Università degli Studi di Pavia
Dipartimento di Fisica ‘A. Volta’



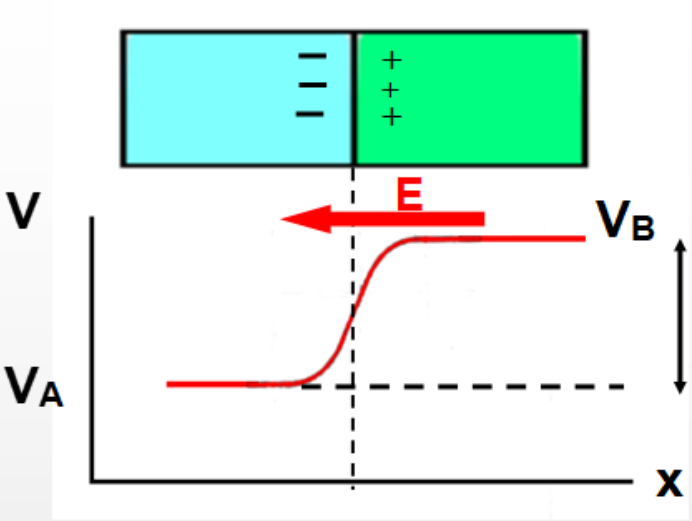
# Alessandro Volta:
# l’uomo, lo scienziato a 200 anni dalla morte

## EFFETTO VOLTA e sue applicazioni

*GIORGIO GUIZZETTI*

AIF Pavia, XLVIII CORSO DI AGGIORNAMENTO IN FISICA
Mercoledì 14 Ottobre 2026

# Che cosa è l' EFFETTO VOLTA ?




$V_B - V_A$ = differenza di potenziale di contatto

*L'effetto è detto anche* ***prima legge di Volta.***

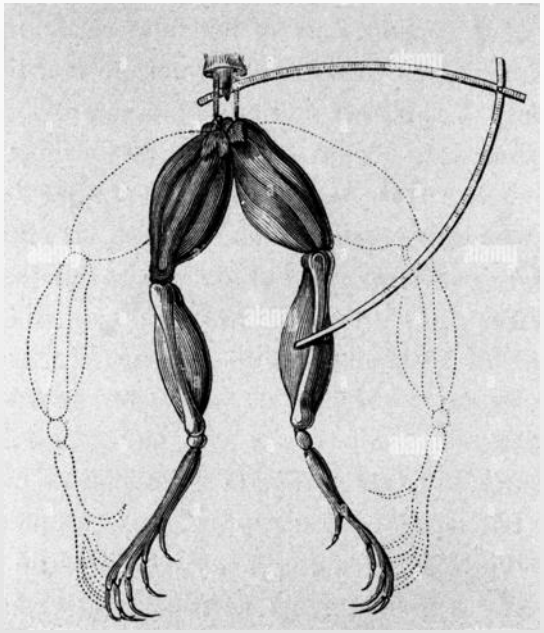
Scoperto da Volta nel **1796,** l'effetto consiste nella *d.d.p.* $V_B - V_A$ e nel relativo campo elettrico **E** che si originano quando due metalli differenti (**A** e **B**), inizialmente scarichi e alla stessa temperatura, sono posti a contatto stretto: $V_B - V_A$ ed **E** sono dovuti al flusso di elettroni da **B** ad **A.**
$V_B - V_A$ non dipende dall'area di contatto, ma solo dalle proprietà elettroniche dei due metalli: il suo valore tipicamente è compreso tra 0.2 e 2 Volt.

***N.B.*** *Per una trattazione storico -scientifica esauriente dell'Effetto Volta e della Pila si vedano i contributi di G.Chiarotti e S.Trasatti, in:* ***Incontro di studio N.2 – ALESSANDRO VOLTA 1792 – Istituto Lombardo di Scienze e Lettere – 22/01/1993****, da cui è sono tratte molte delle note storiche di questa presentazione.*

# CENNI STORICI

- A partire dal **1786** Luigi Galvani a Bologna osservò le contrazioni quando una rana morta, preparata anatomicamente scoprendo i nervi crurali e i muscoli della coscia, veniva messa in contatto con un arco costituito da due metalli diversi.

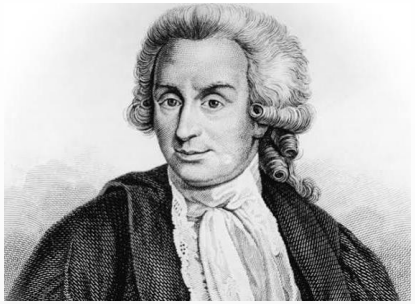
- Nel **1791** Galvani pubblicò la memoria *«De viribus electricitatis in motu musculari commentarius»* sulla sua scoperta, che rapidamente fece il giro del mondo scientifico.



- Sollecitato dai colleghi dell'Università di Pavia (Bassiano Carminati patologo e Jacopo Rezia anatomo) Volta, che era già famoso nel campo dell'elettricità, iniziò, con una certa riluttanza, a sperimentare con le rane.

- Nel **1792** Volta nella *Memoria I sull'elettricità animale* scrive: «…*incredulo e con non molta speranza di buon successo mi indussi a fare le prime prove,…. infine eccomi convertito, dacché cominciai ad essere testimonio oculare e operatore io stesso dei miracoli, e passato forse dall'incredulità al fanatismo*" .

- Quindi Volta accettò inizialmente l'interpretazione di Galvani: le contrazioni dei muscoli della rana sono dovute all'elettricità già presente in essi e vengono innescate dall'arco metallico fra muscoli e nervo sciatico.



- L'attitudine scientifica spinse però Volta a un nuovo modo di fare ricerca: il riscontro quantitativo e la deduzione logica. Utilizzando differenti coppie di metalli (Stagno, Piombo, Argento, Oro, ottone e Ferro), il **5 maggio 1792** (dissertazione all'Università di Pavia) Volta giunse a conclusioni diverse dal Galvani: le contrazioni si hanno anche quando si toccano con l'arco due punti differenti di un nervo e gli stimoli sono notevolmente più forti quando l'arco è bimetallico



→ l'origine dell'elettricità non è nell'animale, ma nel contatto fra due metalli diversi

- In particolare Volta osservò che se l'arco è formato da due metalli nominalmente uguali, il fenomeno è molto più debole e si deve alle differenze fra le leghe, o fra le superfici, o fra i trattamenti metallurgici, o alle condizioni sperimentali, e concluse: «*In somma è la diversità dei metalli che fa*» (*Memoria II sull'elettricità animale, 1792).*

- Le conclusioni di Volta diedero origine alla controversia con Galvani, che divise il mondo scientifico sino alla fine del 1700. Ne uscì "*vittorioso e in auge*" il Volta, e l'ipotesi dell'elettricità animale venne messa in secondo piano per molti anni. Ciò anche perché Galvani e i suoi discepoli, nonostante i tanti sforzi, non riuscirono a spiegare perché l'arco metallico innescasse le contrazioni, né a trovare qualcosa che lo sostituisse.

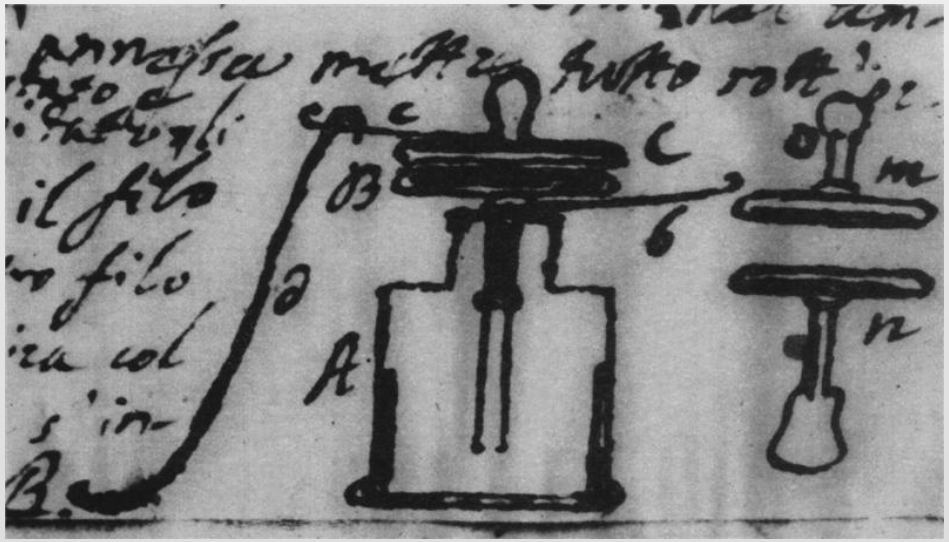
- **N.B.**: *In realtà, l'ipotesi di un'elettricità animale è stata confermata dagli studi di elettrofisiologia condotti nei secoli successivi. Una tale elettricità infatti è presente in tutti gli esseri viventi e, come pensò Galvani, essa esiste in uno stato di disequilibrio prodotto da gradienti di concentrazione e pompe proteiche*.

- Proprio per trovare una prova definitive della sua Teoria, Volta ideò numerosi esperimenti che lo condussero alla classificazione dei conduttori di prima e di seconda specie.

- Nel **1796** utilizzando l' **elettrometro condensatore** di sua invenzione, con grande soddisfazione, e un po' di stupore riuscì a misurare una differenza di potenziale di contatto (*d.d.p.*) fra due metalli diversi: " … *picciola è vero e al di sotto di quel grado che richiederebbesi per darne segno ai comuni spettrometri ma che pure sono giunto finalmente a rendere, più che non avrei sperato, sensibile, coll'aiuto del mio condenstore dell'elettricità".*

# Elettrometro condensatore di Volta

- Ideato nel **1796** da Volta per aumentare la sensibilità degli elettrometri classici, in particolare per misurare le piccole *d.d.p.* di contatto.
- E’ costituito da un elettrometro a pagliuzze sul quale è avvitato un condensatore a piatti piani paralleli di ottone, separati da uno strato di ceralacca.
- Sulle pareti in vetro è inoltre riportata una scala graduata circolare a zero centrale, avente le pagliuzze per raggio.

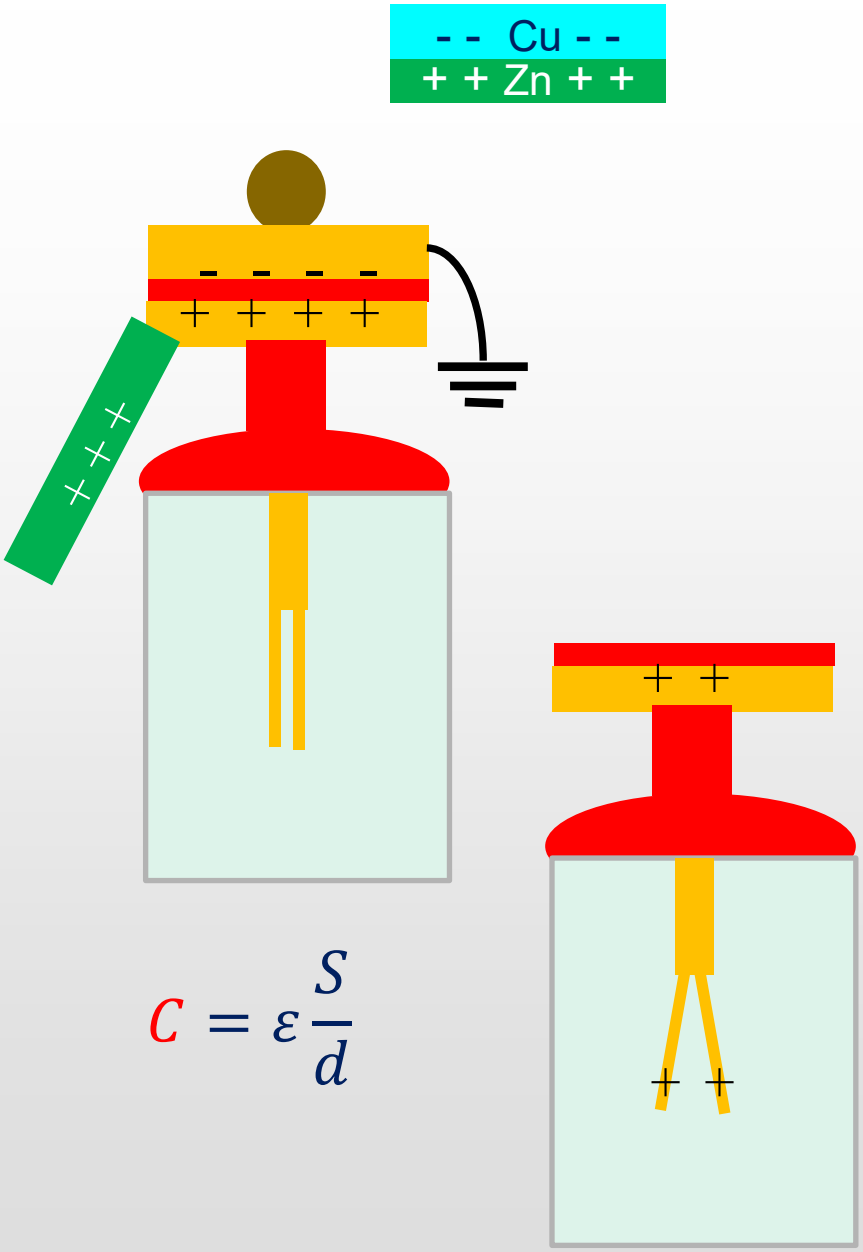






***Elettrometro di Volta***
***Gabinetto di Fisica –***
***Università di Pavia***

- Due dischi metallici, tipicamente di Cu e Zn , con diametro di 10 cm e spessore 4 mm, vengono messi a contatto stretto e si caricano per effetto Volta: il Cu si carica negativamente e lo Zn positivamente.
- I due dischi vengono separati, mediante manici isolanti, e uno dei due viene messo a contatto con il piatto inferiore del condensatore, mentre il piatto superiore viene messo a terra.
- Poiché i potenziali **V** del disco e del piatto diventano uguali, ma la capacità elettrica **C** del condensatore è molto maggiore di quella del disco; la maggior parte della carica è trasferita dal disco al piatto, ma poca sulle pagliuzze che non si muovono.
- Quindi si rimuovono il disco e il piatto superiore del condensatore, provocando una drastica diminuzione della capacità dello strumento.
- In questo modo, le cariche presenti sul piatto inferiore si ridistribuiscono anche sulle pagliuzze provocandone la separazione e rendendo possibile la misura della *d.d.p.*,(soprattutto ripetendo più volte la carica del condensatore).




$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

- Sperimentando sistematicamente con varie coppie di metalli per i dischi, Volta stabilì la serie delle *d.d.p.* elettriche o, come egli la chiamò, la "*colonna o scala*" voltaica, corrispondente in termini moderni alla serie delle *funzioni lavoro* dei vari metalli. Pur con qualche aggiustamento o modifica, tale serie è rimasta sostanzialmente valida sino ai giorni nostri, dimostrando così la elevata accuratezza dei suoi esperimenti.

- Inoltre, Volta enunciò quella che è detta la ***seconda legge di Volta***:
  *in una catena di conduttori metallici* ***aperta*** (cioè il primo e l'ultimo elemento sono diversi*), tutti alla stessa temperatura*, *la differenza di potenziale fra i due metalli estremi è la stessa che si avrebbe se essi fossero a contatto diretto.*
  *Ne consegue che in una catena di conduttori* ***chiusa*** *(*cioè i due estremi *sono* uguali) *la differenza di potenziale fra gli estremi è nulla.*

- In seguito alla polemica con Galvani e Eusebio Valli, Volta fu costretto anche a interessarsi dei conduttori umidi, ossia di ***IIa classe***. Diversamente dai metalli, conduttori di ***Ia classe***, in cui la corrente elettrica è trasportata da elettroni liberi, nei conduttori di *IIa* classe (soluzioni elettrolitiche ed elettroliti fusi) la corrente elettrica è trasportata da ioni positivi o negativi e si verificano sempre reazioni chimiche, con deposito di sostanze, agli elettrodi.

- Ne conseguì la ***terza legge di Volta****:*
  *In una catena di conduttori di prima classe chiusa la d.d.p. agli estremi è nulla, ma se si inserisce fra due elementi della catena un conduttore di seconda classe (soluzione elettrolitica) agli estremi vi sarà una d.d.p. diversa da zero.*

- Nonostante l'evidenza sperimentale e l'interpretazione dell'effetto Volta, molti fisici europei, alcuni illustri, continuarono, anche dopo l'invenzione della pila, a negarne l'esistenza. Affermavano che l'esperimento fatto da Volta non era quasi mai riproducibile e le poche volte che riusciva, lo attribuivano alla pressione con cui venivano tenuti a contatto i due dischi metallici o al loro vicendevole sfregamento, o ai contatti con l'elettrometro, o alla polarizzazione della ceralacca o del dielettrico del condensatore.

- Fu per questi motivi che Giuseppe Belli, dal 1842 cattedratico di Fisica a Pavia, nella 2a Radunanza degli Scienziati italiani nel **1840** lesse una sua memoria "*Di un nuovo apparecchio sull'origine dell'Elettricità Voltiana*".

  Con essa rintuzzava quasi definitivamente le critiche sopracitate: in particolare, fece osservare che con il suo apparecchio era facile evidenziare e misurare in modo riproducibile l'effetto Volta, ma soprattutto se si utilizzava una coppia di dischi metallici uguali non si aveva alcun effetto.



# Dall'effetto Volta alla pila

- Lo scopo di Volta fu per molti anni quello di ottenere l'amplificazione dei fenomeni elettrici dovuti al contatto fra metalli. Pensò quindi di mettere in serie varie coppie identiche di due metalli diversi, in particolare Zn e Cu o, meglio, di Zn e Ag (forse per la vasta disponibilità di monete di Ag).

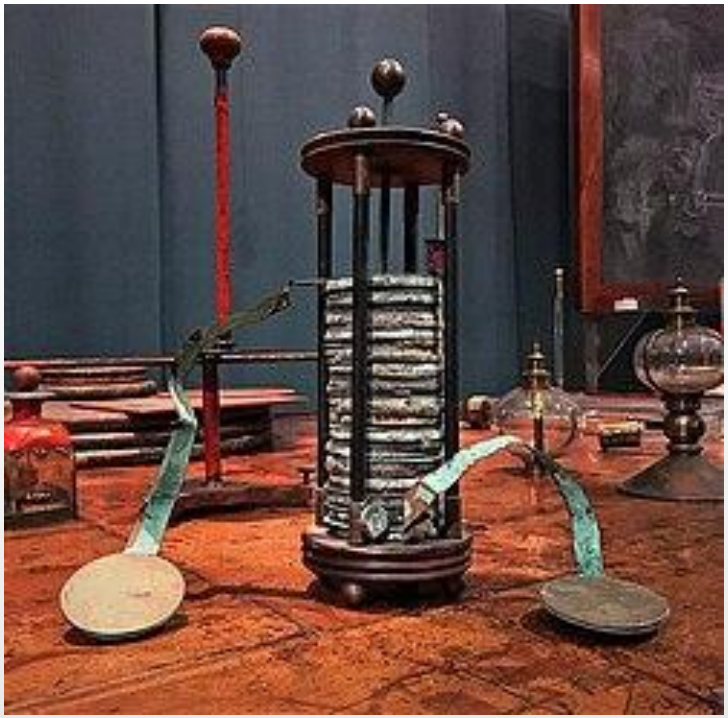
- Volta sperava che le *d.d.p.* di contatto delle coppie si sommassero, ma si rese conto (caso particolare della ***IIa legge di Volta***) che così non era: la *d.d.p.* agli estremi era uguale alla *d.d.p.* di una singola coppia.

- Se però fra due (o più) coppie metalliche poneva un tampone umido qualunque (conduttore di *IIa classe*), le due *d.d.p*.si sommavano:

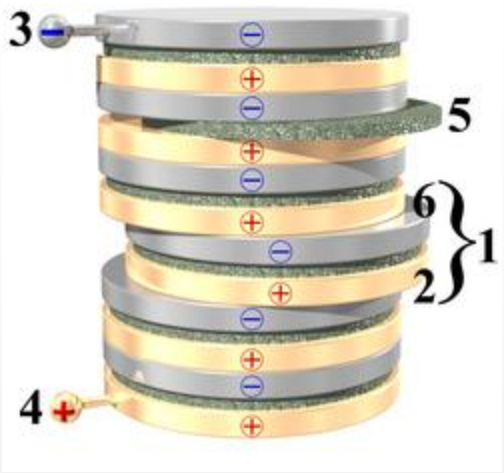
  **era nata la *PILA***

  nome che venne dato all'apparecchio perchè costituito da diverse coppie impilate, con interposti i tamponi umidi.

- Il **20 marzo 1800** Volta inviò a Sir Joseph Banks, presidente della Royal Society di Londra, una lettera (che apparve in forma di pubblicazione il **26 giugno 1800**) che descriveva in modo dettagliato la sua invenzione.



***Copia della pila di Volta***
***Gabinetto di Fisica –***
***Università di Pavia***




**1.** Cu - tampone - Zn: cella elementare della pila
**2.** disco di Rame
**3.** contatto negativo
**4.** contatto positivo
**5.** feltro o cartone imbevuto in soluzione di acqua e acido solforico
**6.** disco di Zinco

La pila si rivelò una sorgente capace di erogare correnti continue di intensità non trascurabile, quasi certamente oltre le aspettative di Volta stesso, che si compiaceva di aver realizzato “un moto perpetuo elettrico” (la termodinamica non era ancora nata…).

- La notizia dell'invenzione della pila suscitò subito grande scalpore e interesse, nonché molte ricerche basate sull'uso della pila, anche perché, seguendo le istruzioni dettagliate di Volta, chi volle costruire una pila fu subito in grado di farlo (a parte i costi…).

E quindi in preda allo stupor li parve
Chiaro veder quella virtù, che cieca
Passa per interposti umidi tratti
Dal vile stagno al ricco argento, e torna
Da questo a quello con perenne giro.

*Mascheroni, 1793*

- In particolare, probabilmente informati dallo stesso Joseph Banks, gli inglesi W. Nicholson e A. Carlisle riprodussero la pila e pubblicarono il risultato il 2 maggio 1800, precedendo la pubblicazione di Volta. Inoltre essi notarono che chiudendo il circuito su un recipiente sigillato contenente acqua acidulata, si sviluppava idrogeno ad un elettrodo e ossigeno dall'altro: era stata realizzata l'elettrolisi dell'acqua.

- In precedenza alcuni esperimenti (**1772** e **1789**) con la scarica elettrica da una bottiglia di Leida erano stati effettuati sulla decomposizione di sostanze, ma data la breve durata della scarica era impossibile qualsiasi approccio quantitativo.

- Fra il **1807** e il 1**809 Humphry Davy** compì accurate ricerche per mezzo della pila e giunse alla conclusione che i suoi effetti elettrici, contrariamente a quanto creduto da Volta, non erano provocati dal semplice contatto di metalli diversi, bensì da **mutamenti chimici**. Sperimentando con l'elettrolisi, egli riuscì a isolare dai loro sali alcuni metalli alcalini alcalinoterrosi come Sodio, Potassio, Bario, Stronzio, Calcio e Magnesio.

- Seguirono con continuità molte evidenze sperimentali degli effetti chimici prodotti dal *«fluido elettrico»* sia all'interno della pila stessa sia su sistemi esterni. L'**elettrochimica sperimentale,** cioè lo studio delle relazioni tra elettricità e relazioni chimiche, nasce con la pila.

- Sicuramente Volta notò trasformazioni chimiche nei metalli della sua pila (e ne scrisse anche in una sua lettera del 1800), ma non mostrò eccessivo interesse. Egli era convinto che la tensione di contatto fra i due metalli fosse **la forza motrice** che metteva in moto il fluido elettrico e che il tampone servisse solo da collegamento elettrico fra le singole coppie, permettendo che le tensioni delle coppie in serie si sommassero.

- Per i sostenitori della **teoria chimica** (che si rivelò corretta) la forza motrice era dovuta alle reazioni chimiche che avvenivano fra i metalli e la soluzione acida: essi però non riuscivano a confutare la teoria di Volta (che si resse a lungo come postulato), perché mancava loro la prova della corrispondenza fra eventi chimici ed azione elettrica.

- Nel **1833** Michael Faraday, che era un assistente di Davy scoprì le leggi dell'elettrolisi, in particolare il rapporto stechiometrico tra fluido elettrico e trasformazioni chimiche.

- Tra le maggiori scoperte ottenute con correnti continue prodotte da pile citiamo:

**1820** Hans Christian Oersted scopre che una corrente genera un campo magnetico
**1827** Georg Simon Ohm scopre l'omonima legge $V = R\ I$
**1833** Michael Faraday, che era un assistente di Davy, scopre le leggi dell'elettrolisi.

- La validità dell'invenzione della pila e la statura scientifica di Volta restarono e restano intatte indipendentemente dalla corretta intuizione del meccanismo di funzionamento.

- La pila valse a Volta fama e onori internazionali: in particolare, il **7 novembre 1801** ne illustrò il funzionamento in una seduta plenaria del *Institut de France* a Parigi di fronte a Napoleone Bonaparte. Al colmo dell'entusiasmo e dell'ammirazione Napoleone lo insignì di una speciale medaglia d'oro (mai assegnata a uno straniero), dispose una donazione e un vitalizio e lo nominò membro straniero dell'Istituto. Nella biblioteca dell'Istituto lo stesso Napoleone raschiò le ultime tre lettere della scritta "Al grande Voltaire" lasciando così leggere "Al grande Volta".



- Altri riconoscimenti prestigiosi:
  **1785** Rettore dell'Università di Pavia
  **1802** membro dell'Istituto Lombardo di Scienze e Lettere
  **1805** insignito della *Legion d'onore*
  **1809** Senatore del Regno d'Italia
  **1810** insignito del titolo di Conte.

- Purtroppo, dal **1802** per 25 anni fino alla sua morte nel **1827**, all'età di **82** anni, Volta non produsse più un solo lavoro scientifico nuovo.

- Le applicazioni della pila di Volta progredirono più rapidamente della comprensione dei fenomeni. Elenchiamo le più significative.

- **1836** Intensi studi rivolti all'aumento della durata della pila e della capacità elettrica portano all'invenzione della pila Daniel , e poi alla pila Weston
- **1839** Grove realizza la pila a combustibile, cioè un reattore elettrochimico continuo
- **1859** Planté inventa l'accumulatore a piombo, cioè una pila ricaricabile
- **1867** Leclanché inventa la pila a secco, a base di Zn, una pasta di carbone e $MnO_2$

- Si noti che il primo carro elettrico alimentato da una batteria di celle elettrolitiche fu realizzato prima dell'invenzione del motore a scoppio: alla fine dell'Ottocento il 60% delle automobili prodotte In USA erano elettriche. Fu l'introduzione dello starter elettrico (in cui c'era ancora l'influenza della pila) che ribaltò la produzione.

- Oggigiorno la pila è ancora un oggetto indispensabile: basti pensare ai pacemaker, a tutti i telecomandi, ai cellulari, agli orologi, alle auto elettriche e agli accumulatori di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili.

