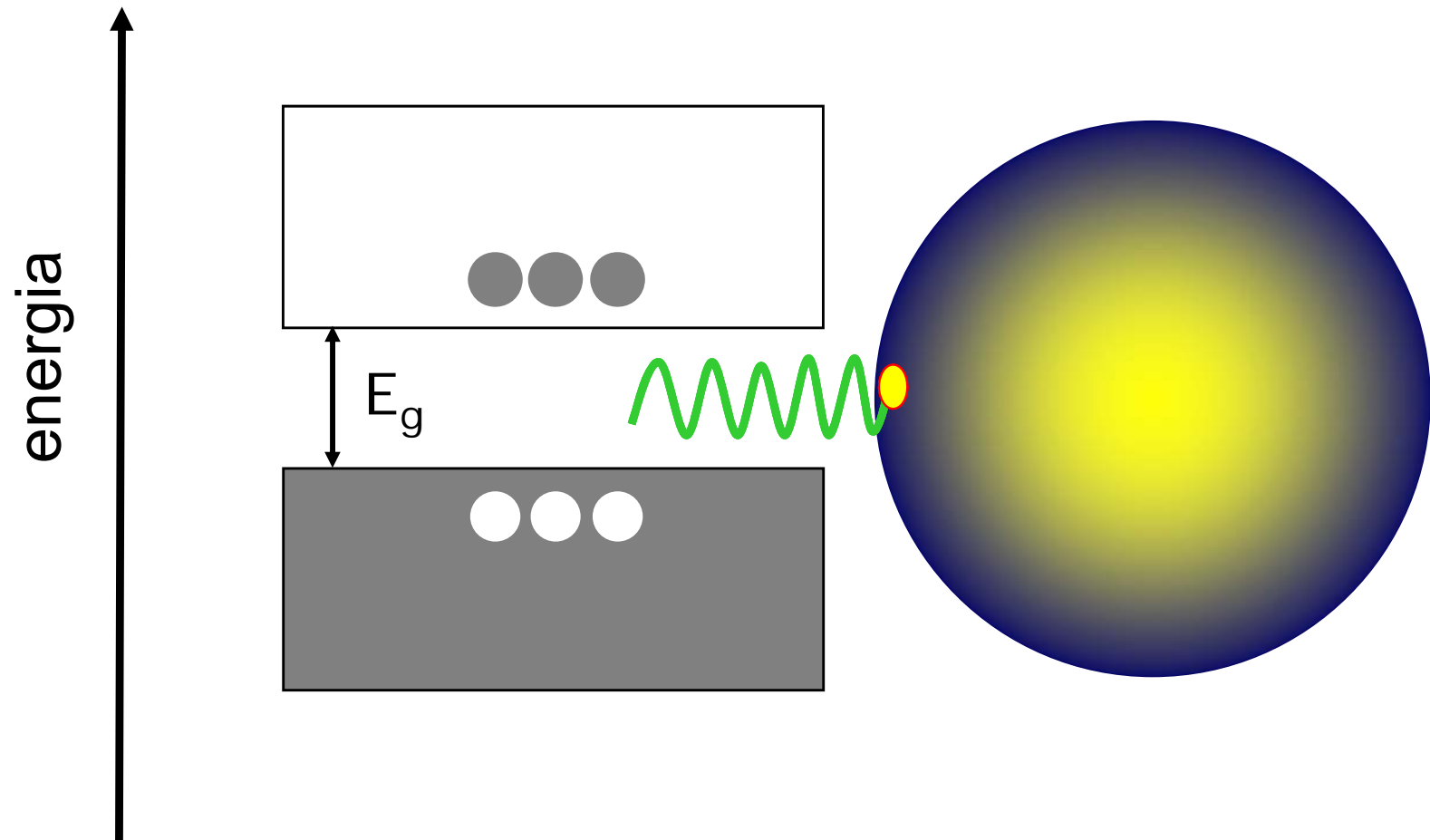
Gli stati vuoti in banda di valenza, o *lacune*, si comportano come particelle cariche positivamente

Fotoeccitazione e fotoconducibilità



Se il semiconduttore viene illuminato con luce di energia $h\nu > E_g$, la corrente elettrica aumenta. Questo fenomeno è detto **fotoconducibilità**

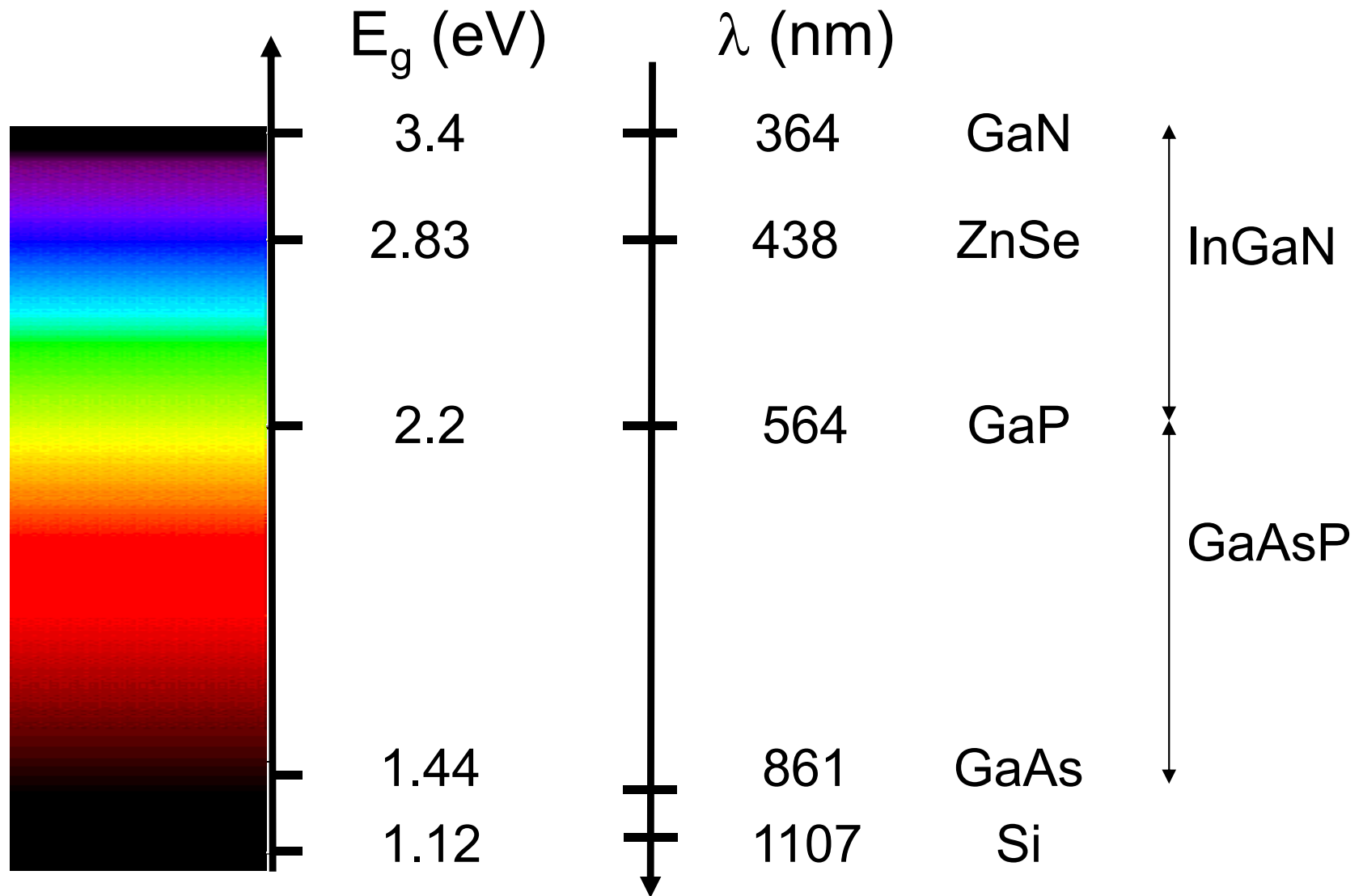
Emissione di luce



Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia $h\nu = E_g \rightarrow$ *luminescenza*

