

# L'illuminazione e i LED: principi fisici

Alessandro De Angelis  
INFN Padova; LIP/IST Lisboa

Udine 2015



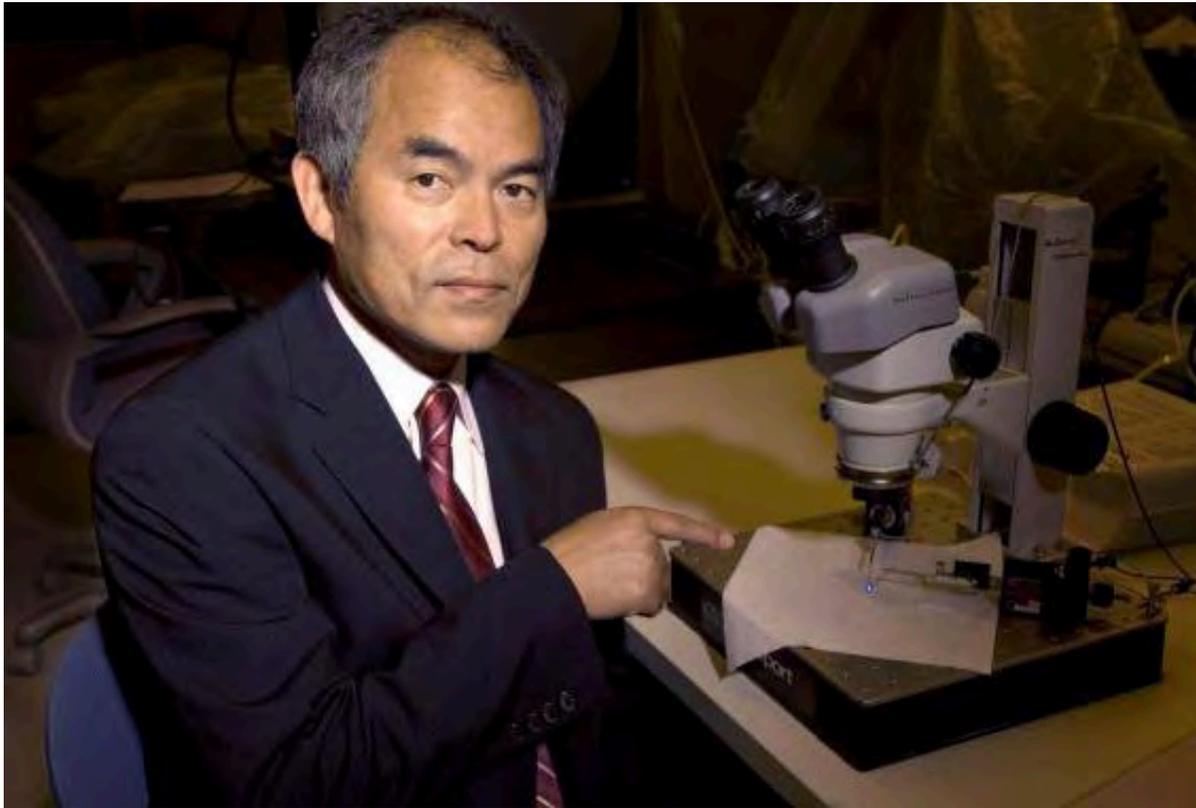
United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



International  
Year of Light  
2015

*(grazie a prof. Peron, IUAV; prof. Meneghini, UniPD)*

## LED e Premio Nobel 2014



Il Nobel per la fisica 2014 è stato assegnato a Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura, inventori, nel 1993, del LED ad emissione di luce nello spettro del blu, basato su tecnologia GaN

# Che cos'è la luce (Einstein 1905, premio Nobel)

- È un insieme di particelle, dette **fotoni**, prive di massa; il fotone viaggia nel vuoto a velocità  
 $c \sim 300\,000 \text{ km/s}$
- Il fotone corrisponde a una perturbazione oscillatoria del vuoto
- L'energia di un fotone è proporzionale alla sua frequenza di oscillazione:

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

$h \sim 6 \times 10^{-34} \text{ Js} \sim 4 \times 10^{-15} \text{ eV s}$  è la costante di Planck



