



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015



# Luce ed Energia

Lucio Claudio Andreani

Università di Pavia, Dipartimento di Fisica

<http://fisica.unipv.it>

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

**La Luce: Scienza e Tecnologia, Milano, 25-02-2015**

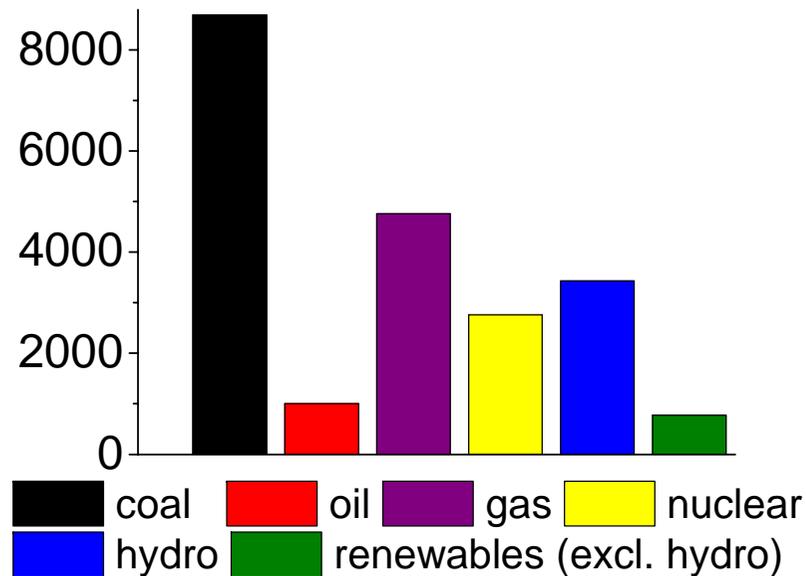
# Indice

- Introduzione: il problema energetico, energia elettrica
- La luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Semiconduttori: gap di energia, assorbimento/emissione
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n (diodo)
- LED a luce blu e a luce bianca
- Celle fotovoltaiche

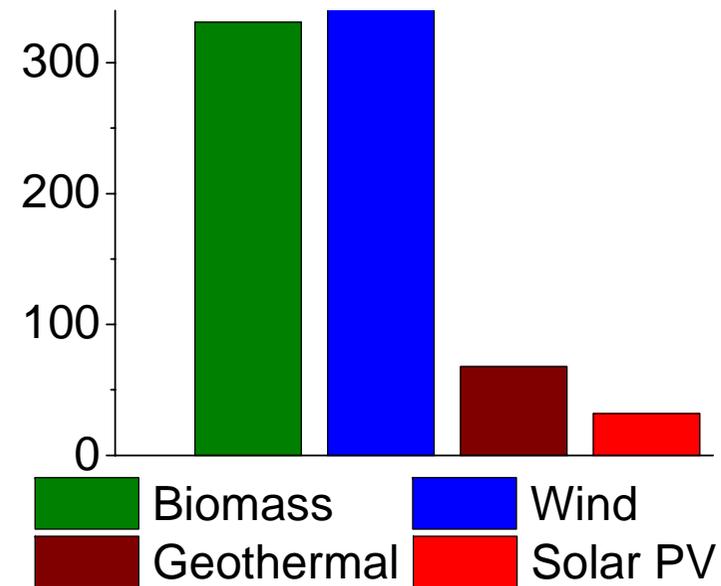
# Produzione di energia elettrica nel mondo

(IEA World Energy Outlook, 2012; dati in TWh= $10^9$  kWh)

## Tutte le fonti di energia

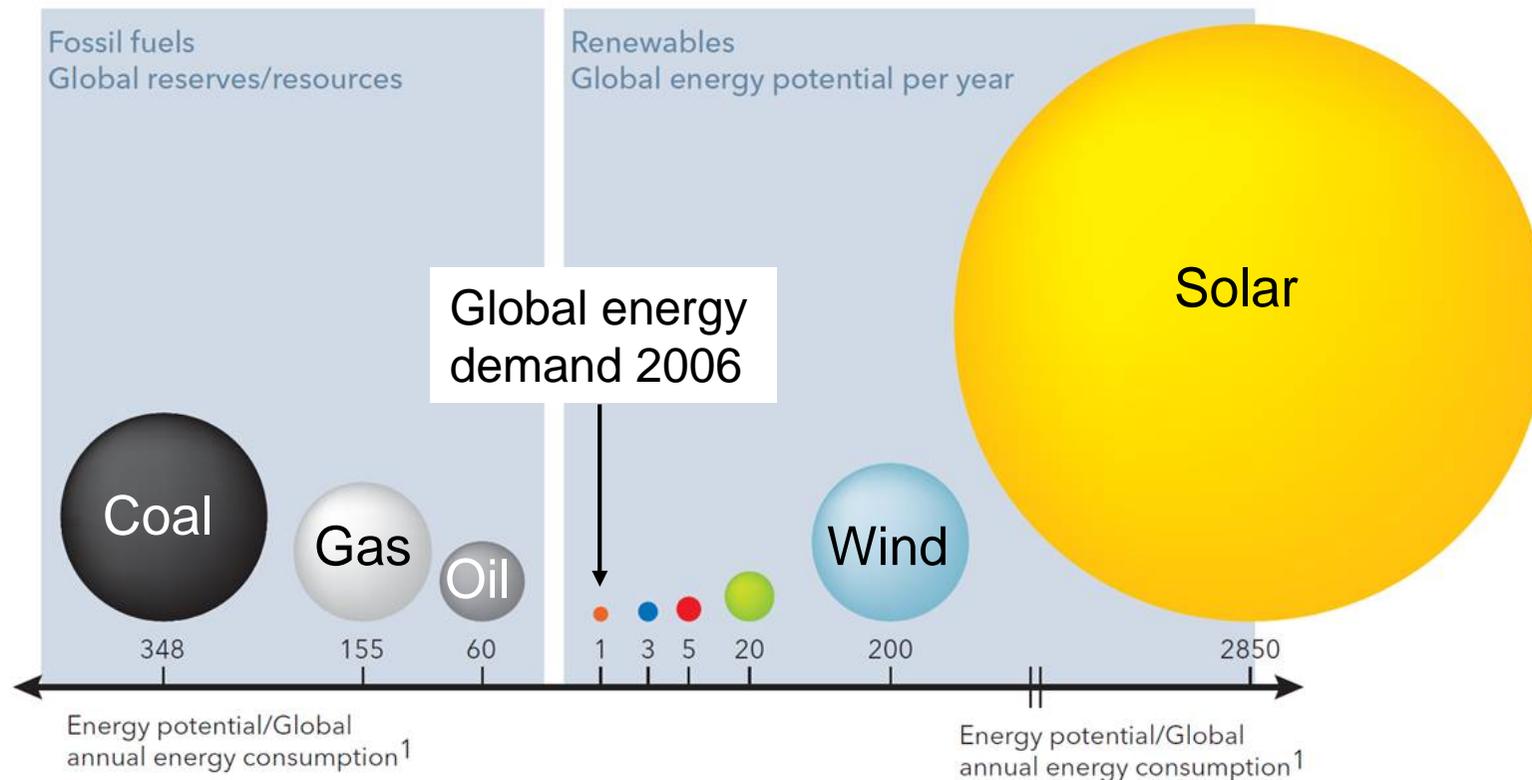


## Fonti rinnovabili (tranne idroelettrico)



⇒ circa il 65% dell'energia elettrica è prodotta da fonti fossili (carbone+gas+petrolio)

# Fonti energetiche: il potenziale



	Energy potential Reserves/Resources <sup>2</sup>	Thereof conventionally utilisable <sup>2</sup>
Coal	~ 135.000 EJ	
Natural gas	~ 60.400 EJ	~ 12.000 EJ
Crude oil	~ 23.000 EJ	~ 9.800 EJ
Global energy demand 2006:	~ 470 EJ	

	Energy potential (amount of energy p. a.) <sup>2</sup>	technologically utilisable (state of the art) <sup>2</sup>
Solar radiation	~ 1.111.500 EJ	~ 1.482 EJ
Wind energy	~ 78.000 EJ	~ 195 EJ
Biomass	~ 7.800 EJ	~ 156 EJ
Geothermal	~ 1.950 EJ	~ 390 EJ
Hydro/tide power	~ 1.170 EJ	~ 78 EJ

# Unione Europea: la direttiva 20-20-20

➤ Il Parlamento Europeo ha approvato a fine 2008 il pacchetto clima-energia volto a conseguire gli obiettivi che l'Unione Europea si è fissata per il 2020:

- ridurre del 20% le emissioni di gas a effetto serra (rispetto al 1990);
- portare al 20% il risparmio energetico;
- aumentare al 20% il consumo di energia da fonti rinnovabili (per l'Italia l'obiettivo nazionale è del 17%) rispetto all'energia primaria.

➤ Considerando i consumi di energia dei 4 settori (industria, trasporto, riscaldamento, elettricità), **la produzione di energia elettrica dovrà provenire per almeno il 35-40% da fonti rinnovabili.**

***Questa è una legge europea, che deve essere rispettata da tutti i Paesi membri della UE***

# Come ci può aiutare la luce?

LED (Light Emitting Diode)



⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche



⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

# Il premio Nobel per la Fisica 2014

è stato attribuito per l'invenzione del **LED a luce blu** a

**Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura**



*“for the invention of **efficient blue light-emitting diodes (LEDs)** which has enabled **bright and energy saving white light sources**”*

<http://www.nobelprize.org>

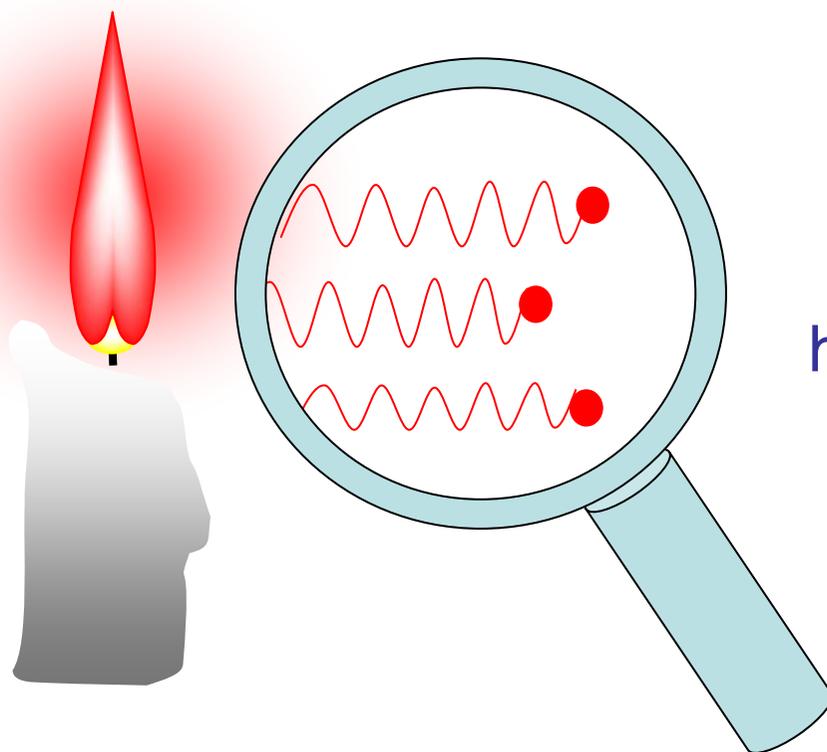
# ***La luce: onde elettromagnetiche e fotoni***