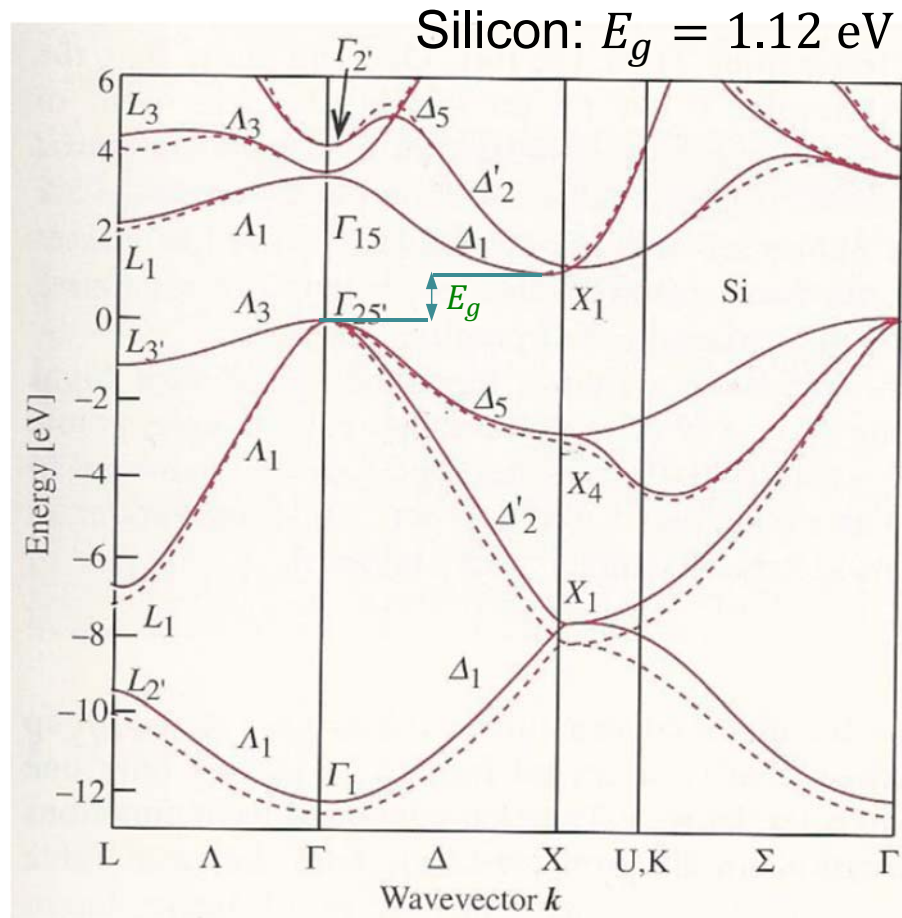
Solo in materiali a gap diretto: GaAsP, InGaN, ...

Gap di energia e luce visibile

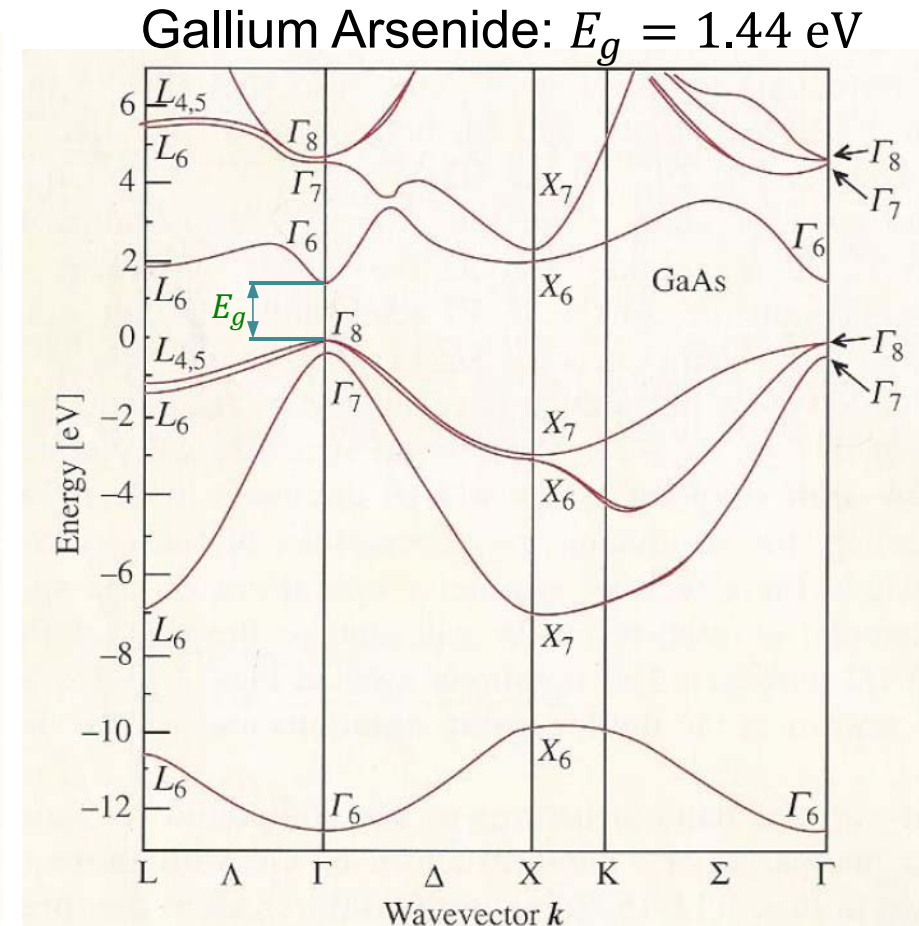


Utilizzando semiconduttori binari e le loro leghe è possibile ottenere emissione/assorbimento di luce in tutto lo spettro visibile

Gap indiretto o diretto ?



Indirect band gap (k max VB \neq min CB):
no light emission



Direct band gap (k max VB \neq min CB):
efficient light emission

Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune, assorbimento/emissione di luce
- **Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n**
- LED e fotodiodi (e celle solari)