- Nel **1881** l'unità di misura del potenziale elettrico fu chiamata Volt.

***N.B**. Perché Volt e non Volta, come Ampère, Newton, Tesla, Franklin, Joule, Siemens, Ohm, ecc. ? Si veda in proposito* link
https.// www.primapagina.sif.it/article/1580/di-volt-in-volts://ps://www.primapagina.sif.it/article/1580/di-volt-in-volta
*che rimanda a un articoletto di Giulio Casati e Lucio Fregonese, intitolato "Di volt in Volta" che racconta brevemente la vicenda volt-volt(a).*

# INTERPRETAZIONE MICROSCOPICA DELL'EFFETTO VOLTA e DELLA PILA
# E
# APPLICAZIONI

# CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI IN BASE ALLA CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

**Legge di Ohm** $E = \rho j$ $(V = I R)$ **o** $j = \sigma E$

**Densità di corrente** $j = q N v_d$

**Conducibilità** $\sigma = j / E = q N v_d / E = q N \mu$

**Resistività** $\rho = 1/\sigma$

**Mobilità** $\mu = q \tau_s / m^*$

**Tempo di scattering** $\tau_s$ ($10^{-12} \div 10^{-14}$ s, funzione di T (agitazione termica), struttura cristallina, difetti, impurezze)

**Massa efficace m*** (può essere minore o maggiore della massa $m_e$ dell'elettrone libero)

***Isolanti (vetro, quarzo, diamante)***

**$\sigma = 10^{-18} – 10^{-8}$ S/cm**

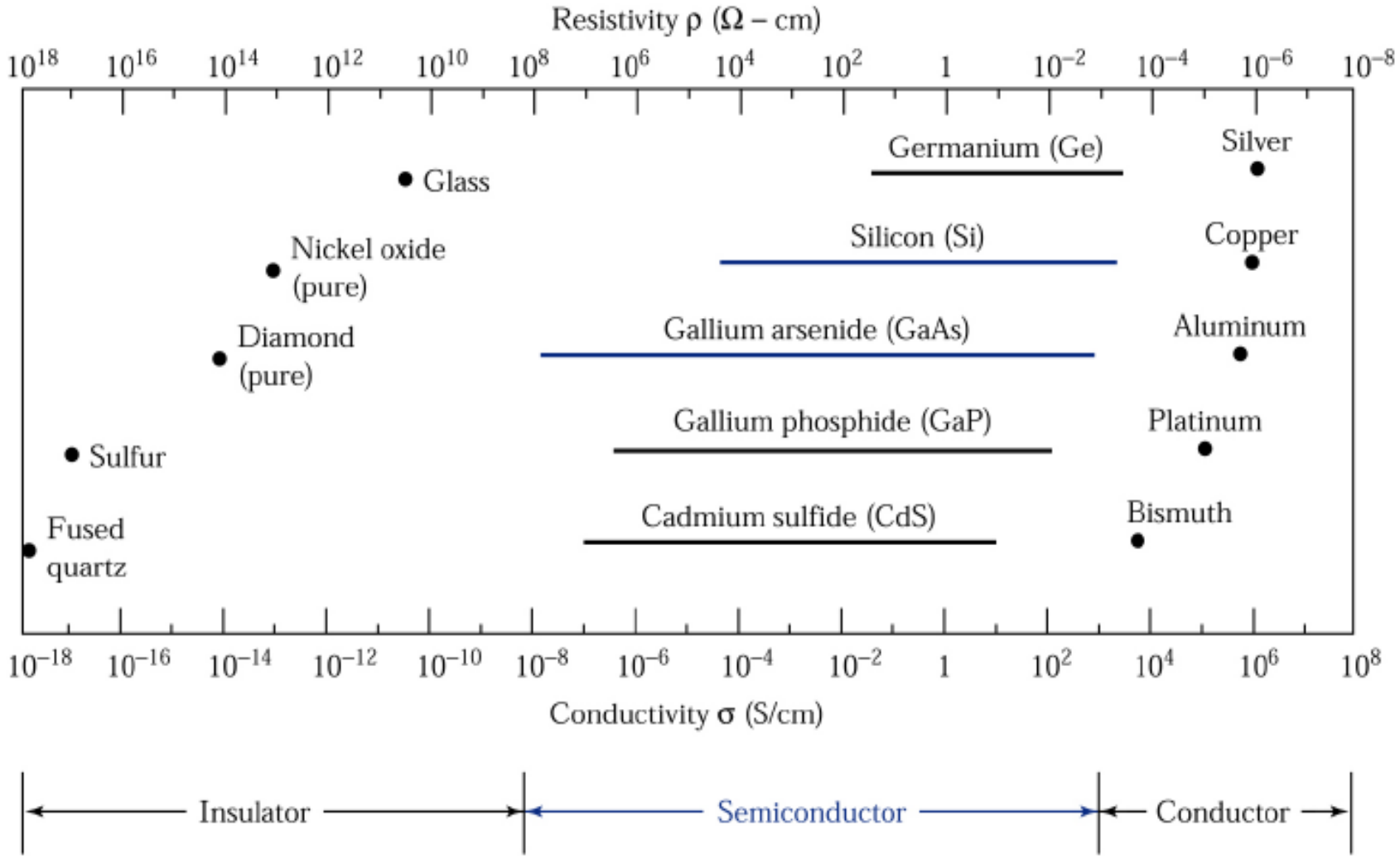
***Semiconduttori***

**$\sigma = 10^{-8} – 10^{4}$ S/cm**

***Conduttori (metalli)***

**$\sigma = 10^{4} – 10^{6}$ S/cm**

# Intervalli tipici di conducibilità elettrica per isolanti, semiconduttori, conduttori.



# I semiconduttori: un po' di storia (1824-1947)

**1824:** Berzelius isola e identifica il Silicio

**1873:** Smith scopre la fotoconducibilità nel Selenio

**1897:** Proprietà raddrizzatrici della Galena (PbS) e sviluppo della radiotelegrafia (Marconi)

**1907:** Elettroluminescenza (carburo di silicio)

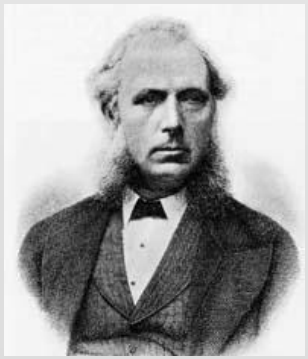
**1925:** Sviluppo della meccanica quantistica, teoria della conduzione elettrica nei solidi

**1927:** LED (carburo di silicio)

**1940:** Radar a onde corte basato sulla giunzione Silicio-Tungsteno

**1947:** Bardeen, Shockley, Brattain: il primo transistor







# I semiconduttori: un po' di storia (1947-1970)

**1954:** Celle solari al Silicio

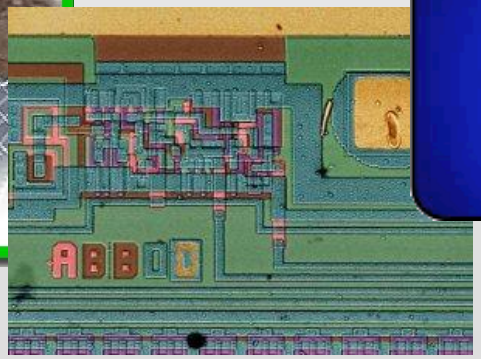
**1958:** Kilby, Noyce: Il circuito integrato

**1960:** Bande di energia e proprietà ottiche dei solidi

**1969:** Alferov, Kroemer: Laser rosso a eterogiunzione GaAs-AlGaAs

**1970:** Faggin: Microprocessore a 4 bit







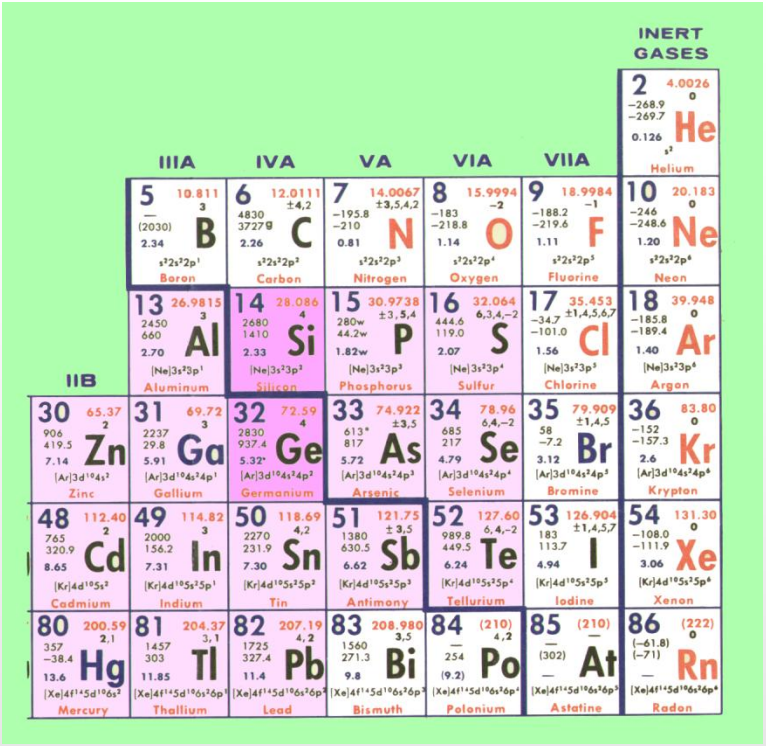


# La conducibilità elettrica di un semiconduttore dipende da:

- *Illuminazione* (effetto *fotoconduttivo*)
- *Temperatura* (in particolare $\sigma$ può crescere con T entro certi intervalli)
- *Pressione* (effetto *piezoresistivo*)
- *Purezza del materiale* (difetti composizionali o strutturali < 1 ppm)
- *Drogaggio* (impurezze intenzionali in quantità controllata)
- *Campo magnetico* (effetto *magnetoresistivo*)

La corrente elettrica in un semiconduttore può essere trasportata da portatori di carica negativi (elettroni) e/o positivi (buche o lacune) la cui concentrazione dipende dai parametri sopracitati, in particolare dal drogaggio.

# SEMICONDUTTORI




***Composti inorganici*:**

IV: Si, Ge, SiGe, SiC **e il C ?**

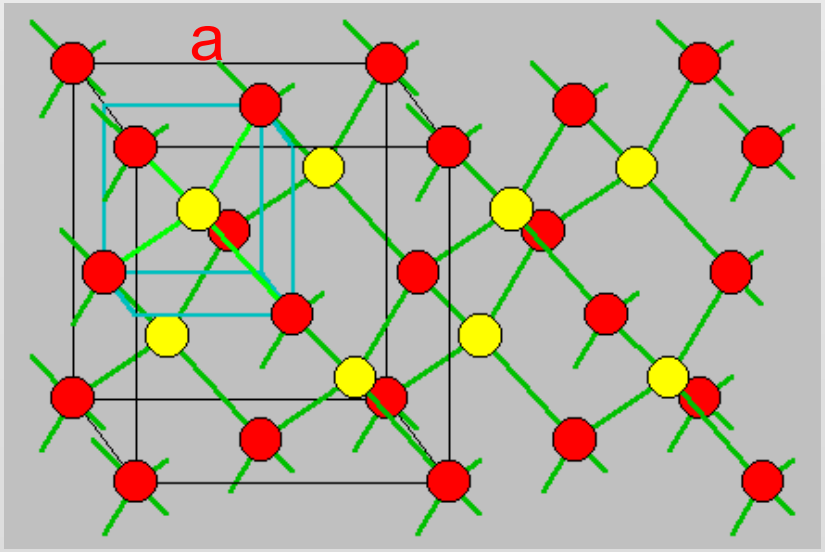
III-V : GaAs, InP, InSb…..+ leghe ternarie e multinarie (AlGaAs, InGaAsP, …)

II-VI: ZnS, CdTe, HgTe.....+ leghe ternarie

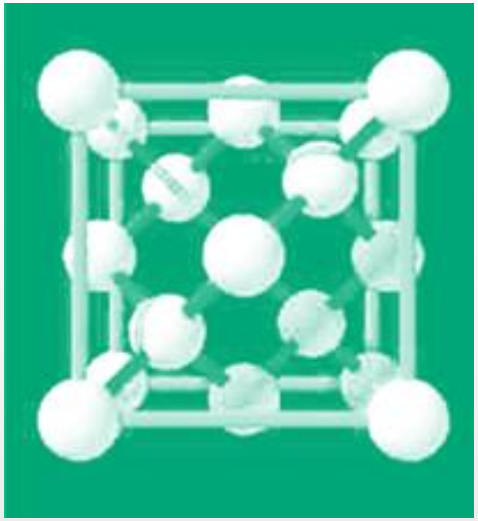
***Composti organici*:** poliacetilene, polidiacetilene, tiofene,…

***Struttura*:** cristalli, policristalli, amorfi

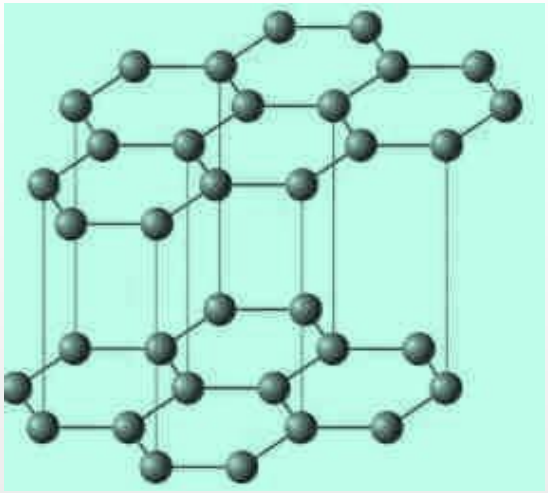
***Struttura cristallina della zincoblenda*:** il reticolo di Bravais è cubico a facce centrate; la cella unitaria è cubica, con una costante reticolare *a* ; ciascun atomo si trova al centro di un tetraedro e forma quattro legami covalenti con i quattro atomi primi vicini.



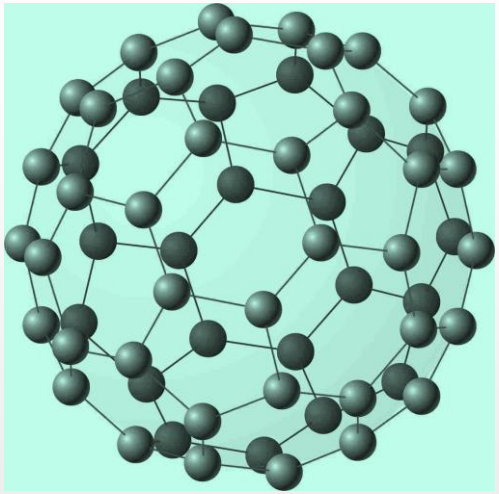
# FORME ALLOTROPICHE DEL CARBONIO



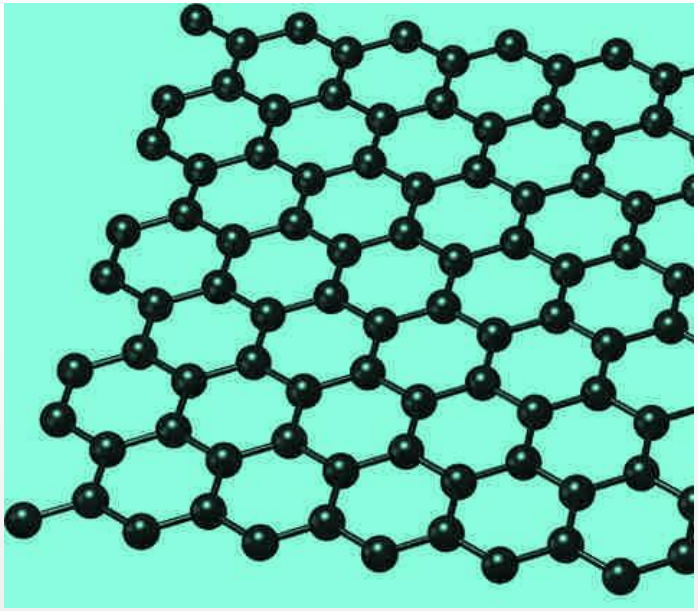
**DIAMANTE**
**Ottimo isolante**
Reticolo cubico a facce centrate
Durezza 10 (Scala di Mohs)
Ottimo conduttore di calore (5 volte il Cu)



**GRAFITE**
**Semimetallo**
Reticolo esagonale
Deboli legami di van der Waals fra piani

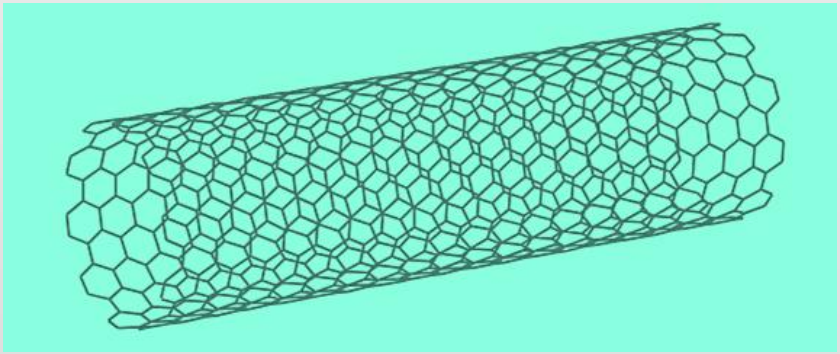


**FULLERENE C60**
**Semiconduttore**
Struttura a icosaedro troncato, costituito da esagoni e pentagoni, scoperto da R.F. Curl , R.Smalley (USA) e H.W.Kroto (GB)
Nobel1996 per la Chimica.



**GRAFENE Metallo**
**Reticolo esagonale 2D**

- Ottimo conduttore di calore ed elettricità, assume legami diversi a seconda del substrato di contatto.
- Flessibilissimo e 200 volte più resistente dell'acciaio.
- A. Geim e K. Novoselov (Università di Manchester) Premio Nobel 2010 per la fisica per i loro studi sul grafene *(esfoliazione di grafite*)



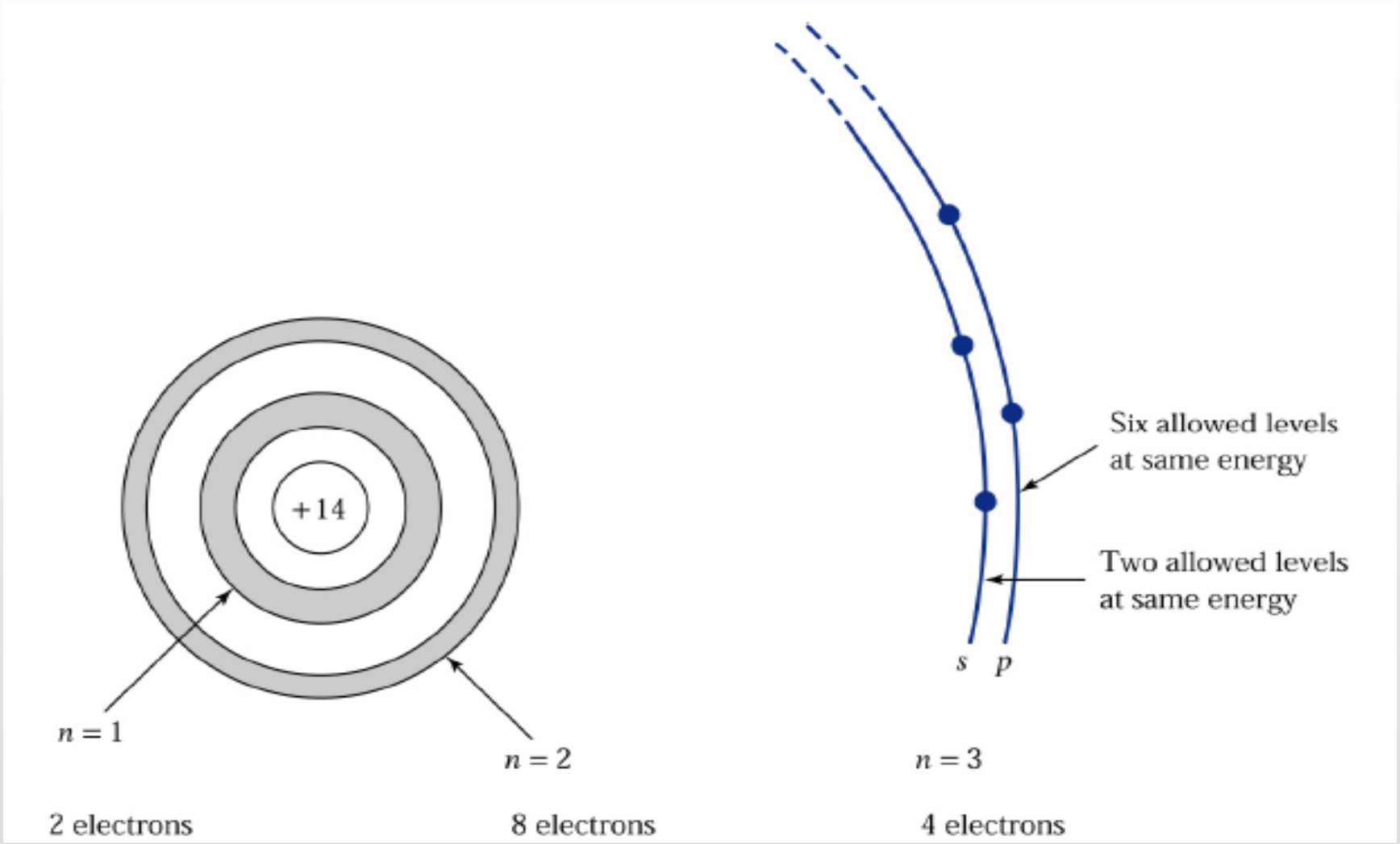
**NANOTUBO Metallo - Semiconduttore**
**Reticolo esagonale 2D**

Proprietà elettriche dipendenti dalla la geometria:

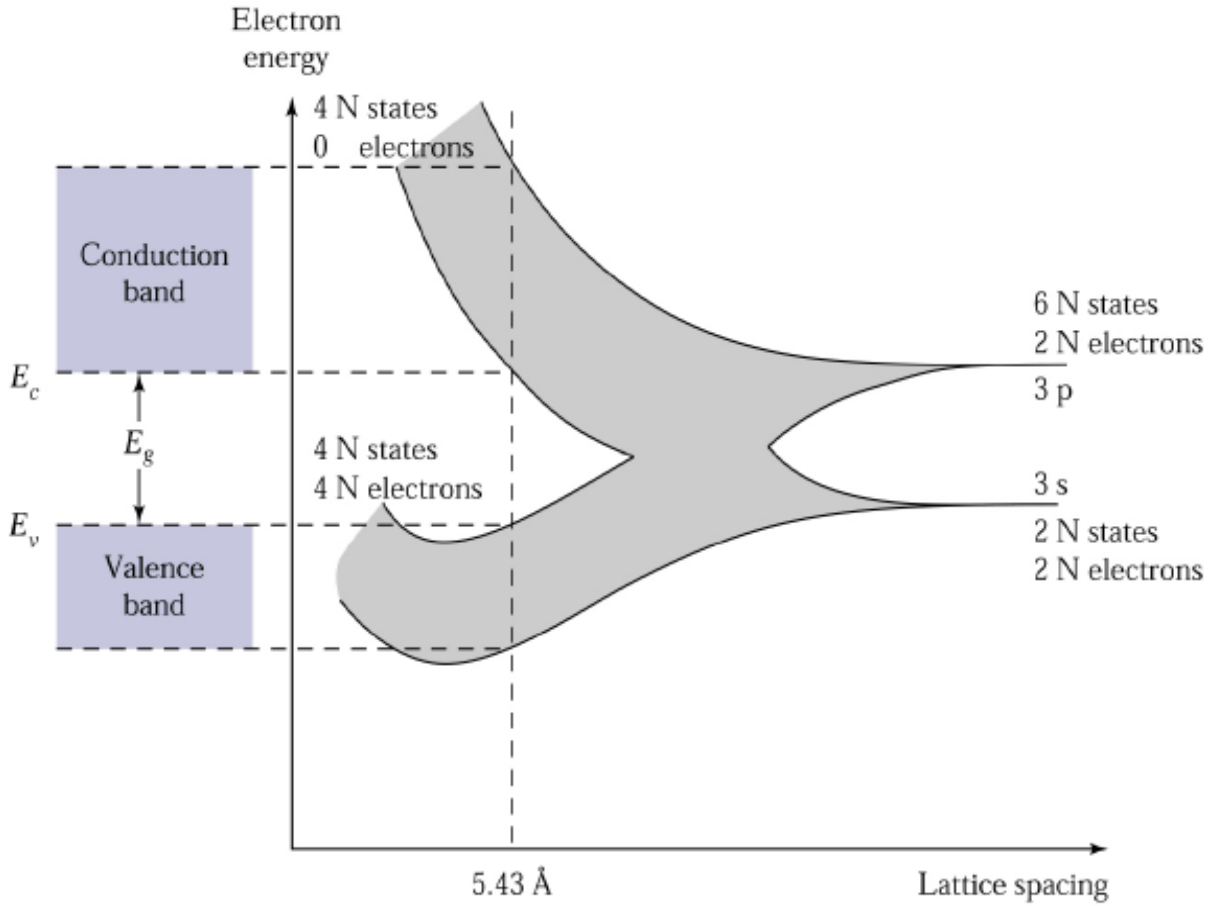
- nanotubo a parete singola
  $0{,}7\text{nm} < \text{diametro} < 10\text{ nm}$
- nanotubo a parete multipla formato da più fogli ($\leq 100$) avvolti coassialmente uno sull'altro

E' tra i materiali più resistenti e duri: bassa densità e proprietà meccaniche uniche, come forza tensile e modulo di Young.

# Rappresentazione schematica degli orbitali elettronici in un atomo (*p.e.* di silicio)

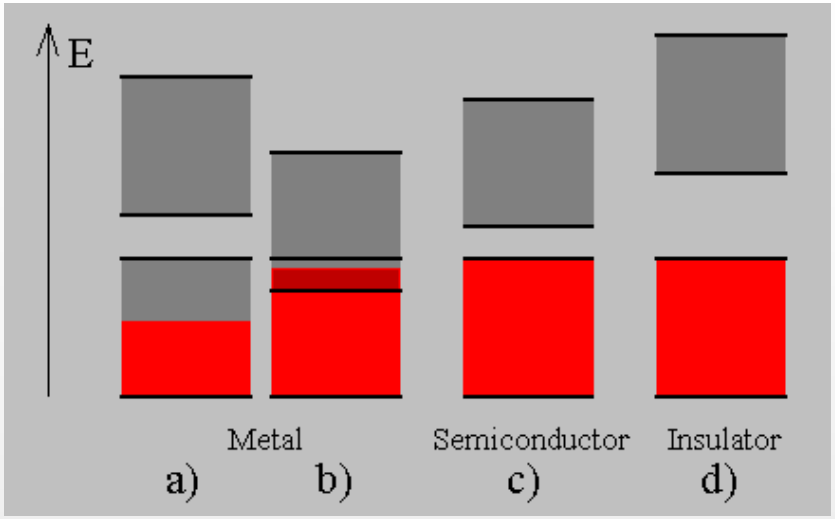


# BANDE DI ENERGIA ELETTRONICA (p.e. di silicio)




Quando N atomi di silicio isolati sono avvicinati fino a formare un cristallo con la struttura del diamante e con parametro reticolare a = 5.43 Å, ogni livello di energia atomico si divide in N livelli molto vicini che formano una banda. Su ogni levello, per il Principio di esclusione di Pauli, possono stare solo 2 elettroni con spin antiparalleli.