# Quantizzazione della luce: i fotoni

La **radiazione elettromagnetica** ha simultaneamente natura

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

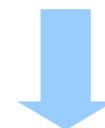
L'energia viene emessa, trasportata ed assorbita in “pacchetti” detti **quanti**



quanto di energia  
elettromagnetica (fotone):

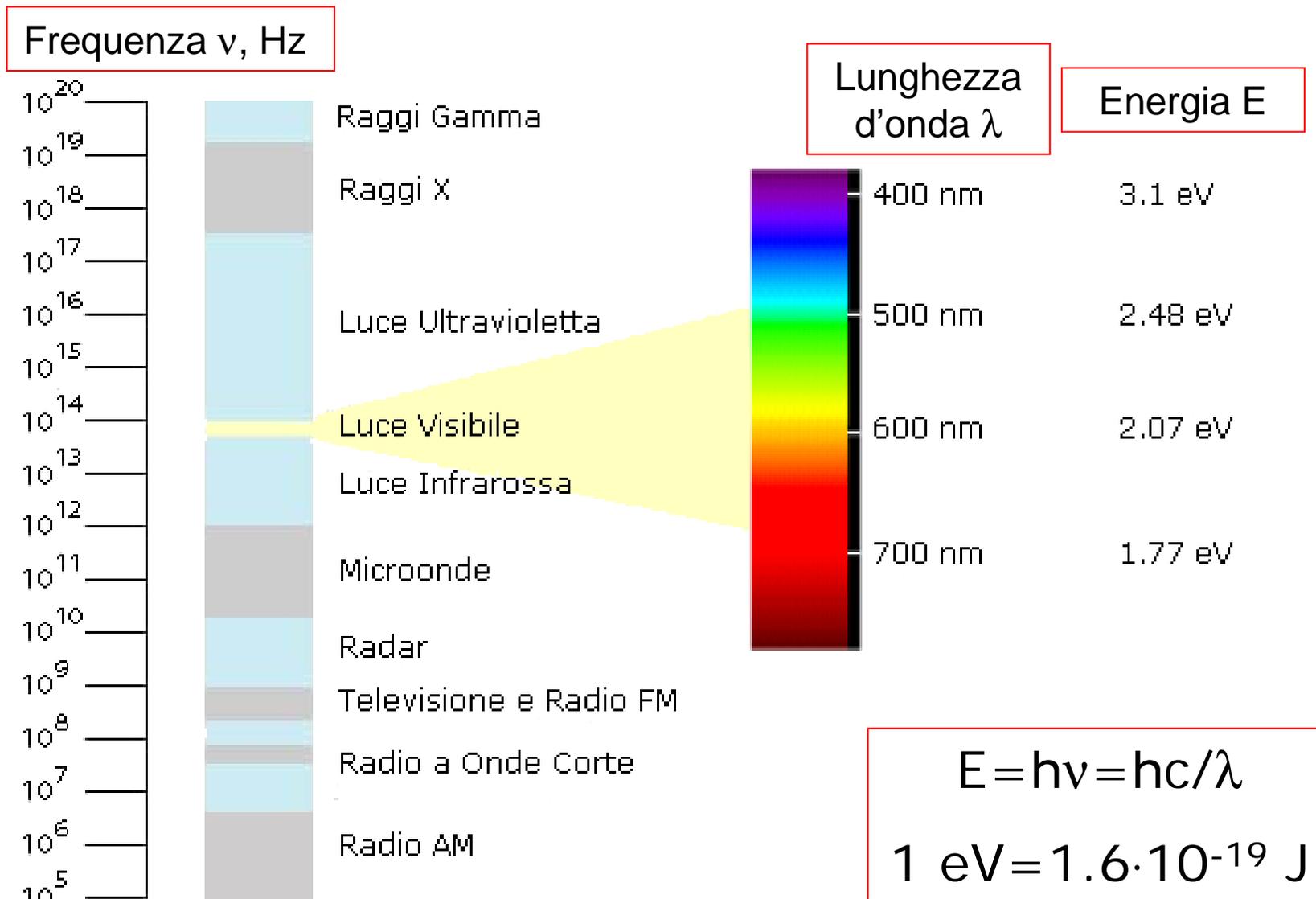
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ (costante di Planck)}$$

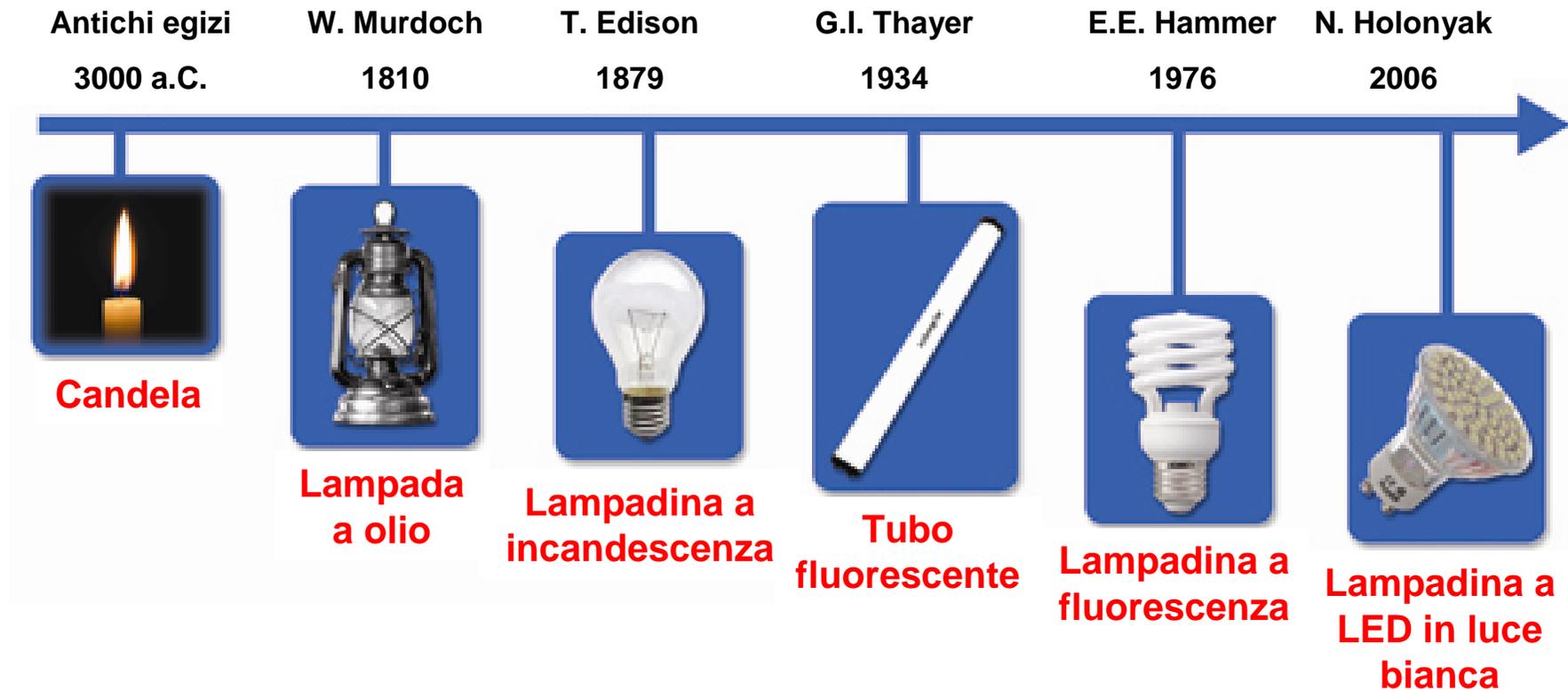


anche la luce (così come la  
materia) è onda/particella!

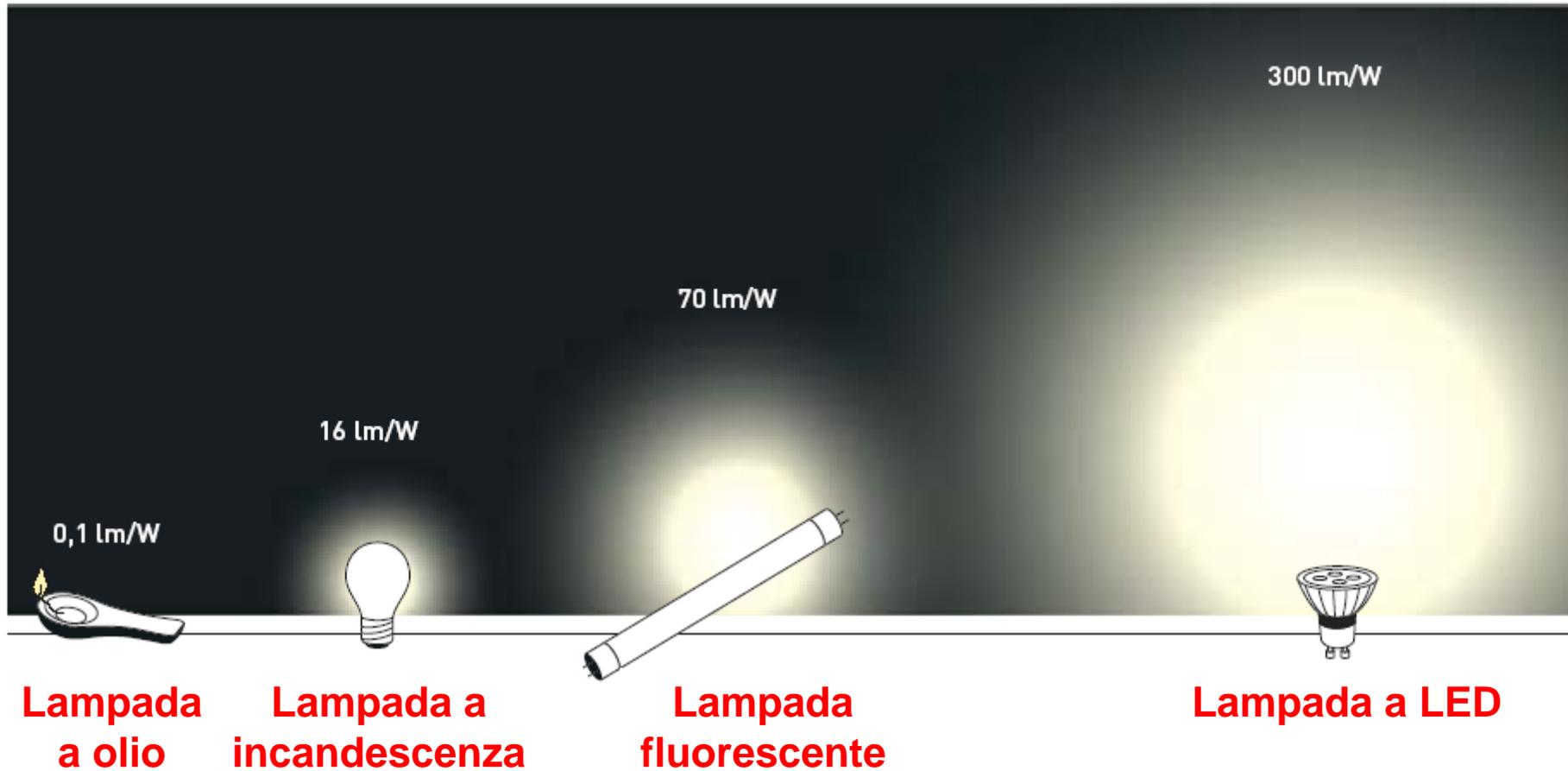
# Lo spettro delle onde elettromagnetiche