Il drogaggio

una tecnica per controllare il numero dei portatori di carica

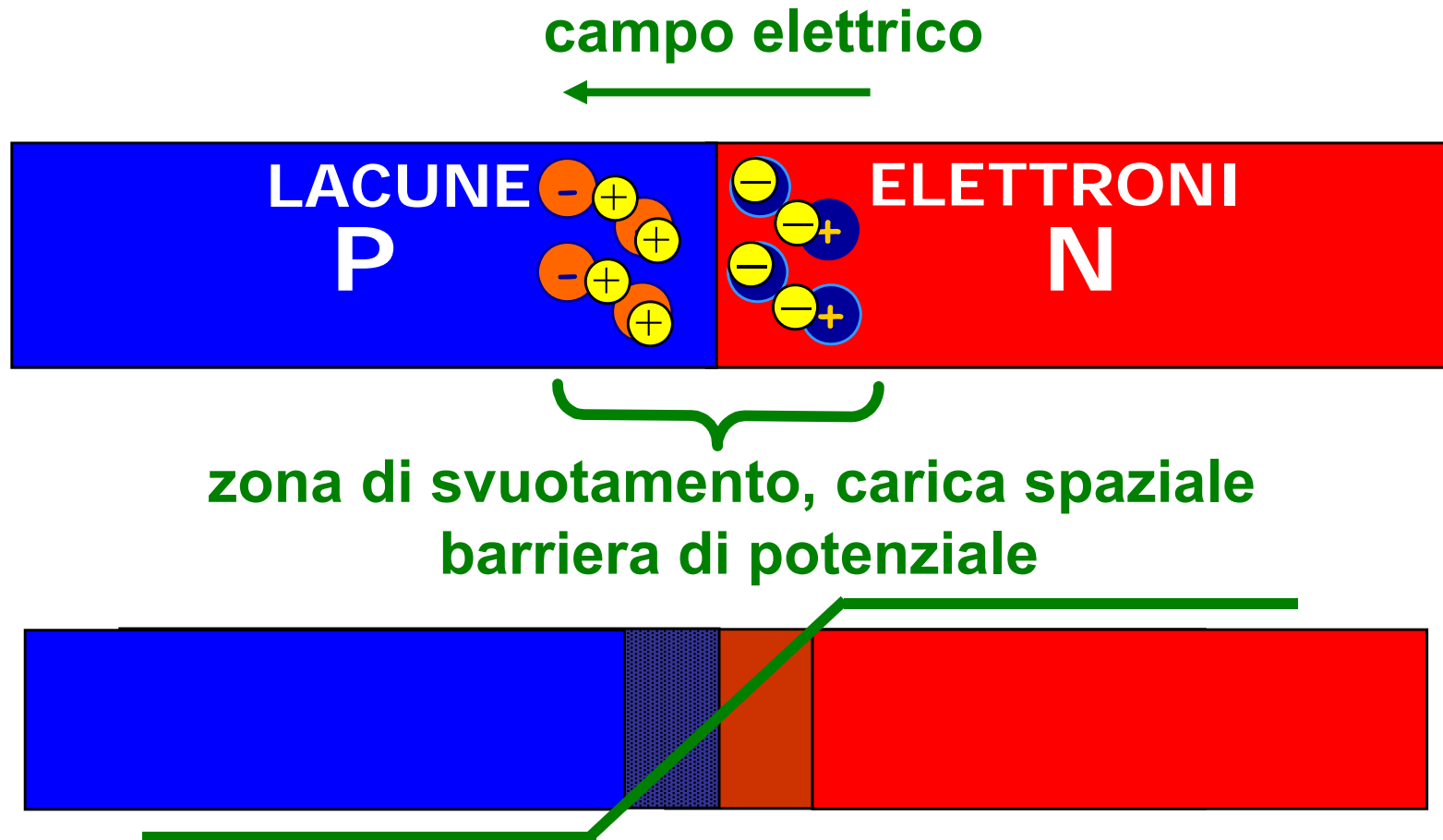
Come funziona? Prendiamo il **Silicio**:

atomi con un elettrone in più \Rightarrow **donori**,
forniscono elettroni in banda di
conduzione: *drogaggio di tipo n*

atomi con un el. in meno \Rightarrow **accettori**,
forniscono lacune in banda di valenza:
drogaggio di tipo p

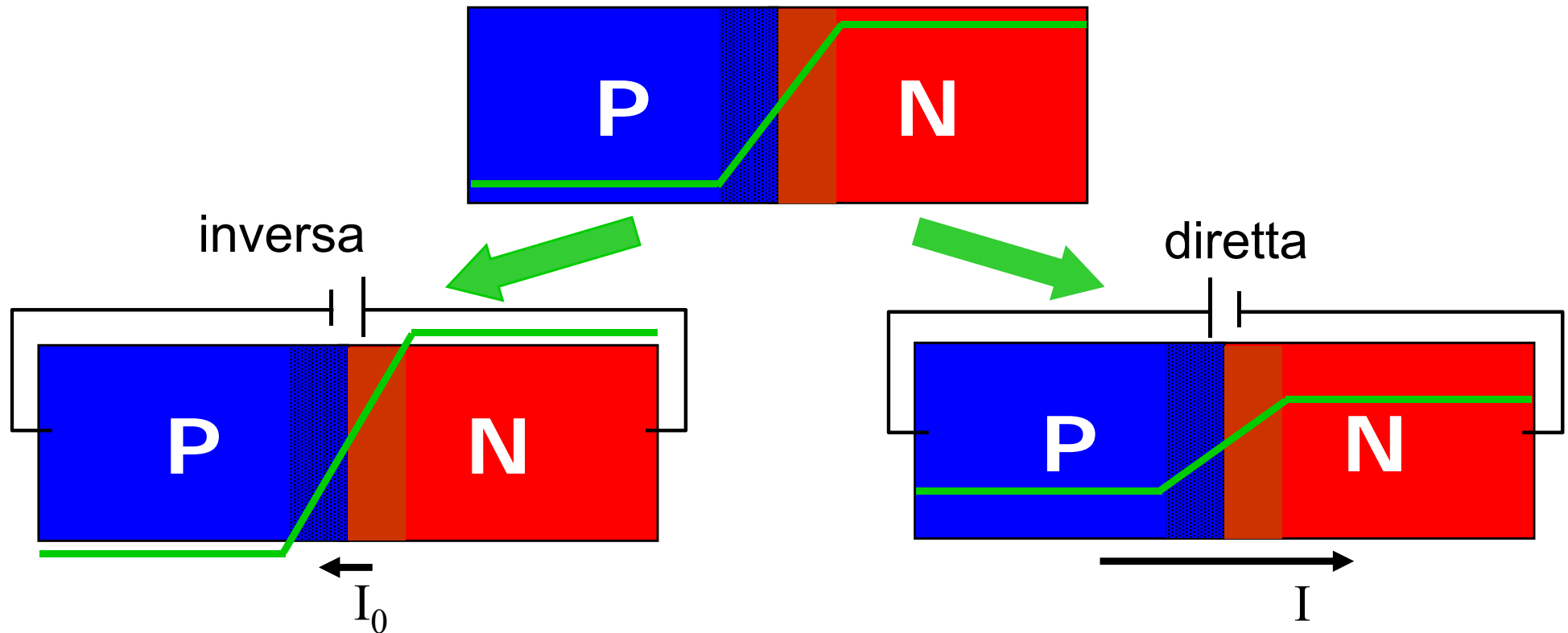
		III	IV	V
	5	6	7	
	B	C	N	
	10.811	12.0112	14.0067	
	13	14	15	
	Al	Si	P	
	26.9815	28.0855	30.9738	
29	30	31	32	33
Cu	Zn	Ga	Ge	As
63.54	65.38	69.72	72.59	74.9216
47	48	49	50	51
Ag	Cd	In	Sn	Sb
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75
79	80	81	82	83
Au	Hg	Tl	Pb	Bi
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980

La giunzione p-n: il “cuore” dei dispositivi a semiconduttore



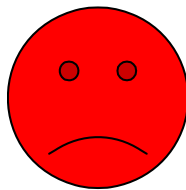
Il campo elettrico nella zona di svuotamento si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari (lacune dal lato p, elettroni dal lato n)