# I nostri occhi rivelano fotoni

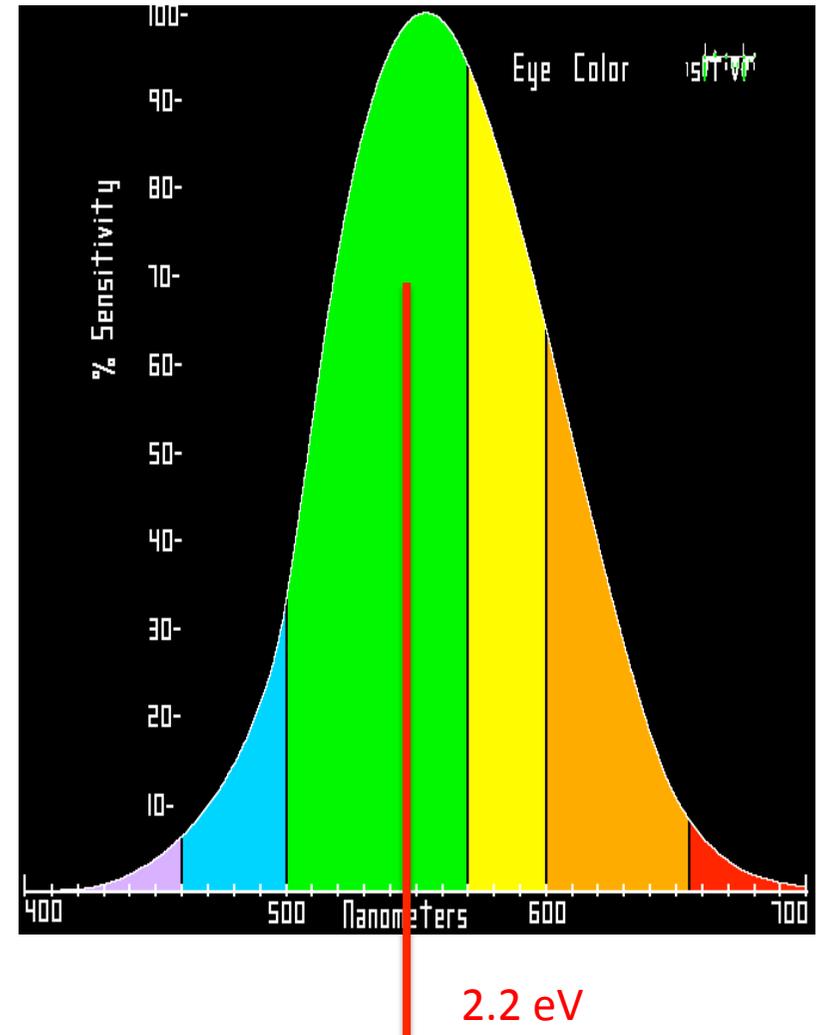
- L'occhio umano e' sensibile ai fotoni di lunghezze d'onda tra 0.4 e 0.8  $\mu\text{m}$

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

⇒ Energie tra 1.8 eV e 3.1 eV

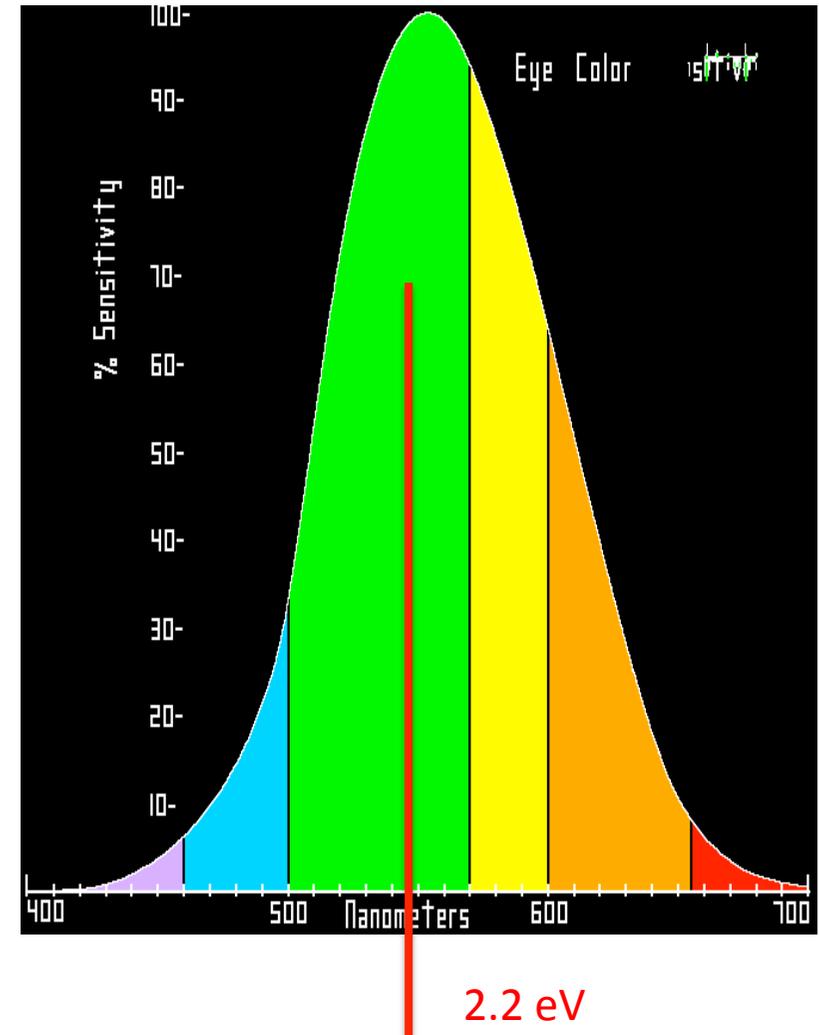
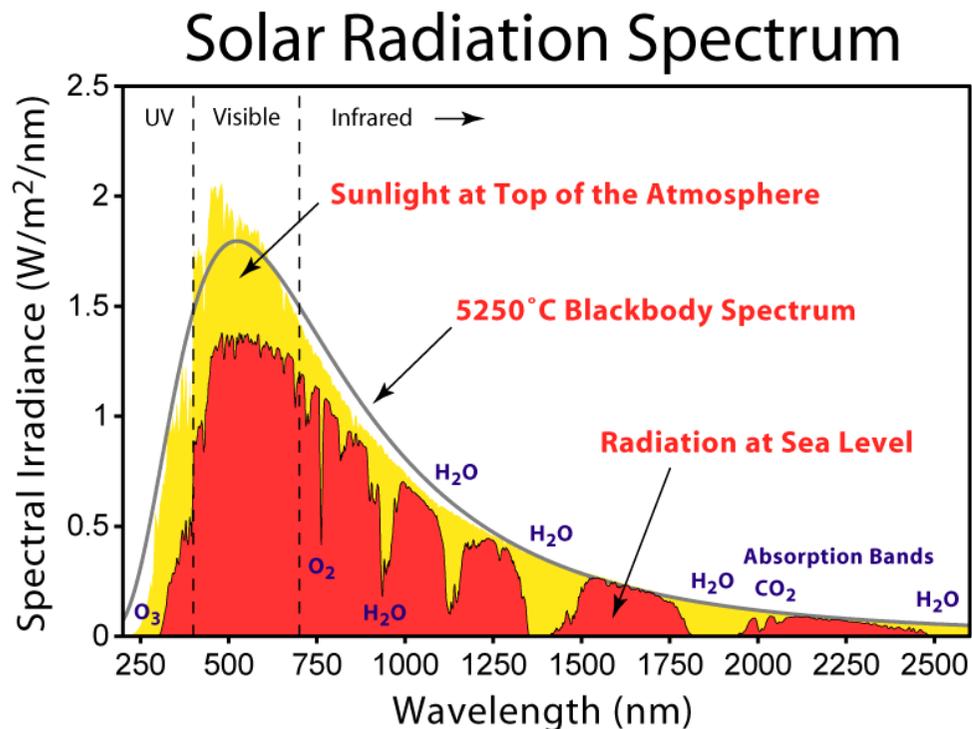
⇒ Una potenza di 1 mW  
corrisponde a oltre 1000  
miliardi di fotoni visibili al  
millisecondo