# L'illuminazione... a "bright story"



# Efficienza luminosa

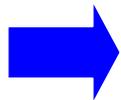
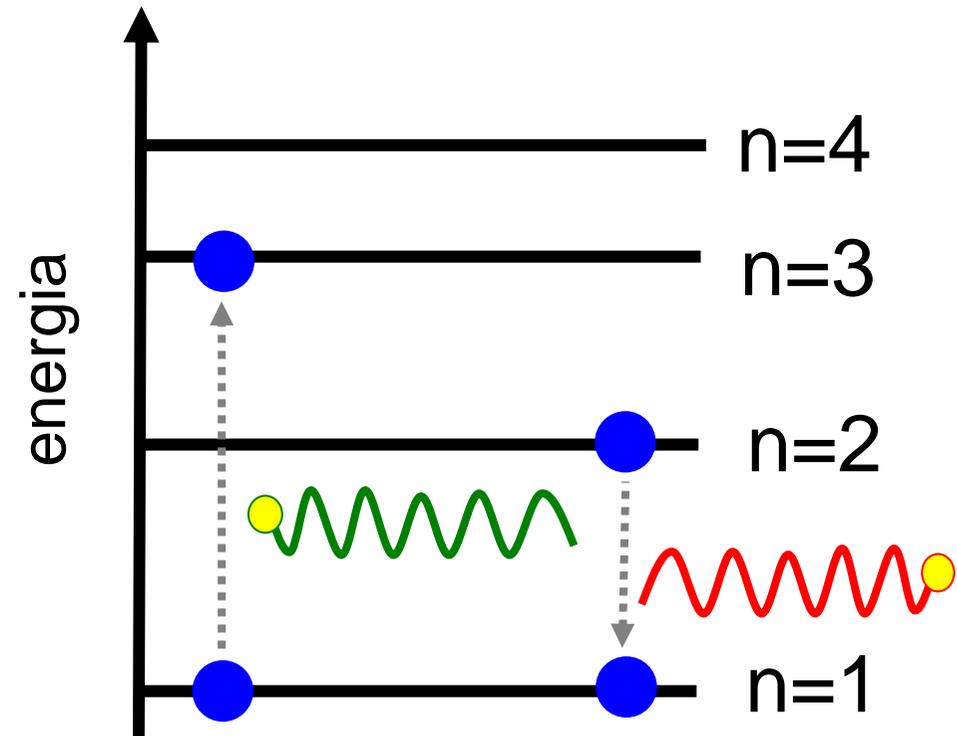
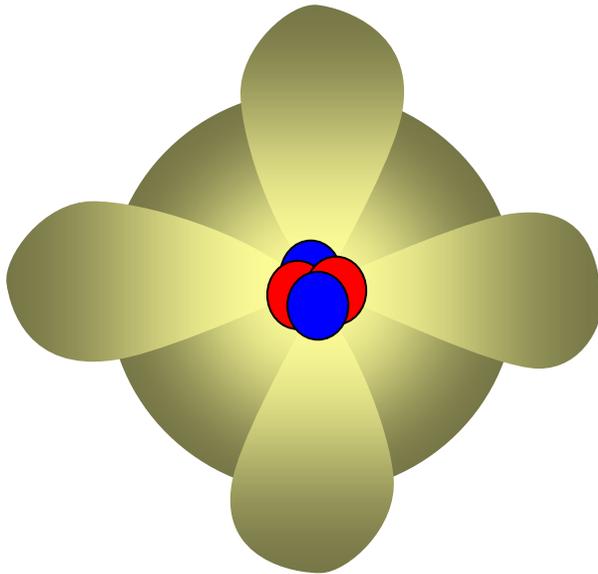