# STRUTTURA A BANDE DI ENERGIA NEI SOLIDI



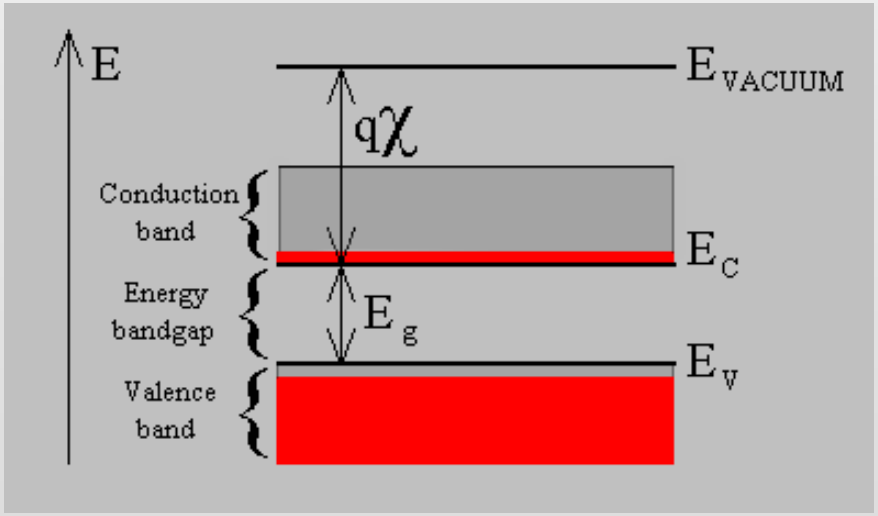

La banda ad energia più alta completamente occupata da elettroni è detta banda di valenza (VB); la banda immediatamente superiore, che è vuota (isolanti e semiconduttori) o parzialmente occupata (metalli) è detta banda di conduzione (CB).

La VB e la CB sono separate da un intervallo di energia proibita $E_g$, chiamato bandgap di energia.

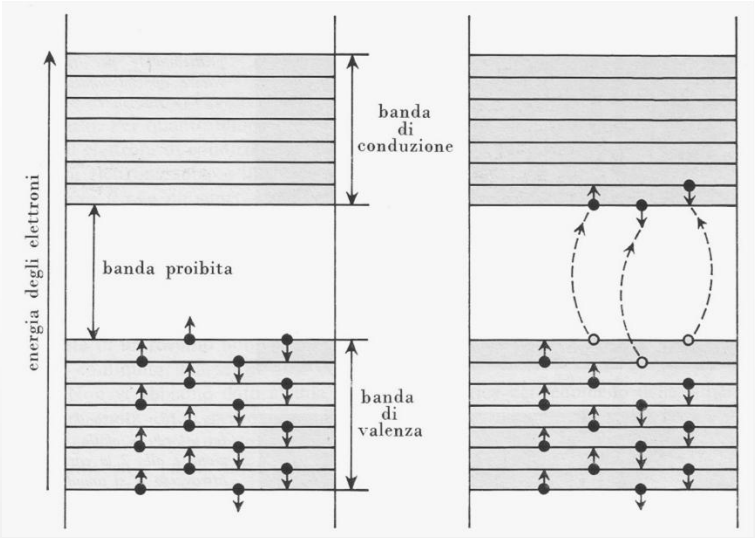
Materiali con $E_g \geq 3$ eV sono isolanti, quelli con $E_g < 3$ eV sono semiconduttori.

Isolanti e semiconduttori a T = 0 K non possono condurre elettricità.

In un semiconduttore a T > 0 K alcuni elettroni possono essere eccitati termicamente nella banda di conduzione vuota (*e.g.* in Si a RT $n = 10^{10}$ cm$^{-3}$) dove agiscono come portatori liberi. Le loro vacanze in banda di valenza si comportano come portatori liberi positivi (buche o lacune).

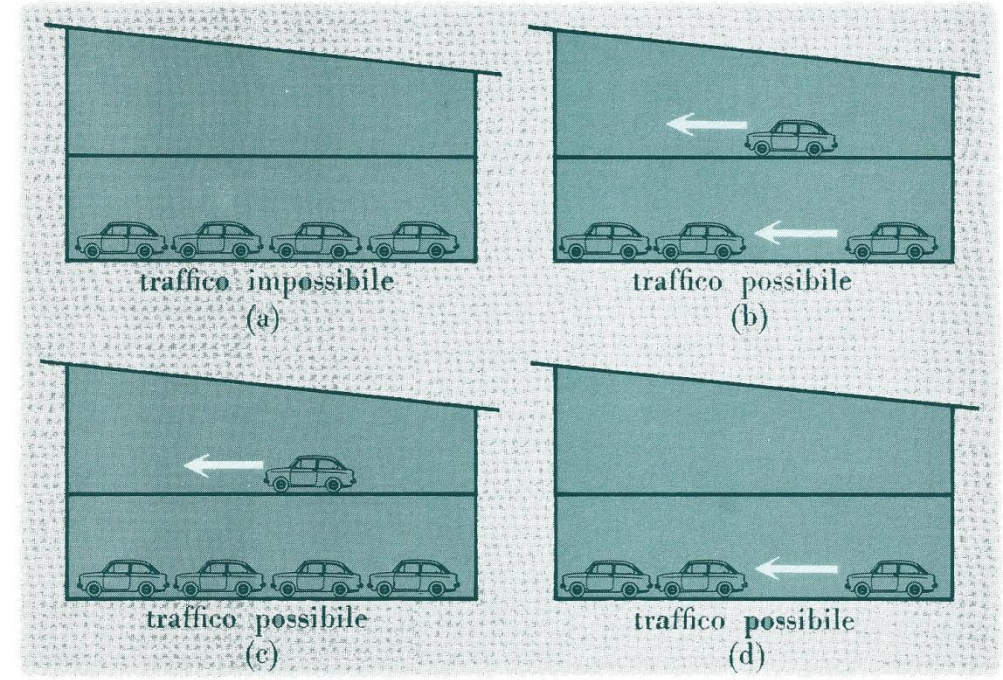


# DISTRIBUZIONE DEGLI ELETTRONI IN UN SEMICONDUTTORE

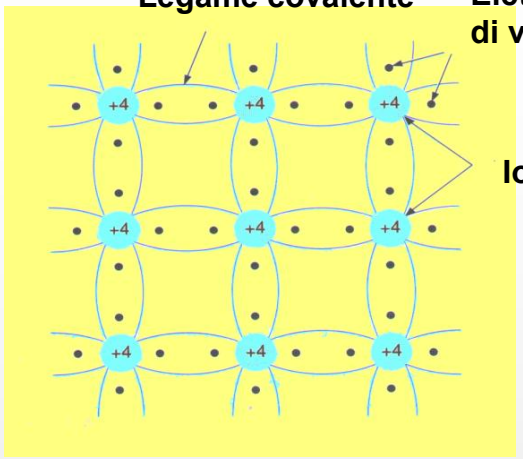



Bande di energia in un semiconduttore intrinseco. A temperature assolute molto basse tutti gli elettroni occupano i livelli in banda di valenza (2 elettroni con spin opposto su ciascun livello, per il *principio di esclusione di Pauli*). Aumentando la temperatura (o fornendo agli elettroni energia sufficiente, per es. mediante luce ➡ *effetto fotoconduttivo*) alcuni elettroni possono saltare in banda di conduzione, lasciando una "buca" in banda di valenza.

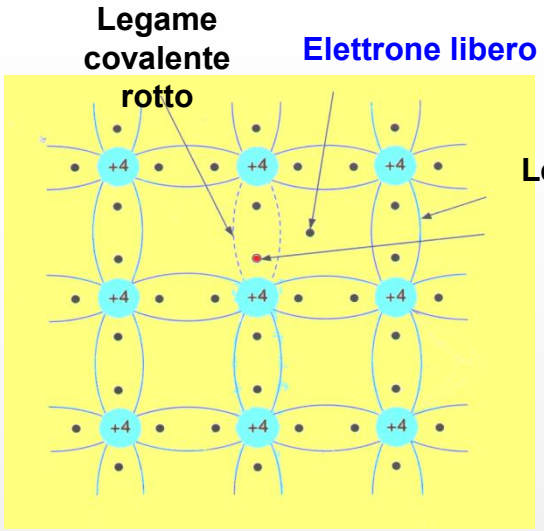
Il moto di deriva degli elettroni e delle buche in un semiconduttore è paragonabile a quello di automobili identiche in un'autorimessa a due piani (inferiore=banda di valenza; superiore= banda di conduzione).



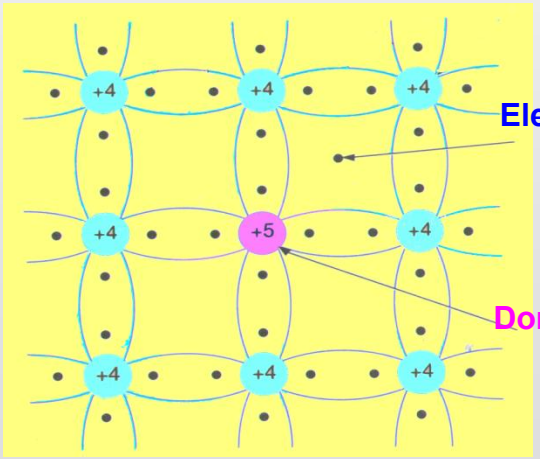
# SILICIO INTRINSECO E DROGATO



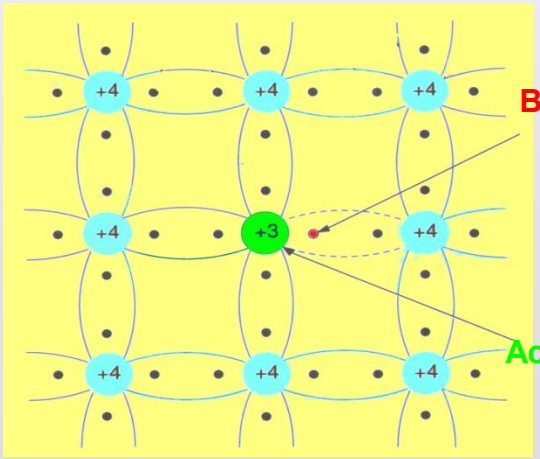

Rappresentazione bidimensionale di un cristallo di Si intrinseco




Si con un legame covalente rotto: si forma una coppia libera elettrone-buca ($n=p=10^{10}$ cm$^{-3}$ a RT)




Si con un atomo sostituito da un'impurezza pentavalente (P, As,) donatore: $n \cong N_D = 10^{17} \div 10^{20}$ cm$^{-3}$




Si con un atomo sostituito da una impurezza trivalente(B), accettore: $p \cong N_A = 10^{17} \div 10^{20}$ cm$^{-3}$

# CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI SEMICONDUTTORI

In un semiconduttore **intrinseco**

$p_i = n_i$

In un semiconduttore **estrinseco**

$n\,p = n_i\,p_i = n_i^2 = N_c\,N_v\,e^{-Eg/KT}$

**legge dell'azione di massa**

$N_{c(v)}$ densità effettiva di stati in CB (VB) $\propto T^{3/2}$

In generale per un semiconduttore

$j = q\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p)\,E = \sigma\,E$

$\sigma$ = conducibilità **ambipolare**
(cfr. soluzione elettrolitica)

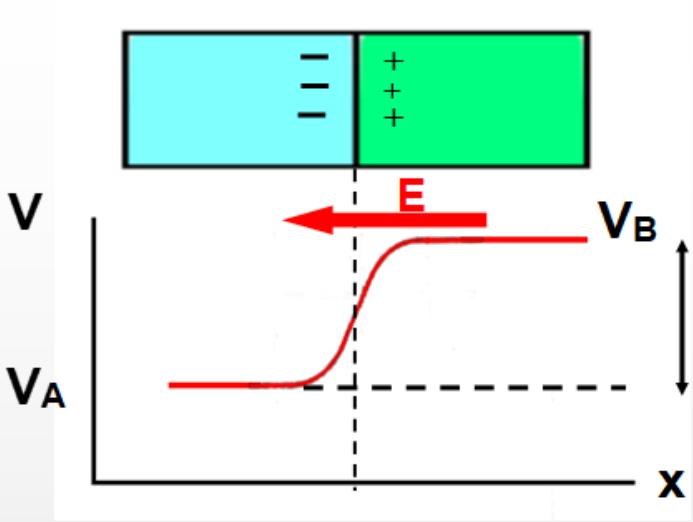
**Si** (T = 300 K) $\mu_n$ = 1500 $cm^2/(V\cdot s)$
$\mu_p$ = 475 $cm^2/(V\cdot s)$

**GaAs** (T=300 K) $\mu_n$ = 5000 $cm^2/(V\cdot s)$
$\mu_p$ = 400 $cm^2/(V\cdot s)$

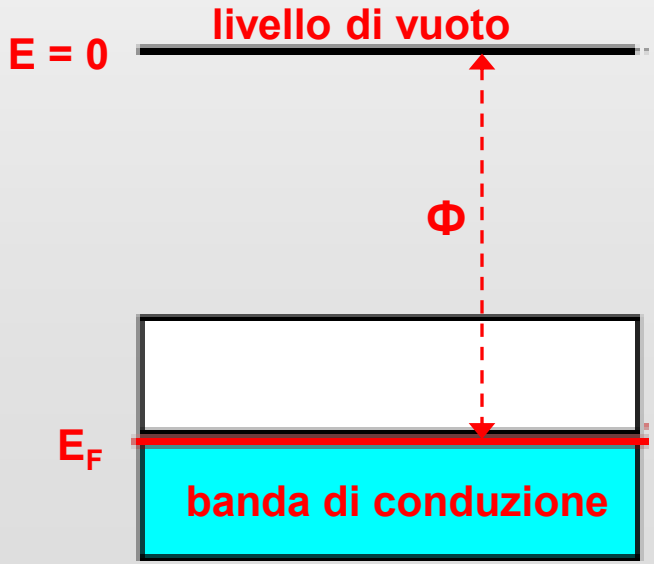
**Valori di $E_g$ , $N_c$, $N_v$ e $n_i$ a T = 300 K per alcuni semiconduttori**

| | C | Si | Ge | GaAs | InP |
|---|---|---|---|---|---|
| $E_g$ (eV) | 5.5 | 1.12 | 0.66 | 1.43 | 1.37 |
| $N_c$ ($cm^{-3}$) | | $2.9\times10^{19}$ | $1.04\times10^{19}$ | $4.4\times10^{17}$ | $5.4\times10^{17}$ |
| $N_v$ ($cm^{-3}$) | | $1.1\times10^{19}$ | $6.1\times10^{18}$ | $8.2\times10^{18}$ | $1.2\times10^{19}$ |
| $n_i$ ($cm^{-3}$) | ≈0 | $1.0\times10^{10}$ | $2.4\times10^{13}$ | $5.0\times10^{6}$ | $1.2\times10^{7}$ |

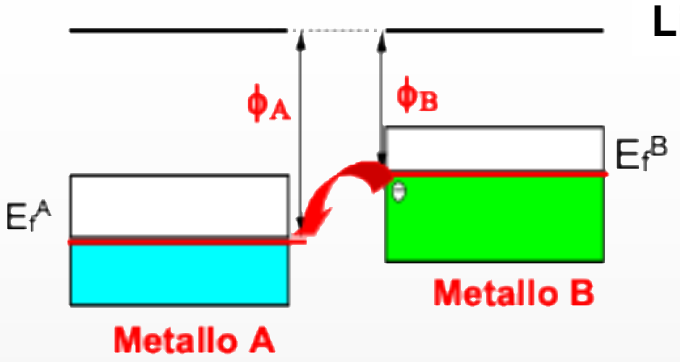
# Teoria microscopica dell'Effetto Volta nei metalli

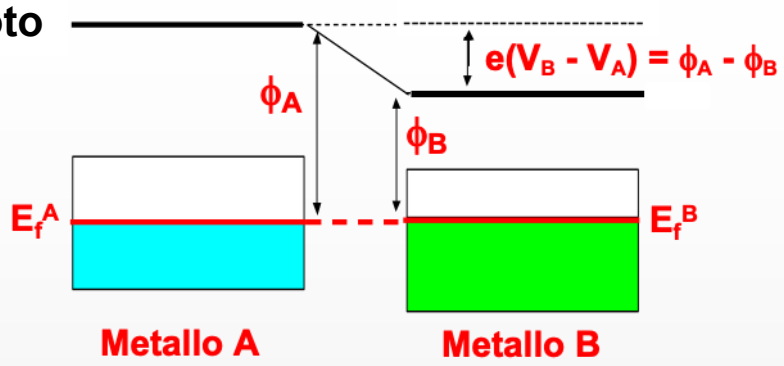



$V_B - V_A$ = differenza di potenziale di contatto




- $E_F$ è l'**energia di Fermi**, che in un metallo è il livello di energia massima occupato dagli elettroni in banda di conduzione, alla temperatura T ~ 0 .
- Dal punto di vista termodinamico la distanza fra $E_F$ **e il livello di vuoto E = 0** rappresenta la **variazione Φ** dell'energia libera del cristallo quando un elettrone è aggiunto o sottratto al metallo. **Φ** è chiamata **funzione lavoro**.
- In un sistema all'equilibrio elettrostatico $E_F$ è uniforme dappertutto.




Se l'energia di Fermi $E_f^A < E_f^B$ , per cui $\Phi_A > \Phi_B$ , si ha una diminuzione di energia quando alcuni elettroni fluiscono da **B** ad **A** .

Il metallo **A** si carica negativamente e **B** positivamente: si crea una *d.d.p.* $V_B - V_A > 0$ .
Il flusso di elettroni cessa quando si raggiunge l'equilibrio elettrostatico per cui

$$E_f^A = E_f^B \quad \text{e} \quad e(V_B - V_A) = \Phi_A - \Phi_B$$

La situazione rappresentata nelle figure è quella che si realizza, ad esempio, quando il metallo **A** è rame (**Cu**) e il metallo **B** è zinco (**Zn**).

Si può valutare l'ordine di grandezza dello spessore ***d*** del doppio strato in cui si crea la *d.d.p.* $\Delta V = V_B - V_A$ . **Ponendo :**

***n*** concentrazione di elettroni nei due metalli (supposta uguale),

$\sigma = e\, n\, d$ densità superficiale di cariche nel doppio strato;

$E = e\, n\, d / \varepsilon_0$ campo elettrico (teorema di Coulomb)

$\Delta V = E\, d = e\, n\, d^2 / \varepsilon_0 \rightarrow d = (\Delta V\, \varepsilon_0 / e\, n)^{1/2}$

ASSUMENDO $\Delta V = 1$ Volt , $n = 5 \times 1021$ cm$^{-3}$ si ottiene $d = 10^{-8}$ cm$^{-3} = 1$ Å

Gli elettroni attraversano la barriera per effetto tunnel.




Consideriamo la catena aperta di quattro metalli, tutti diversi, in condizioni di equilibrio elettrostatico: all'interfaccia di ogni coppia si crea una *d.d.p.* Volta. La *d.d.p.* $\Delta V$ fra il primo e l'ultimo metallo è:

$$\Delta V = (V_a - V_b) + (V_b - V_c) + (V_c - V_d) = V_a - V_d$$

Questa relazione è valida perché all'equilibrio il livello di Fermi $E_f$ è costante lungo tutta la catena

➔ $e(V_i - V_j) = \Phi_i - \Phi_j$ .

La relazione fra $\Delta V$ e $V_a - V_d$ costituisce la **2ª legge di Volta**. In particolare:

- in una catena chiusa, dove cioè il primo e l'ultimo metallo sono uguali, $\Delta V = 0$
- In una catena di coppie metalliche *tutte uguali* $\Delta V$ agli estremi è uguale a $\Delta V_{ij}$ di una singola coppia ➔impossibilità di una pila bimetallica.

**Tecniche sperimentali per misurare $\Delta V$ e la funzione lavoro $\Phi$**

**a)** Una tecnica attuale per misurare $\Delta V$ di una coppia di metalli viene effettuata sostituendo il condensatore di Volta con un condensatore vibrante (mediante cristalli piezoelettrici); la *d.d.p*. alternata fra le armature è inviata a un amplificatore operazionale, quindi a un elettrometro ad alta sensibilità.

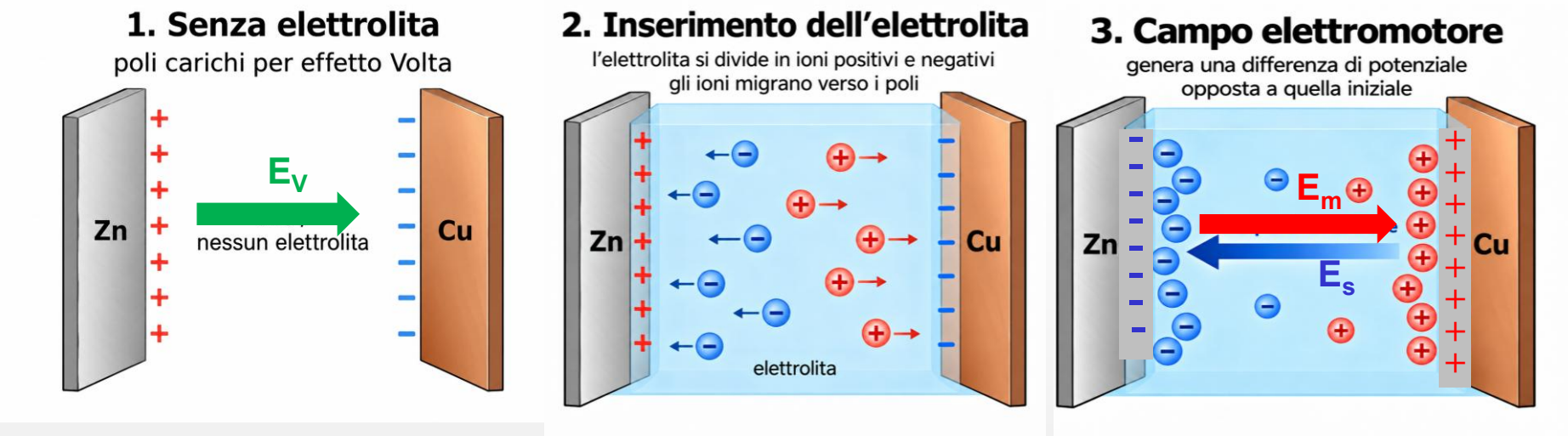
**b)** La tecnica più sensibile ed accurata per misurare la funzione lavoro $\Phi$ di un metallo è la spettroscopia di fotoemissione di elettronii (**PES**). Si fonda sull'effetto fotoelettrico perchè misura la soglia di emissione di elettroni da parte della superficie del metallo quando l'energia $h\nu$ dei fotoni monocromattici è uguale a $\Phi$.

Inoltre la PES misura l'energia di legame , l'intensità e la distribuzione angolare degli elettroni fotoemessi. E' tecnica fondamentale per studiare la struttura elettronica di solidi (bande di energia), liquidi, gas e molecole. Inoltre analizza le superfici dei cristalli non contaminate da ossidi, ioni e agenti atmosferici, perché avviene in ultra-alto vuoto.

| Elemento | φ (eV) | Elemento | φ (eV) | Elemento | φ (eV) | Elemento | φ (eV) | Elemento | φ (eV) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ag: | 4,26[19] | Al: | 4,28[19] | As: | 3,75 | Au: | 5,1-5,47 | B: | ~4,45 |
| Ba: | 2,52-2,7 | Be: | 4,98 | Bi: | 4,34 | C: | ~5 | Ca: | 2,87 |
| Cd: | 4,08 | Ce: | 2,9 | Co: | 5 | Cr: | 4,5 | Cs: | 2,14[19] |
| Cu: | 4,65[19] | Eu: | 2,5 | Fe: | 4,67-4,81 | Ga: | 4,32 | Gd: | 2,90 |
| Hf: | 3,9 | Hg: | 4,475 | In: | 4,09 | Ir: | 5,00-5,67 | K: | 2,30[19] |
| La: | 4 | Li: | 2,93 | Lu: | ~3,3 | Mg: | 3,66 | Mn: | 4,1 |
| Mo: | 4,36-4,95 | Na: | 2,36 | Nb: | 3,95-4,87 | Nd: | 3,2 | Ni: | 5,15[19] |
| Os: | 5,93 | Pb: | 4,25 | Pd: | 5,22-5,6 | Pt: | 5,12-5,93 | Rb: | 2,261 |
| Re: | 4,72 | Rh: | 4,98 | Ru: | 4,71 | Sb: | 4,55-4,7 | Sc: | 3,5 |
| Se: | 5,9 | Si: | 4,85[19] | Sm: | 2,7 | Sn: | 4,42 | Sr: | ~2,59 |
| Ta: | 4,00-4,80 | Tb: | 3,00 | Te: | 4,95 | Th: | 3,4 | Ti: | 4,33 |
| Tl: | ~3,84 | U: | 3,63-3,90 | V: | 4,3 | W: | 4,32-5,22 | Y: | 3,1 |
| Yb: | 2,60[20] | Zn: | 3,63-4,9 | Zr: | 4,05 | | | | |

Tabella con i valori dei lavori della **funzione lavoro** $\varphi$ di alcuni metalli. I valori sono indicativi perché variano a seconda dell'orientazione della struttura cristallina e della purezza del metallo e della superficie. *(CRC Handbook on Chemistry and Physics version 2008, p. 12-114)*

# Principi fisico-chimici della pila di Volta




- Fra i due **elettrodi** di rame (**Cu**) e zinco (**Zn**) per effetto Volta si crea una *d.d.p.* $\Delta V = V_{Zn} - V_{cu}$ e un campo elettrico $E_V$ (freccia verde) diretto da Zn a Cu.

- L'elettrolita è l'acido solforico $H_2SO_4$ , che si dissocia in ioni $H^{2+}$ e $SO_4^{2-}$ . Il campo $E_V$ muove gli ioni $SO_4^{2-}$ verso l' elettrodo Zn , dove avviene la **reazione chimica**

$$Zn + SO_4^{2-} = ZnSO_4 + 2e^-$$

per cui l'elettrodo **Zn** si carica **negativamente** con $2e^-$ , mentre $ZnSO_4$ va nella soluzione. Viceversa all'elettrodo Cu si ha

$$Cu + H^{2+} = Cu^{2+} + H_2$$

per cui l'elettrodo **Cu** si carica **positivamente** e si libera idrogeno molecolare.