Limite di visibilita': circa 10  
fotoni/ms



- I nostri occhi hanno 3 tipi di recettori diurni (coni); questi consentono un'analisi spettroscopica della luce
- La migliore sensibilità si ottiene (con la luce del giorno) a una lunghezza d'onda di 555 nm (verde)
- Ricalca l'emissione solare!

## La sensibilità dell'occhio umano

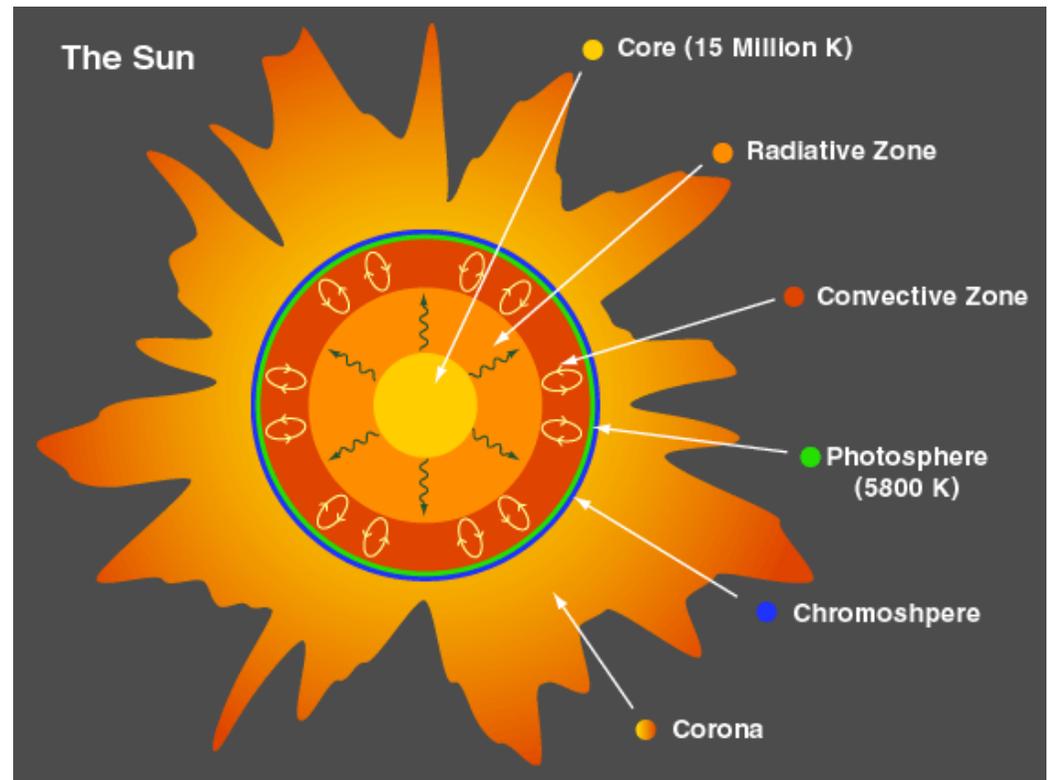


# Intermezzo: energie

- 2 eV: la luce visibile
- 14 eV: energia di legame dell'atomo di Idrogeno
- 1 GeV =  $10^9$  eV : energia che serve a creare un protone (relazione di Einstein  $E=mc^2$ )
- 4000 GeV = 4 TeV : energia di un protone accelerato in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- $6 \cdot 10^{18}$  eV = 1 joule : energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro
- $10^{21}$  eV: energia cinetica di una palla da tennis ben lanciata (sono le più grandi energie mai misurate nei raggi cosmici, quasi un miliardo di volte più grandi delle energie dei fasci di LHC)
- **Le varie lunghezze d'onda ci mostrano un Universo differente...**

# Come possiamo produrre luce (imitare il Sole?)

- Il Sole utilizza processi termonucleari nel nucleo, che vengono moderati fino alla superficie. E' un generatore efficiente di energia, ma non di luce visibile
- Come possiamo far meglio?