# ***Semiconduttori: gap di energia, assorbimento/emissione***

# Livelli di energia negli atomi

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

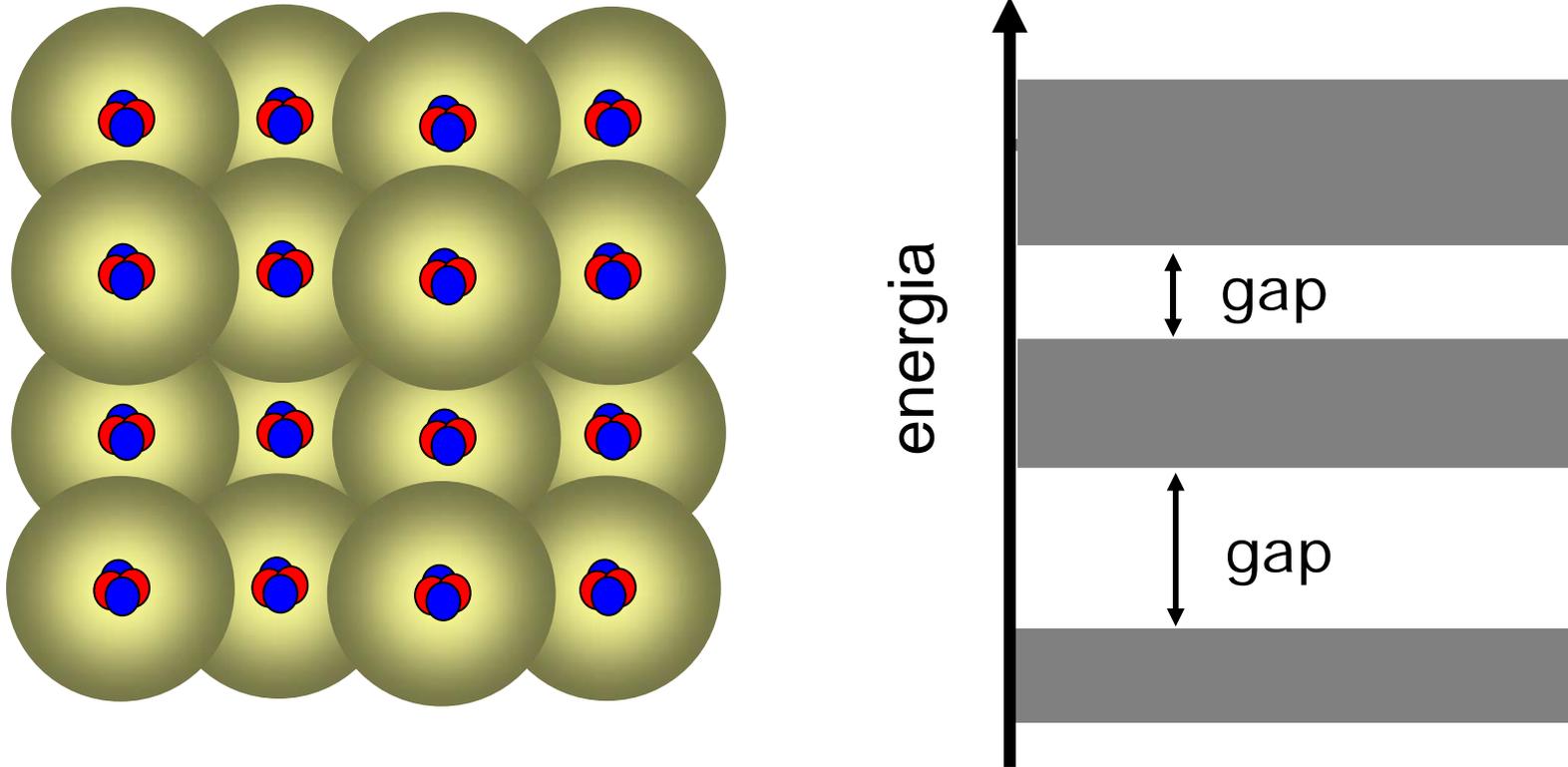
Es. elettroni in un atomo



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

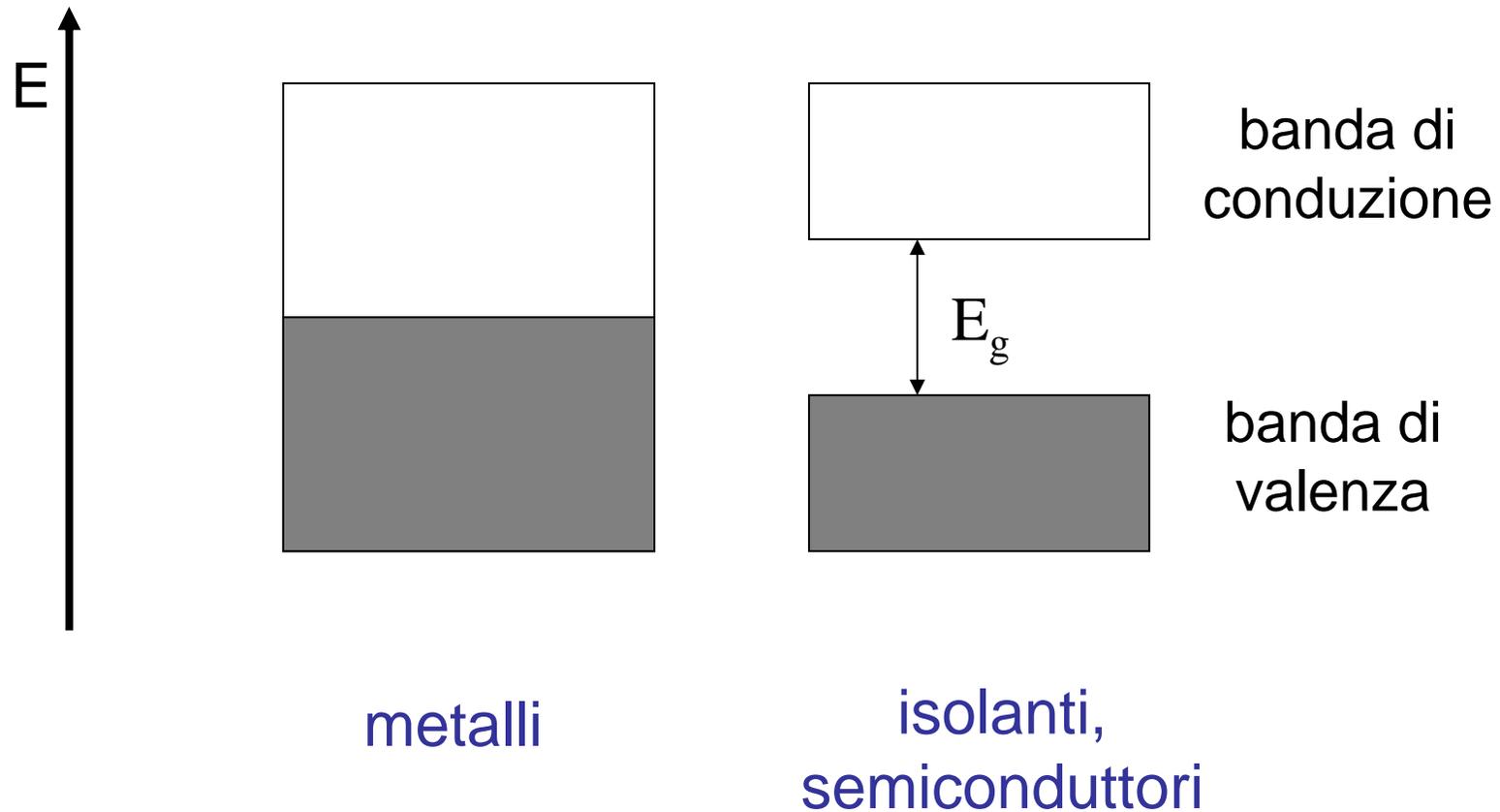
# Bande di energia nei solidi

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

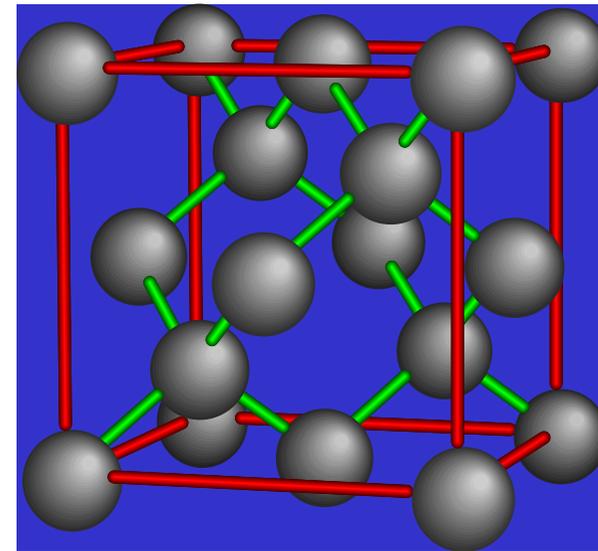


# Semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

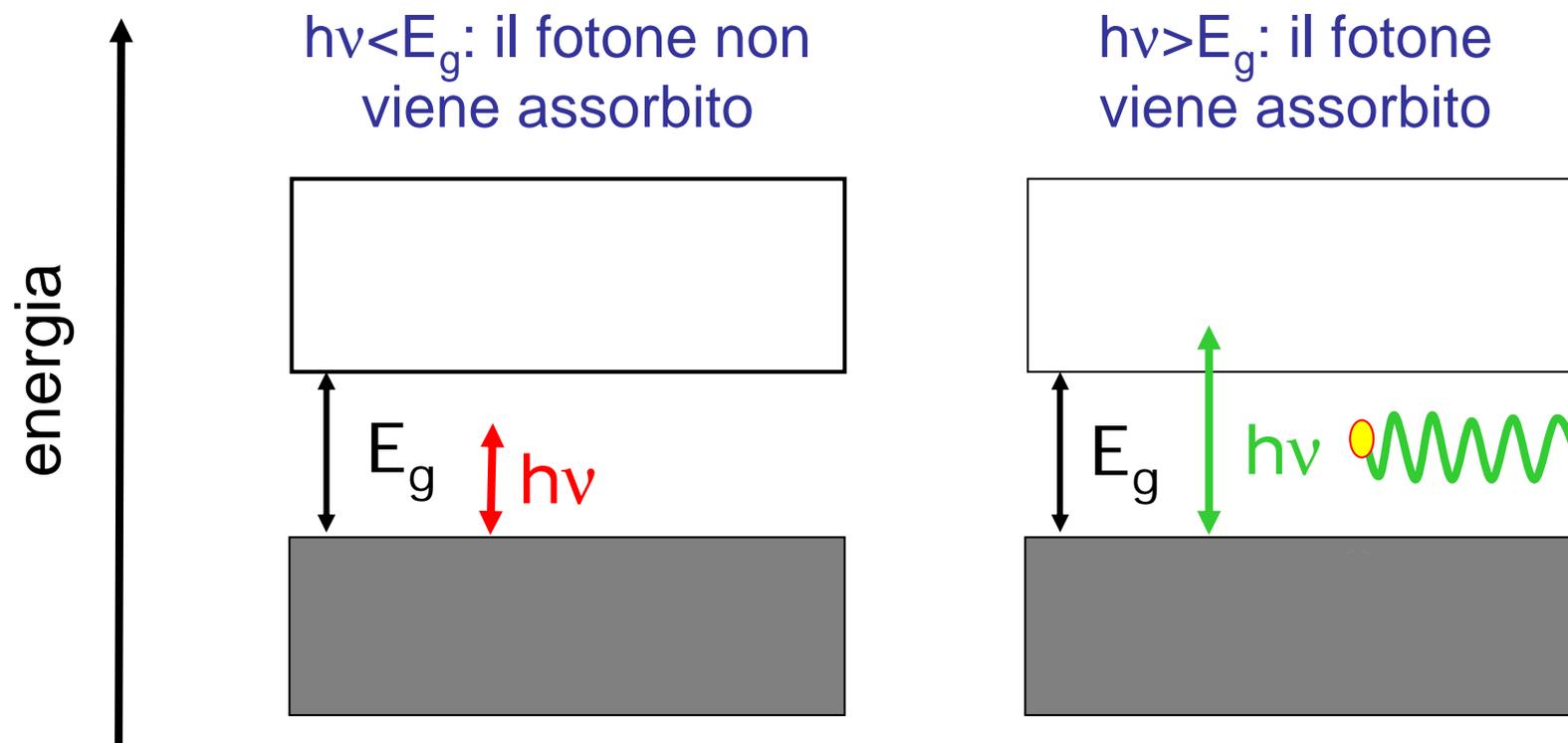
		III	IV	V	VI
		5 <b>B</b>	6 <b>C</b>	7 <b>N</b>	8 <b>O</b>
IB	IIB	13 <b>Al</b>	14 <b>Si</b>	15 <b>P</b>	16 <b>S</b>
29 <b>Cu</b>	30 <b>Zn</b>	31 <b>Ga</b>	32 <b>Ge</b>	33 <b>As</b>	34 <b>Se</b>
47 <b>Ag</b>	48 <b>Cd</b>	49 <b>In</b>	50 <b>Sn</b>	51 <b>Sb</b>	52 <b>Te</b>
79 <b>Au</b>	80 <b>Hg</b>	81 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

Cella elementare (Si)



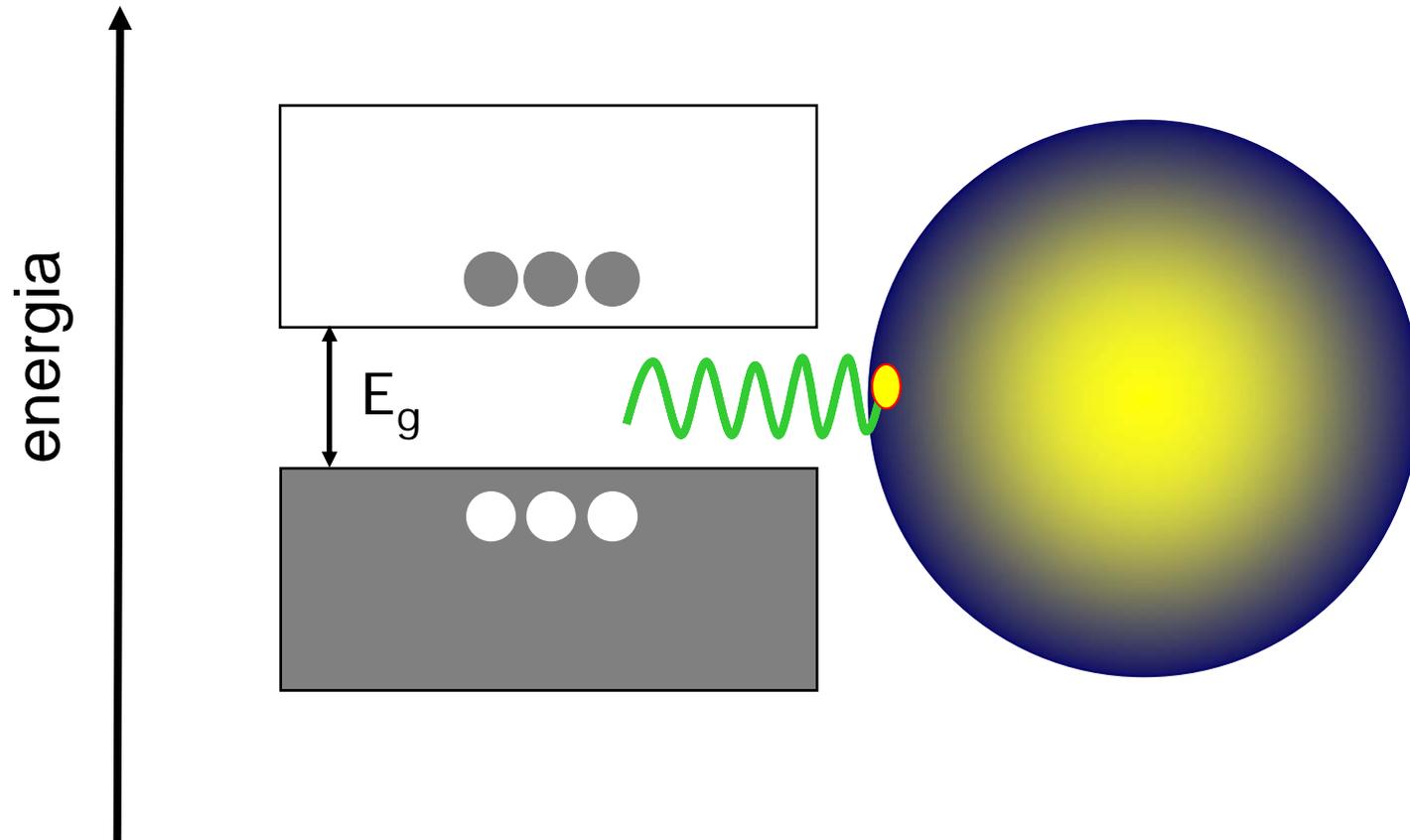
I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente  $< 4$  eV.