Polarizzazione della giunzione p-n



Aumento della barriera

**Minimo passaggio
di corrente**

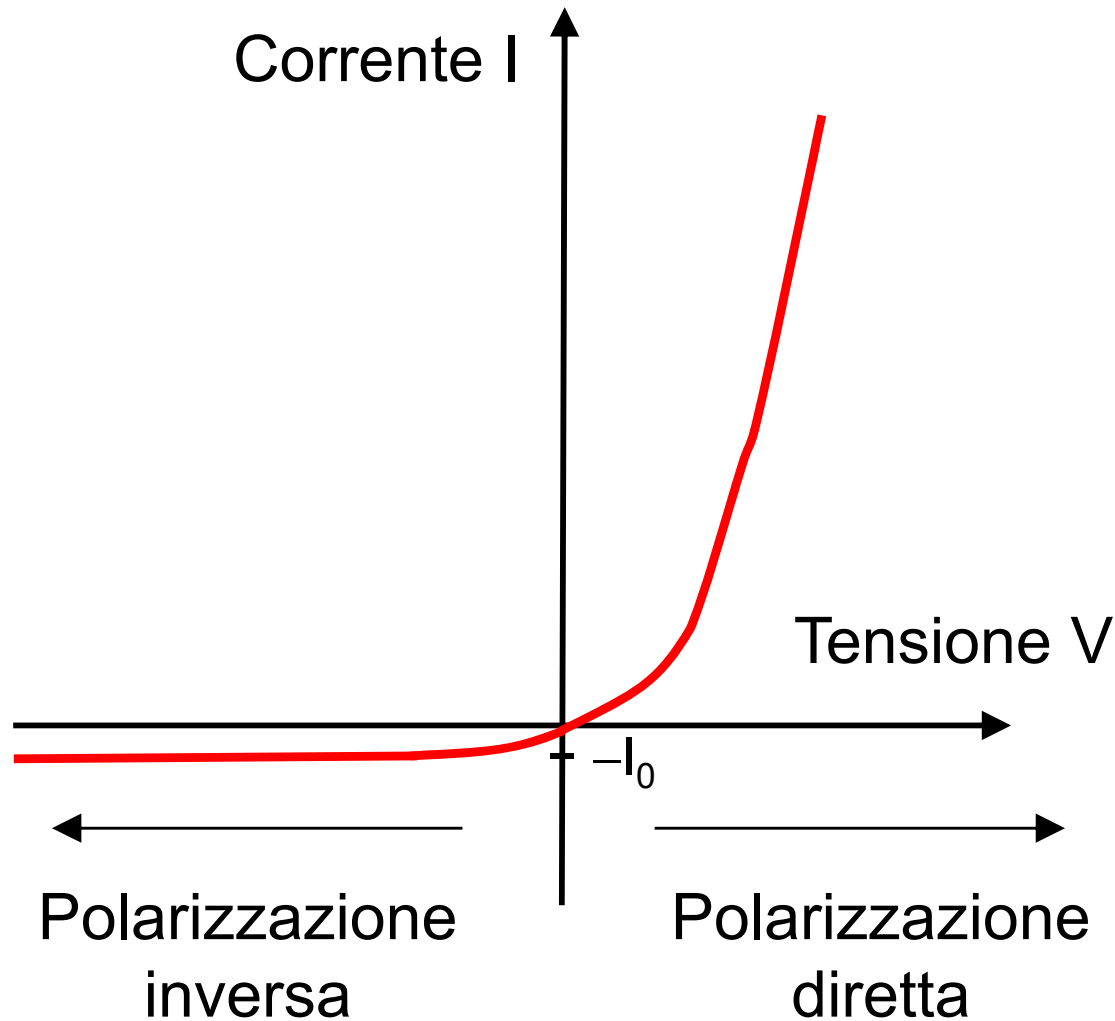


Riduzione della barriera

**Forte passaggio
di corrente**



Caratteristica I-V del diodo a giunzione



$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right]$$

Legge del diodo ideale

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

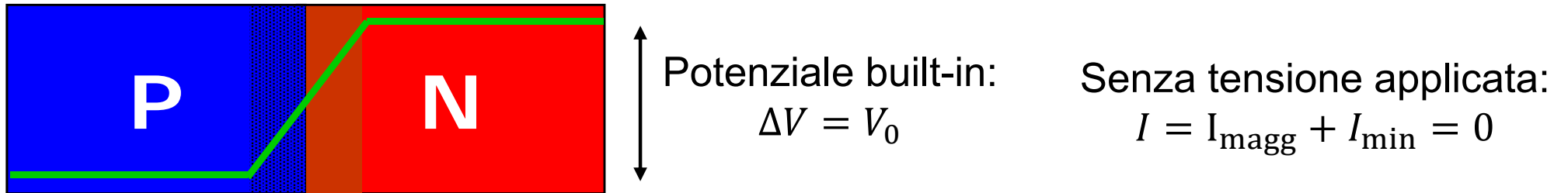
Diodo non ideale:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{n k_B T} \right) - 1 \right]$$

n = fattore di idealità

Come si spiega la caratteristica I-V del diodo?

Correnti di portatori *maggioritari* e *minoritari*



Giunzione pn polarizzata: barriera di potenziale $\Delta V(V) = V_0 - V$:
la tensione applicata si **sottrae** alla tensione di built-in

Corrente di portatori maggioritari (diffusione): $I_{\text{magg}}(V) \propto e^{-\frac{q\Delta V}{kT}} = e^{-\frac{qV_0}{kT}} e^{\frac{qV}{kT}}$

Corrente di portatori minoritari (deriva): $I_{\text{min}}(V) = I_{\text{min}}(0)$

Corrente totale: $I(V) = I_{\text{magg}}(V) + I_{\text{min}}(V) = I_{\text{magg}}(0)e^{\frac{qV}{kT}} + I_{\text{min}}(0) = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$

$I_0 = |I_{\text{min}}(0)| =$ corrente inversa di saturazione (portatori minoritari)

In pratica, quando la polarizzazione è...

... **diretta**: si riduce la barriera di potenziale, domina la corrente di portatori maggioritari

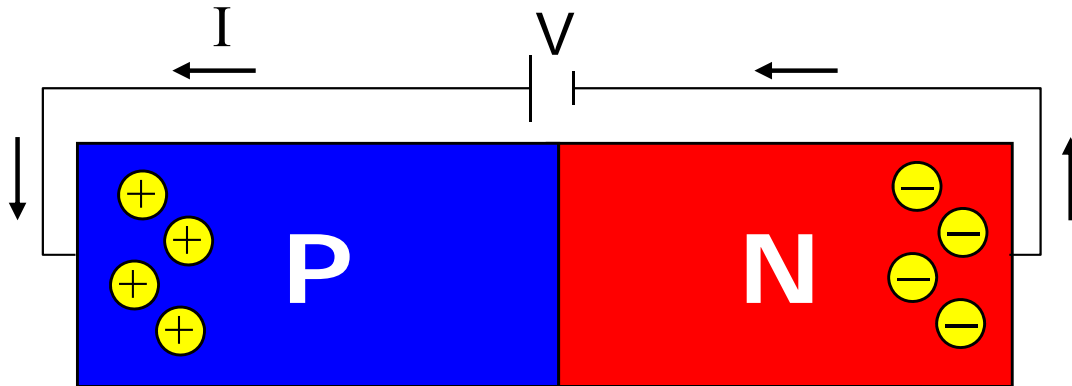
... **inversa**: aumenta la barriera di potenziale, rimane la corrente di portatori minoritari

Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune, assorbimento/emissione di luce
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- **LED e fotodiodi (e celle solari)**

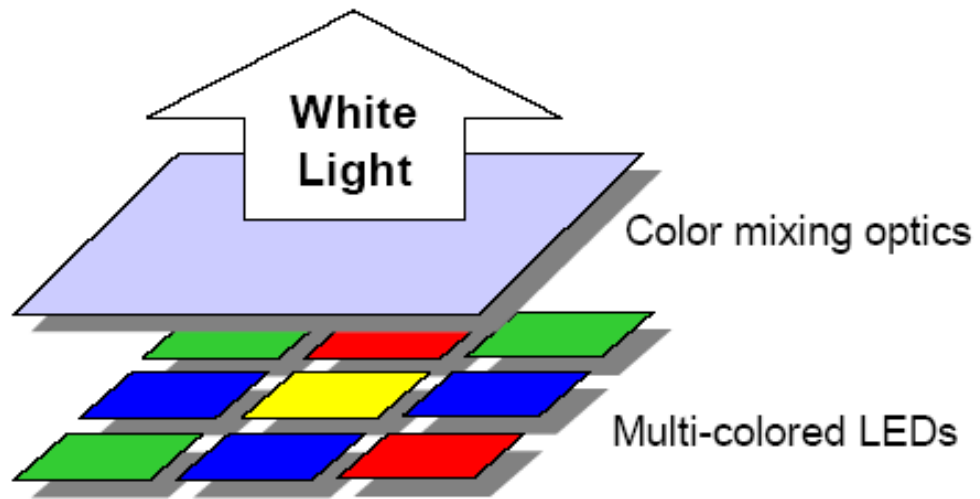
Giunzione p-n per emissione di luce:

LED e laser a semiconduttore (composti III-V: GaAsP, InGaN, ...)