# Breve storia dell'illuminazione (dopo Prometeo)



Gas lighting (18th century) → A chemical reaction



Incandescent bulb (Edison, Swan and other 22 inventors!) → 10 lm/W efficiency, 19th century

→ Blackbody radiation



Fluorescent lamp (early 20th century, 50 lm/W)

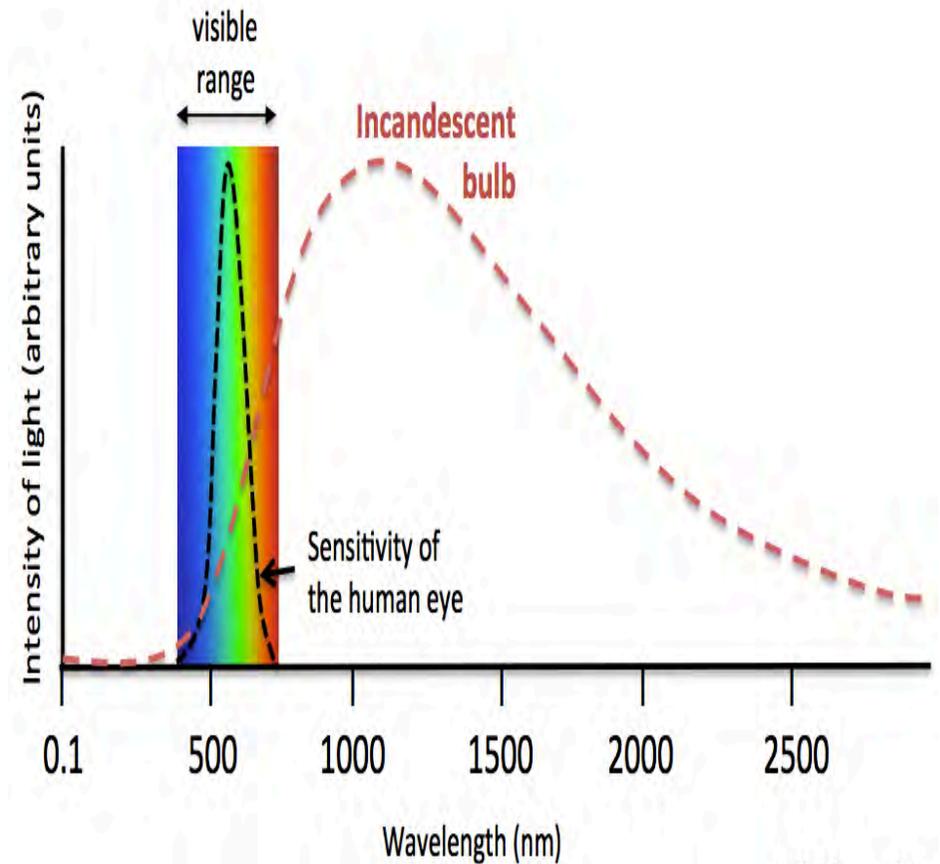
→ Downconversion, Stokes shift



LED (1962), up to 200 lm/W  
→ Quantum confinement