# Gap di energia e assorbimento ottico



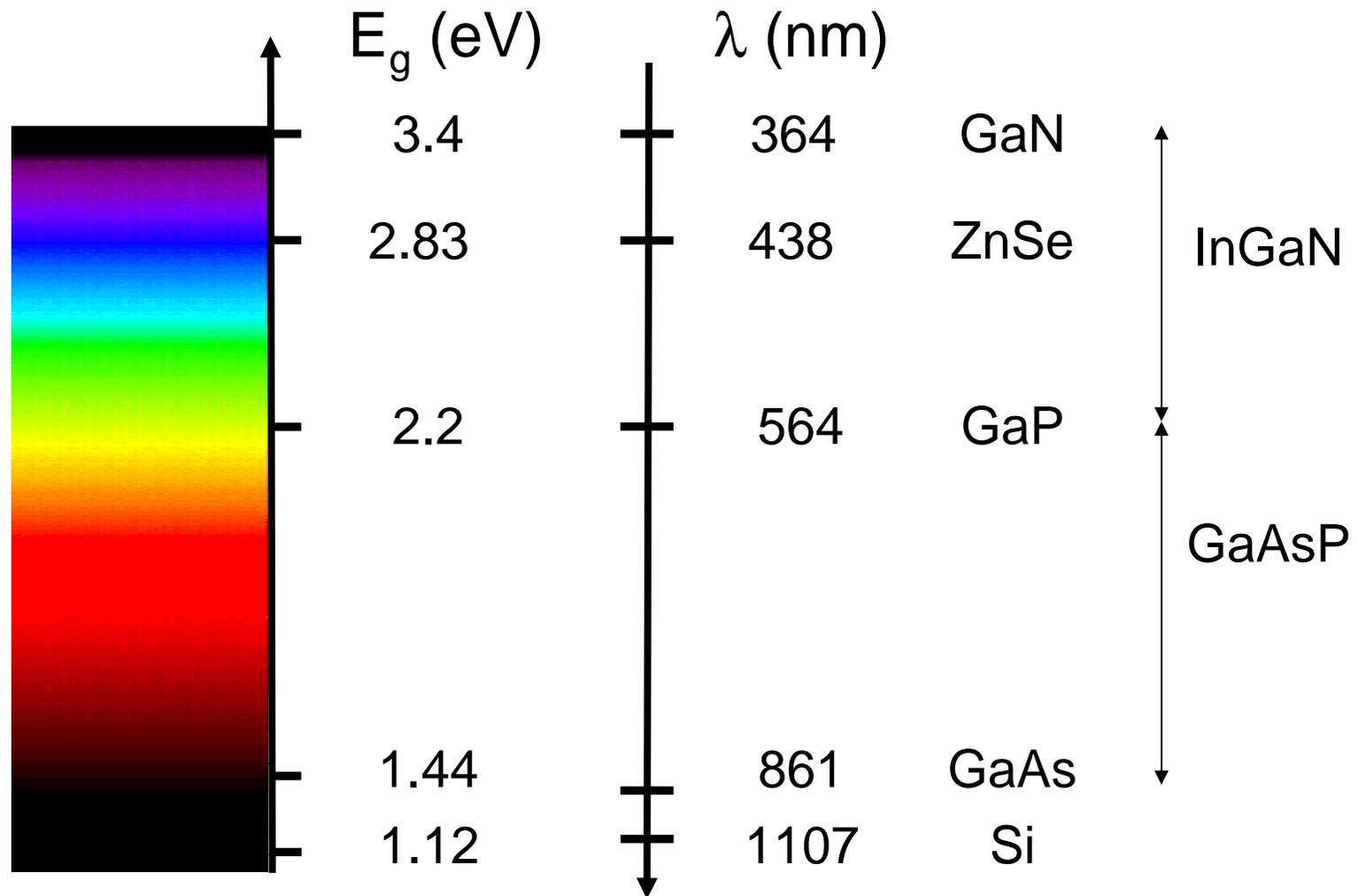
Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione  $E_g = h\nu = hc/\lambda$ . L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico.

# Emissione di luce



**Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia pari al gap:  $h\nu = E_g$ .**

# 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

# Fisica e tecnologia dei semiconduttori...

1873: fotoconducibilità nel selenio

1901: proprietà raddrizzatrici dei cristalli (silicio, galena, ...)

1907: elettroluminescenza (carburo di silicio)

1927: LED (carburo di silicio)

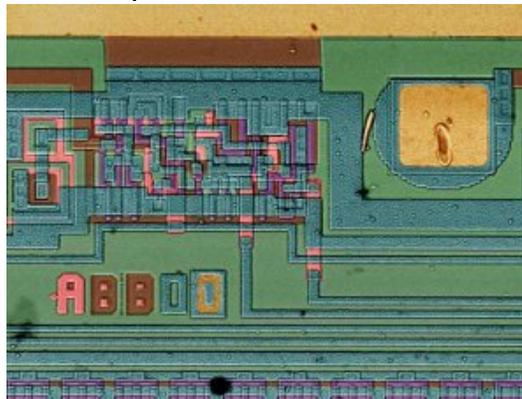
1930-1932: celle fotovoltaiche al selenio (efficienza  $< 1\%$ )

1940: silicio ultra-puro, giunzioni p-n (radar...)

1947: transistor (AT&T Bell Laboratories)

1954: celle fotovoltaiche al silicio (AT&T Bell Labs)

1958: circuito integrato



## ... sviluppo della micro- e optoelettronica

1961: LED infrarosso basato su giunzione p-n di GaAs

1969: laser rosso a eterogiunzione in AlGaAs

1979: compact disc (laser rosso,  $\lambda=720$  nm)

1993: LED blu in InGaN/AlGaIn/GaN

1995: laser blu in InGaN/AlGaIn/GaN

1995: cella fotovoltaica con efficienza record (25%)

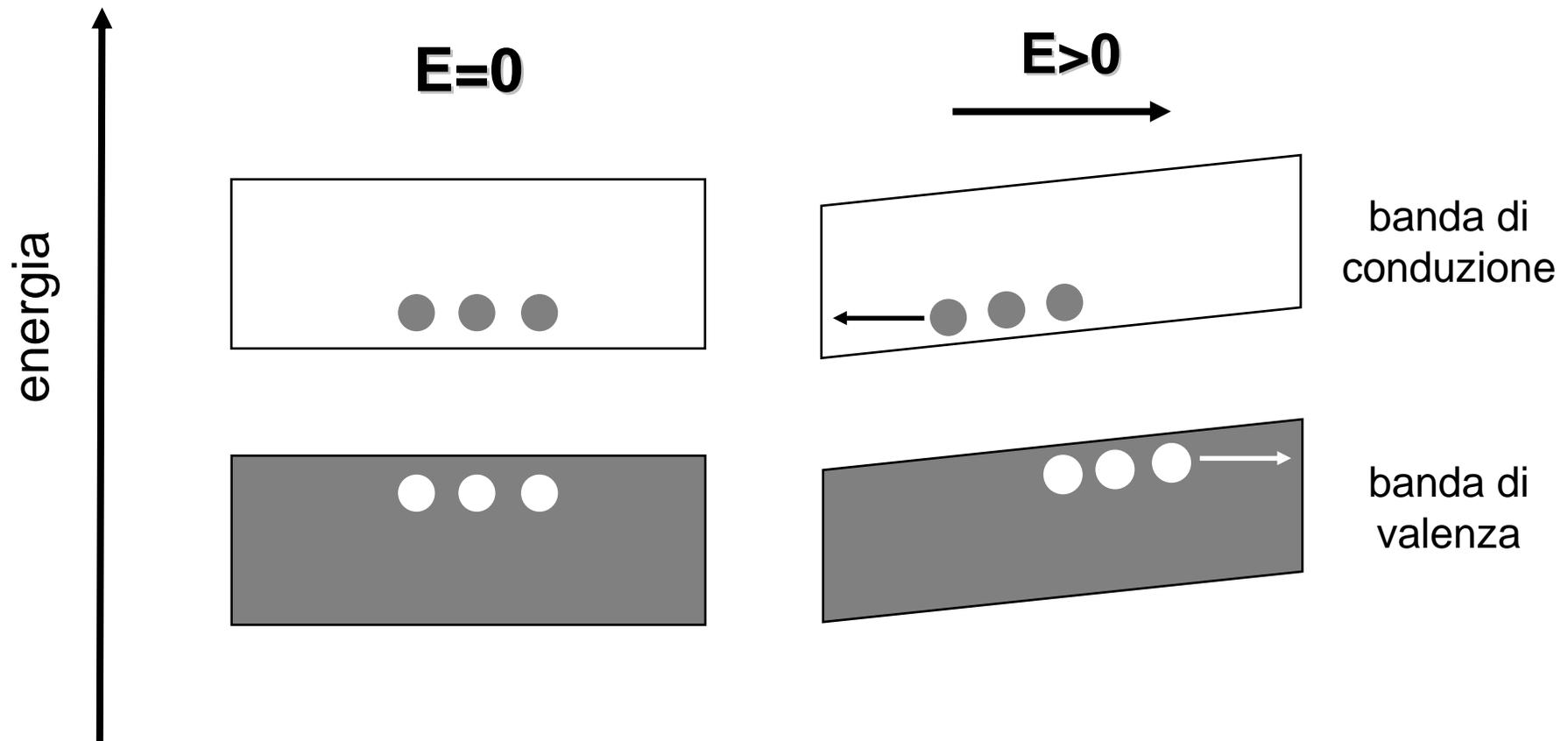
2002: blu-ray disc (laser blu,  $\lambda=405$  nm)

2006: lampada a LED in luce bianca



# ***Semiconduttori: drogaggio e giunzione p-n***

# Portatori di carica: elettroni e lacune. Effetto di un campo elettrico



I portatori di carica in semiconduttori sono di 2 tipi: ***elettroni*** in banda di conduzione, con carica negativa, e stati vuoti o ***lacune*** in banda di valenza, che si comportano come particelle con carica positiva.

# Il drogaggio

una tecnica per controllare il numero dei portatori di carica

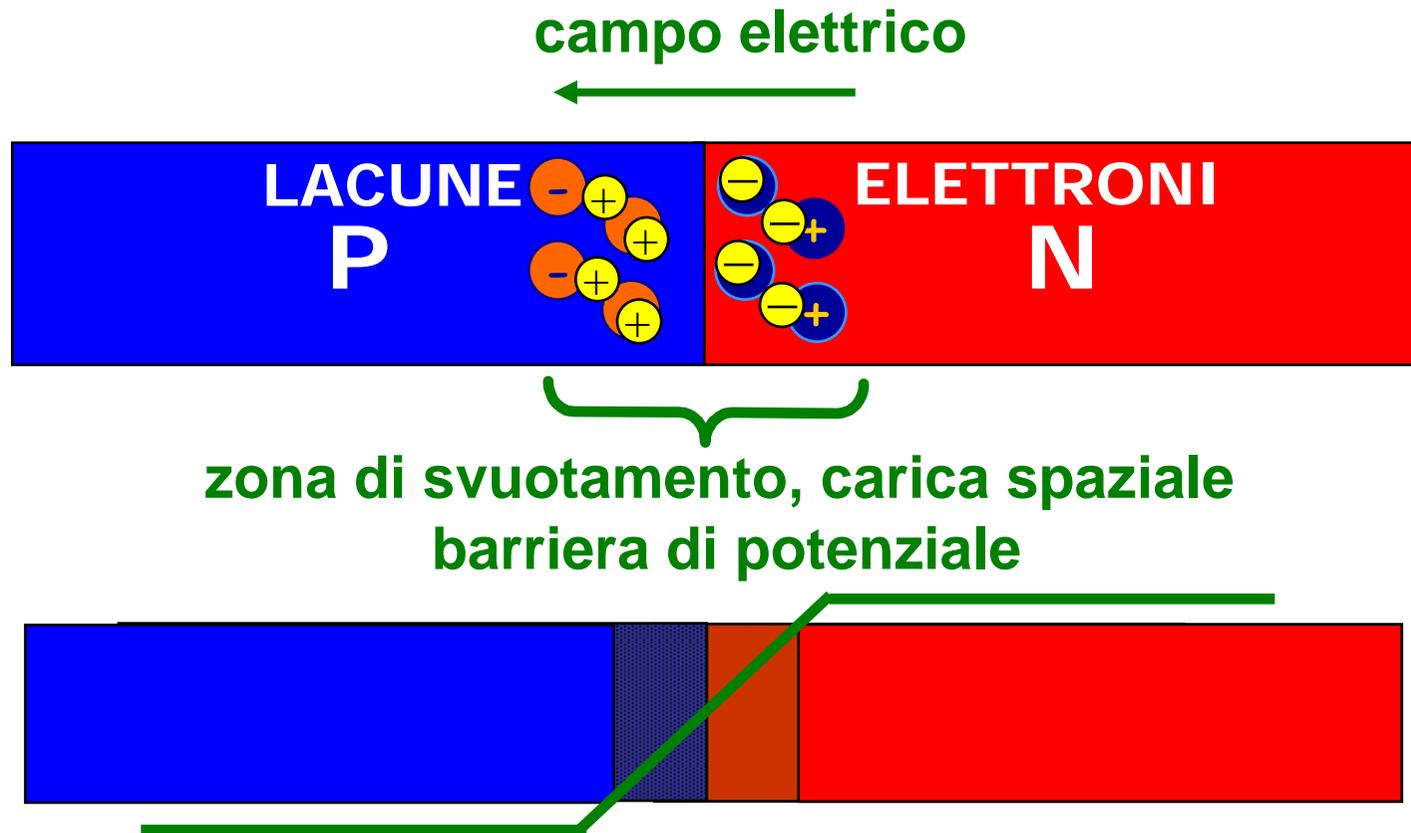
Come funziona? Prendiamo il **Silicio**:

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

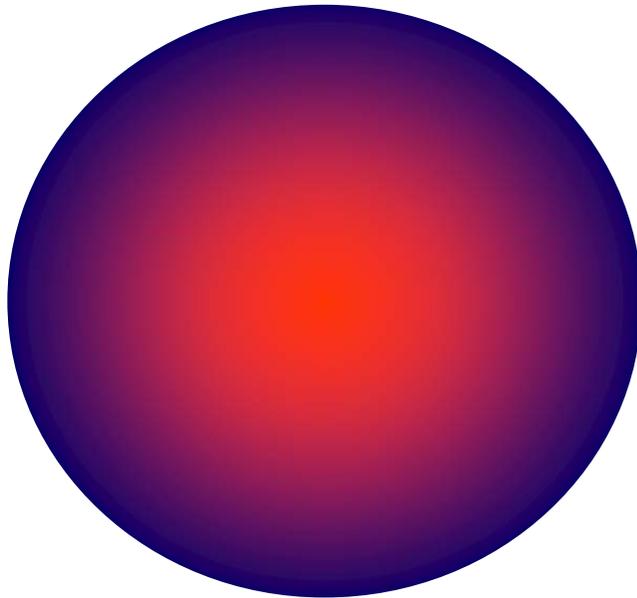
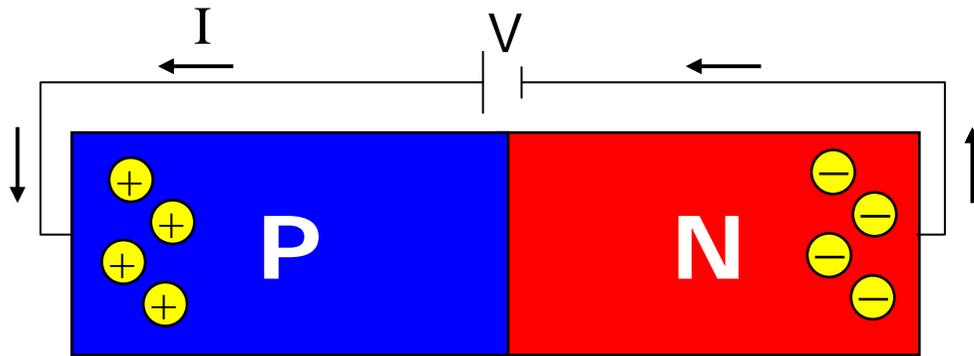
# La giunzione p-n (*diodo*): il “cuore” dei dispositivi a semiconduttore



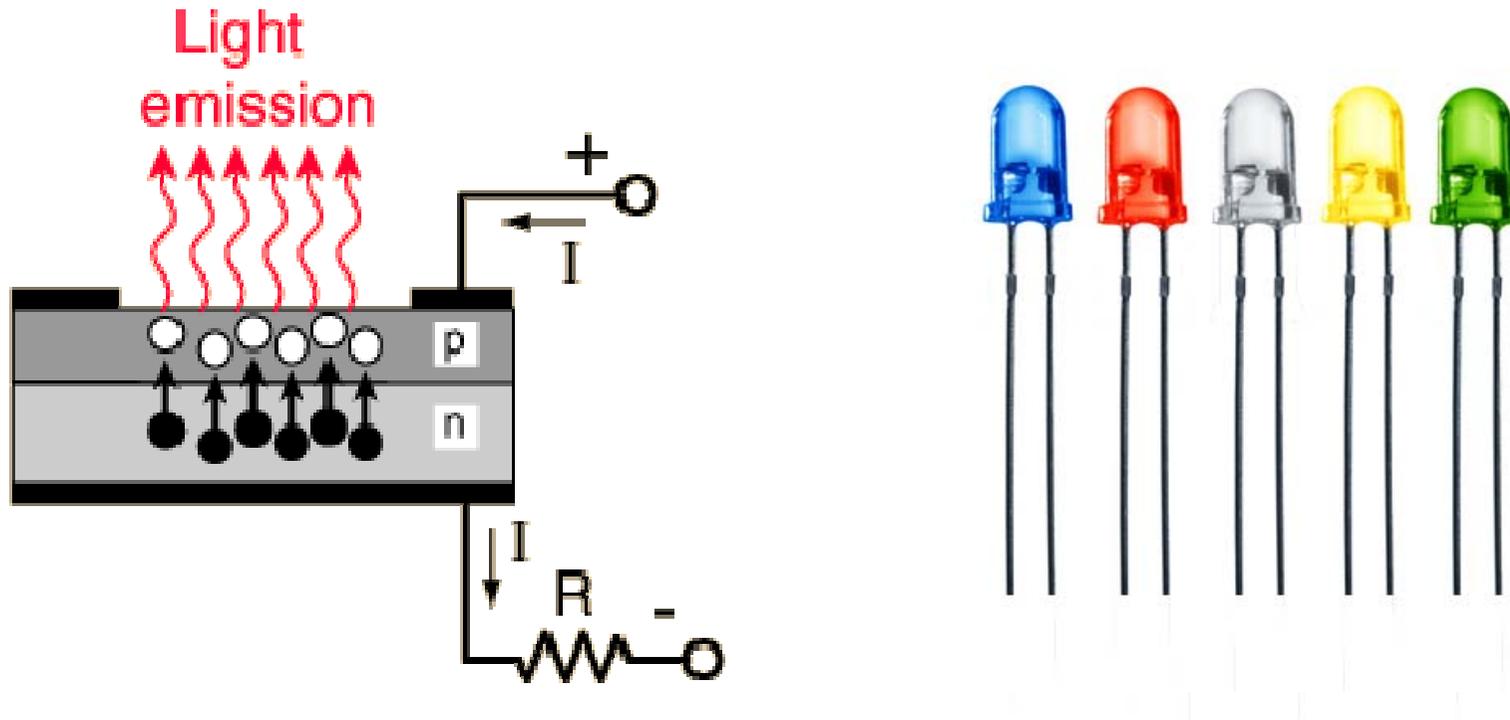
Il campo elettrico nella zona di svuotamento si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari (lacune dal lato p, elettroni dal lato n)

# ***LED a luce blu e a luce bianca***

# Applicazioni della giunzione p-n: LED e laser a semiconduttore (con composti III-V: GaAsP, InGaN, ...)



# LED (Light Emitting Device)



Il colore, ossia la lunghezza d'onda della luce emessa, dipende dal gap di energia del materiale semiconduttore secondo la relazione

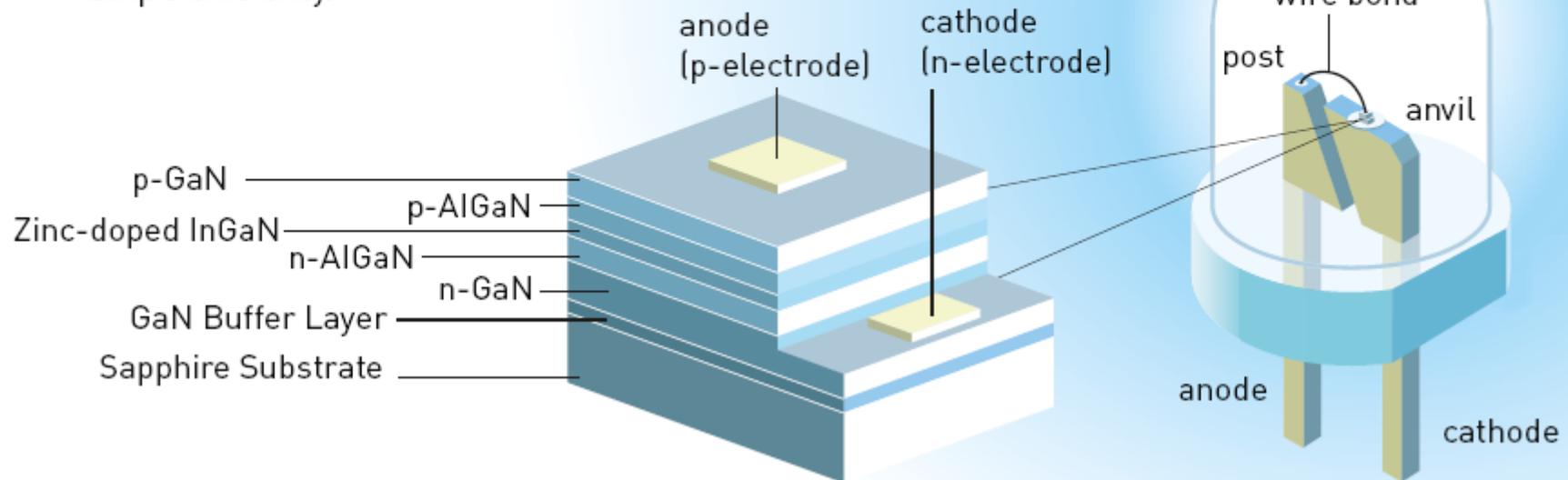
$$E_g = h\nu = hc/\lambda$$

# LED blu:

basati su GaN e leghe ternarie InGaN, AlGaN

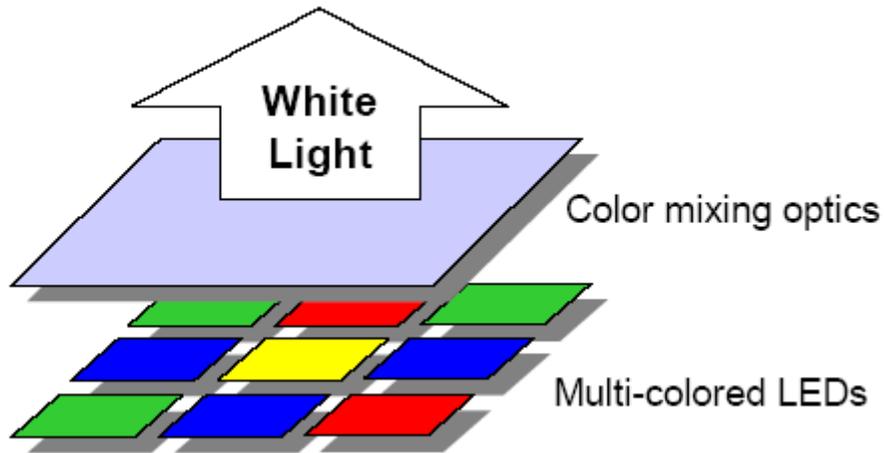
⇒ problema di *strain* fra materiali con passi reticolari diversi

**Blue LED lamp.** The light-emitting diode in this lamp consists of several different layers of gallium nitride (GaN). By mixing in indium (In) and aluminium (Al), the Laureates succeeded in increasing the lamp's efficiency.