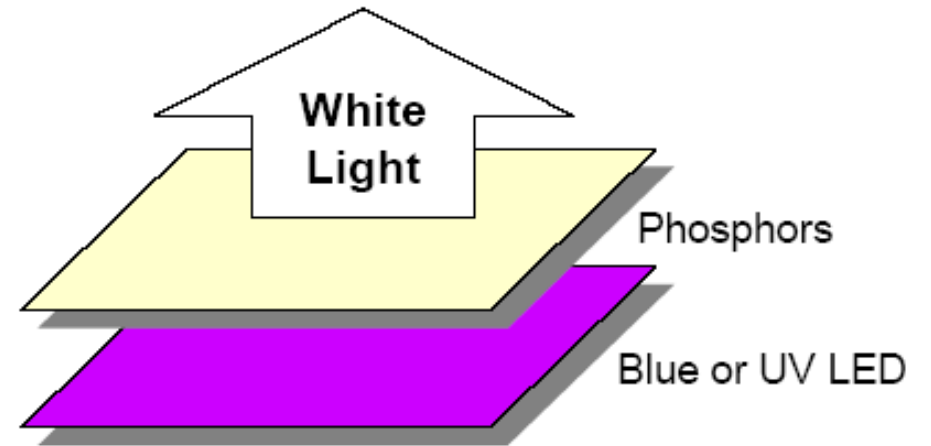


Il colore, ossia la lunghezza d'onda della luce emessa, dipende dal gap di energia del semiconduttore secondo la relazione $E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

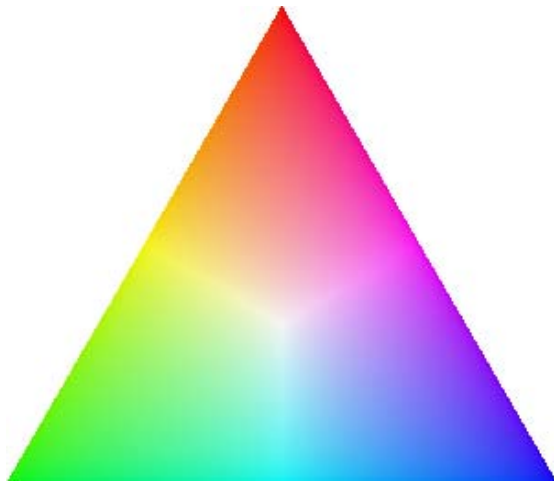
LED a luce bianca



LED RGB (Red-Green-Blue)



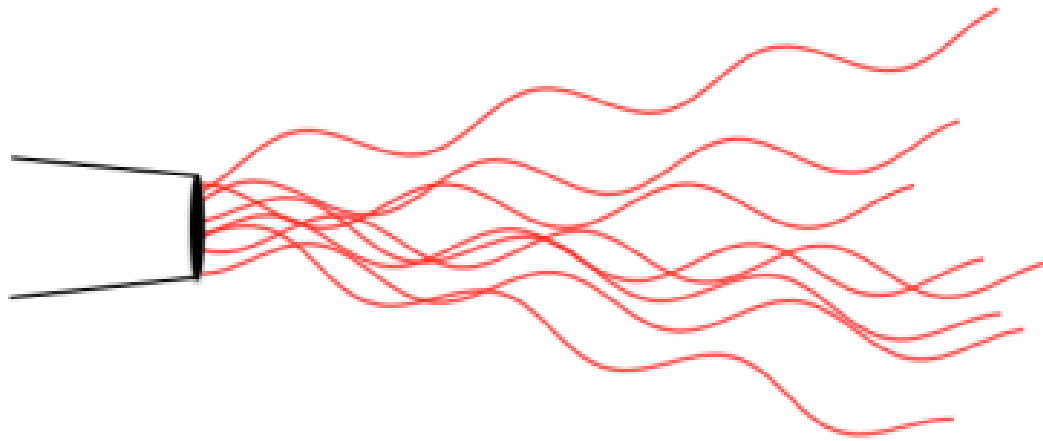
LED a fosfori



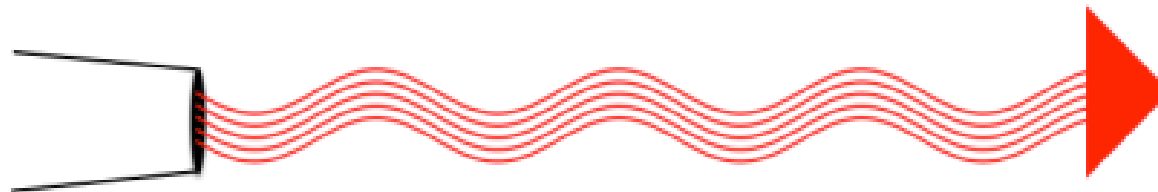
il "triangolo dei colori"



Emissione coerente: la luce laser



La luce di un LED è **incoerente**:
i fotoni emessi hanno fasi casuali

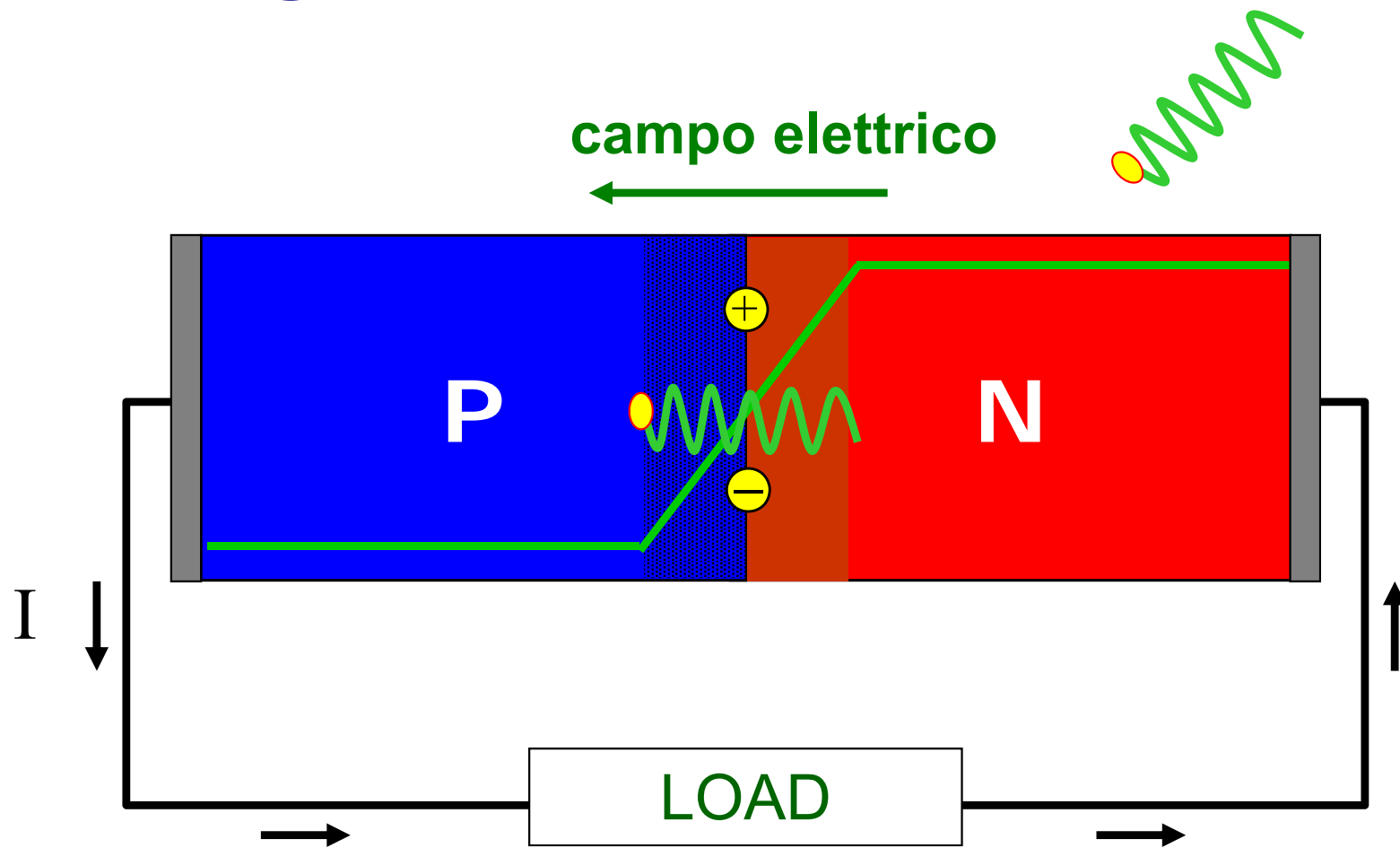


Invece la luce emessa da un laser è **coerente**:
tutti i fotoni hanno *la stessa fase*
⇒ direzionalità, brillantezza...