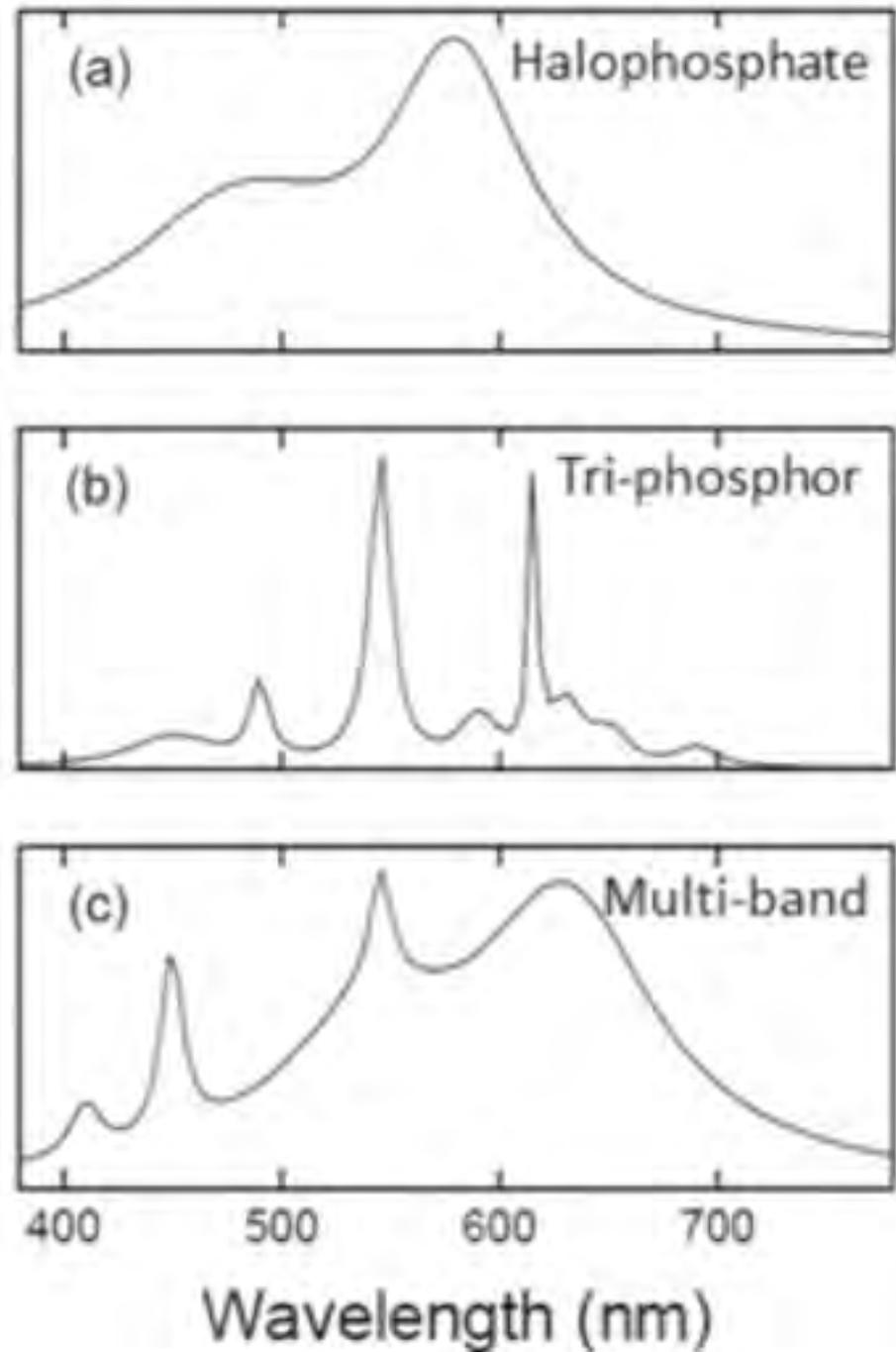
# Le lampade a incandescenza

- Radiazione di corpo nero (Stefan, Boltzmann, Wien, Planck...)
- Emissione di fotoni con uno spettro “di corpo nero”
- Energia di picco proporzionale alla temperatura
- Energia totale proporzionale a  $T^4$
- Efficienza  $\sim 4\%$

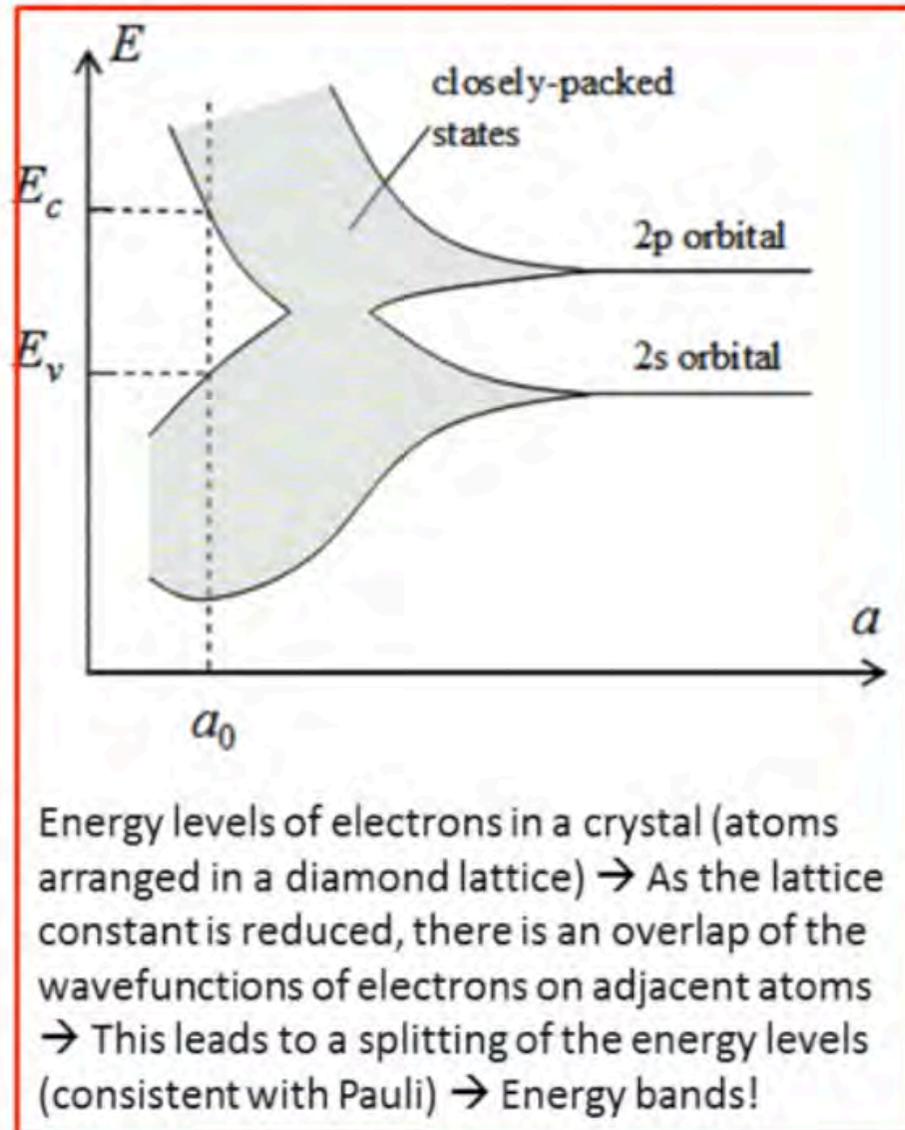
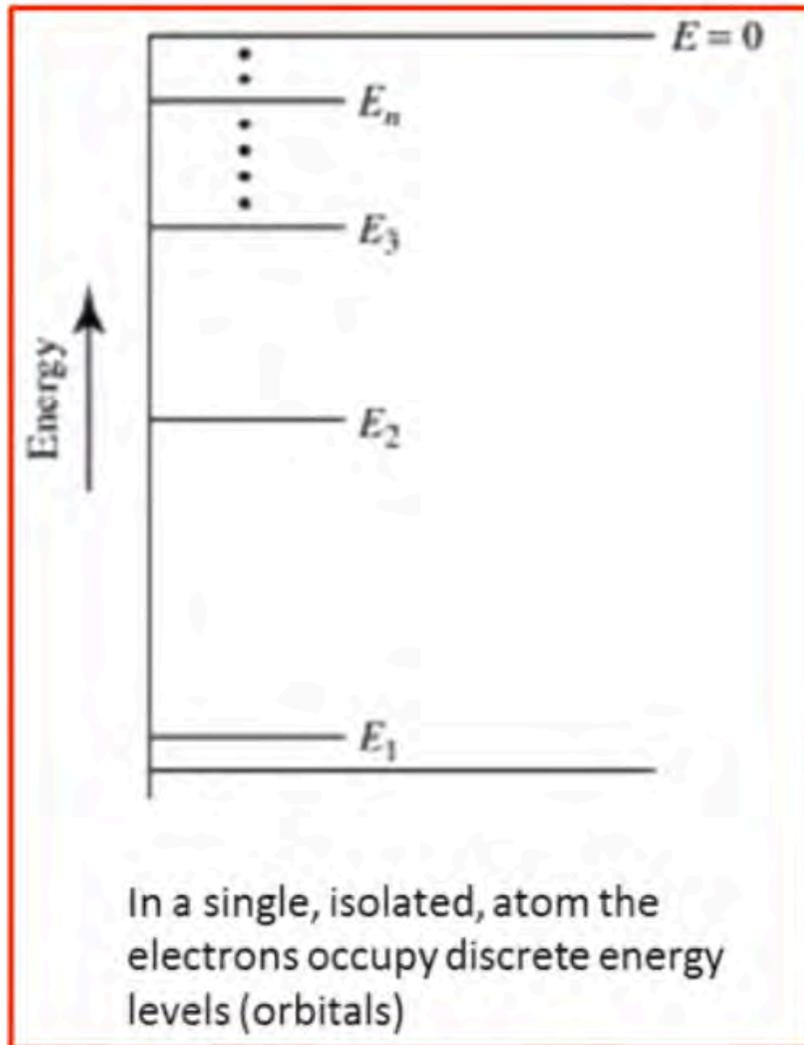


