



**UNIMORE**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA



# FISICA

a cura di Rossella Brunetti

**SEMICONDUTTORI  
DAL MONDO DEGLI ATOMI  
ALL'ERA DIGITALE**



**SCIENZA  
CREATIVA**



# I SEMICONDUCTORI

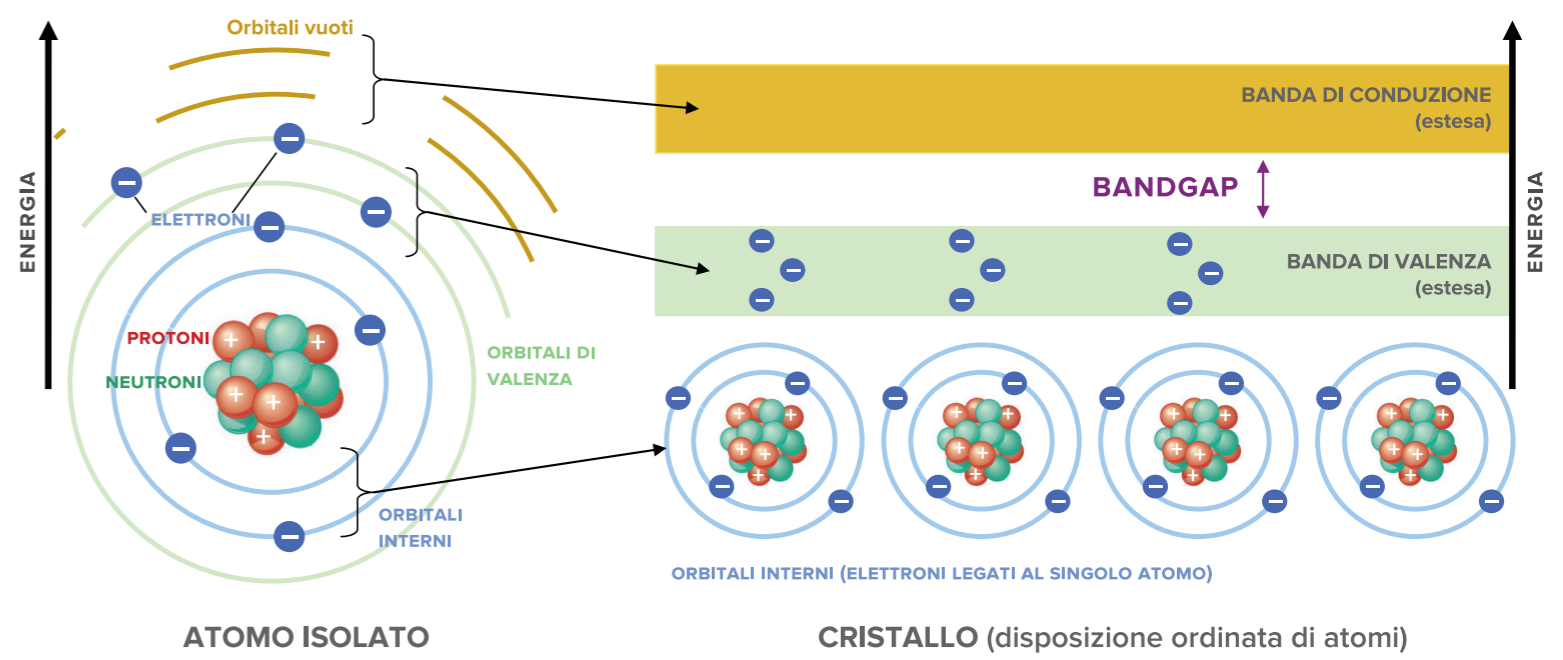
I materiali semiconduttori **offrono** a fisici e ingegneri **una tavolozza praticamente infinita di proprietà** attraverso le quali possiamo indagare leggi fondamentali della Natura e **inventare dispositivi in grado di rivoluzionare il nostro vivere e il nostro comunicare**. Entra con noi attraverso questo allestimento nel mondo dei semiconduttori. **Partiremo dagli atomi e arriveremo ... al mercato globale!**

## I SEMICONDUCTORI SULLA TAVOLA PERIODICA

Il **Silicio** è il **secondo elemento più abbondante nella crosta terrestre** dopo l'Ossigeno ed è il **semiconduttore più importante per la tecnologia attuale**. Altri elementi semiconduttori sono Germanio, Carbonio e Tellurio. Ma anche tantissimi composti sono semiconduttori: GaAs, AlP, ecc., molti dei quali solidi cristallini.

TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

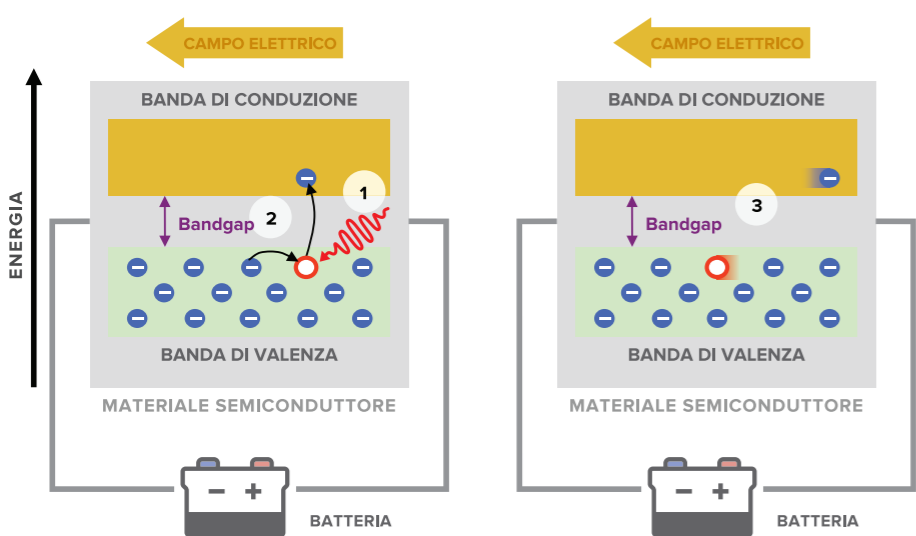
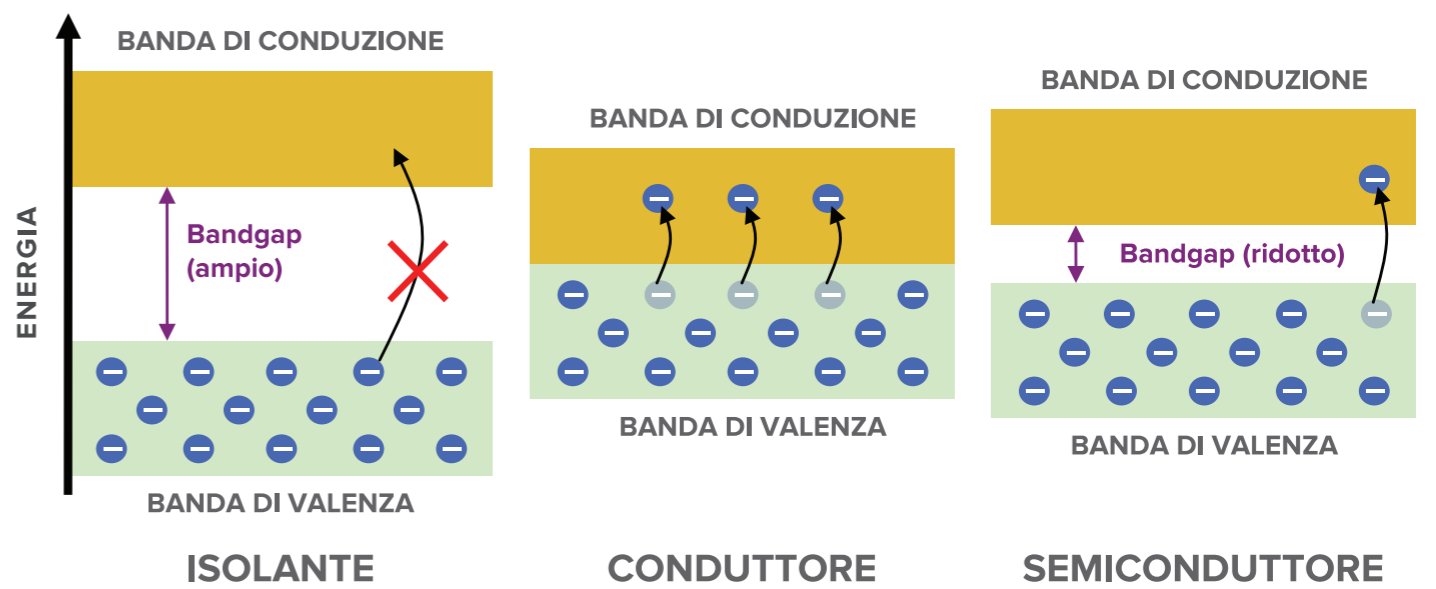
5 B boro 10,81 2,0	6 C carbonio 12,01 2,5	7 N azoto 14,01 3,0
13 Al alluminio 26,98 1,5	14 Si silicio 28,09 1,8	15 P fosforo 30,97 2,1
31 Ga galio 69,72 1,8	32 Ge germanio 72,61 1,8	33 As arsenico 74,92 2,0