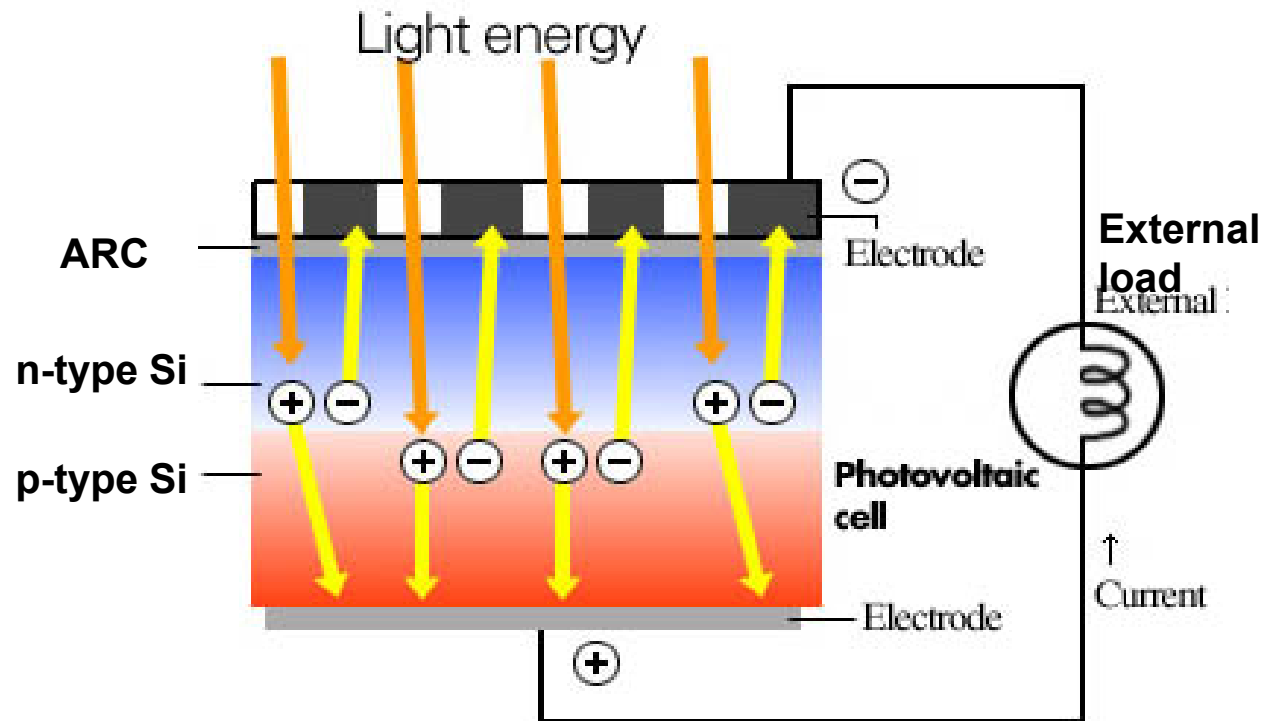
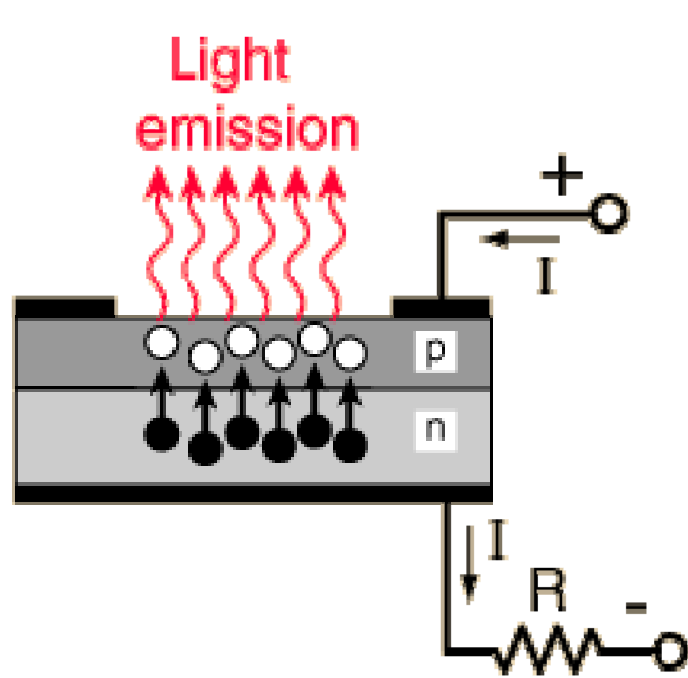
Ottenuta tramite un mezzo attivo in una **cavità ottica**

Fotodiodo/Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata

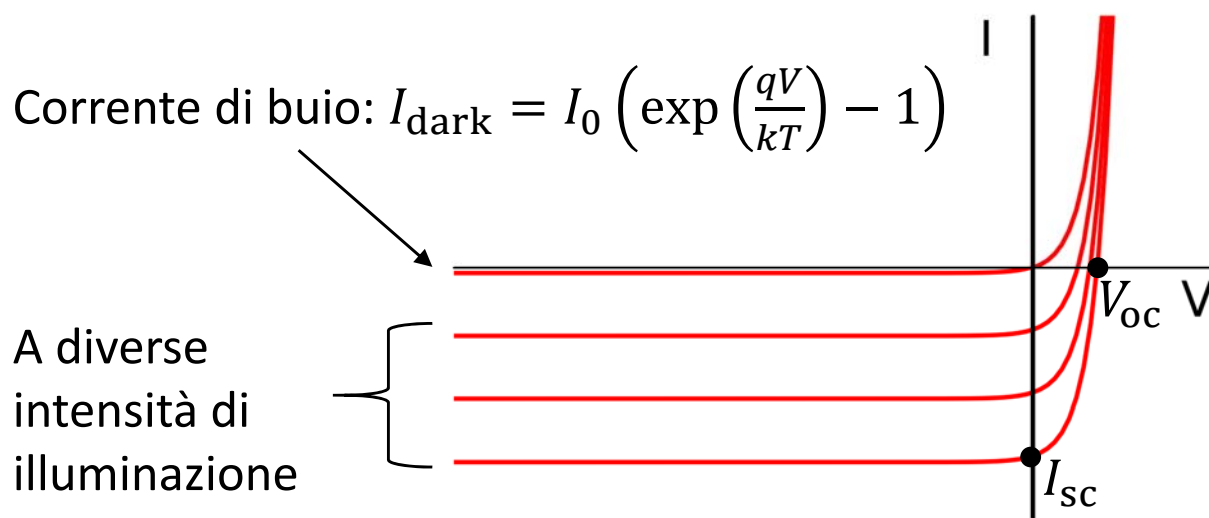


Un fotodiodo / cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED o un laser a semiconduttore: quando viene illuminata, la corrente prodotta ha il verso della corrente inversa del diodo