- Queste reazioni provocano un cambiamento di polarità degli elettrodi, che è dovuta a un **campo elettromotore $E_m$** , **non conservativo** (freccia rossa). A circuito **aperto** si crea subito una ***d.d.p.*** $V_s$ e **un campo elettrostatico $E_s$** (freccia blu) che equilibra $E_m$ .

- Quando si connettono con un filo conduttore i due elettrodi, l'equilibrio elettrico è rotto e attraverso il circuito esterno fluiscono elettroni da Zn a Cu , cioè una **corrente** che **continua** finchè dura il processo elettro-chimico sopra descritto.

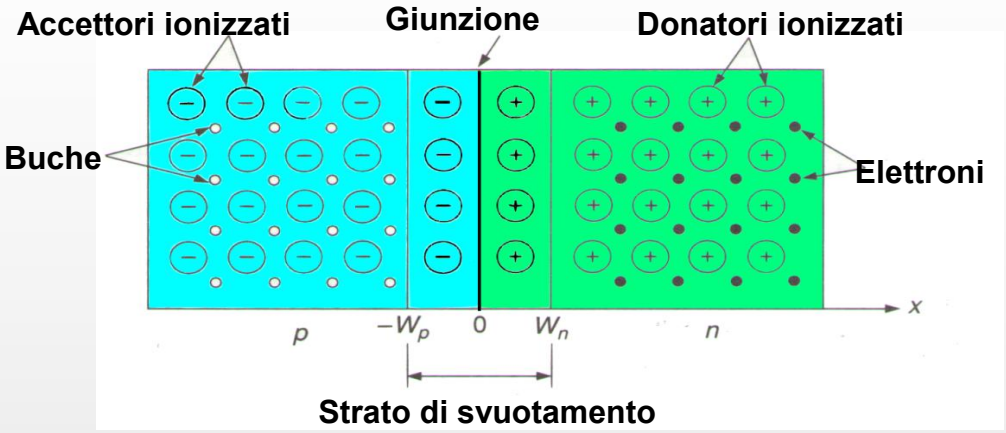
- Il processo si interrompe quando finisce l'elettrolita o gli elettrodi si modificano: in particolare, l'elettrodo di Zn si consuma, per la reazione chimica con l'elettrolita, mentre all'elettrodo di Cu l'idrogeno che si sviluppa in forma di bolle, genera man mano una patina isolante di bolle (polarizzazione dell'elettrodo) che rallenta, e infine impedisce lo scambio di ioni ed elettroni.

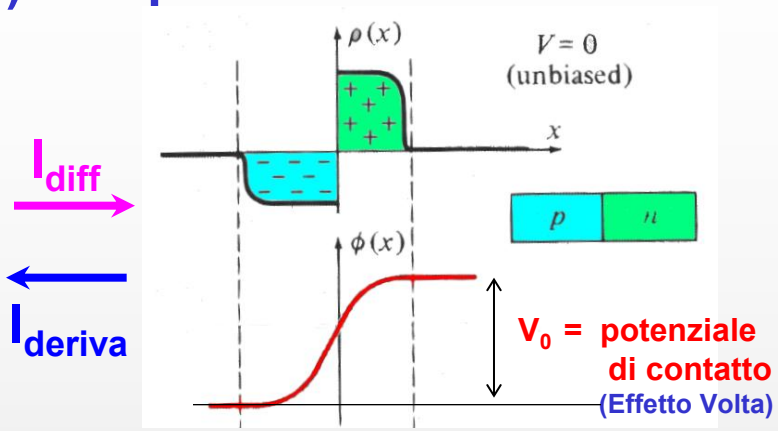
- L'energia che si sviluppa durante le **reazioni** fra imetalli e la soluzione è quella che consentie il flusso di una corrente continua. La **forza elettromotrice $f_{em}$** (energia/unità di carica) di ciascuna cella è **0,76 volt**, da moltiplicare per il numero di celle della pila. A circuito aperto, la *d.d.p.* misurata ai capi della pila è $V_s = f_{em}$ . A circuito chiuso, con resistenza ***R*** e corrente ***I*** , *la d.d.p.* **V** misurata **è** $V = I R = f_{em} - I r$ , dove ***r*** è la **resistenza interna** della pila.

*Del funzionamento della pila di Volta sono state fornite varie spiegazioni, oltre che dallo stesso Volta, da H. Davy (1826), M. Faraday (1835), lord Kelvin(1879), H. Helmholtz(1884), fino alla teoria di W.H. Nernst (1889), che per prima fornì una spiegazione sul meccanismo di produzione della forza elettromotrice in termini di tendenza di ogni metallo immerso in una soluzione elettrolitica a scambiare ioni con la soluzione; la teoria di Nernst è stata successivamente completata dalla piena comprensione dell'effetto Volta nell'ambito della teoria quantistica dei metalli.*

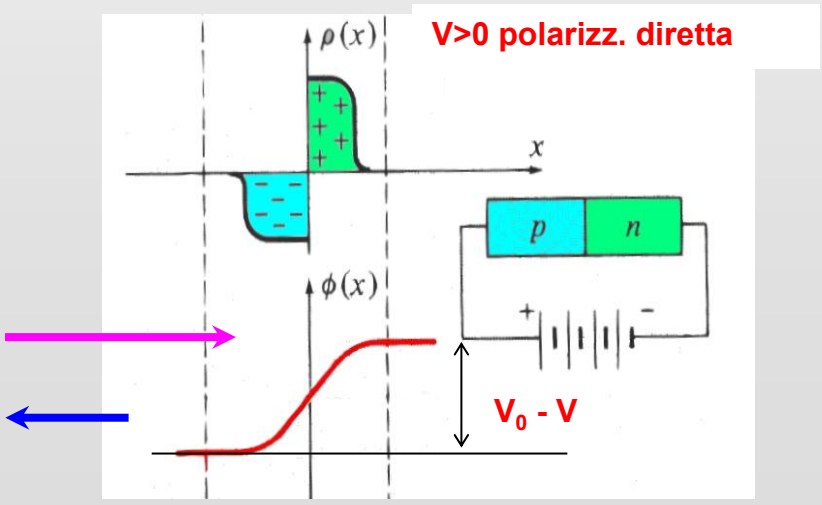
# Teoria microscopica dell'Effetto Volta nei semiconduttori

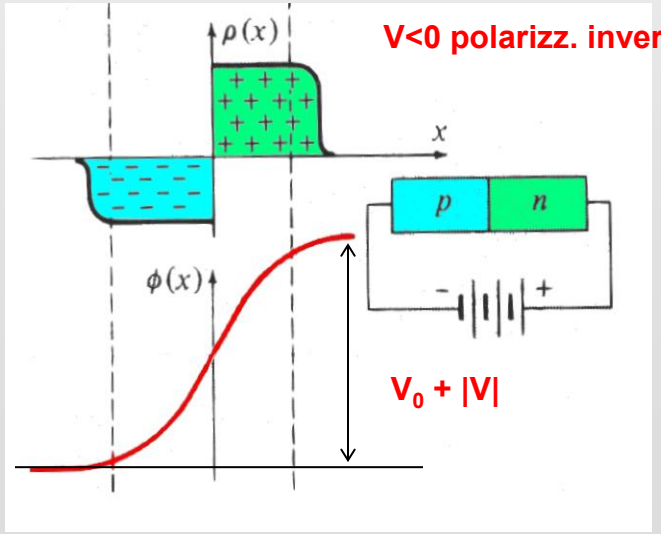
## GIUNZIONE *p-n* (DIODO) in equilibrio




## GIUNZIONE *p-n* polarizzata



# CARATTERISTICA I-V IN UNA GIUNZIONE *p-n*

All' equilibrio termodinamico (giunzione *p-n* non polarizzata), si ha

D= diffusione, S= deriva

$J^o_p = J^o_n = 0$ ⇒ per le lacune $J^o_p = J^o_{p,D} - J^o_{p,S} = 0$ (1)

Se il semiconduttore è *non degenere* vale la statistica di Boltzmann

$$J^o_{p,D} \propto e^{-qVo/kT} \quad (2)$$

Dalle (1) e (2) ⇒ $J^o_{p,S} = J^o_{p,D} \propto e^{-qVo/kT}$ (3)

Polarizzando la giunzione con una *d.d.p.* esterna V la barriera di potenziale diventa $V_o - V$, cioè si riduce per $V > 0$ (aumenta per $V < 0$). L'equilibrio termodinamico è rotto, però se si suppone che $V << V_o < E_G$, si può ancora applicare la statistica di Boltzmann (condizioni di quasi equilibrio) per cui

$$J_{p,D} \propto e^{-q(Vo-V)/kT} = J^o_{p,D}\, e^{qV/kT} = J^o_{p,S}\, e^{qV/kT} \quad (4)$$

Poichè la corrente di deriva $J_{p,S}$ non dipende praticamente dalla altezza della barriera di potenziale ➡

$$J_{p,S} \approx J^{o}_{p,S} \qquad (5)$$

La corrente totale $J_p$ di lacune per le (4) e (5) è

$$J_p = J_{p,D} - J_{p,S} = J^{o}_{p,S}\,(e^{qV/kT} - 1) \qquad (6)$$

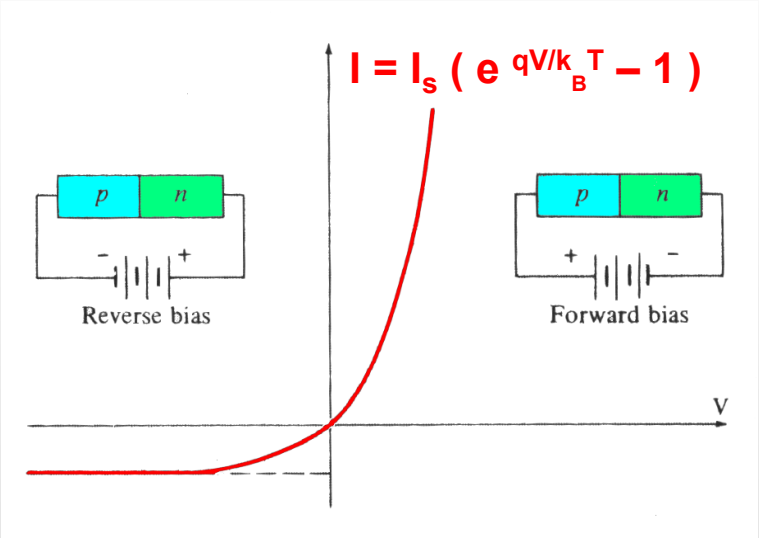
La stessa analisi si applica alle componenti $J_{n,D}$ e $J_{n,S}$ della corrente $J_n$ trasportata da elettroni, che è equiversa a $J_p$ , per cui la densità di corrente totale attraverso la giunzione è:

$$J = J_p + J_n = (J^{o}_{p,S} + J^{o}_{n,S})\,(e^{qV/kT} - 1) = J^{o}_{S}\,(e^{qV/kT} - 1) \qquad (7)$$

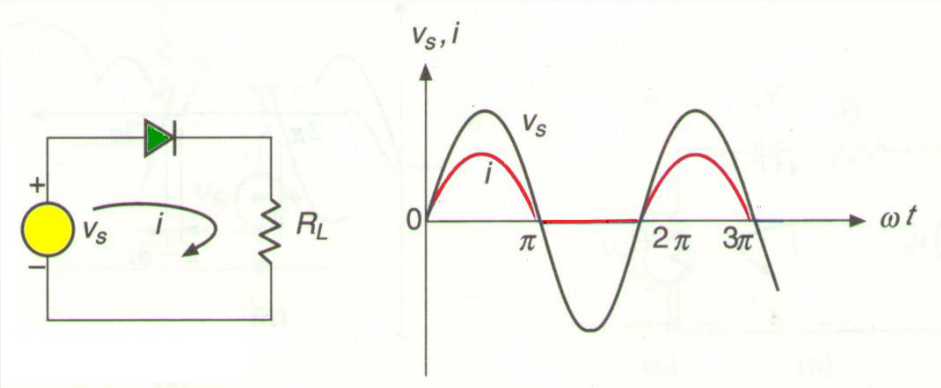
La densità di corrente $J^{o}_{S}$ viene detta *corrente di saturazione*. Utilizzando le relazioni che regolano i processi di diffusione e la continuità della corrente all'interfaccia, e supponendo di trascurare nella regione di svuotamento (larga W) la ricombinazione fra gli elettroni e le lacune che diffondono in versi opposti (il che implica W << L, lunghezza di diffusione), si può dimostrare che

$$J^{o}_{p,S} = L_p p_{on}/\tau_p = D_p p_{on}/L_p \qquad J^{o}_{n,S} = L_n n_{op}/\tau_n = D_n n_{op}/L_n \qquad (8)$$

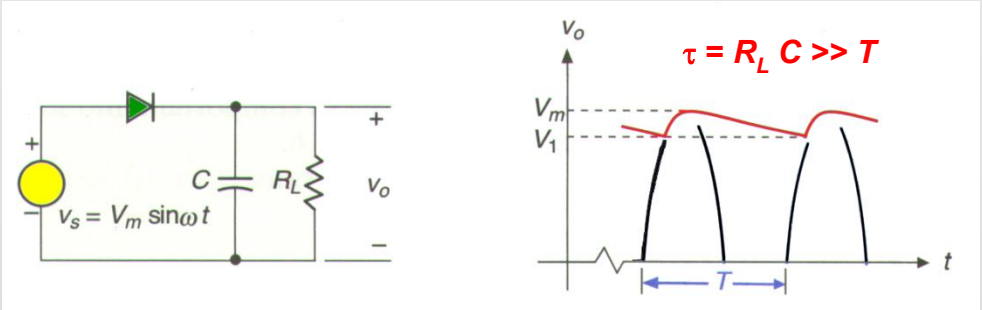
# Caratteristica Corrente (I) – Voltaggio (V) di un diodo *p-n*




## Rettificatore a mezz'onda




## Rettificatore con un condensatore di filtro



# The Transistor (Phys. Rev. 74, 230 ,1948)



to have a positive $dn/dT$ and is considered to have large homopolar bonding, similar reasoning predicts that $dn/d\rho$ is positive; i.e., $\lambda_\rho > 1$. In crystals containing radicals and in many glasses, positive $dn/dT$ values are frequently obtained although their $dn/d\rho$ values are negative. In these materials there are effects within the radical which contribute mainly to $dn/dT$ and only slightly to $dn/d\rho$. A more complete treatment of these subjects will be presented in a forthcoming paper.

[1] H. Mueller, Phys. Rev. **47**, 947 (1935).
[2] Burstein, Smith, and Henvis, Bull. Am. Phys. Soc. **23** (2), 33 (1948).
[3] G. N. Ramachandran, Proc. Ind. Acad. Sci. **A25**, 266 (1947).
[4] S. Bhagavantam and S. Suryanarayana, Proc. Ind. Acad. Sci. **A26**, 97 (1947).
[5] C. D. West and J. Makas, Chem. Phys. **16**, 427 (1948) reported $+(\rho_{11}-\rho_{12})$ for two mixed thallium halides in agreement with our results. Their data also gives a $+(\rho_{11}-\rho_{12})$ and $-\rho_{44}$ for AgCl in agreement with Mueller's prediction for NaCl structures with small ratio of negative to positive ion polarizibilities. We do not agree with West and Makas concerning the sign of the diamond constants and believe them to be correct as given by Ramachandran.[3]

## The Transistor, A Semi-Conductor Triode

J. Bardeen and W. H. Brattain
*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*
June 25, 1948

A THREE-ELEMENT electronic device which utilizes a newly discovered principle involving a semiconductor as the basic element is described. It may be employed as an amplifier, oscillator, and for other purposes for which vacuum tubes are ordinarily used. The device consists of three electrodes placed on a block of germanium[1] as shown schematically in Fig. 1. Two, called the emitter and collector, are of the point-contact rectifier type and are placed in close proximity (separation ~.005 to .025 cm) on the upper surface. The third is a large area low resistance contact on the base.

The germanium is prepared in the same way as that used for high back-voltage rectifiers.[2] In this form it is an $N$-type or excess semi-conductor with a resistivity of the order of 10 ohm cm. In the original studies, the upper surface was subjected to an additional anodic oxidation in a glycol borate solution[3] after it had been ground and etched in the usual way. The oxide is washed off and plays no direct role. It has since been found that other surface treatments are equally effective. Both tungsten and phosphor bronze points have been used. The collector point may be electrically formed by passing large currents in the reverse direction.

Each point, when connected separately with the base electrode, has characteristics similar to those of the high

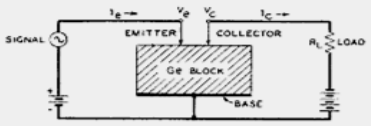


FIG. 1. Schematic of semi-conductor triode.

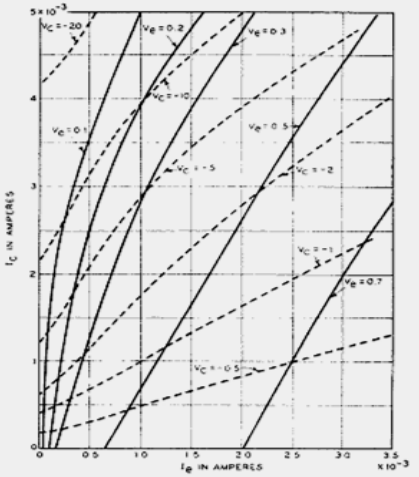


FIG. 2. d.c. characteristics of an experimental semi-conductor triode. The currents and voltages are as indicated in Fig. 1.

back-voltage rectifier. Of critical importance for the operation of the device is the nature of the current in the forward direction. We believe, for reasons discussed in detail in the accompanying letter,[4] that there is a thin layer next to the surface of $P$-type (defect) conductivity. As a result, the current in the forward direction with respect to the block is composed in large part of holes, i.e., of carriers of sign opposite to those normally in excess in the body of the block.

When the two point contacts are placed close together on the surface and d.c. bias potentials are applied, there is a mutual influence which makes it possible to use the device to amplify a.c. signals. A circuit by which this may be accomplished in shown in Fig. 1. There is a small forward (positive) bias on the emitter, which causes a current of a few milliamperes to flow into the surface. A reverse (negative) bias is applied to the collector, large enough to make the collector current of the same order or greater than the emitter current. The sign of the collector bias is such as to attract the holes which flow from the emitter so that a large part of the emitter current flows to and enters the collector. While the collector has a high impedance for flow of electrons into the semi-conductor, there is little impediment to the flow of holes into the point. If now the emitter current is varied by a signal voltage, there will be a corresponding variation in collector current. It has been found that the flow of holes from the emitter into the collector may alter the normal current flow from the base to the collector in such a way that the change in collector current is larger than the change in emitter current. Furthermore, the collector, being operated in the reverse direction as a rectifier, has a high impedance ($10^4$ to $10^5$ ohms) and may be matched to a high impedance load. A large ratio of output to input voltage, of the same order as the ratio of the reverse to the forward impedance of the point, is obtained. There is a corresponding power amplification of the input signal.

The d.c. characteristics of a typical experimental unit are shown in Fig. 2. There are four variables, two currents and two voltages, with a functional relation between them. If two are specified the other two are determined. In the plot of Fig. 2 the emitter and collector currents $I_e$ and $I_c$ are taken as the independent variables and the corresponding voltages, $V_e$ and $V_c$, measured relative to the base electrode, as the dependent variables. The conventional directions for the currents are as shown in Fig. 1. In normal operation, $I_c$, $I_c$, and $V_e$ are positive, and $V_c$ is negative.

The emitter current, $I_e$, is simply related to $V_e$ and $I_c$. To a close approximation:

$$I_e = f(V_e + R_P I_c), \qquad (1)$$

where $R_P$ is a constant independent of bias. The interpretation is that the collector current lowers the potential of the surface in the vicinity of the emitter by $R_P I_c$, and thus increases the effective bias voltage on the emitter by an equivalent amount. The term $R_P I_c$ represents a positive feedback, which under some operating conditions is sufficient to cause instability.

The current amplification factor $\alpha$ is defined as

$$\alpha = (\partial I_c/\partial I_e)_{V_c = \text{const.}}$$

This factor depends on the operating biases. For the unit shown in Fig. 2, $\alpha$ lies between one and two if $V_c < -2$.

Using the circuit of Fig. 1, power gains of over 20 db have been obtained. Units have been operated as amplifiers at frequencies up to 10 megacycles.

We wish to acknowledge our debt to W. Shockley for initiating and directing the research program that led to the discovery on which this development is based. We are also indebted to many other of our colleagues at these Laboratories for material assistance and valuable suggestions.

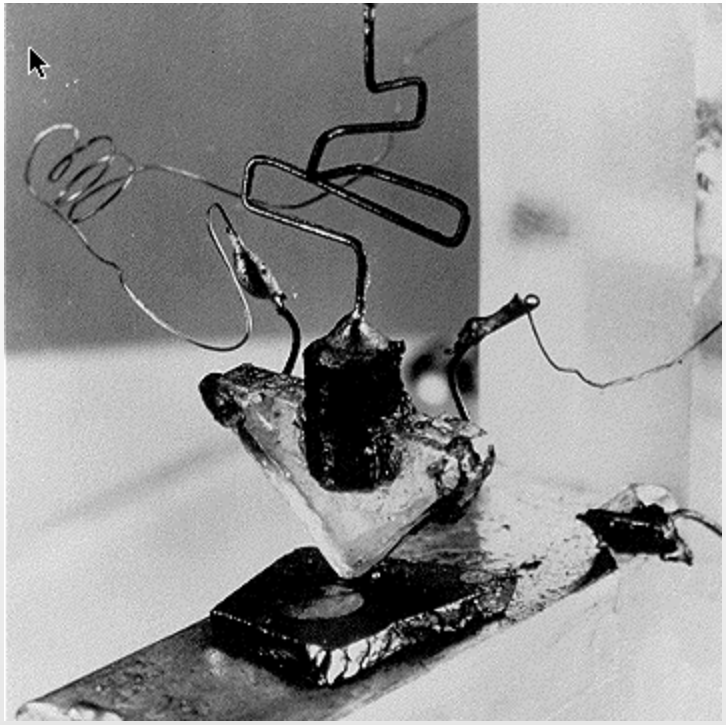
[1] While the effect has been found with both silicon and germanium, we describe only the use of the latter.
[2] The germanium was furnished by J. H. Scaff and H. C. Theuerer. For methods of preparation and information on the rectifier, see H. C. Torrey and C. A. Whitmer, *Crystal Rectifiers* (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, New York, 1948), Chap. 12.
[3] This surface treatment is due to R. B. Gibney, formerly of Bell Telephone Laboratories, now at Los Alamos Scientific Laboratory.
[4] W. H. Brattain and J. Bardeen, Phys. Rev., this issue.

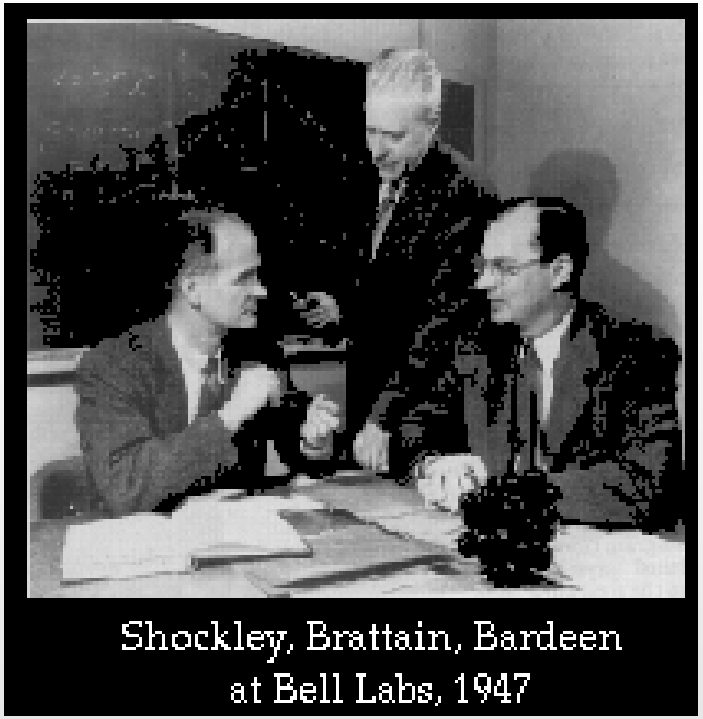
## Nature of the Forward Current in Germanium Point Contacts

W. H. Brattain and J. Bardeen
*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*
June 25, 1948

THE forward current in germanium high back-voltage rectifiers[1] is much larger than that estimated from the formula for the spreading resistance, $R_s$, in a medium

# Il primo Transistor a contatto di punto





Shockley, Brattain, Bardeen
at Bell Labs, 1947

**Shockley, Brattain e Bardeen nel 1956 furono insigniti del Premio Nobel per la Fisica per le loro ricerche sui semiconduttori e per la scoperta dell'effetto transistor (1948)**

# ERA DEL TRANSISTOR (2ª rivoluzione industriale)

**1948** – **Brattain e Bardeen** (Bell. Tel.) realizzano il transistor a germanio a punto di contatto. **Shockley**, il capogruppo, propone il transistor a giunzione (**BJT**) e ne sviluppa la teoria

**1951** – Transistor messi in commercio dalla Bell Telephone

**1954** – Transistor al silicio (Texas)

**1958** – **Kilby** (Texas) concepisce l'idea del circuito monolitico, realizzato nel 1959, chiamato poi **circuito integrato (IC)**

**1958** – **Hoerni** (Fairchild) realizza il transistor planare mediante litografia e diffusione

**1961** – Fairchild e Texas commercializzano IC

**1960** – **Atalla** e **Kahng** (Bell Tel.) realizzano il **MOSFET** (ideato negli anni '30 da **Lilienfield**), che consente maggiori densità e velocità (moto di deriva dei portatori di maggioranza) del BJT

**1965** – Primo **amplificatore operazionale** integrato

**1980** – Tecnologia **CMOS**

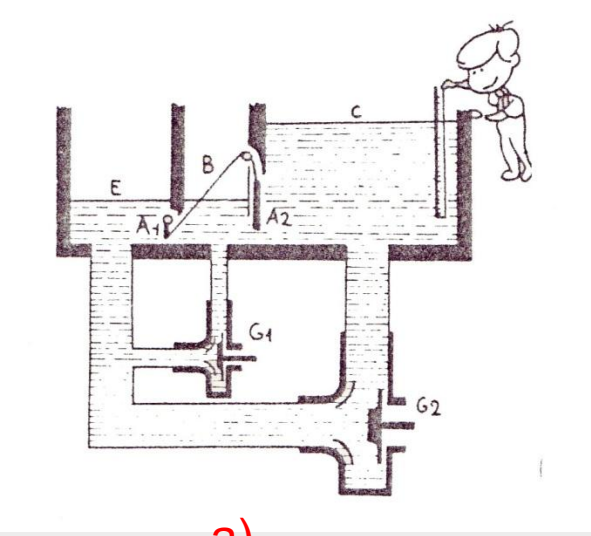
## FUNZIONI DEL TRANSISTOR

- **Amplificatore**
- **Generatore in continua** (raddrizzatore): converte $V_{ac}$ ➡ $V_dc$
- **Oscillatore** (fino a 100 GHz): converte $V_{dc}$ ➡ $V_ac$
- **Modulatore**: somma 2 segnali a.c. che possono essere quindi separati dopo invio a grandi distanze
- **Commutatore o interruttore**: commuta l'uscita su due possibili posizioni stabili (ON/OFF) in risposta a un segnale di ingresso (circuiti logici, memorie, …)