## LA CORRENTE ELETTRICA

La corrente elettrica è data dal **moto di cariche elettriche in un circuito** o all'interno di una soluzione elettrolitica. Una **forza elettrica** genera un **flusso di cariche, e queste sperimentano una "resistenza"** mentre attraversano il materiale in cui si muovono. I materiali in cui la **resistenza è molto bassa sono detti CONDUTTORI** (per esempio i metalli), mentre quelli in cui la **resistenza è molto alta sono detti ISOLANTI**. I **SEMICONDUCTORI** sono materiali interessanti perché **possiedono proprietà intermedie tra conduttori e isolanti**, e tali proprietà possono essere **modificate a piacere**. Inoltre, mentre nei metalli le cariche sono elettroni (negativi), nei semiconduttori vi sono sia cariche positive che elettroni in moto.

ENERGIE NEGLI ELETTRONI NEGLI ATOMI E NEI SOLIDI



- 1 Per effetto di una fonte di energia esterna (es. luce o calore) un elettrone viene promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione, e dà origine ad una corrente (in direzione opposta al campo elettrico della batteria)
- 2 Si crea così una lacuna nella banda di valenza, che viene riempita da un elettrone vicino (di valenza), che si muove in direzione opposta al campo.
- 3 La corrente complessiva è data dall'elettrone, che si muove contro il campo e dalla lacuna, che di fatto "si muove" nella stessa direzione del campo della batteria.

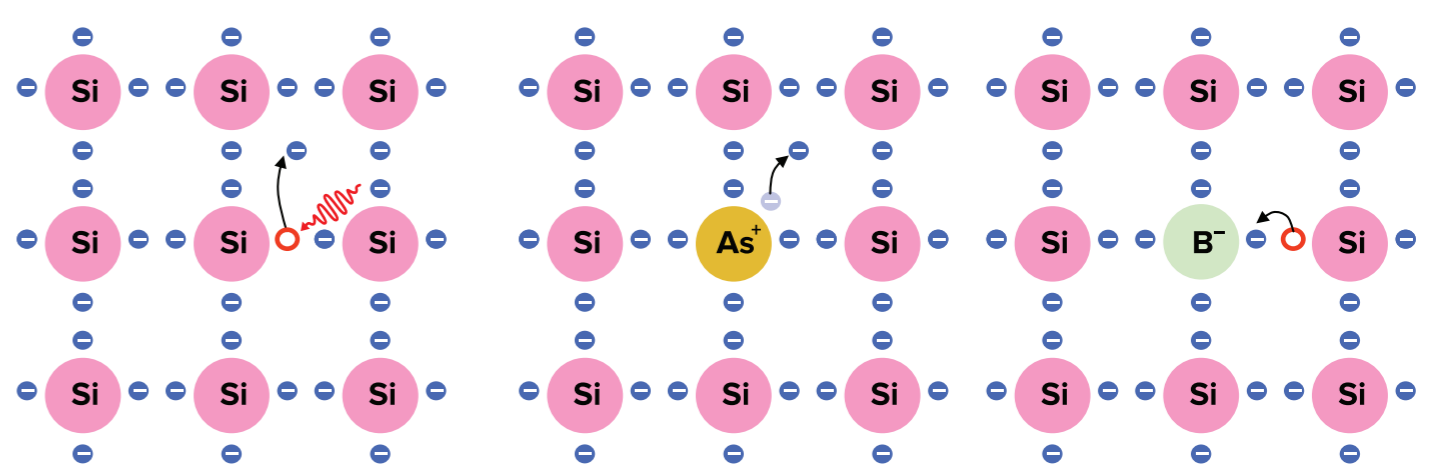
CREAZIONE DI COPPIE ELETTRONE-LACUNA E LORO MOTO PER EFFETTO DEL CAMPO ELETTRICO