LED e fotodiodi / celle fotovoltaiche



Risposta elettrica del fotodiodo



$$I(V) = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) - I_{\text{ph}}$$

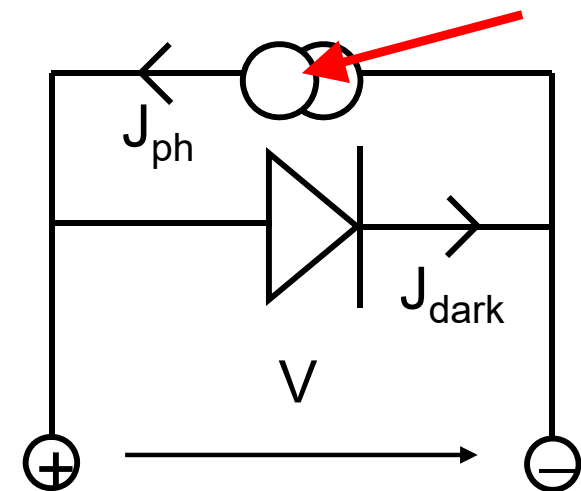
I_{ph} = fotocorrente, si sottrae alla corrente di buio



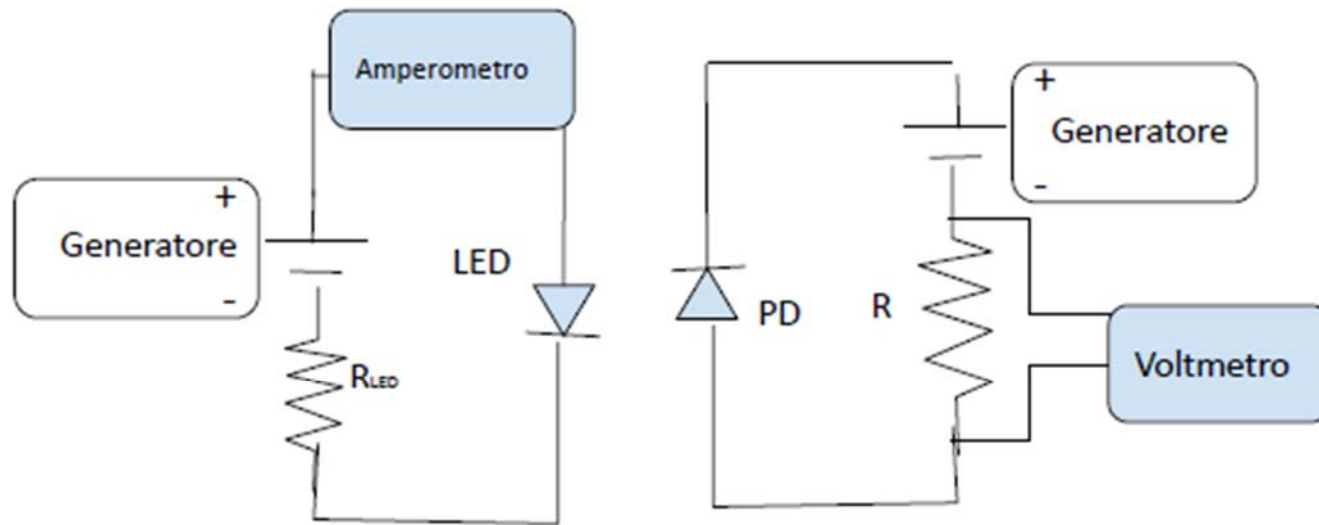
A circuito chiuso ($V = 0$): $I = I_{\text{sc}} = -I_{\text{ph}}$

A circuito aperto ($I = 0$):

$$V = V_{\text{oc}} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{\text{ph}}}{I_0} \right)$$



Accoppiamento LED-fotodiodo: schema sperimentale



Il LED viene alimentato con un generatore in continua che lo polarizza in diretta. Una piccola resistenza (500Ω) viene posta in serie per proteggere il LED da un sovraccarico di corrente e facilitare la regolazione con l'alimentatore.

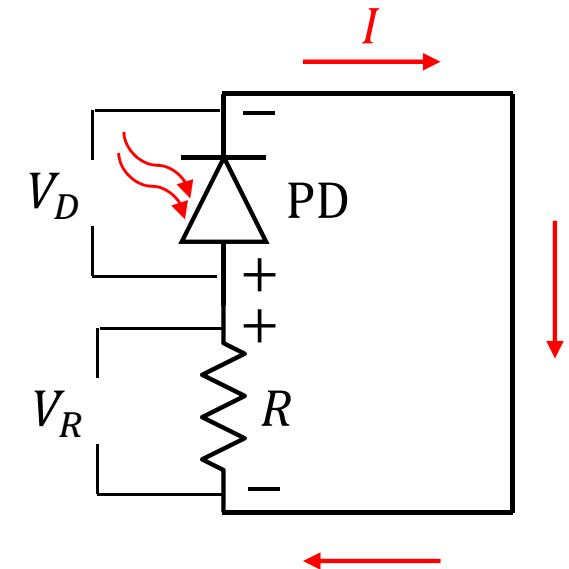
La corrente nel LED non deve superare 20 mA.

Fotodiodo con resistenza di carico

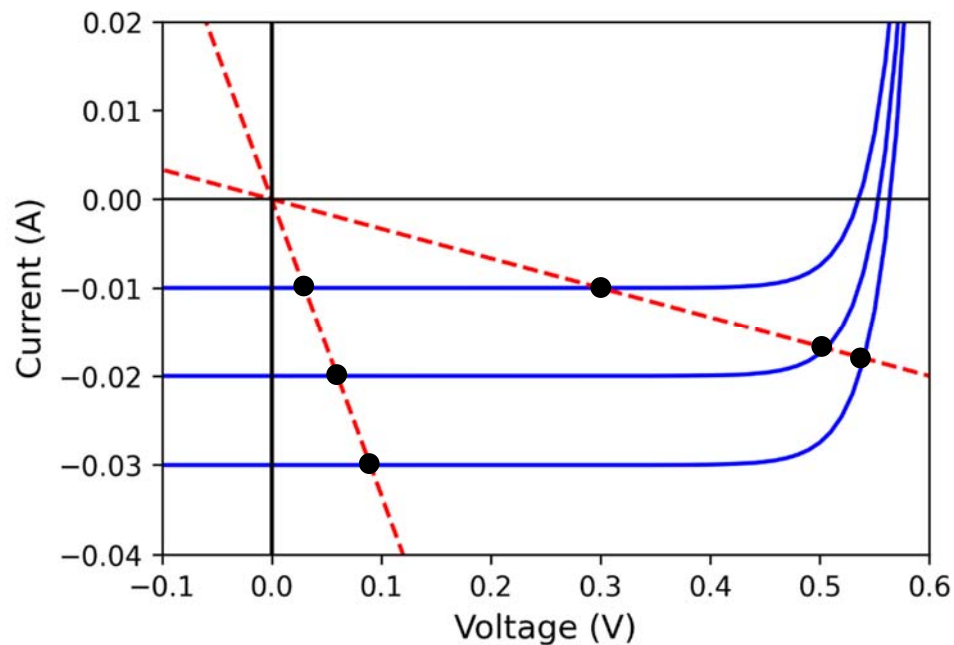
Inserendo una resistenza in serie con il fotodiodo e misurando la tensione V_R ai capi, devono essere soddisfatte le relazioni:

$$I = I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} = I_R, \quad V_R = V_D = -RI_R$$

$$\Rightarrow I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} = -\frac{V_D}{R}$$