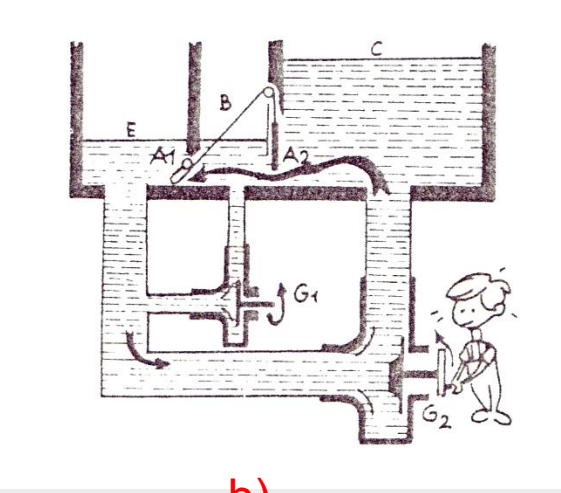
## VANTAGGI DEL TRANSISTOR (SUL TRIODO)

- **Minor consumo di energia** ( ➡ minore T)
- **Minori tensioni di alimentazione** ( ~ Volt)
- **Compattezza e robustezza** (resistenza a urti e accelerazioni fino a ~ $10^3$ g)
- **Elevata affidabilità e durata** ( > $10^5$ h)
- **Dimensioni ridotte** ➡ riduzione ingombri, costi dei materiali, $\tau$ di propagazione dei segnali

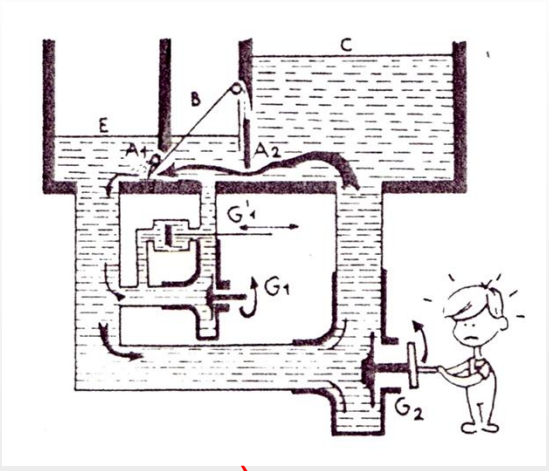
# Modello idraulico del transistor BJT




a)




b)




c)

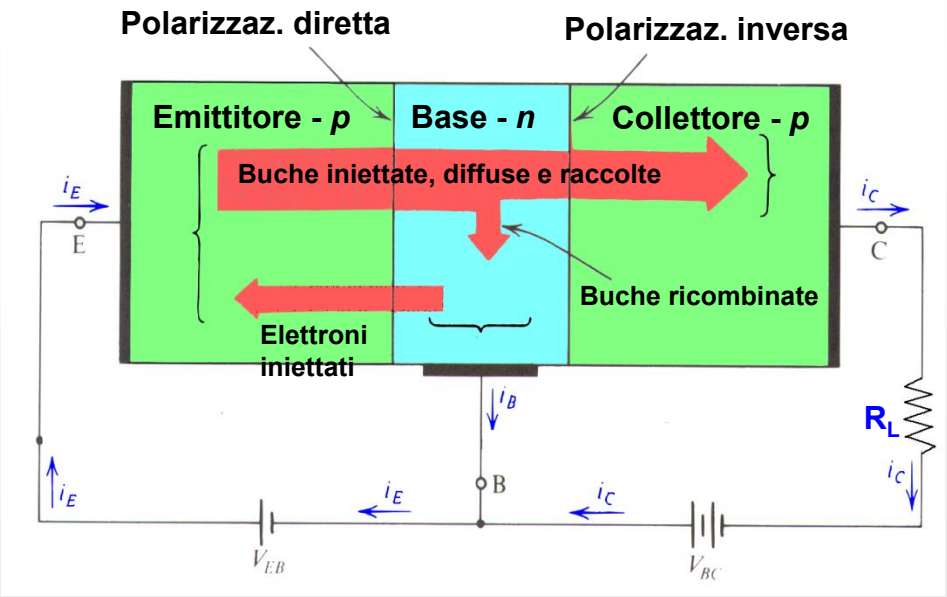
a) Se la pompa $G_1$ non gira ➡ la paratia $A_1$ è chiusa ➡ è chiusa anche la paratia $A_2$ ➡ non circola acqua da C a E anche se gira $G_2$

b) Se girano $G_1$ e $G_2$, circola acqua sia da B a E sia da C a E, con $I_{BE} << I_{CE}$ (cioè il flusso di una piccola corrente controlla il flusso di una corrente molto maggiore)

c) Se oltre alla pompa $G_1$ si inserisce anche una pompa alternata $G_1$' ➡ la corrente alternata $i_{BE}$ provoca una corrente alternata $i_{CE}$, molto maggiore ma con la stessa frequenza ➡

**amplificazione della corrente** (non dell'energia, che viene fornita sempre dalle pompe)

# TRANSISTOR BIPOLARE A GIUNZIONE (BJT)




Il **BJT** consiste di tre regioni di semiconduttori: l'**emettitore** (**p**-tipo), la **base** (**n**) e il **collettore** (**p**). Esso è detto transistor ***pnp*** ; il duale è il transistor ***npn*** .

Il **BJT** quindi consiste di due giunzioni ***p-n*** in serie, ma con versi opposti, con in comune la regione di base **molto sottile** (rispetto alla lunghezza di diffusione delle buche).

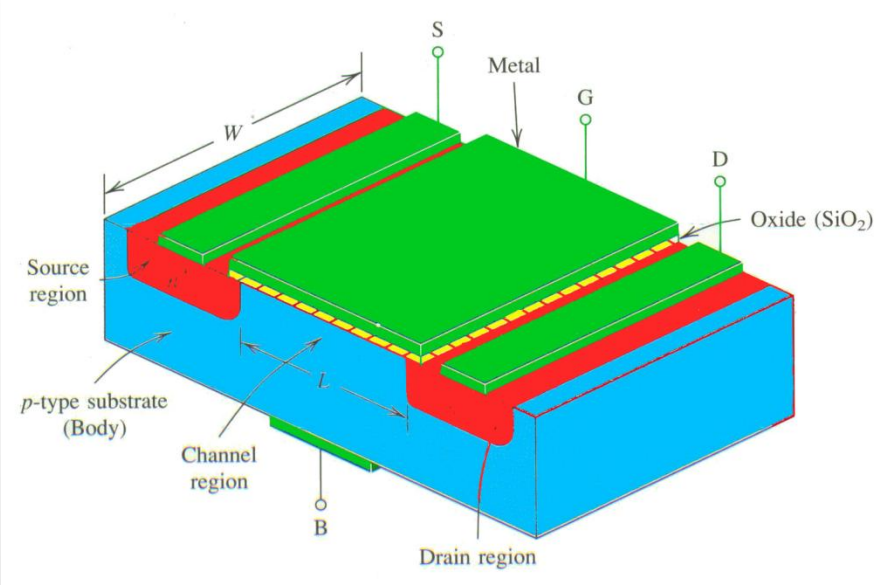
- **La polarizzazione (diretta o inversa) di ciascuna giunzione determina diversi modi di operazione del BJT: nel modo di amplificazione la giunzione E-B è polarizzata direttamente mentre quella C-B è polarizzata inversamente.**
- **Un gran numero di buche diffonde da E a B: una piccola frazione di esse si ricombina con elettroni in B, ma la stragrande maggioranza, grazie al sottile spessore di B, raggiunge la regione di svuotamento alla giunzione C-B e viene attratta dal voltaggio negativo entro il collettore C →**

$$i_E \approx i_C >> i_B \qquad (\text{con } i_E = i_C + i_B)$$

- **In tal modo una grande corrente è trasferita da una regione con bassa resistenza (giunzione E-B polarizzata direttamente) a una regione con alta resistenza (giunzione C-B polarizzata inversamente) → TRANSISTOR = TRANSfer of resISTOR.**
- **La modulazione della corrente $i_B$ o della tensione $V_{EB}$ produce una modulazione simile, ma di ampiezza molto maggiore, della corrente $i_C$ o della tensione $V_R$ sulla resistenza di carico $R_L$, cioè amplificazione.**

# TRANSISTOR A EFFETTO DI CAMPO METALLO-OSSIDO-SEMICONDUTTORE

(MOSFET, *Atalla* and *Kahng*, 1960)




**Struttura fisica di un MOSFET**:

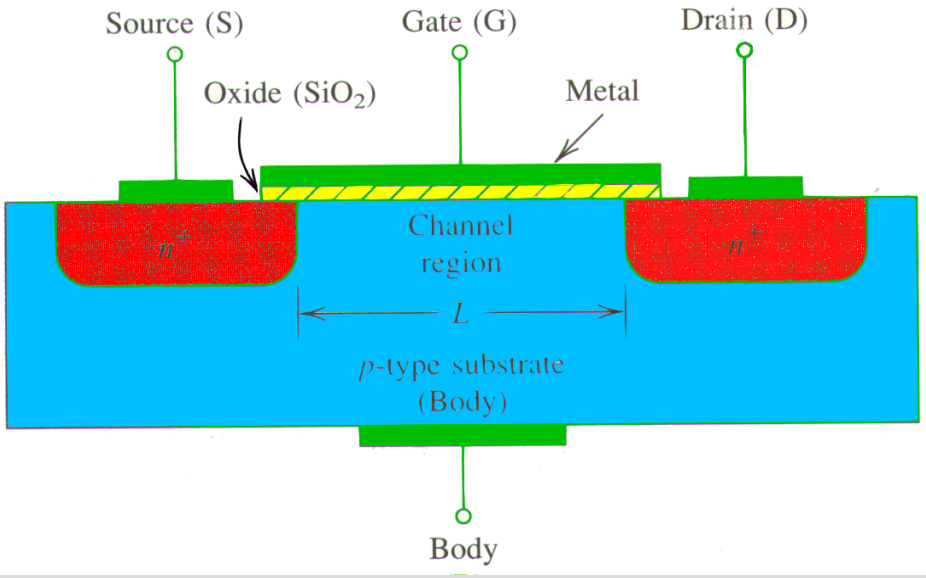
**L = 0.1 - 1 μm, W = 0.2 - 50 μm e spessore dell'ossido < 0.1 μm.**

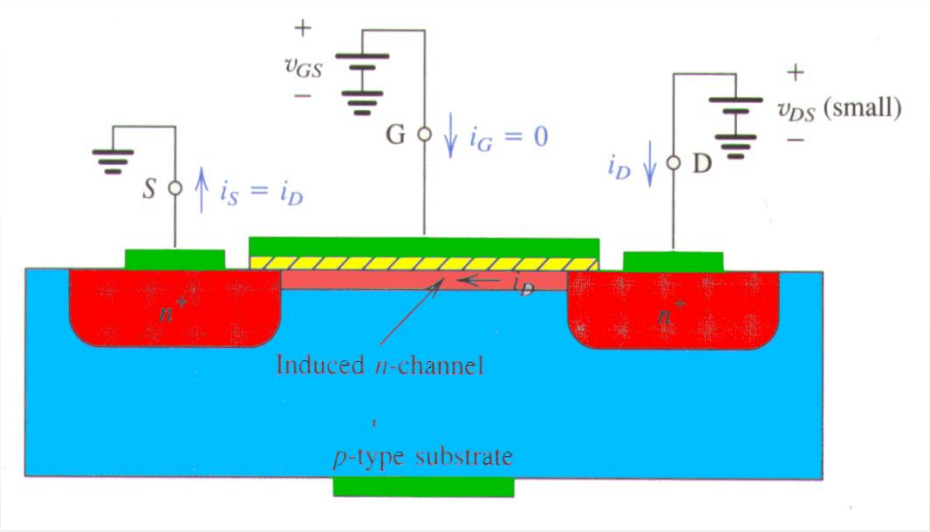
**3 regioni: sorgente (S), canale (C) pozzo (D) , rispettivamente con drogaggio $n^+$, $p$, $n^+$**

## Sezione trasversale di un MOSFET

**La corrente che fluisce nella regione di canale L tra la sorgente S e il pozzo D viene controllata da un elettrodo di metallo, detto porta (G), mediante effetto di campo elettrico (induzione elettrostatica).**

**Quando G non è polarizzato, tra S e D ci sono due giunzioni *p-n* in serie, ma opposte, che impediscono la conduzione di corrente tra S e D quando viene applicata una *d.d.p.* $V_{DS}$ .**






Quando un voltaggio positivo è applicato all'elettrodo di porta (G), per induzione elettrostatica si forma un canale di tipo *n* in cima al substrato, appena sotto G.

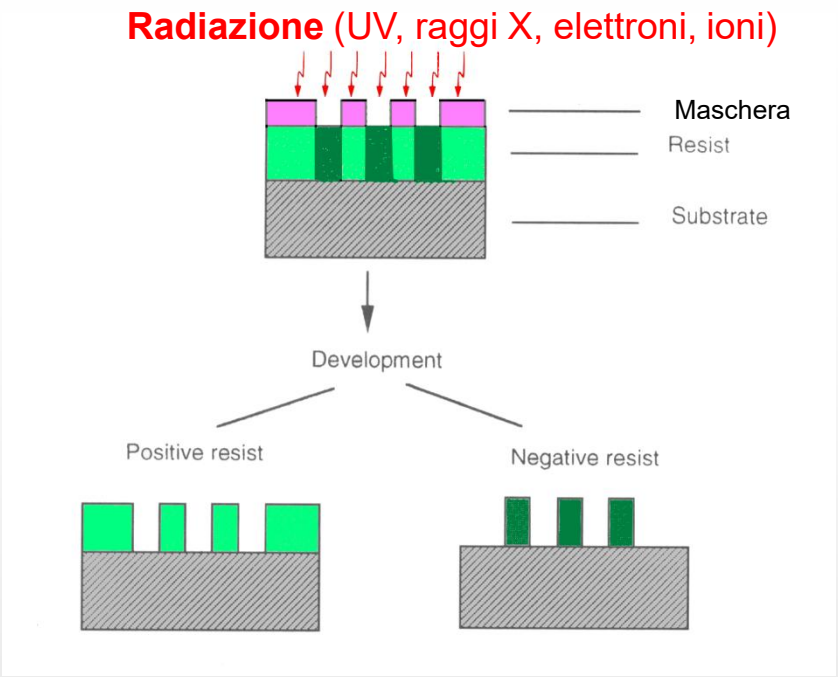
Il canale indotto di tipo *n* permette che al suo interno fluisca una corrente di deriva diretta da D a S quando viene applicata una *d.d.p* esterna $V_{DS} > 0$.

**Il FET è un transistor unipolare: solo le cariche libere di maggioranza (nel caso attuale gli elettroni) sono i portatori della corrente di deriva.**

Analogamente al BJT, il the FET può essere utilizzato sia come **amplificatore** sia come **interruttore** ; inoltre può funzionare come **resistore** o **condensatore**. Rispetto al BJT occupa un'area minore su un chip per IC, è più veloce, dissipa meno potenza, anche se il processo di fabbricazione è più complesso (più di 400 passi di processo).

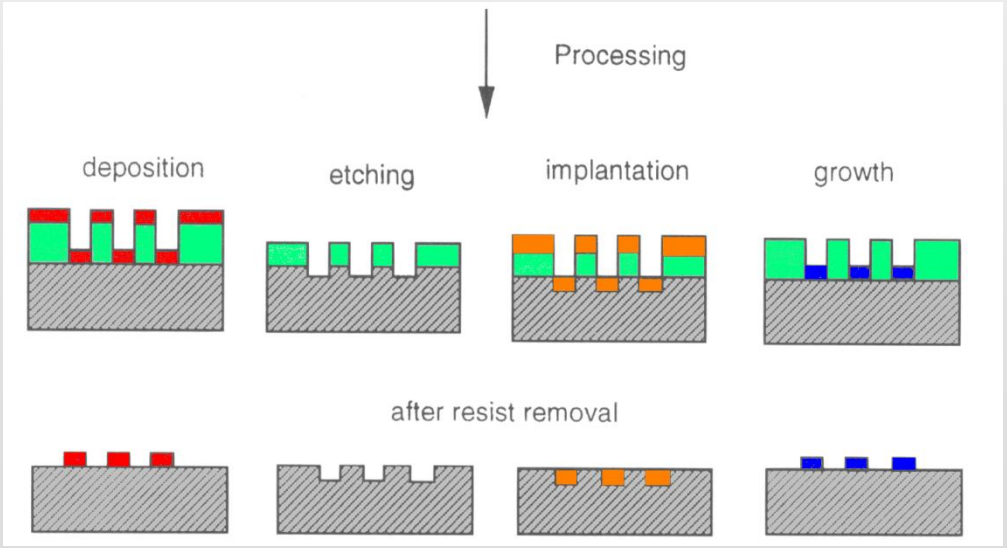
**Il MOSFET è il dispositivo più utilizzato nei circuiti integrati (IC) per microelettronica**

# LITOGRAFIA PER PROCESSI PLANARI




Il substrato è ricoperto da un film sottile (**resist**) sensibile alla radiazione, che colpisce il resist attraverso una **maschera** e ne modifica le proprietà fisico-chimiche

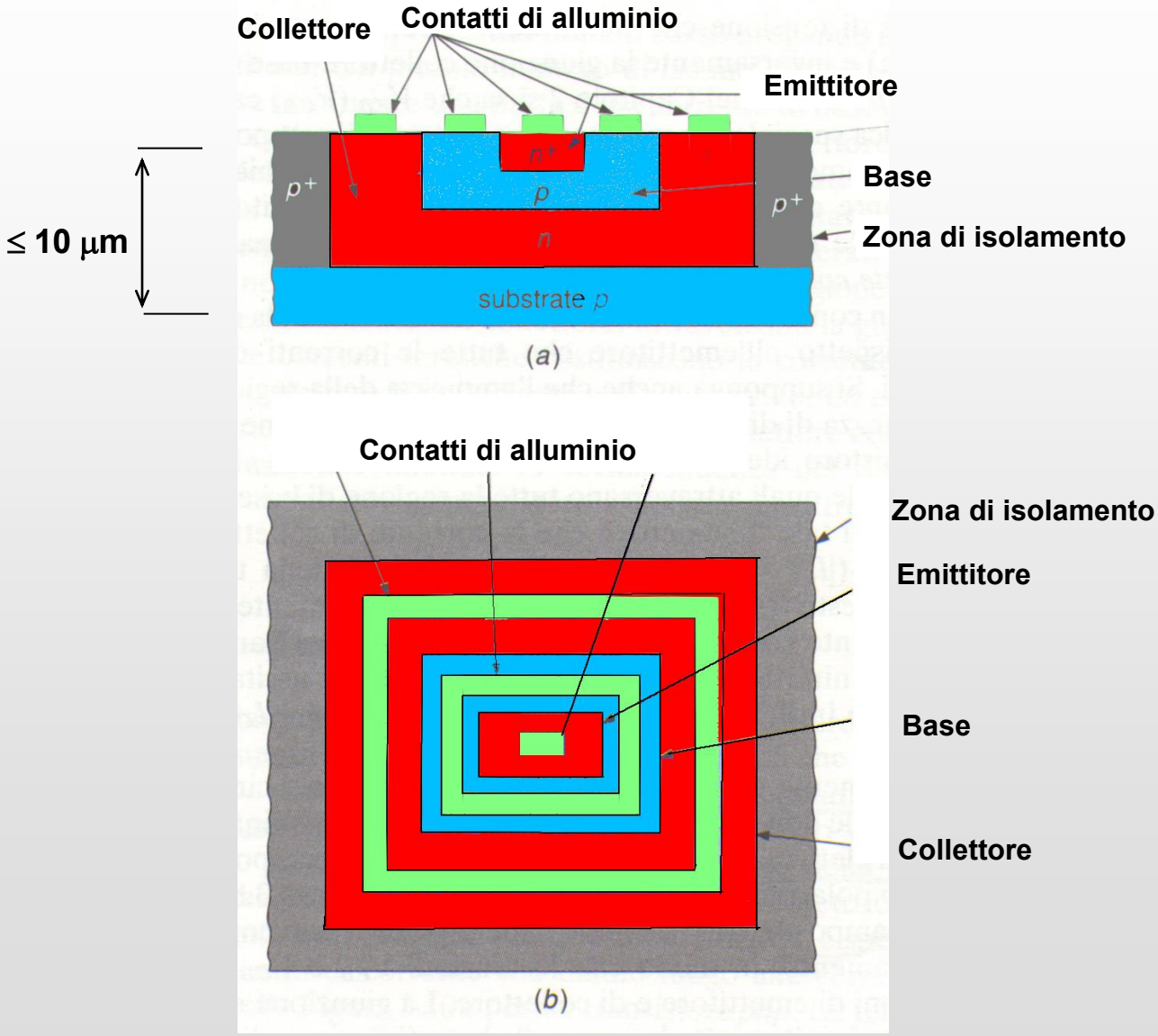
Mediante lo **sviluppo** il motivo (in positivo o in negativo) della maschera viene riprodotto sul resist



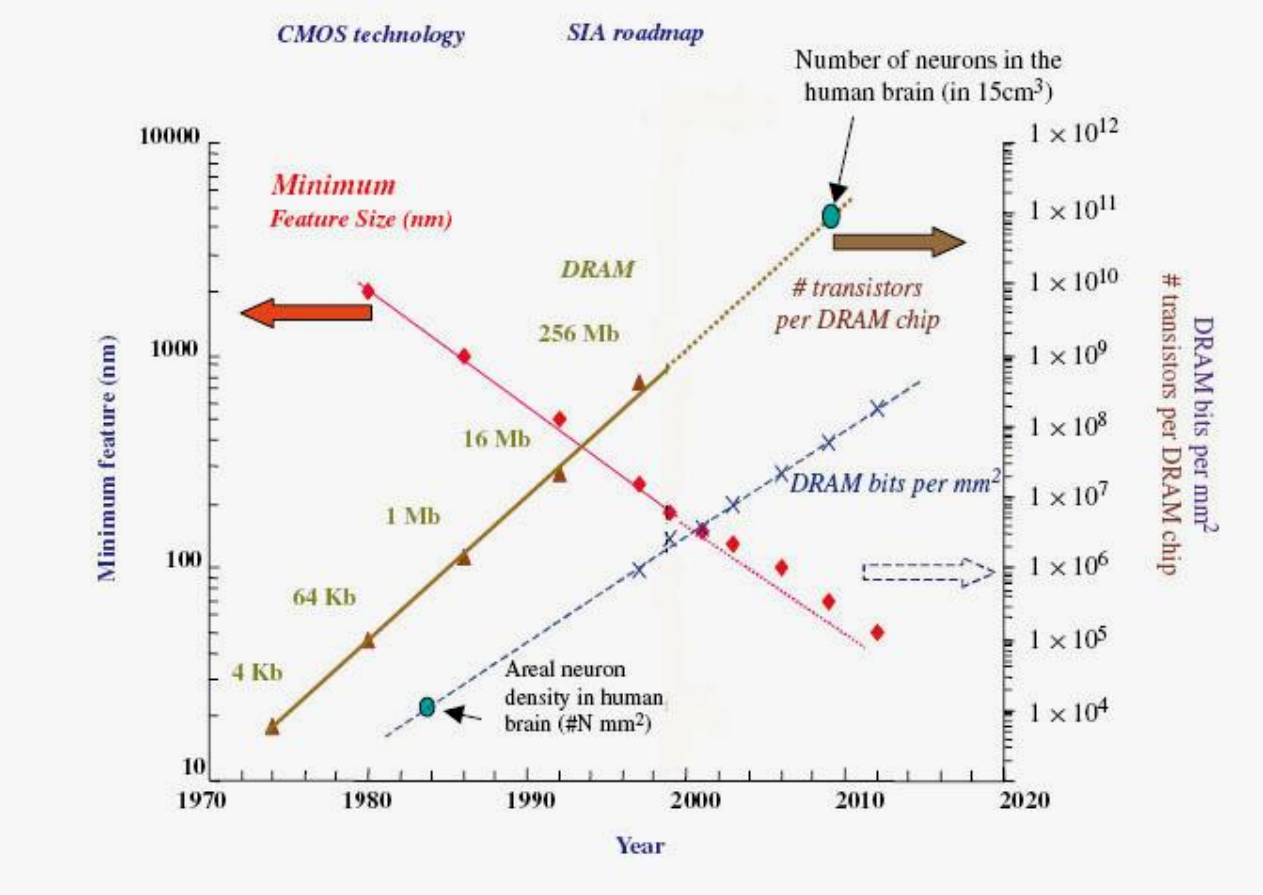

Il motivo viene quindi trasferito sul substrato mediante un processo di **deposizione** o **attacco chimico** o **impianto** o **crescita**.