## UN COLPO DI CREATIVITÀ: IL DROGAGGIO

È una tecnica che **introduce**, durante la crescita del semiconduttore, **atomi di specie diversa** scelti in modo da **aumentare la carica elettrica** totale che produce la corrente. Pochi atomi di drogante ogni milione di atomi di semiconduttore possono aumentare molto la corrente elettrica attraverso il semiconduttore.

## TUTTO DIPENDE DAL "BAND GAP"... CIOÈ DALLA STRUTTURA DEGLI ATOMI E DAL LORO LEGAME!

Gli elettroni nel solido semiconduttore possono avere solo certi valori di energia: ci sono **interi intervalli di energie permesse (BANDE)** e **interi intervalli di energie proibite (GAPS)**. Se gli elettroni da «collocare» riempiono completamente una banda, per **aumentare la loro energia** gli elettroni devono passare nella banda successiva ed eventualmente **superare un gap**. Se un elettrone lascia la banda piena e passa ad uno stato nella banda superiore crea nella banda di partenza un «buco», chiamato **«LACUNA»**: una sorta di **«vuoto di elettrone»** che si comporta come una carica positiva. Infatti, così come un posto vuoto in una fila di auto si muove "in verso opposto alle auto", nello stesso modo un «vuoto di elettroni», che ha carica positiva, **si muove in verso opposto agli elettroni**.



**Semiconduttore intrinseco**  
Nel Silicio ogni atomo ha 4 elettroni di valenza, che mette in condivisione con gli atomi vicini per raggiungere la stabilità (8 elettroni). Per effetto dell'agitazione termica alcuni elettroni vengono promossi in banda di conduzione e si creano altrettante lacune in banda di valenza.

**Semiconduttore drogato N**  
L'atomo di Arsenico ha 5 elettroni di valenza, pertanto ha in condivisione 9 elettroni con gli atomi vicini: l'ultimo elettrone, debolmente legato rispetto agli altri, può saltare facilmente in banda di conduzione. Il materiale si ritrova così con un eccesso di elettroni di conduzione.

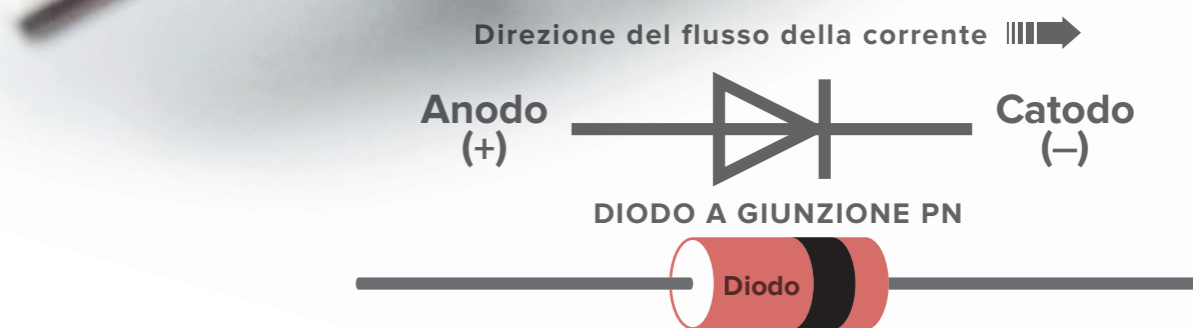
**Semiconduttore drogato P**  
L'atomo di Boro ha 3 elettroni di valenza, pertanto ha in condivisione 7 elettroni con gli atomi vicini: strappa allora un elettrone all'atomo di silicio più vicino per raggiungere la stabilità: si crea così un eccesso di lacune in banda di valenza.