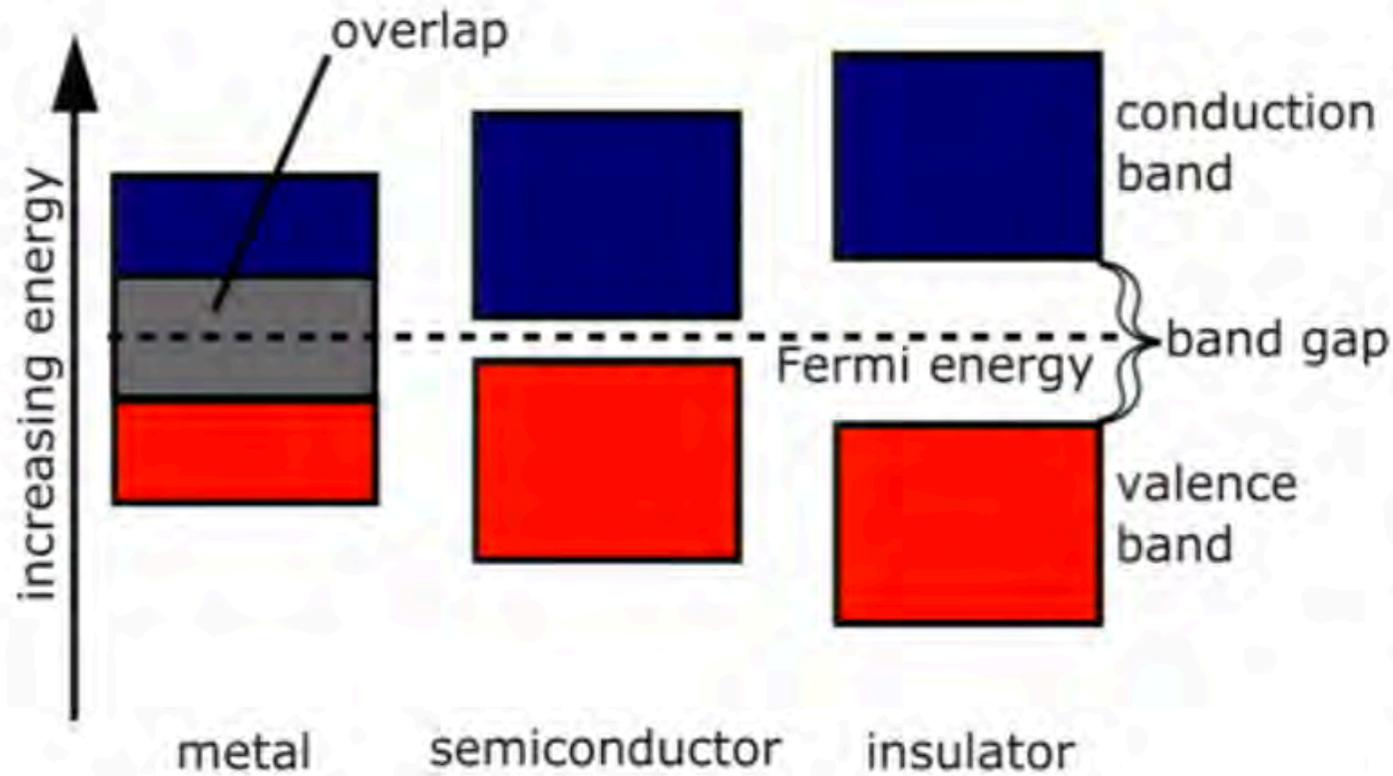
## Le lampade a fluorescenza e i fosfori

- Emissione di luce ultravioletta
- Conversione in luce visibile da parte di fosfori
- Efficienza ~20%