Infine il resist viene rimosso chimicamente

# STRUTTURA PLANARE di un TRANSISTOR *npn* (I.C.)

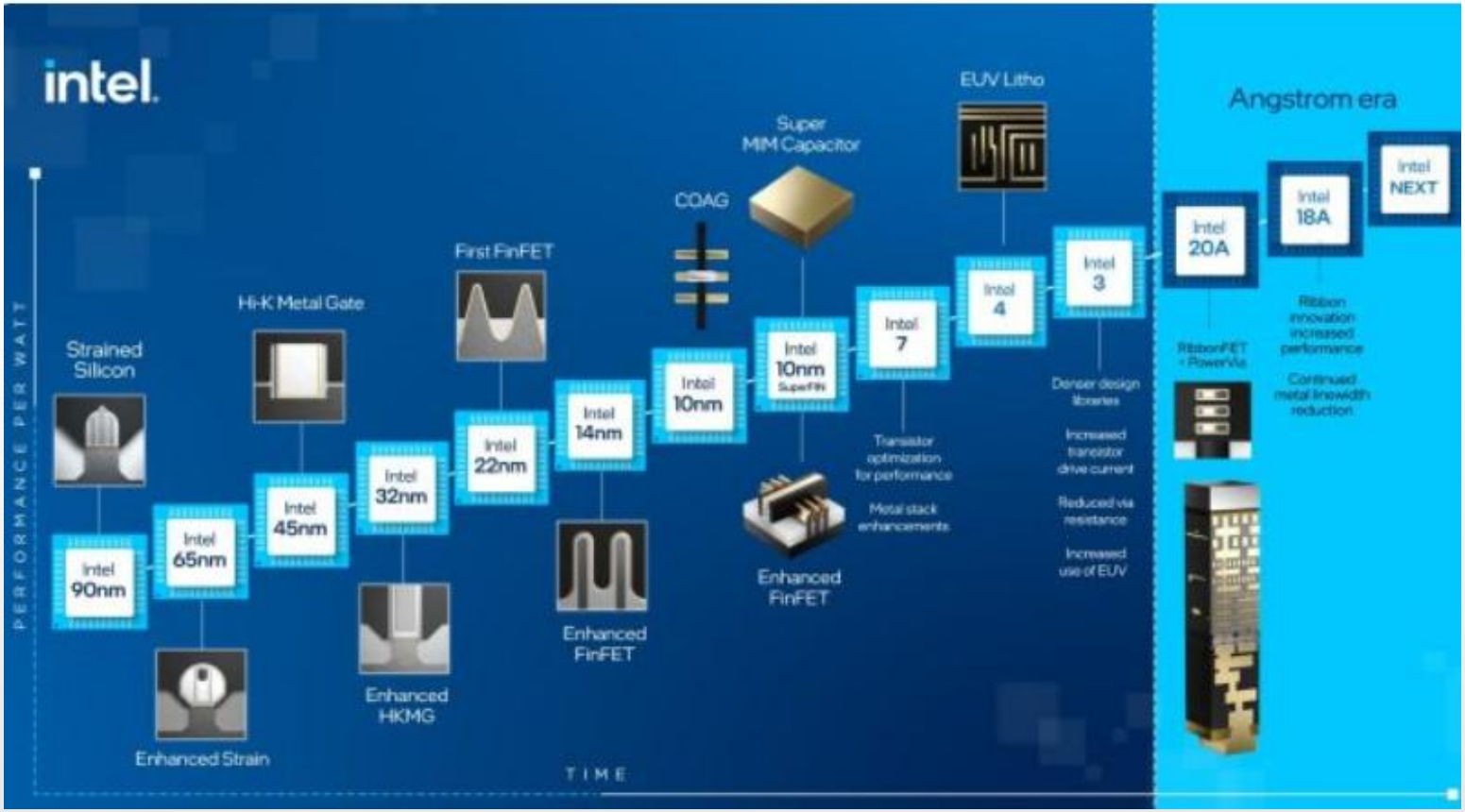


# “LEGGE” DI MOORE




**Tempo di raddoppio dei dispositivi per chip ≈ 18 mesi**

Osservazione empirica fatta nel 1965 da G. Moore cofondatore di Intel. Nel 2016 *Nature* celebrava la fine della legge, mentre oggi (2022) il CEO di Intel, P. Gelsinger, non solo ha dichiarato che la legge è viva e vegeta, ma anche che il ritmo di crescita seguito nei prossimi anni sarà ancora più sostenuto.




- Per la miniaturizzazione dei processi costruttivi la **litografia ultravioletta estrema** (EUV) è la “ricetta” che i produttori di chip meglio organizzati e capaci di investimenti economici poderosi stanno utilizzando (anno 2022).

- Inoltre si sta lavorando anche sulla progettazione e sull’utilizzo di **modelli di transistor** sempre più evoluti: p.e. lo schema **Nanosheet** che impila in senso verticale gli strati di transistor, come le pagine di un libro, superando problemi nel processo litografico fino a quale anno fa insormontabili, soprattutto sul versante dei costi.

# PROBLEMI APERTI IN NANOELETTRONICA

- **Raffreddamento:** i circuiti integrati attuali dissipano una potenza termica di 30 watt/cm $^2$ (come un corpo riscaldato a 1200 °C).

- **Necessità di isolanti con una bassa costante dielettrica** ($\varepsilon_r < 2.5$) per ridurre effetti di capacità e di ritardo RC .

- **Campi elettrici alle giunzioni:** aumentano al diminuire delle dimensioni (a parità di d.d.p. applicate) e possono produrre effetti valanga sulle correnti.

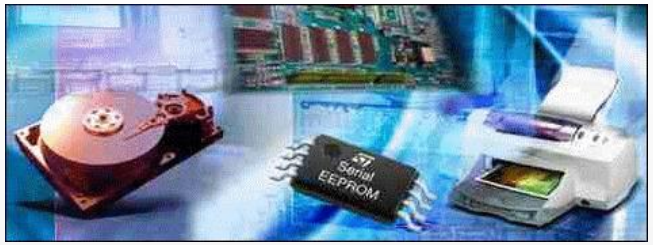
- **Controllo preciso a livello atomico della stechiometria, di difetti e impurezze nei materiali (impurezze < $1/10^{11}$ atomi Si.**

- **Effetti quantistici**, come effetto tunnel o effetti di dimensione quantica.

- **Lunghezza fisica del canale in un FET** : 10 - 20 nm (anno 2026)

# APPLICAZIONI: Memorie Flash

## (non volatile, scrittura/lettura)









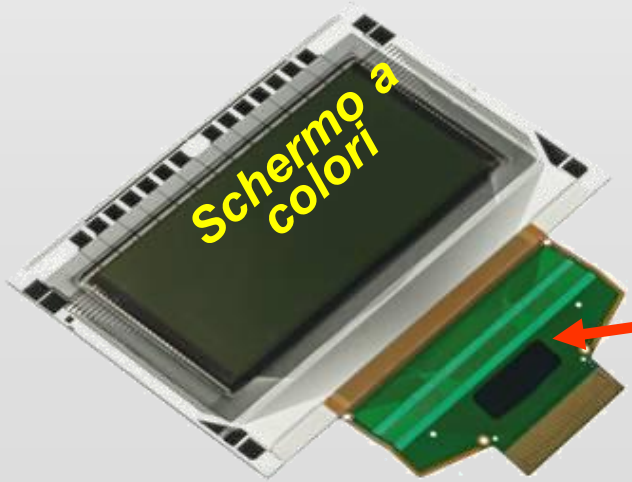


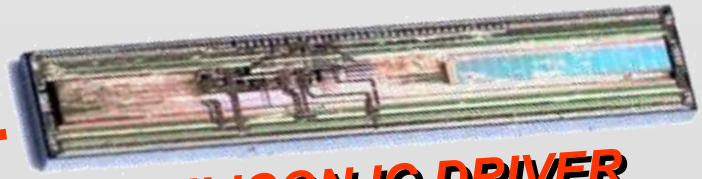

- Comunicazioni mobili
- Fotocamere digitali
- Memorie di massa
- Digital TV
- DVD/ lettori CD
- Audio MP3
- Elettrodomestici
- Modem
- Monitors
- Periferiche per computer
- Controllo motori
- Controlli programmabili
- Lettori di gas e corrente
- Strumenti di misura

# APPLICAZIONI: Schermi a colori




- Giochi portatili
- Videocamere e macchine fotografiche digitali
- Telefoni cellulari
- Riproduttori MP3
- Autoradio
- Agende portatili digitali
- Industriali
- Punti di vendita
- Smartcard



SILICON IC DRIVER

# APPLICAZIONI: Autoveicoli

## (>200 dispositivi elttronici/auto)


Computer di bordo


Fari


Tergicristalli


CAN / LIN Node

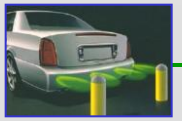

Motori finestrini


Retrovisori


Cruscotto



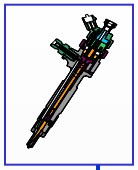
Climatizzatore


Controllo parcheggio

CARROZZERIA


Regolatore di velocità

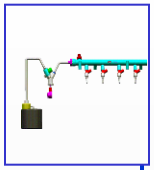

Controllo motore

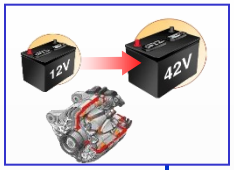

GDI


Trasmissione



Cambio automatico


Injezione



Batteria

CONTROLLI ELETTROMECCANICI



COMUNICAZIONI MULTIMEDIALI E TELEMATICHE


Radio


Amplificatori audio


Radio satellitare


Modulo GPS


Navigatore Portatile


Accesso telematico


Sistema di navigazione


Sistemi multimediali


Trasmissioni ottiche


Kit per telefonia


Telepass

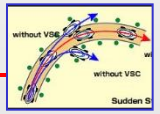
SICUREZZA


Sospensioni attive


Pretensionamento cinture


Airbag


Radar



VDC


ABS


EPS

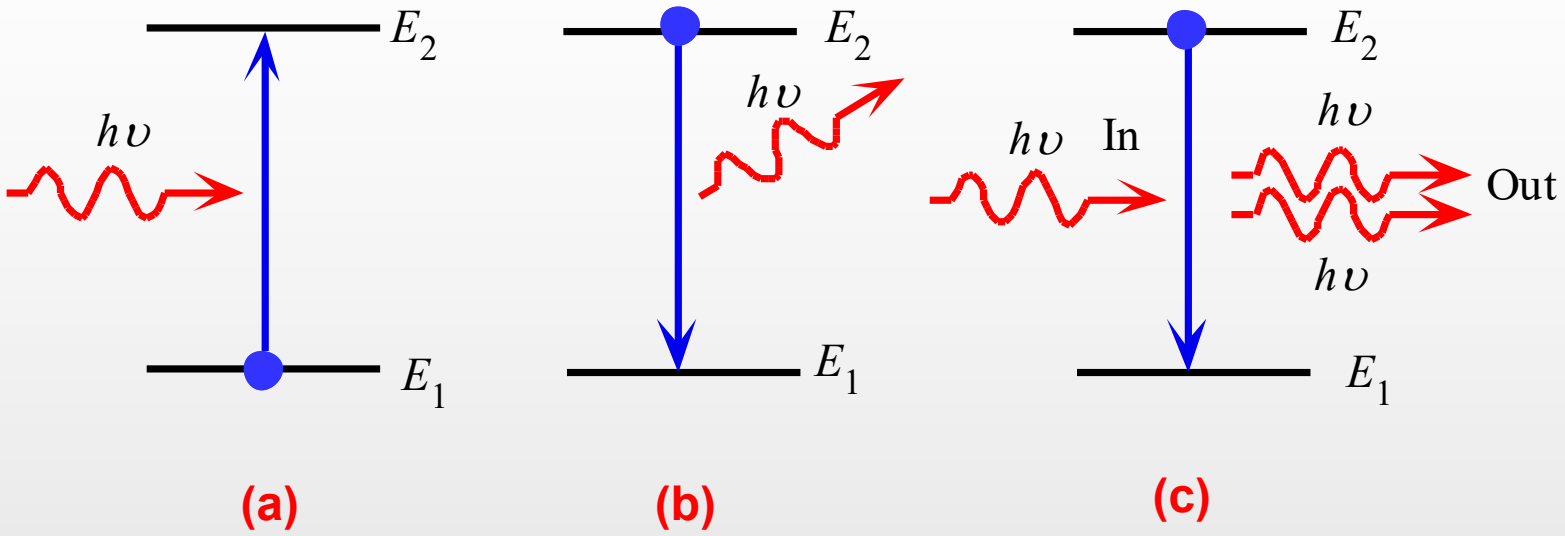
# USO DELLA GIUNZIONE *p – n in* FOTONICA

**FOTONICA** = la scienza e la tecnologia per generare ed utilizzare luce ed altre forme di energia *e.m.* la cui unità quantica è il **fotone** ($E = h\nu$).

Specificamente la **fotonica** studia l'emissione, la trasmissione, la deflessione, l'amplificazione e la rilevazione di luce, con applicazioni in componenti e strumentazione ottici.

Il campo di applicazione della fotonica si estende dalla conversione di energia *e.m.* alla sua rivelazione, sino alla gestione delle comunicazioni e dell'informazione.

# INTERAZIONI FOTONE-ELETTRONE




**(a)** **(b)** **(c)**

I tre processi fondamentali di transizione ottica tra due livelli di energia elettronica. I pallini blu indicano lo stato iniziale dell'elettrone.

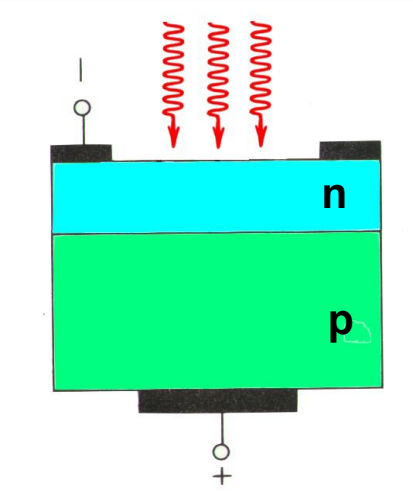
a) Assorbimento di un fotone (**hv** $\geq E_2$-$E_1$)

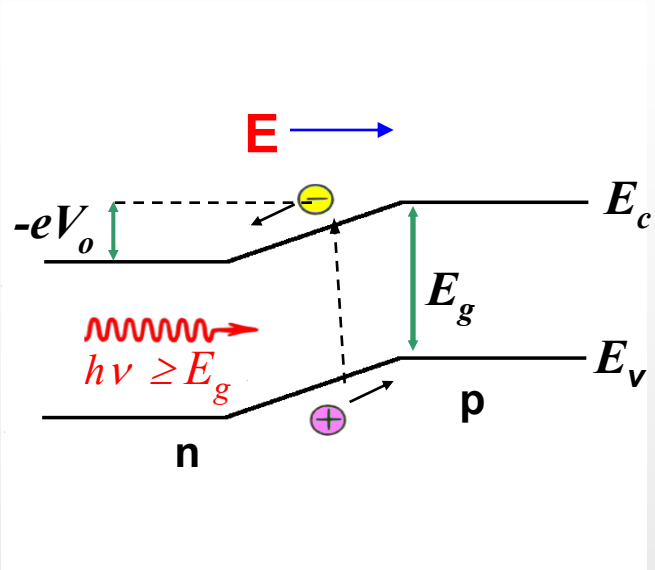
b) Emissione spontanea di un fotone (casuale)

c) Emissione stimolata: il fotone primario e quello emesso sono **coerenti**, cioè hanno uguali frequenza, fase e direzione

# FOTODIODO

**Un fotodiodo è un dispositivo opto-elettronico, basato su una giunzione *p-n,* che assorbe energia luminosa e la converte in energia elettrica (effetto fotovoltaico).**




**Fotoni con energia $h\nu \geq E_g$ possono essere assorbiti e creare coppie buche-elettroni.**

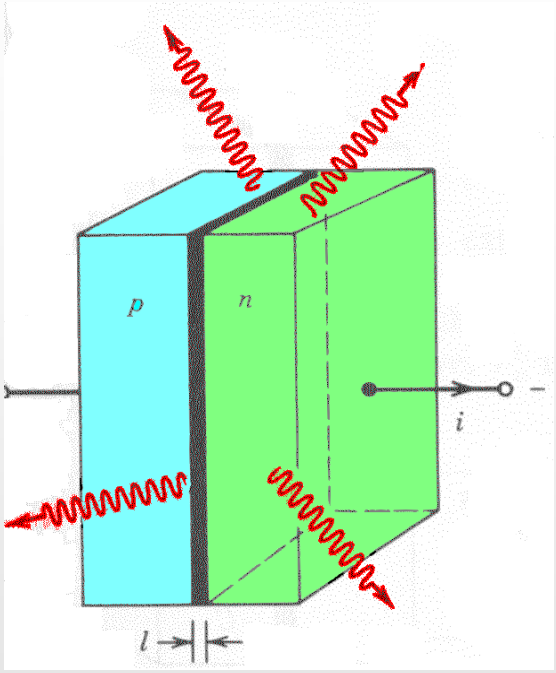
**Nella regione di svuotamento della giunzione il campo elettrico E esistente muove in direzioni opposte le buche e gli elettroni e non permette che essi si ricombinino. Così i portatori di carica fotogenerati possono accumularsi agli estremi della giunzione, producendo un voltaggio o una corrente attraverso un circuito esterno.**

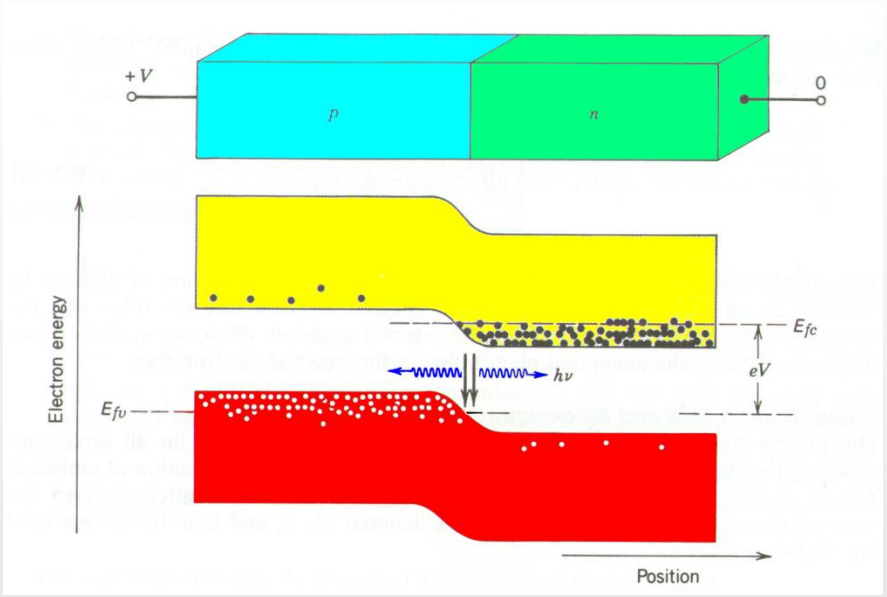
***APPLICAZIONI***

- **Celle solari (basate anche su giunzioni multiple)**
- **Rivelatori di radiazione e.m. (da UV a MIR)**
- **Rivelatori di immagine**
- **Sistemi di comunicazioni in fibra ottica (il fotodiodo riceve gli impulsi ottici trasmessi e li converte in impulsi elettronici)**

# DIODO EMETTITORE DI LUCE (LED)

**In una giunzione *p-n* polarizzata direttamente gli elettroni e le buche che diffondono da una regione all'altra possono ricombinarsi radiativamente, cioè mediante emissione spontanea di fotoni.**



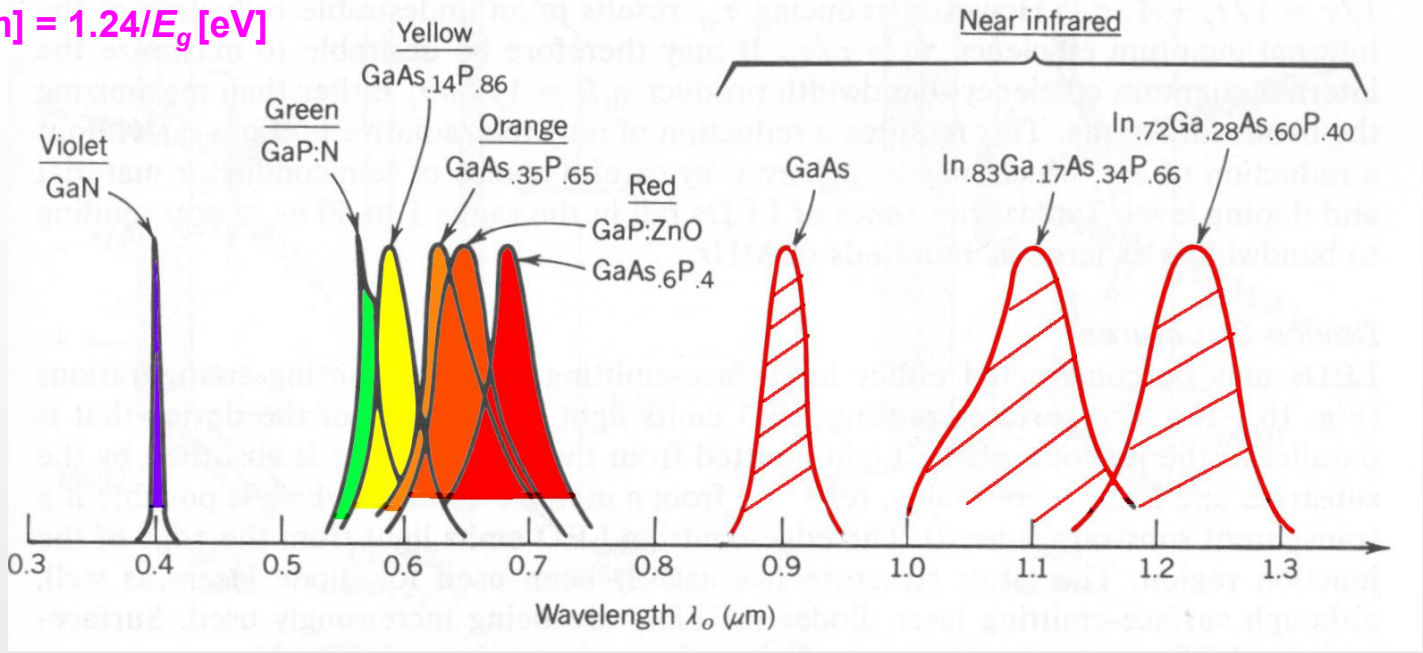

**A destra è mostrato il diagramma a bande di energia di una giunzione *p-n* pesantemente drogata che è polarizzata direttamente con un voltaggio elevato *V* (le linee trattaggiate rappresentano I quasi-livelli di Fermi, che sono molto separati fra loro per effetto della polarizzazione).**

**La abbondanza simultanea di buche ed elettroni nella regione di transizione provoca una forte ricombinazione radiativa buche-elettroni (*elettroluminescenza per iniezione*).**

**L'energia di ciascun fotone emesso è $h\nu \approx E_g$ .**

# SPETTRI DI EMISSIONE DI LED

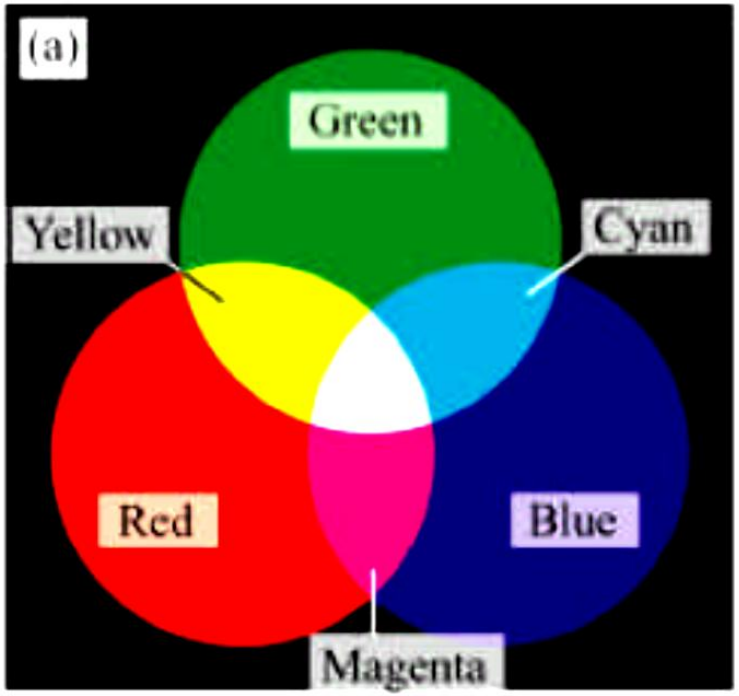
$\lambda_p$ [μm] = 1.24/$E_g$ [eV]




In figura sono rappresentate le densità spettrali in funzione della lunghezza d'onda per LED basati su semiconduttori con differenti gap di energia $E_g$. (I picchi di intensità sono normalizzati allo stesso valore.

I diodi verdi e rossi erano già stati inventati da tempo, ma senza una fonte di luce blu la possibilità di creare una luce bianca che sommasse le tre componenti rimaneva un sogno.

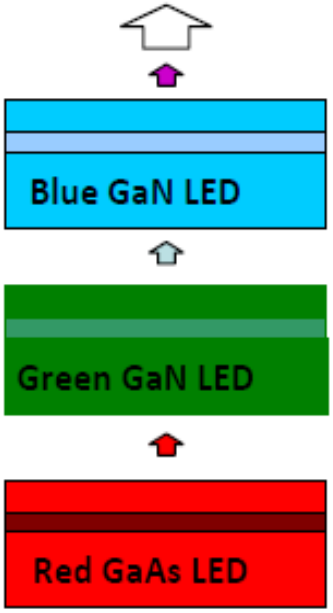
# MISCELA ADDITIVA DI COLORI CON LED





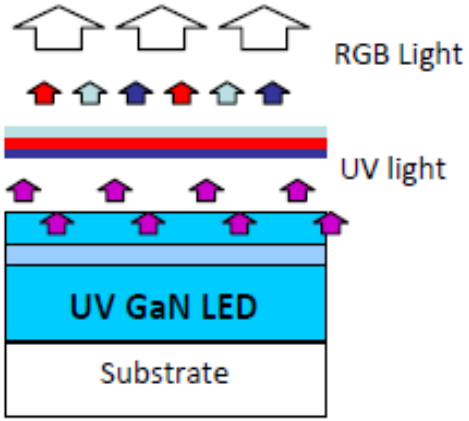

# 3 Metodi per ottenere luce LED bianca

Luce bianca



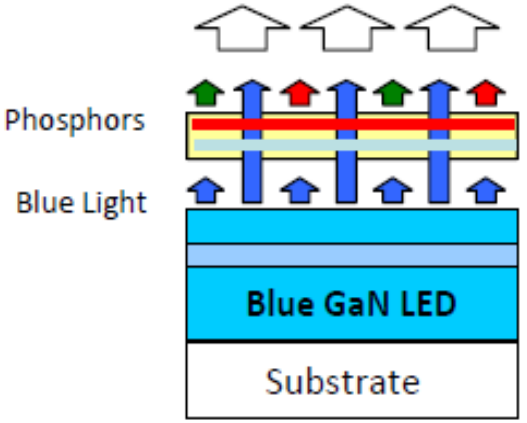

**LED multipli, RGB**
- buona efficienza
- costo maggiore
- colori regolabili

Luce bianca




**UV + Fosfori**
- efficienza più bassa
- basso costo
- uniformità di colore

Luce bianca




**Blu + fosfori gialli**
- 200 lm/W
- costo inferiore

>90% mercato

# LED blu: riconoscimenti e proprietà intellettuale

Nel **2014** il Nobel per la Fisica fu assegnato a I. Akasaki, H. Amano e S. Nakamura per «***la loro invenzione di efficienti LED a luce blu, che hanno permesso di realizzare sistemi di illuminazione a basso consumo energetico e di grande impatto sociale***».







- Il professor **I. Akasaki** portò avanti la sua ricerca sui LED emettitori nel blu tra gli anni Sessanta e i primi anni Ottanta alla Matsushita Electric, oggi Panasonic: a causa della difficoltà del progetto, i manager della compagnia decisero di abbandonare questa ricerca.

- Akasaki si trasferì all'Università di Nagoya, dove divenne supervisore del futuro professore **H. Amano**. Dopo tre anni e migliaia di esperimenti, riiuscirono a creare i primi cristalli di GaN. C'erano però altri importanti ostacoli tecnici da superare,, in particolare rendere il GaN un semiconduttore di «tipo *p*» .Ci riuscirono solo agli inizi degli anni Novanta di pari passo con Nakamura, che lavorava in Nichia.