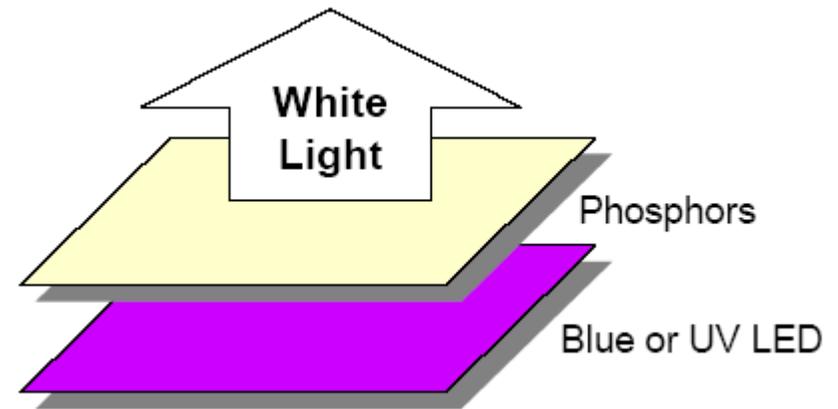


Premio Nobel per la Fisica 2014: <http://www.nobelprize.org>

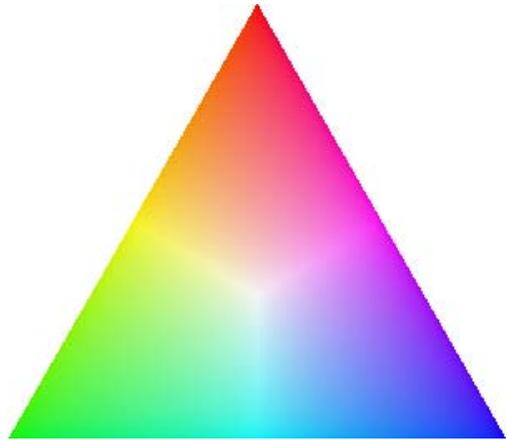
# LED a luce bianca



LED RGB (Red-Green-Blue)



LED a fosfori



*il "triangolo dei colori"*



# Illuminazione a LED: risparmio energetico

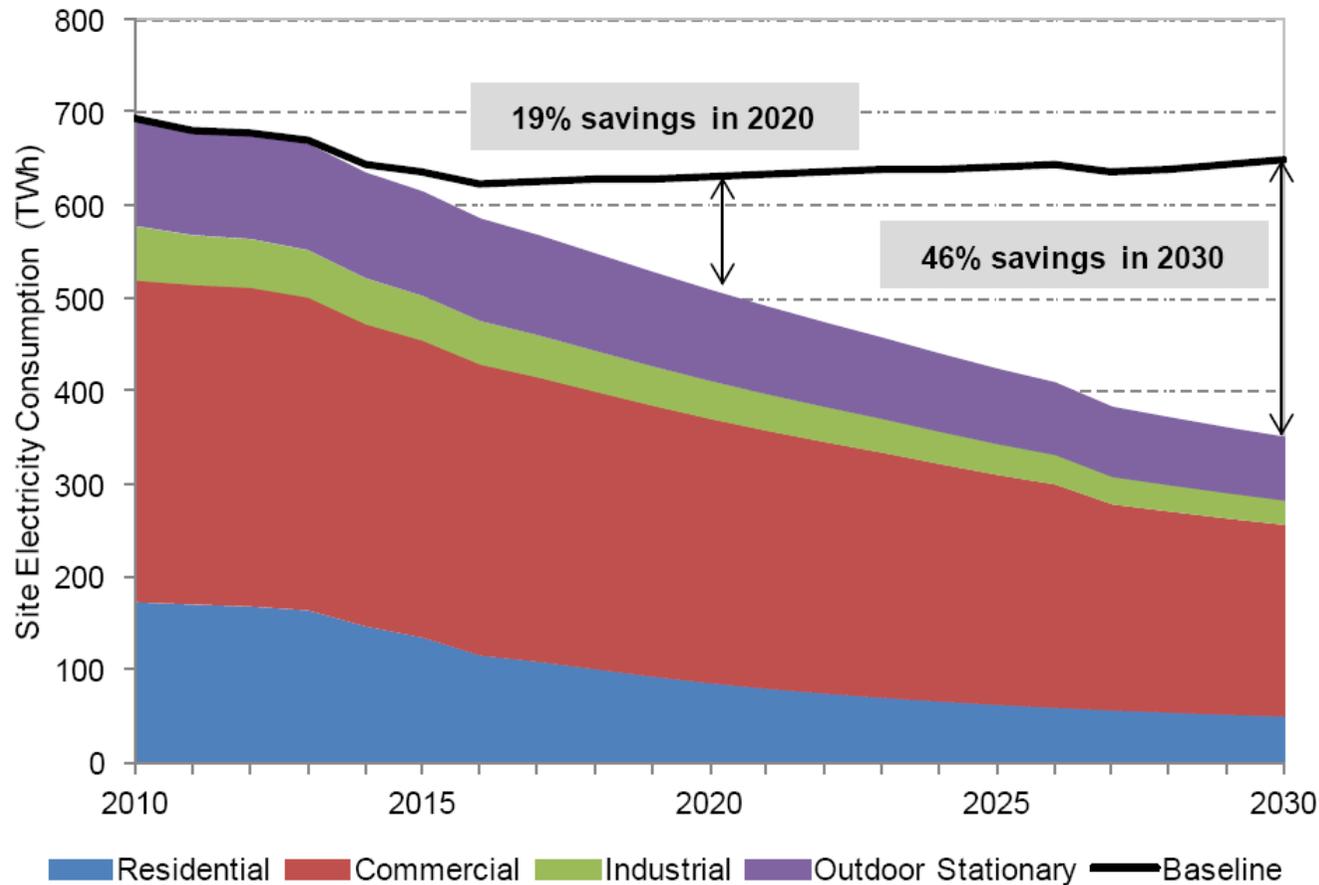
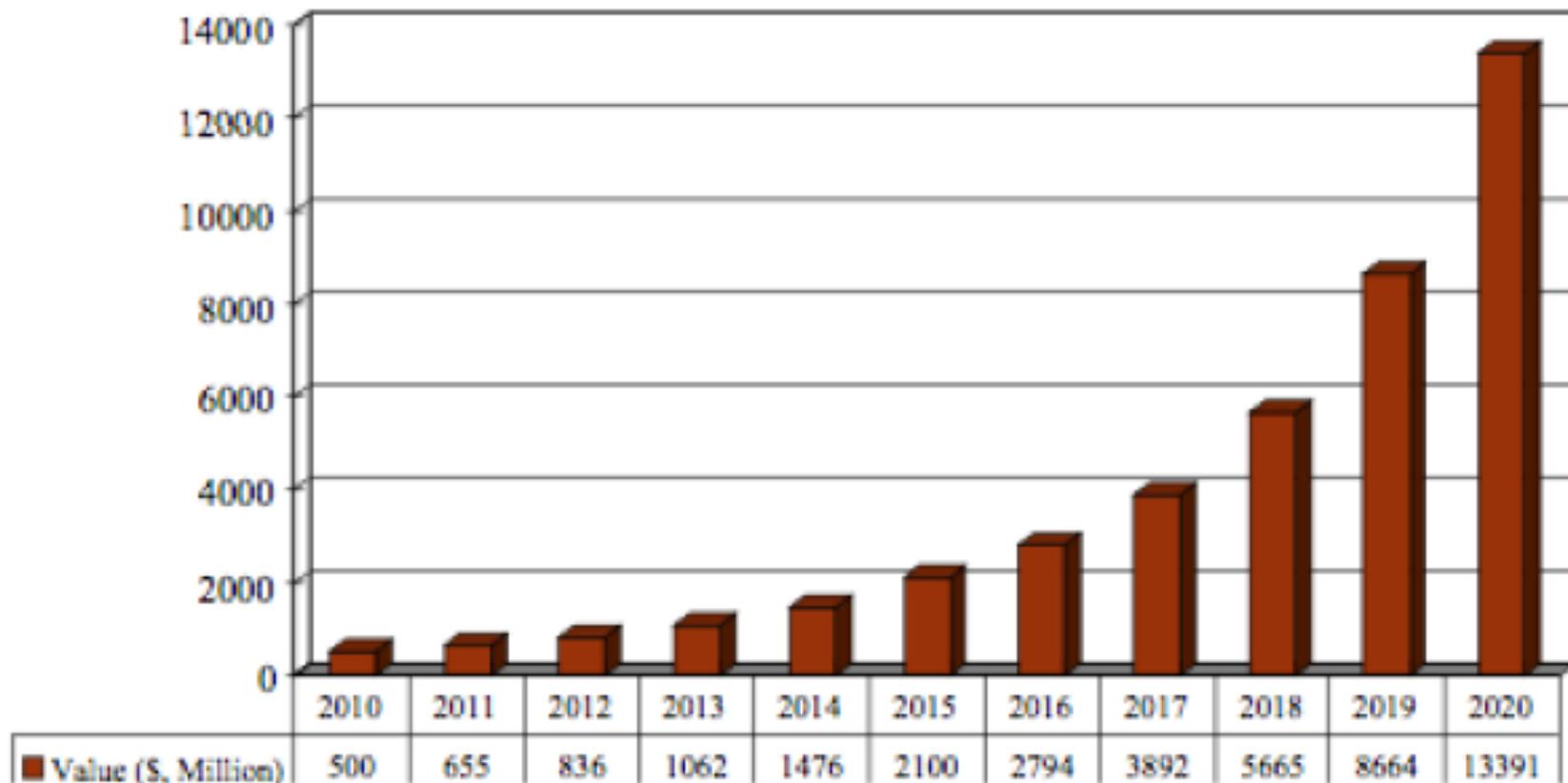


Figure 2.5: Forecasted U.S. Lighting Energy Consumption and Savings, 2010 to 2030