# La fisica dei LED: fisica quantistica, fisica e tecnologia dei semiconduttori



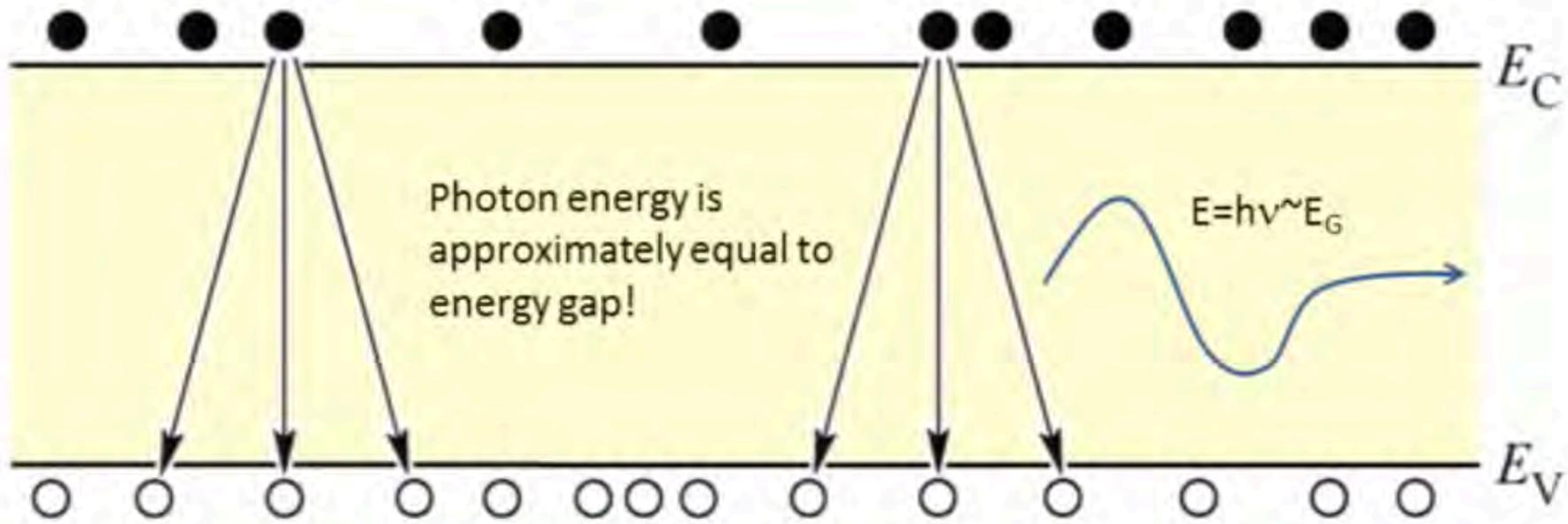


At 0 K, no electrons in conduction band  
 → Insulating behavior

At higher temperature, conduction band is populated → conduction becomes possible!

To increase conductivity → we can add doping!!!

First observation of photon emission in semiconductors: HJ Round 1907



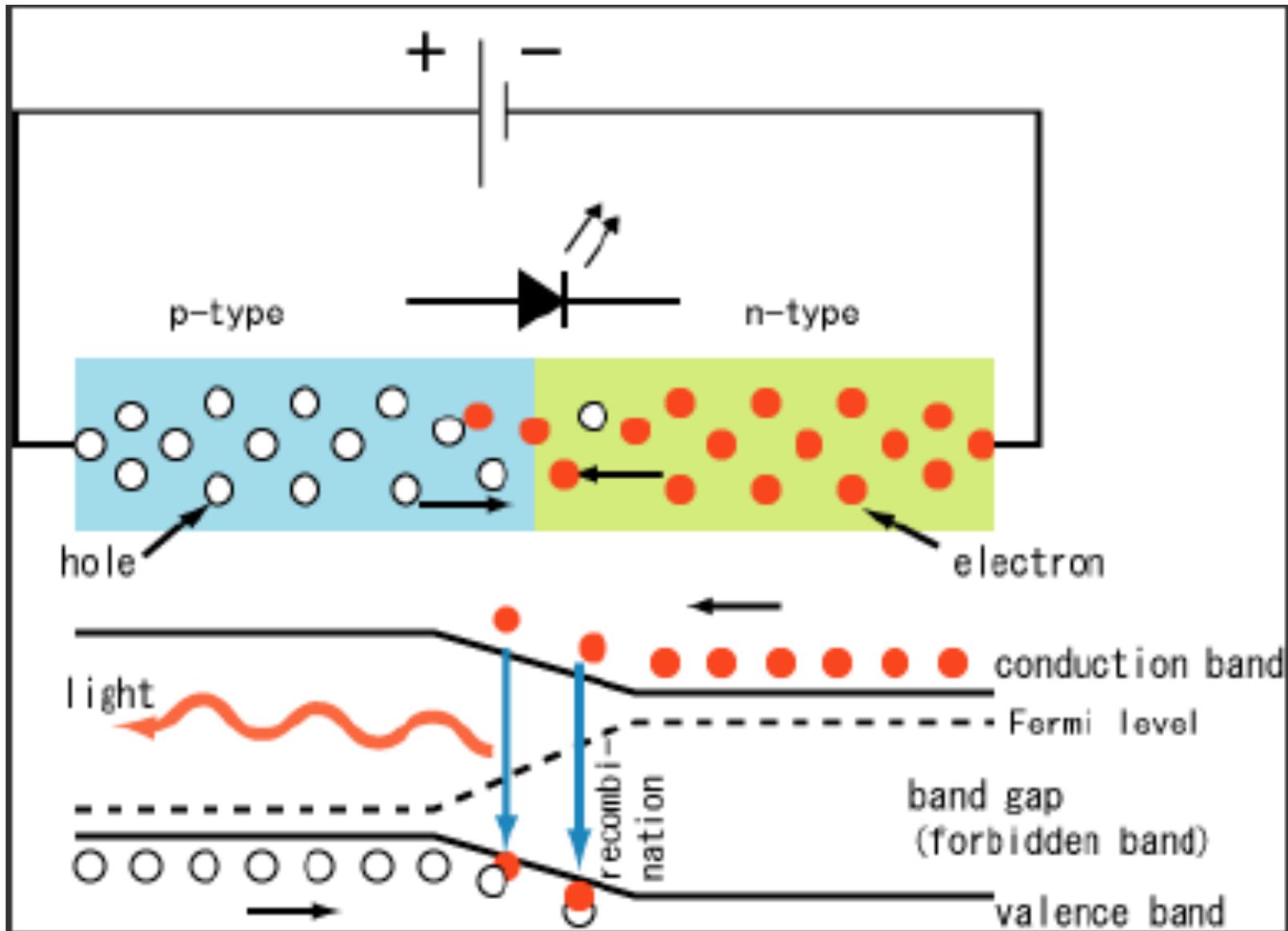
Source of figure: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert>