- Nel **1992, S. Nakamura**, ingegnere alla Nichia, dopo 30 anni di ricerca con una numerosa squadra di fisici, chimici e ingegneri (e contro il parere della Nokia) fu il primo a sviluppare un LED blu al GaN pronto per il mercato, che emetteva un blu perfetto a 450 nm.

- Nel **1996**, posizionando un fosforo giallo sopra il LED blu, ottenne il **primo LED bianco** con luminosità 100 volte superiore a quella dei LED pseudo-blu presenti sul al mondo, rivoluzionando così l'illuminazione. globale e gli schermi di smartphone e TV.

# La proprietà intellettuale

Nonostante l'invenzione avesse fruttato alla Nichia miliardi di dollari in profitti e brevetti commerciali, nel **1993** l'azienda ricompensò Nakamura con un bonus di soli **20.000 yen (circa 200 dollari)**, in linea con le rigide politiche aziendali giapponesi dell'epoca.

Frustrato dalla mancanza di riconoscimento economico e professionale, Nakamura lasciò l'azienda nel **1999** per trasferirsi in USA alla Università di California a Santa Barbara.

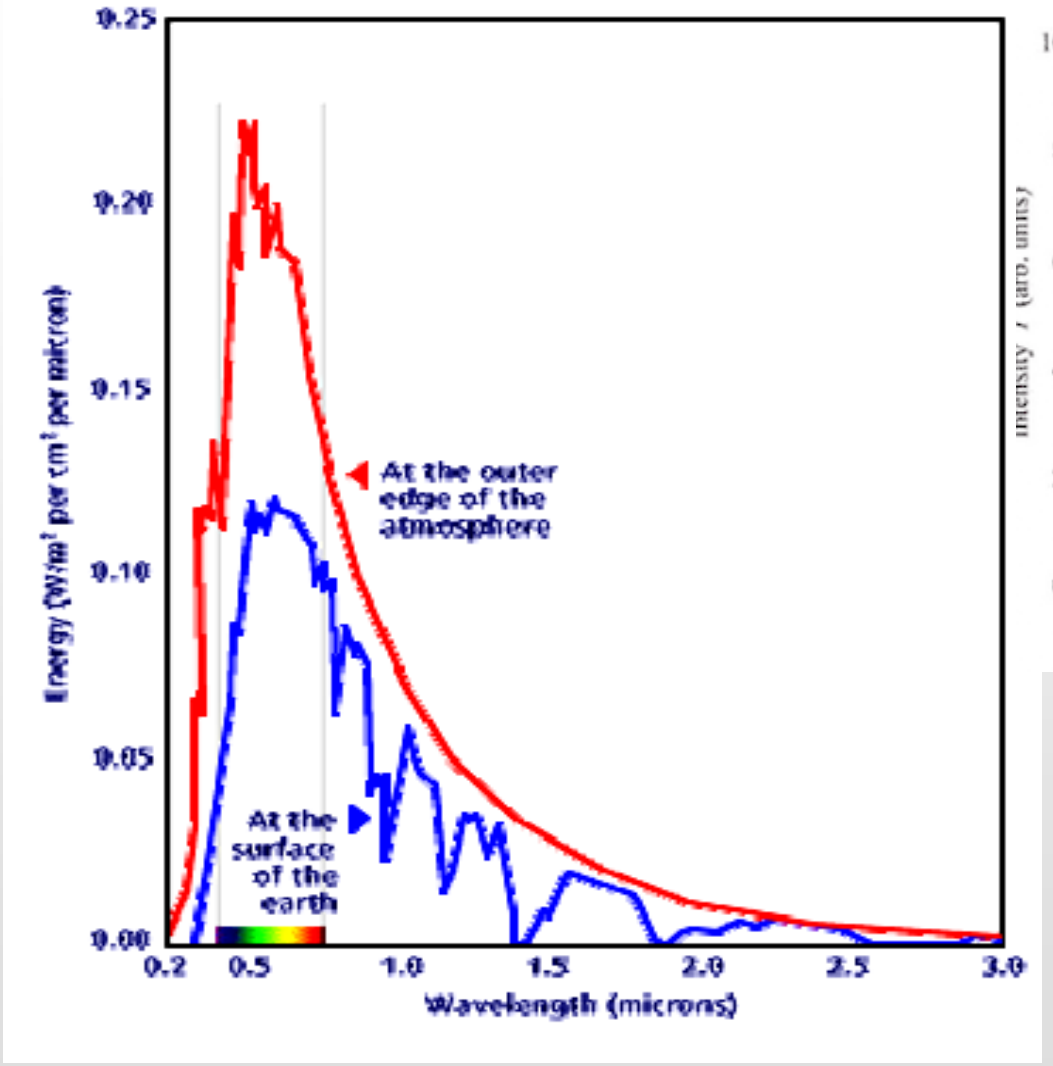
Nel **2001** Nakamura intentò una causa legale senza precedenti presso il Tribunale Distrettuale di Tokyo, richiedendo una **remunerazione appropriata** per il valore dei brevetti legati al LED blu. Il Tribunale di Tokyo stabilì che il contributo di Nakamura era stato fondamentale e ordinò a Nichia di pagare la cifra record di **190 milioni di dollari**, stimando che il valore reale dell'invenzione per l'azienda superasse i **1200 milioni di dollari**.

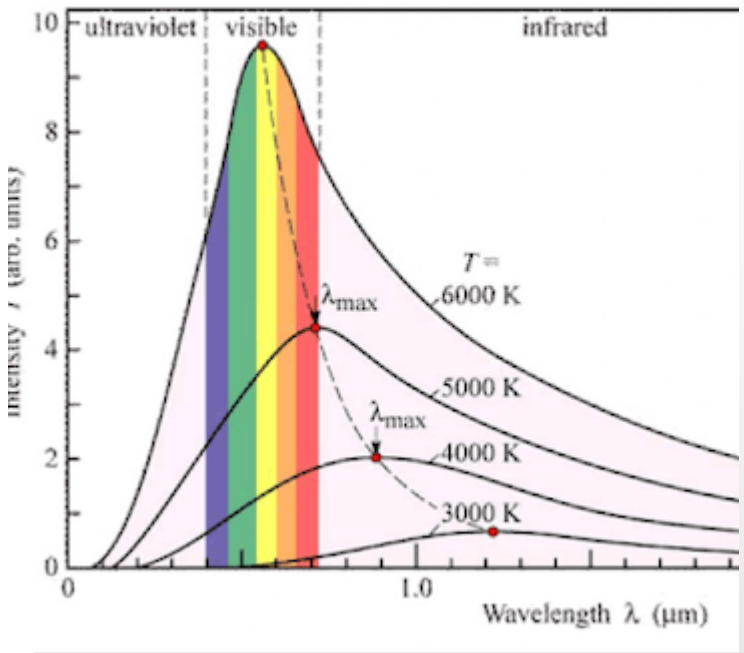
Nel **2005**, su proposta del tribunale seguì un accordo transattivo per **8 milioni di dollari + cessione di alcuni brevetti.**

Sebbene la cifra finale fosse nettamente inferiore rispetto alla prima sentenza, l'esito della causa è stato considerato una **vittoria storica per i lavoratori scientifici.**
La causa legale tra lo scienziato Shuji Nakamura e la Nichia Corporation è uno dei casi più celebri e rivoluzionari nella storia della **proprietà intellettuale aziendale**. La disputa ha ridefinito i diritti dei dipendenti-inventori in Giappone e nel mondo.

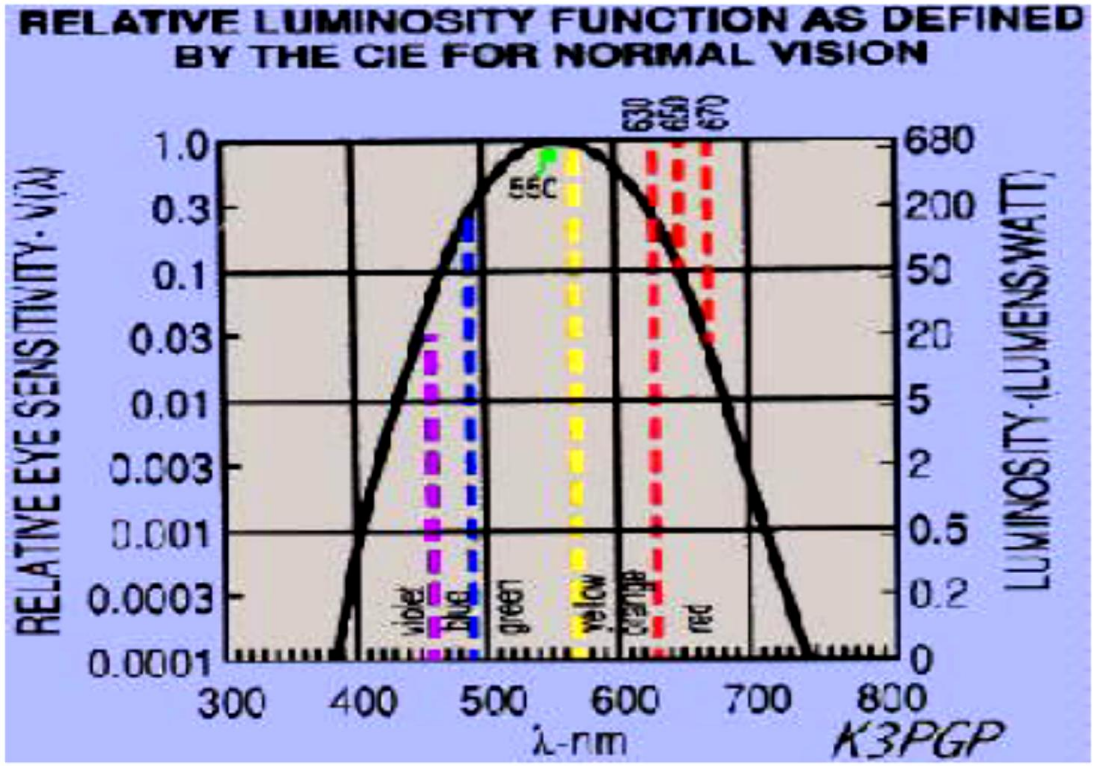
In **Europa,** e quindi anche in **Italia** (*Codice della Proprietà Industriale, DL n.30 ,* 2005) esistono norme per cui, anche se l'ente di ricerca o l'industria sono proprietari del brevetto, il **dipendent**e che ha dato un contributo significativo ha diritto **al riconoscimento morale** e a un **«equo premio»** , se non già adeguatamente retribuito per la sua ricerca.

# SPETTRO SOLARE



# CURVA DI SENSIBILITÀ SPETTRALE DELL'OCCHIO UMANO




**L'occhio umano si è evoluto per adattarsi alla luce del Sole, per cui può facilmente correggere i colori riflessi che vengono illuminati da corpi neri a diverse temperature (es. Sole a 6500 K e lampada a incandescenza a 3000 K). E' invece molto sensibile a sorgenti luminose che si discostano anche solo del 2% dal corpo nero per cui i colori appaiono distorti.**

# GRANDEZZE E UNITÀ FOTOMETRICHE

**Flusso o potenza raggiante e.m. ➔ watt**

**Intensità di radiazione e.m ➔ watt/m$^2$**

**Flusso luminoso ➔ lumen =** sensazione di luminosità dovuta a un flusso raggiante pesato con la curva di sensibilità spettrale dell'occhio umano

Un flusso raggiante di **1 watt** con $\lambda$ **= 0.55** $\mu$**m** (punto di massimo sensibilità dell'occhio umano**)** corrisponde a un flusso luminoso di **685 lumen.** Un flusso di 1 watt con $\lambda$ = 0.5 $\mu$m (luminosità relativa = 0.3) corrisponde a **0.3 x 685 lumen = 205 lumen**

**Efficienza luminosa** di una sorgente ➔ **lumen/watt** = flusso luminoso/potenza elettrica dissipata

**Intensità luminosa ➔ lumen/steradiante o candela =** flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme in un angolo solido unitario

**Candela campione** = intensità luminosa di una sorgente costituita da una superficie di 1/60 cm$^2$ di platino alla temperatura di 2042 K, emessa in direzione perpendicolare alla superficie stessa

**Illuminamento ➔ lumen/m$^2$ (lux)** = flusso luminoso incidente su una superficie di area unitaria

***ESEMPI*.**

**Luce solare:** massima 100.000 lux; in una giornata nuvolosa 1000 lux

**Interno:** con luce solare 200 lux; con luce artificiale per leggere un giornale 100 lux

**Luce di luna piena:** 0.2 lux

# «VECCHIE» LAMPADE

## *LAMPADE A INCANDESCENZA E ALOGENE*

Filamento di tungsteno (W) riscaldato (T = 2600-3400 K) ➡ emissione di fotoni tipo corpo nero (95% in IR e 5% in Vis) .

Efficienza luminosa <12 lm/W Efficienza relativa 5% Tempo di vita $\tau$ < 1500 h

Aumento T ➡ maggior evaporazione di tungsteno ➡ minor tempo di vita ➡ compromesso fra $\tau$ ed efficienza

Nelle alogene l'ampolla di quarzo contiene tracce di gas alogeno (Iodio) che si combinano con tracce di W formando WI che, a contatto col filamento incandescente, si decompone e deposita W ➡ l'efficienza e $\tau$ raddoppiano, temperatura di colore costante, ampolla sempre trasparente .

Svantaggi: bassa efficienza, fragilità, costi di manutenzione (ricambi soventi), rischi di incendio e scottature, $\tau$ corto.

## *LAMPADE A SCARICA IN GAS* (vapori di Hg, Na e terre rare)

Bassa pressione: collisioni inelastiche di elettroni con atomi di Hg ➡ emissione di fotoni in UV (185 nm e 254 nm) ➡ conversione in luce visibile mediante materiali luminescenti.

Alta pressione: collisioni elastiche di elettroni con atomi e molecole di miscele Hg, Na, Terre rare ➡ emissione nel Vis

Efficienza luminosa < 80 lm/W Efficienza relativa < 30% $\tau$ < 10.000 h

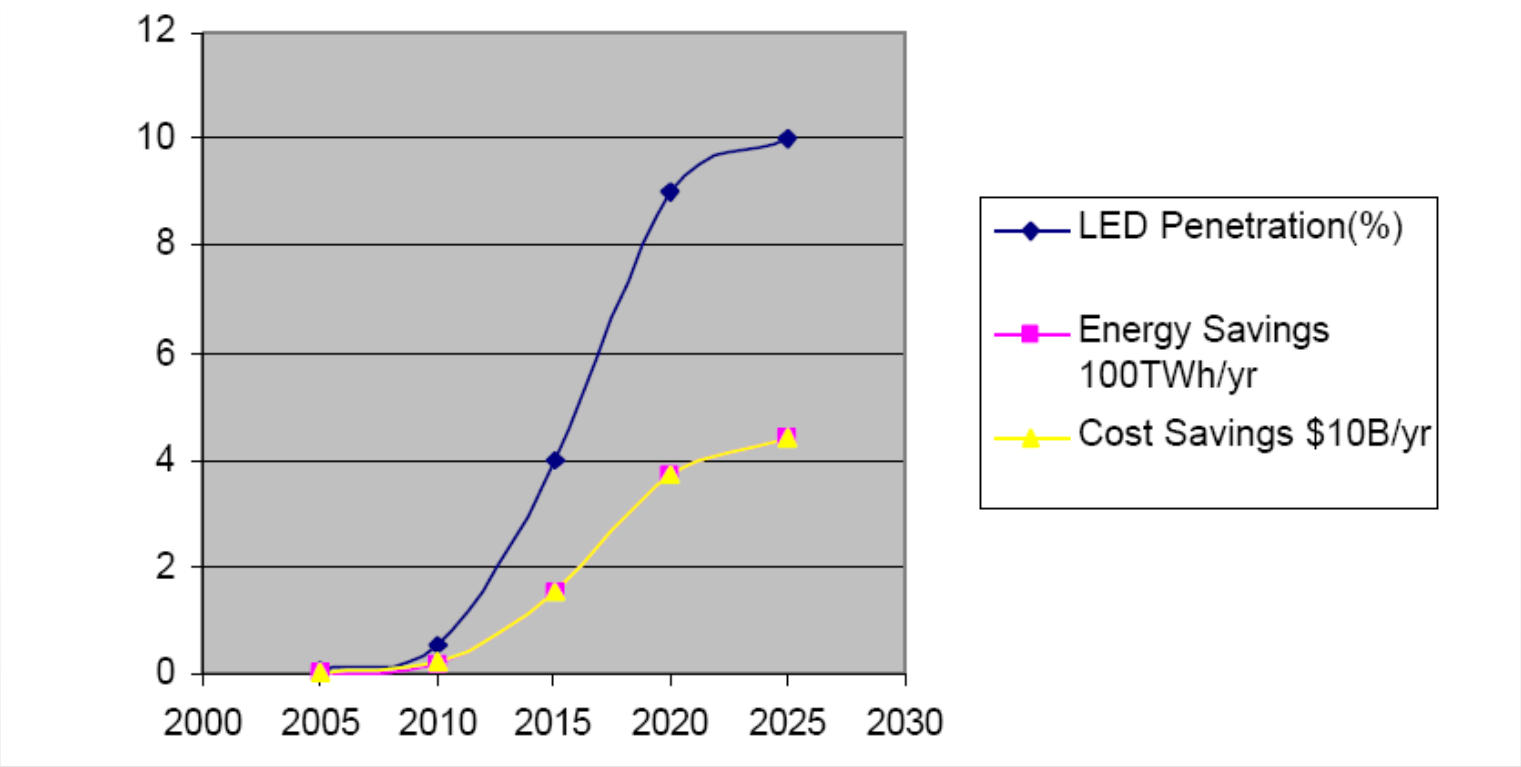
**Svantaggi:** fragilità, necessità di reattore, rumore, sfarfallamento, lungo tempo di innesco, tossicità di Hg

# CONFRONTO COSTI LED-LAMPADINA

| | *LED* | *LAMPADA ALOGENA* |
|---|---|---|
| Flusso luminoso (lm) | 1800 | 1800 |
| Consumo di potenza (W) | 12 | 100 |
| Efficienza luminosa (lm/W) | 150 | 18 |
| Tempo di vita $\tau$ (h) | 25000 | 2500 |
| Consumo energetico in $\tau$ (kWh) | 300 | 250 |
| Costo energia in $\tau$ (0.30 € / kWh) | 90 | 75 |
| Costo lampada (€) | 5 | 2 |
| Costo totale per ora (€/h) | 0.0038 | 0.031 |

** I dati sono relativi a lampade commerciali 2026 Il costo medio del KWh comprende energia/trasporto/oneri di sistema/accise/imposte/IVA*

# RISPARMIO ENERGETICO CON I LED



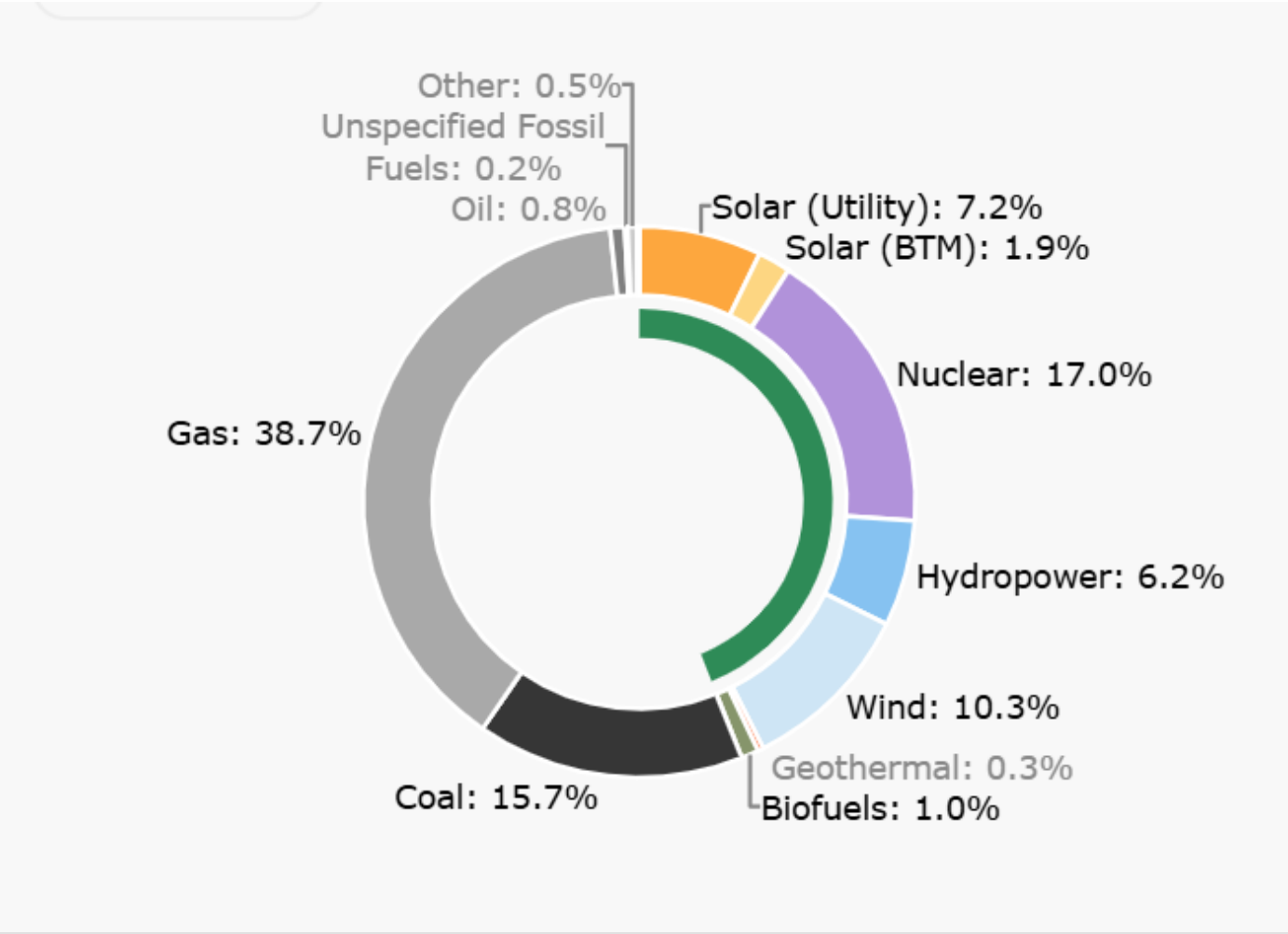

Una crescita dell' 1% nell'efficienza luminosa comporterebbe un risparmio di 2 B$/anno.

Negli USA il 21% di tutta l'energia era consumata per illuminazione, di cui l' 8% con lampade a incandescenza e 13% con lampade a fluorescenza

➡ efficienza media 14% .

Usando LED con efficienza del 30% ➡ dimezzato il consumo di energia per illuminazione e ridotto del 10% il consumo di energia totale.

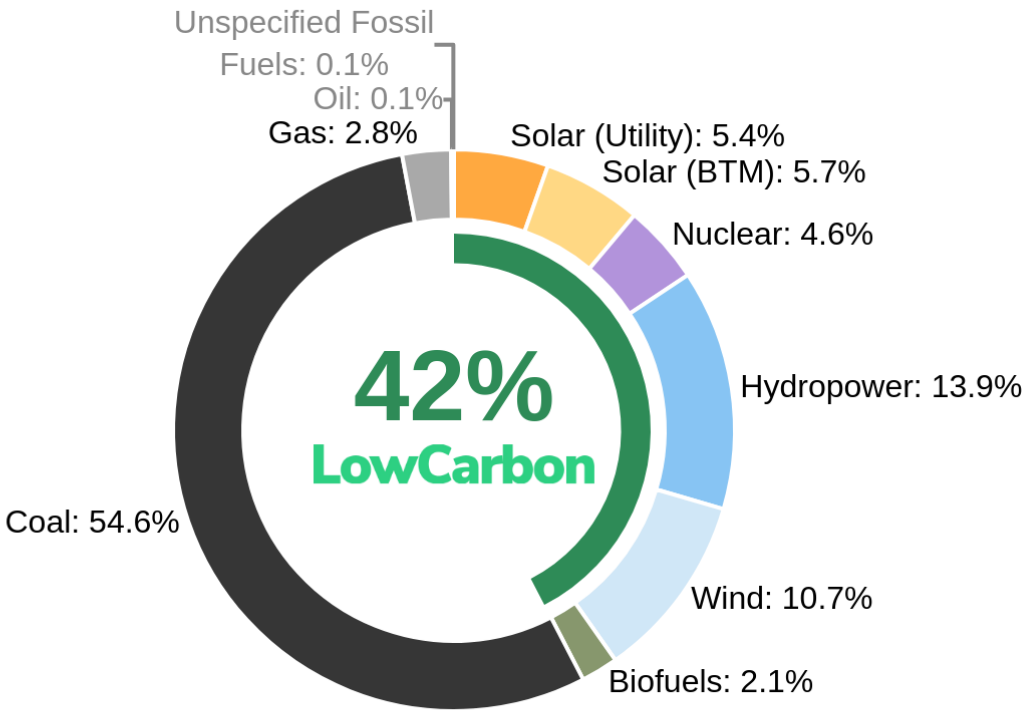
# Electricity generation in USA in 2025




Da agosto 2025 a luglio 2026, i combustibili fossili hanno fornito oltre la metà dell'elettricità consumata negli **Stati Uniti,** circa il 55%, mentre le fonti **a basse emissioni di carbonio** ne hanno fornito circa il 44% (*fonte IEA*).

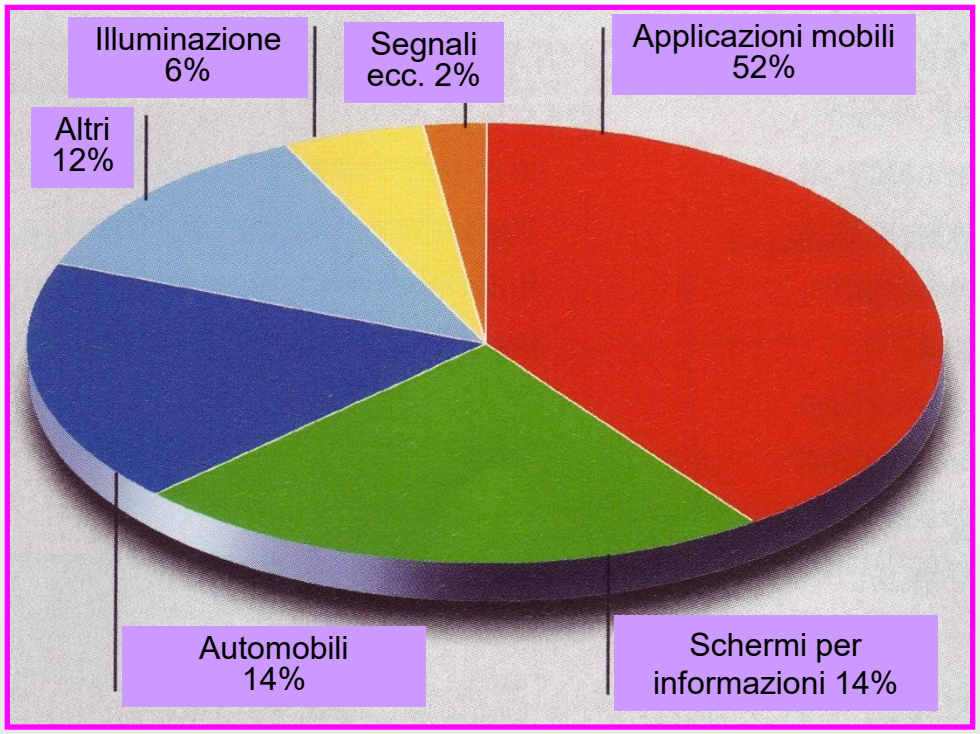
Electricity generation in

# People's Republic of China in 2025




lowcarbonpower.org/r/CN

# APPLICAZIONI DEI LED AD ALTA BRILLANZA




- Ill mercato mondiale dell'illuminazione LED globale 2005 ammontava a circa 3 G$ , è stimato intorno ai 110 G$ per il 2025-26 e si prevede raggiunga i 300 G$ entro il 2034-35.