La fotocorrente $I_{ph} \propto P_{em} =$ intensità della radiazione



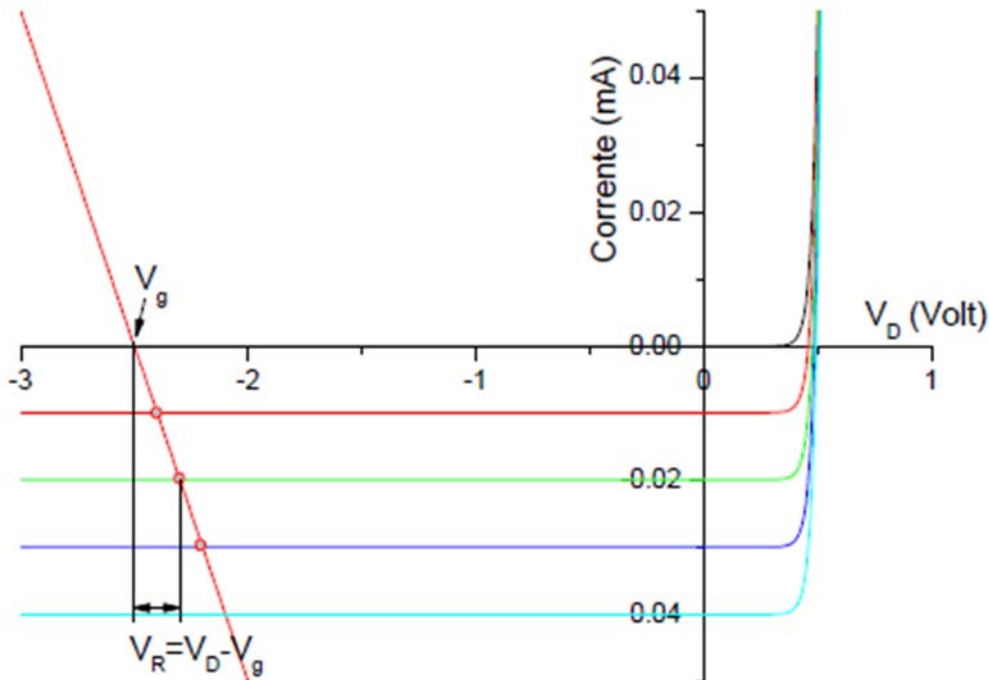
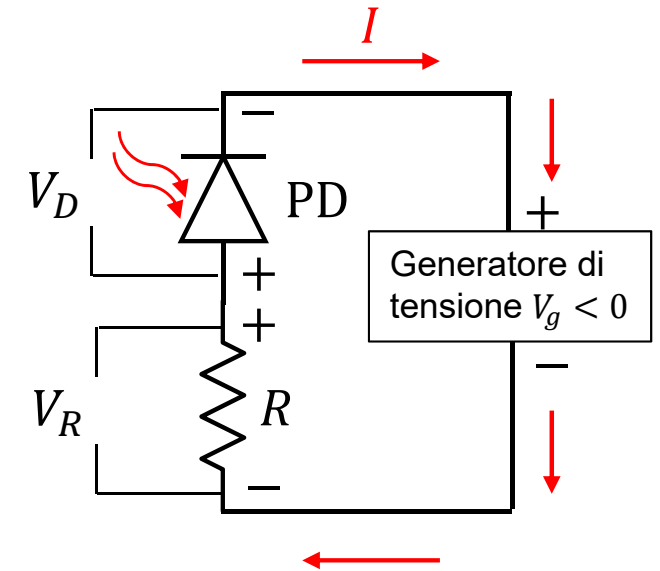
Per valori piccoli di R e di V_D domina il termine lineare $I_{ph} = \frac{V_D}{R}$. Invece per valori grandi di R e/o al crescere di V_D , la risposta è dominata dal termine esponenziale.

Fotodiodo polarizzato inversamente

La stessa corrente scorre nel PD e nella resistenza: $I = I_D = I_R$.
 Il potenziale del generatore è applicato in modo da invertire la polarizzazione sul diodo ed è quindi negativo, $V_g < 0$. Quindi:

$$I = I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} = I_R = -\frac{V_R}{R}, \quad V_D = V_R + V_g$$

$$I = I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} = -\frac{V_D - V_g}{R}$$

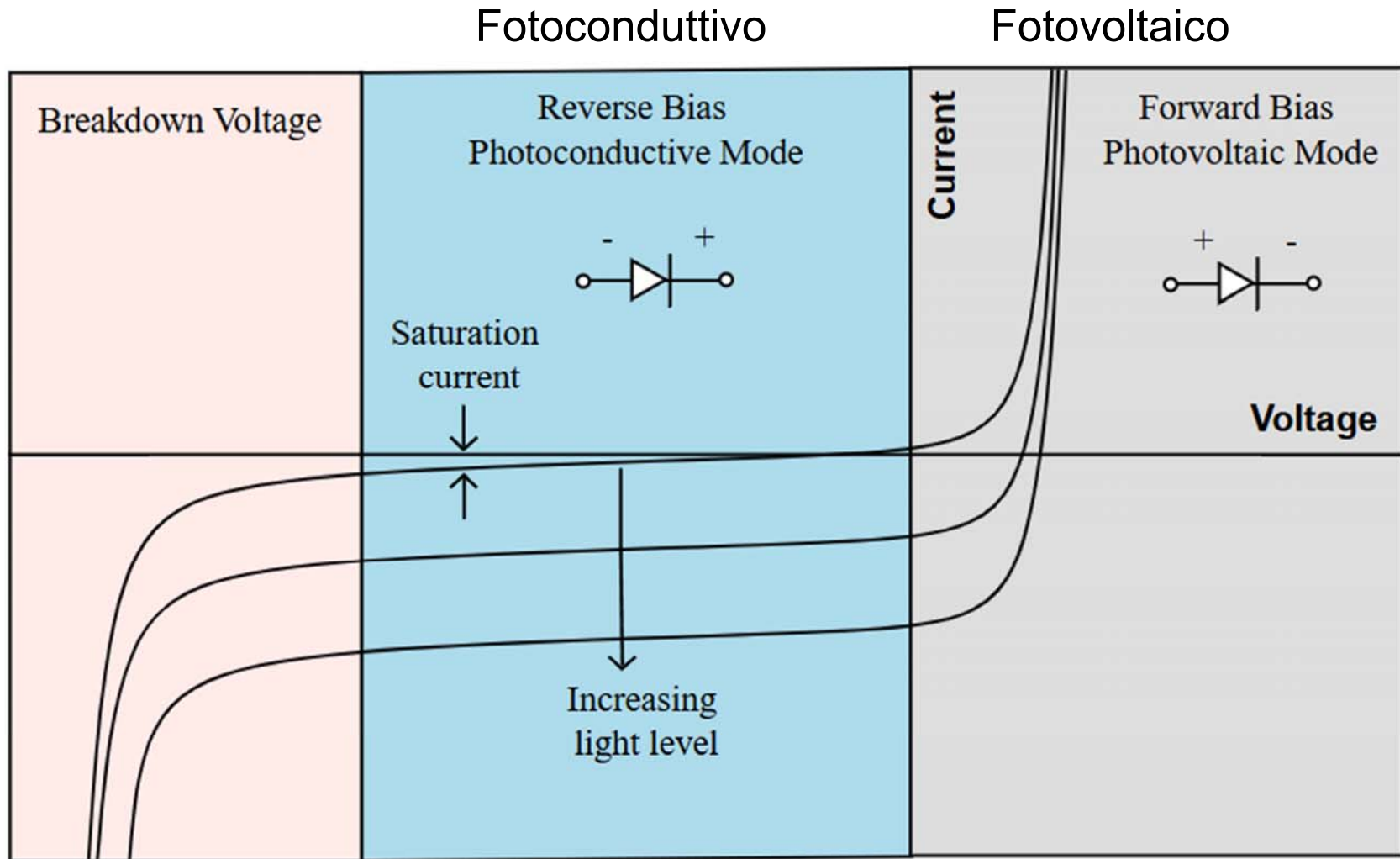


La **polarizzazione inversa** del fotodiode sposta la curva di carico nel regime dominato dalla fotocorrente (corrente di buio trascurabile), cioè nel **regime lineare**:

$$I_{ph} = \frac{V_g - V_D}{R} = \frac{V_D - V_g}{R}$$

La risposta del fotodiode è $\propto I_{ph} \propto P_{em}$, ossia è lineare nell'intensità di illuminazione.

Fotodiode: due diversi regimi



... anzi tre:
breakdown

<https://www.meetoptics.com/academy/photodiodes?srsId=AfmBOorPgNn0uBUqfeG-ktjXyEVrXz-wTJk9H5eXTt98t0ORjNPTCGIk>
<https://www.globalspec.com/reference/21440/160210/chapter-14-1-biasing-the-photodiode>