Illustration of electron-hole recombination  $\rightarrow$  the number of recombination events (per unit time, per unit volume) is proportional to the product of electron and hole concentrations  $\rightarrow R \sim n \cdot p$

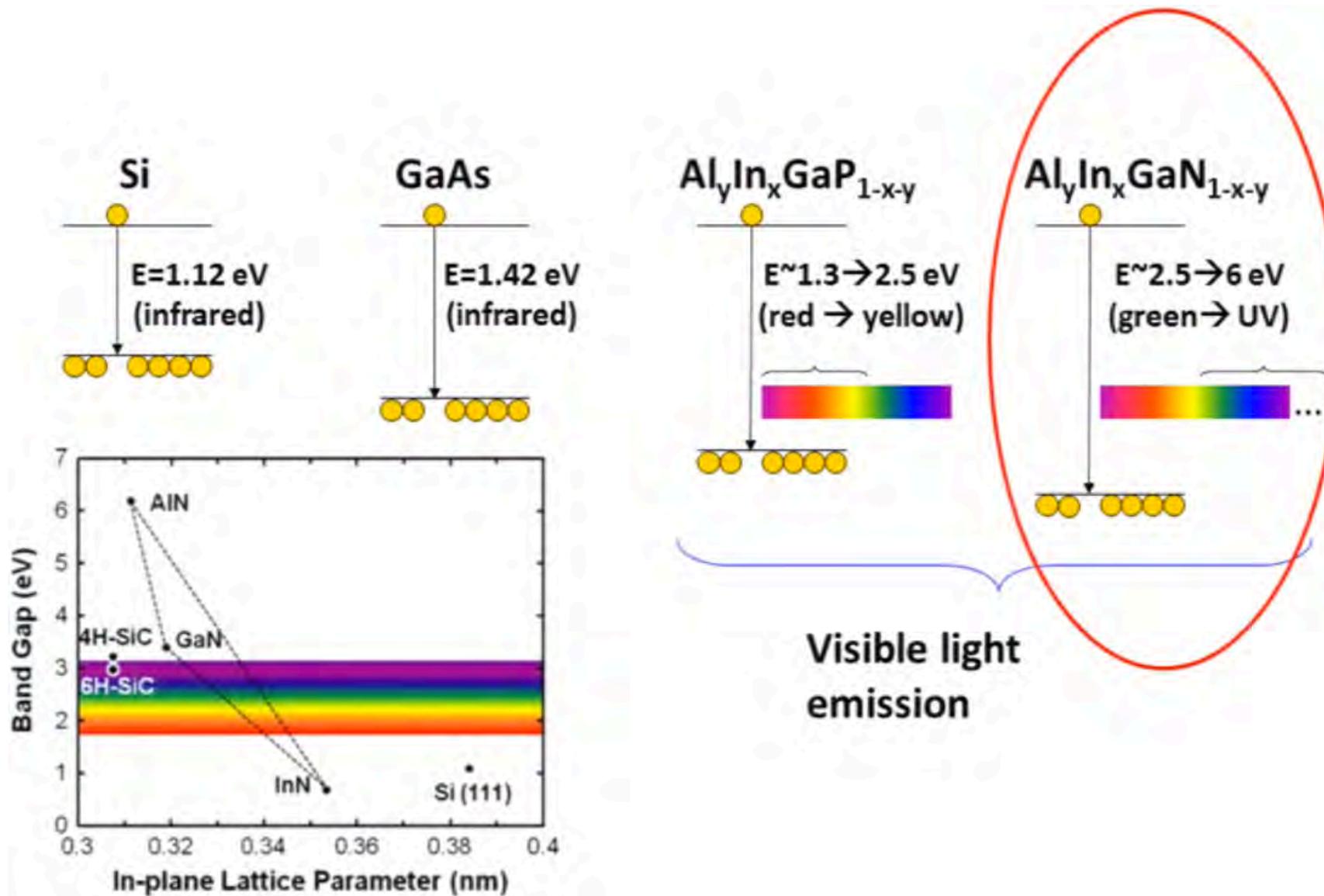
PHYSICAL REVIEW VOLUME 94, NUMBER 6 JUNE 15, 1954

**Photon-Radiative Recombination of Electrons and Holes in Germanium**

W. VAN ROOSBROECK AND W. SHOCKLEY  
*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*  
(Received February 19, 1954)



Nota: con il processo inverso si possono costruire fotosensori piu' sensibili dell'occhio umano



La realizzazione di LED a luce blu consente di emulare la luce bianca per tricromia (RGB)  
 Ma anche di generare luce visibile tramite fosfori (con alta efficienza)