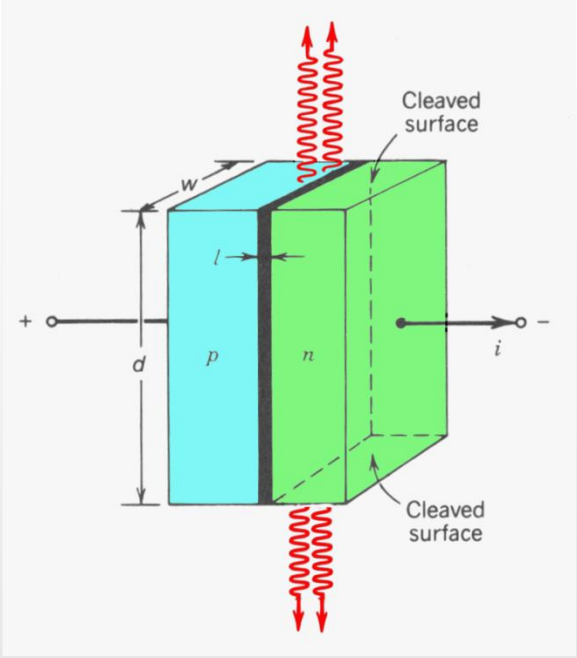
Nel mondo oltre 100 aziende operano nell'industria dei LED: leader nel settore sono: Osram, Signify (ex Philips), Nichia Corporation, Samsung LED, LG Electronics

# VANTAGGI DEI MODULI LED

- *Lunga vita media; basso consumo di energi;, bassa emissione di calore; bassa temperatura di funzionamento (30-60 °C) ; piccole dimensioni; alta affidabilità; compatibilità con sistemi elettronici; dipendenza lineare luce-corrente*
- *Luce colorata, grazie alla disponibilità di LED di tutti i colori fondamentali*
- *Effetti decorativi straordinari, attraverso l'utilizzo di luce colorata in combinazione con guide di luce con lastre in acrilico*
- *Soluzioni luminose estremamente piatte grazie allo spessore minimo dei moduli*
- *Illuminazione per l'orientamento e la segnalazione, facile da installare e perfettamente integrabile nell'architettura esistente*
- *Economia di esercizio, grazie al ridotto consumo di energia elettrica e alla durata*
- *Massima affidabilità nell'utilizzo in esterni, grazie alla robustezza meccanica e all'ampio campo di temperature ammissibili per il funzionamento*
- *Ideali anche per l'impiego in sistemi a energia solare, grazie ai consumi minimi e al basso valore della tensione diretta dei singoli LED*
- *Progressi in medicina, agronomia, comunicazioni in fibra, domotica, display, illuminotecnica, Paesi del Terzo Mondo*

# DIODO LASER (LD) (1962)

**Questo dispositivo è simile a un LED, cioè consiste in una giunzione *p-n* polarizzata direttamente che emette luce: in questo caso però la luce emessa è coerente.**




- **Quando la corrente diretta nella giunzione *p-n* supera un valore di soglia, corrispondente all'inversione di popolazione fra le bande di valenza e di conduzione, oltre all'emissione spontanea si ha anche emissione stimolata di luce.**
- **La amplificazione di luce è prodotta dai riflettori ottenuti clivando il materiale semiconduttore lungo piani cristallini, in direzione perpendicolare al piano della giunzione.**

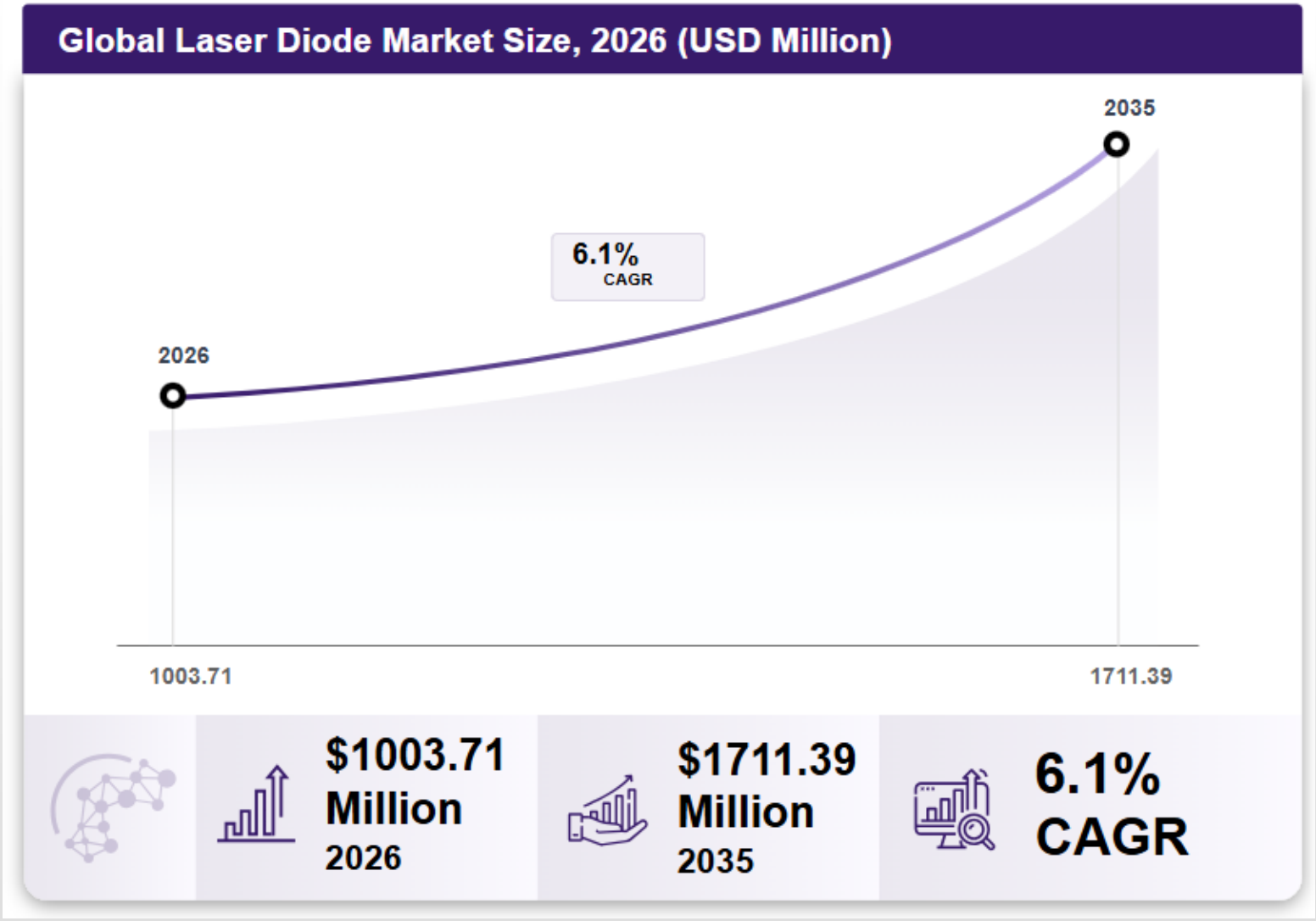
## *CARATTERISTICHE DEL LD:*

- **luce coerente (intensità, monocromaticità, direzionalità, collimazione)**
- **efficienza complessiva alta (tipicamente 40%), superiore a quella di ogni altro tipo di laser.**
- **lunghezza d'onda accordabile e facilità di modulazione**
- **compattezza e prezzo contenuto**

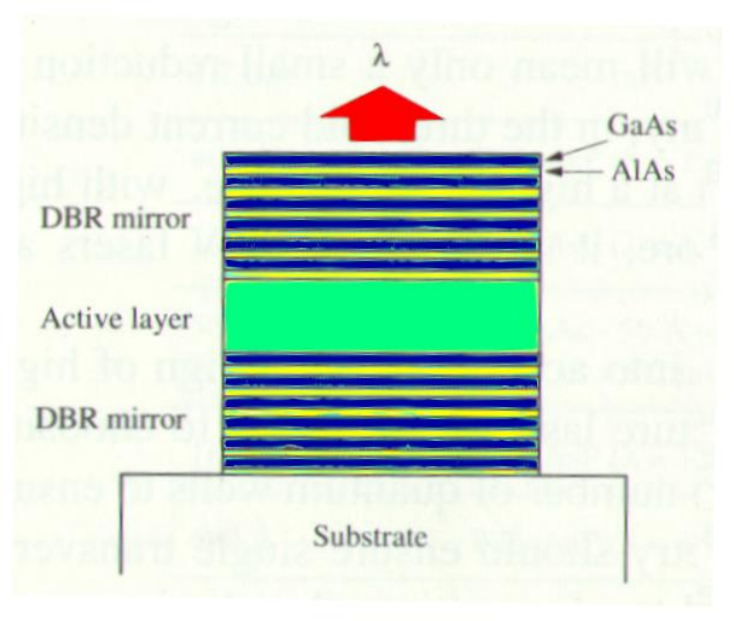
## *APPLICAZIONI*

- **Tutte quelle del LED**
- **Comunicazioni in fibre ottiche, in particolare alle lunghezze d'onda $\lambda_1$ = 1.3 μm e $\lambda_2$ = 1.55 μm, correspondenti ai minimi di assorbimento e di dispersione delle fibre di $SiO_2$.**
- **Lettura/scrittura in sistemi per memorie ottiche (e.g. compact-disc e DVD); stampanti; pointer; sistemi di allarme**
- **Spettroscopia; medicina (diagnostica e chirurgia); controllo ambientale.**

# MERCATO DEI DIODI LASER



# LASER A EMISSIONE SUPERFICIALE (VCSEL)



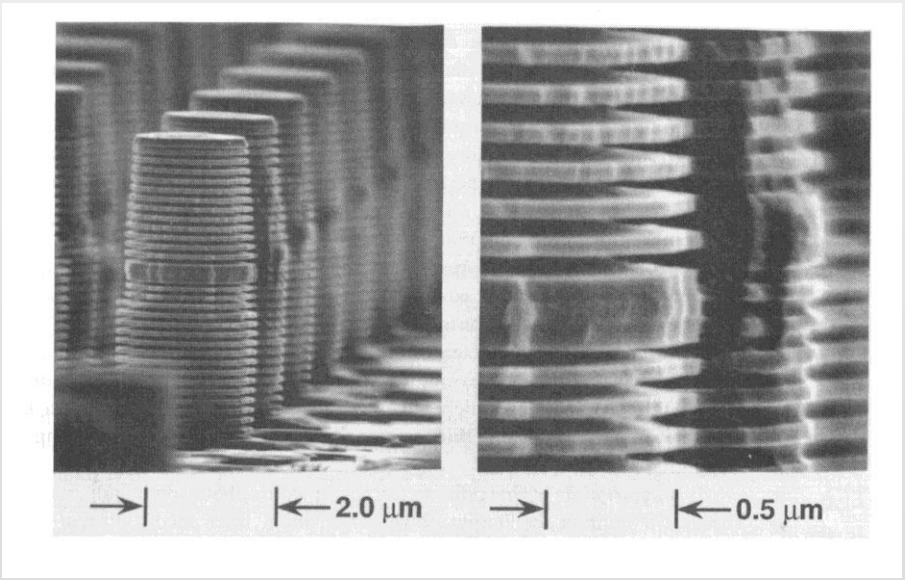

**Struttura di un laser a emissione superficiale con cavità verticale (VCSEL) e con riflettori di Bragg distribuiti (DBR).**

**Molto utile in varie applicazioni che necessitino di comunicazioni *chip-to-chip* e di larghe schiere di sorgenti.**

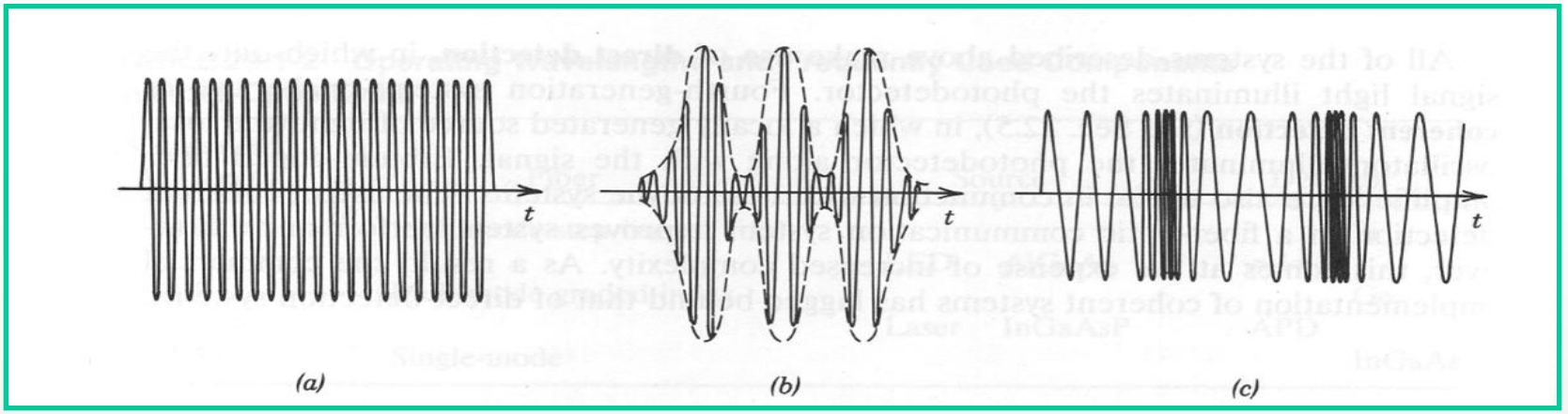
**Caratteristiche: alta potenza di emissione, larga area di emissione, fascio stretto.**

**Micrografia SEM di una schiera microlaser array.**

**Gli strati di AlAs dei riflettori di Bragg sono stati rimossi mediante attacco ionico.**



# TRASMISSIONE DI SEGNALI




*(a)* Onda portante; *(b)* modulata in ampiezza (dal segnale); *(c)* modulata in frequenza

**Segnale** $S(t) = A + B \cos \omega_s t$ **Portante** $P(t) = \cos \omega_p t$

$$\Rightarrow S(t)P(t) = (A + B \cos \omega_s t) \cos \omega_p t$$

$$\cos\alpha \cos \beta = 0.5 \cos (\alpha + \beta) + 0.5 \cos (\alpha - \beta)$$

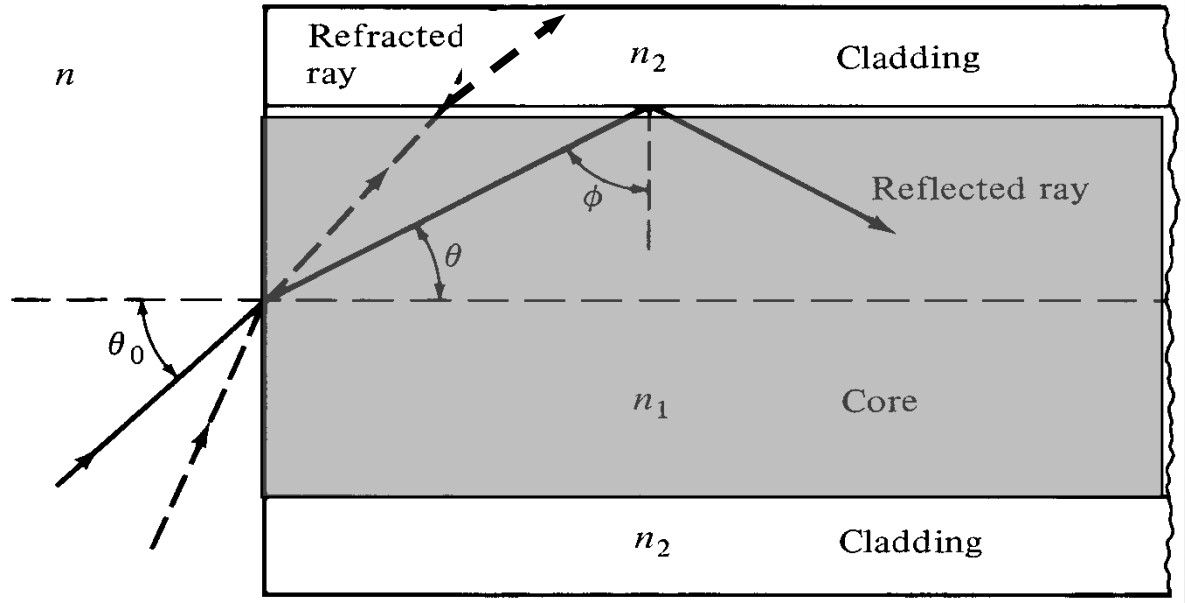
$$\Rightarrow S(t)P(t) = A \cos \omega_p t + 0.5 \cos (\omega_p + \omega_s)t + \cos (\omega_p - \omega_s)t$$

$$\Downarrow$$

**NECESSITA' DI BANDA DI FREQUENZA (CANALE)** $\Delta\omega = 2\, \omega_{s,max}$ , $\omega_p > \Delta\omega$

**Esempi - Radio:** AM 0.3÷3 MHz ; FM 3 ÷ 30 MHz
**TV:** VHF 30 ÷ 300 MHz ; UHF 0.3 ÷ 3 GHz

# RIfLESSIONE TOTALE IN FIBRA OTTICA



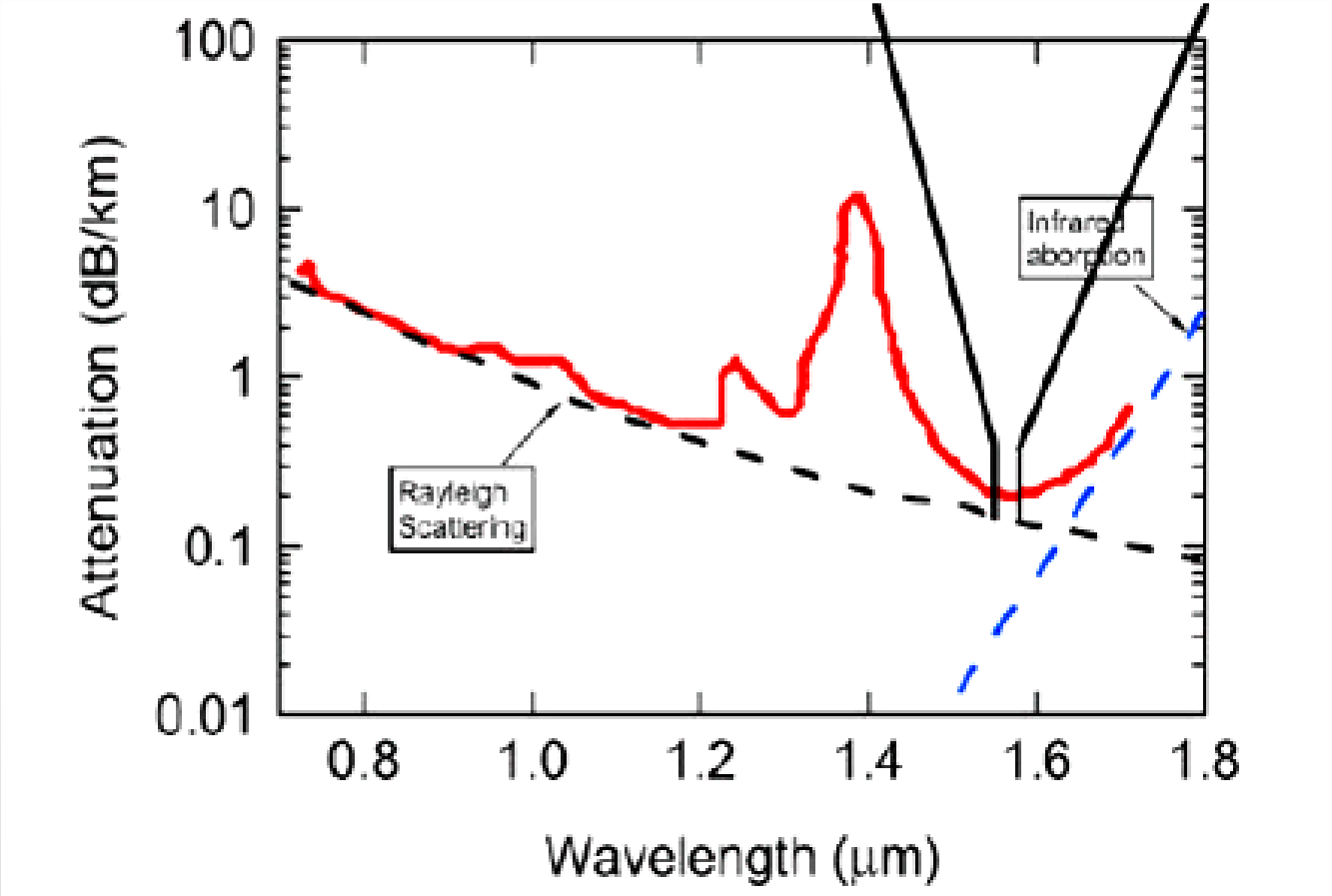

$n_1 > n_2$

Si ha riflessione totale all'interno del nucleo per $\phi \geq \phi_c$ dove $\phi_c$ è **l'angolo critico** determinato dalla **Legge di Snell** della rifrazione

$n_1 \text{ sen } \phi_1 = n_2 \text{ sen } \phi_2$ ➡ $\text{sen } \phi_c = n_2 / n_1$ per $\phi_2 = 90°$

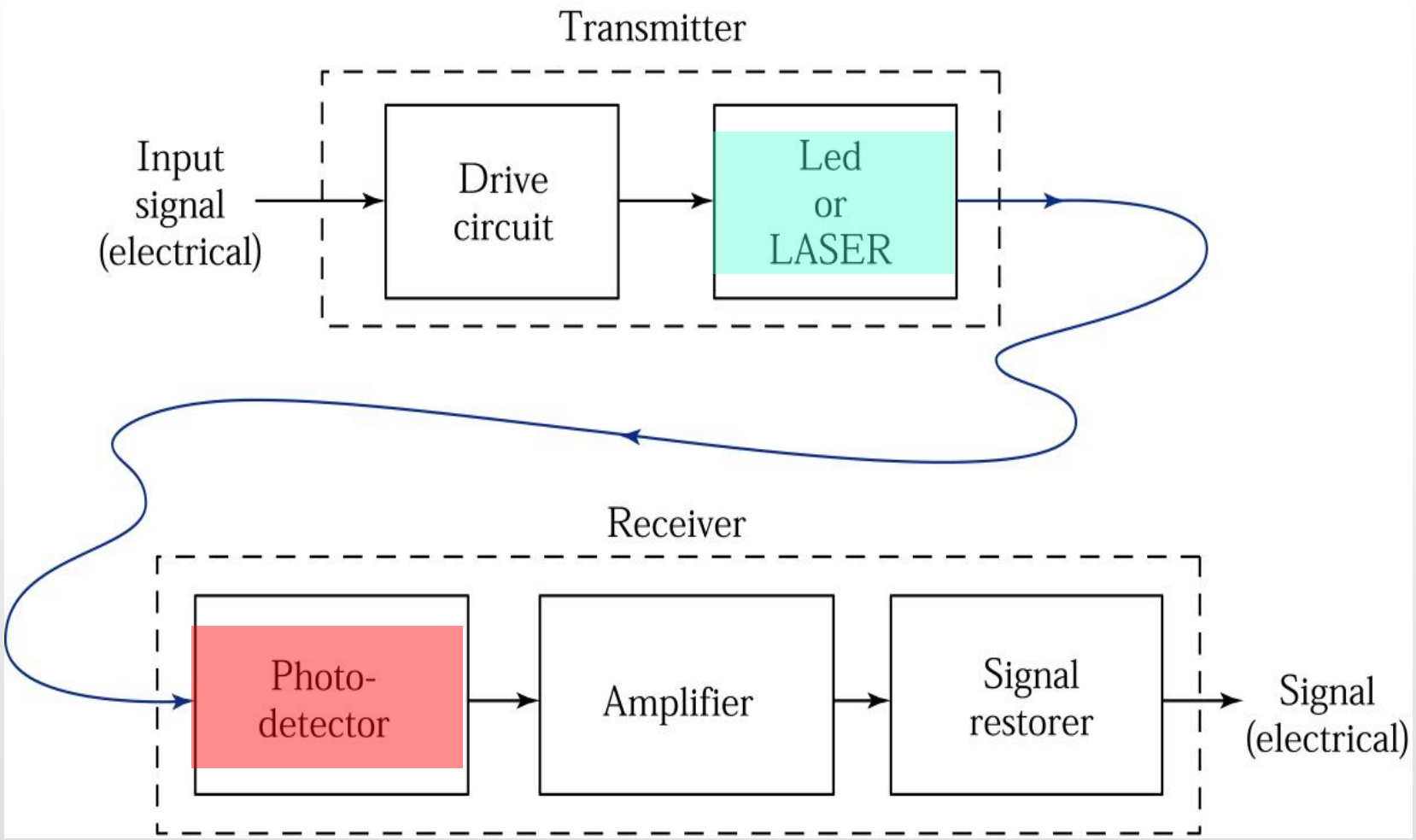
$SiO_2$ fusa, ad alta purezza: $n_1 = 1.44$ a $\lambda = 1.55$ μm.
Piccole variazioni di $n$ si ottengono drogando leggermente con Ti, Ge o B
Tipici valori di $\Delta n = (n_1 - n_2) / n_1$ : 0.001 ÷ 0.02
Esempio: per $\Delta n = 0.01$, l'angolo $\theta_0$ di accettazione massimo è ~ 12°

# FIBRE OTTICHE A $SiO_2$




**Le prime 3 finestre di trasmissione sono a 0.98 , 1.3 e 1.55 μm. Attualmente l'attenuazione minima raggiunta è di 0.15 dB/km, corrispondente a una riduzione del 50% d'intensità luminosa dopo 20 km.**

# TRASMISSIONE IN FIBRA




Elementi fondamentali di un sistema di trasmissione in fibra ottica

# Fine presentazione