Fonte: US DoE, Solid State Lighting: Multi-year Program Plan, 2012

# Illuminazione a LED: previsioni di crescita

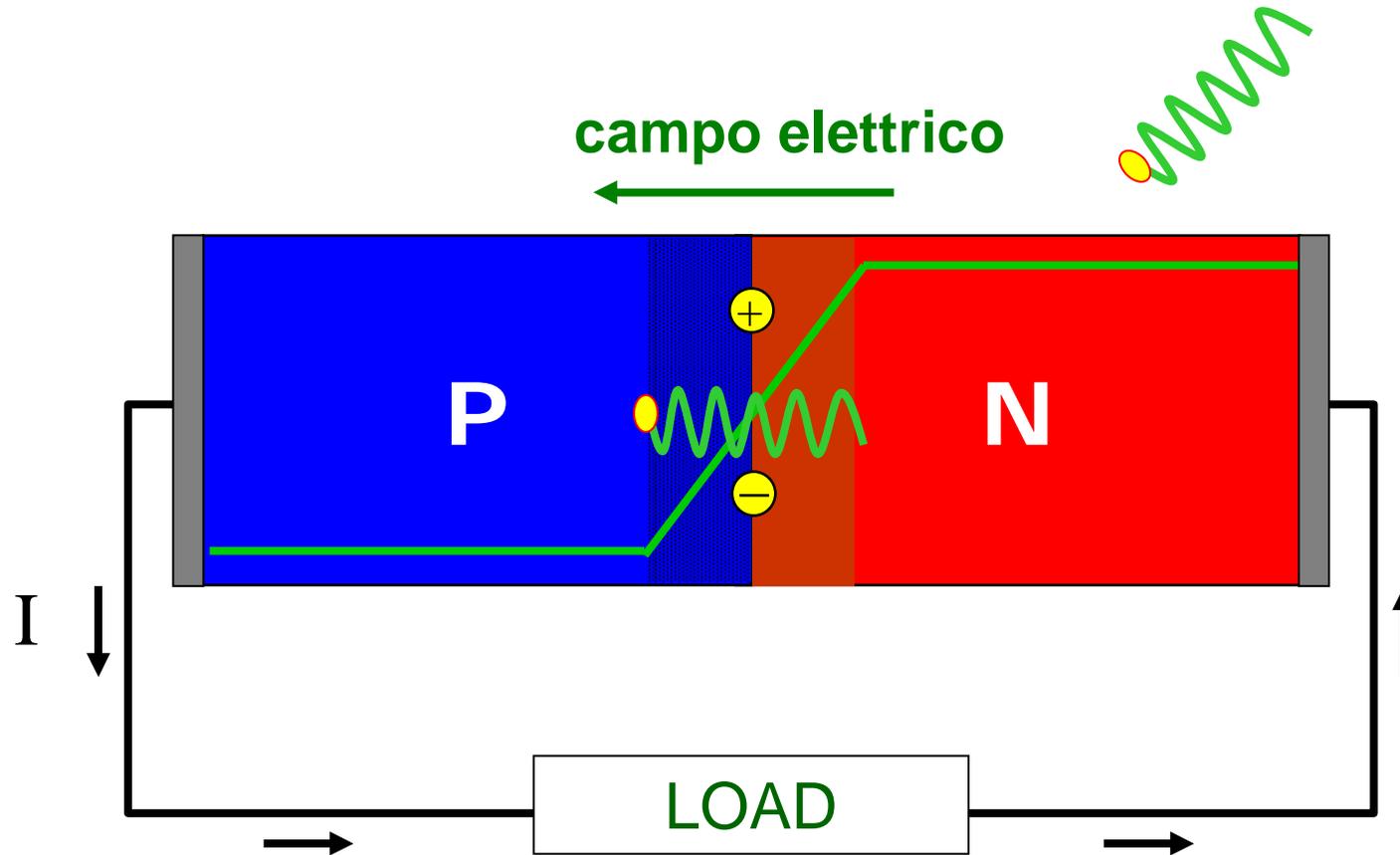
*mercato globale in milioni di \$*



Fonte: EC-JRC “Accelerating the deployment of solid-state lighting”, 2012

# ***Celle fotovoltaiche***

# Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata

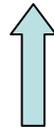


**Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED o un laser a semiconduttore: quando viene illuminata, la corrente prodotta ha il verso della corrente inversa del diodo**

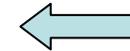
# Il silicio: dalla sabbia ai micro-processori



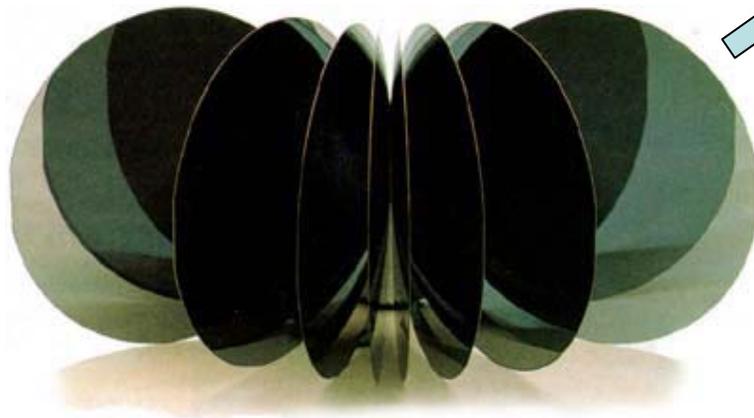
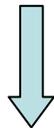
Lingotto



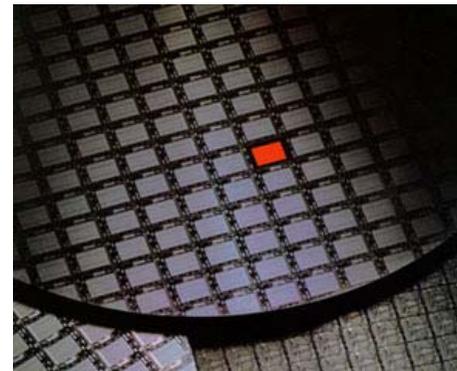
Silicio ultra-puro



Wafer



Chip



oppure



Cella solare



La tecnologia delle celle fotovoltaiche di semiconduttori è molto vicina alle tecnologie della microelettronica

# Celle fotovoltaiche di silicio (wafer)

Silicio mono-cristallino

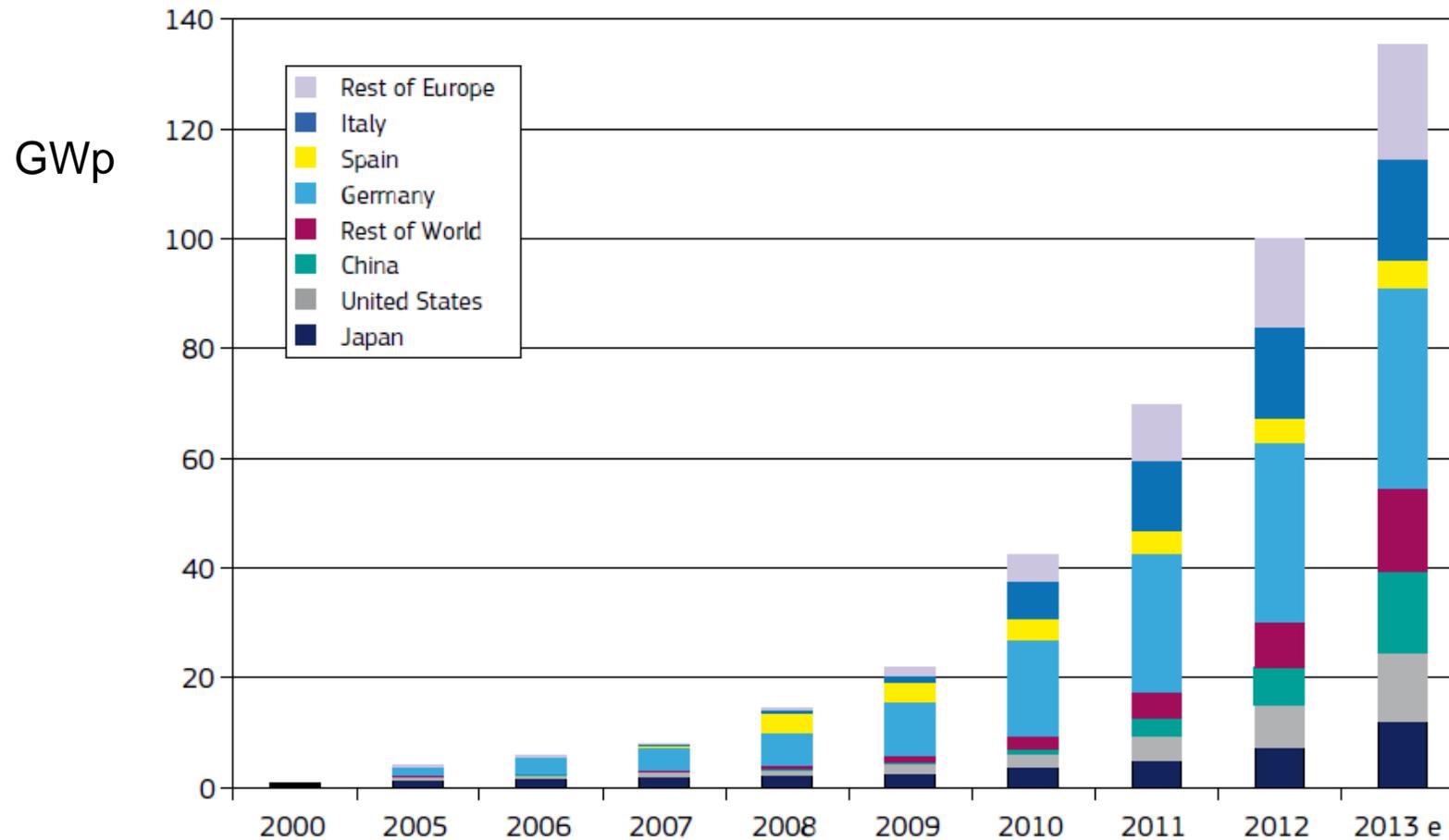


Silicio poli-cristallino



Le celle fotovoltaiche basate su fette (wafer) di silicio coprono circa il 90% del mercato mondiale del fotovoltaico

# Potenza fotovoltaica installata: evoluzione storica



Fonte: JRC EU PV report 2013

Il tasso di crescita annuo è fra il 24% e il 39%, con un tempo di raddoppio fra 2 e 3 anni e una continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

# Fotovoltaico in Italia



L'Italia è attualmente il secondo paese al mondo per potenza fotovoltaica installata (18.2 GW al 20 febbraio 2015).

Con questi numeri, il fotovoltaico in Italia può contribuire fino al 30% della potenza di picco (~56 GW) e circa il 6% dell'energia elettrica prodotta in un anno (~320 TWh).

# Conclusioni

- **LED e celle fotovoltaiche** sono dispositivi basati sui semiconduttori. Il loro comportamento dipende in maniera cruciale dalle proprietà quantistiche della materia e della radiazione elettromagnetica (luce).
- La comprensione profonda di queste proprietà è alla base dello sviluppo della conoscenza in fisica della materia, così come di tutte le applicazioni. **Ricerca pura e ricerca applicata formano un binomio inscindibile.**
- Fisica dei semiconduttori, microelettronica, optoelettronica, fotonica, fotovoltaico sono campi di ricerca strettamente collegati.
- **Risparmio energetico e produzione di energia rinnovabile** sono essenziali per una soluzione sostenibile del problema energetico. L'illuminazione a stato solido (LED) e l'utilizzo dell'energia solare (fotovoltaico) sono una parte importante del mix energetico del futuro.