IL DROGAGGIO

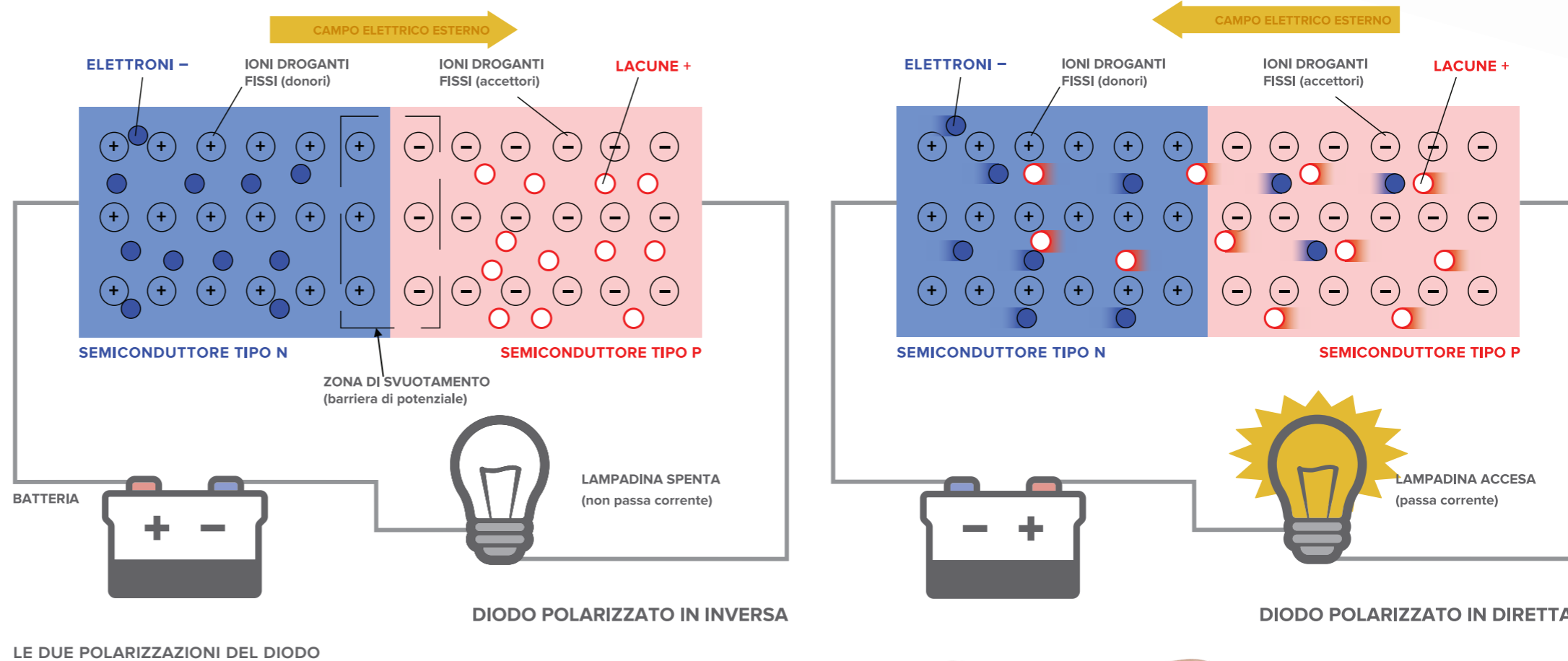
# CREAZIONI... ELETTRIZZANTI!

## IL DIODO A SEMICONDUCTORE

Detto anche giunzione PN, il diodo a semiconduttore **si ottiene accostando due pezzi di semiconduttore, uno di tipo P** (cioè drogato con un eccesso di lacune), **e l'altro di tipo N** (cioè drogato con un eccesso di elettroni) e applicando alle estremità i morsetti di una batteria. Il diodo funziona come un **"raddrizzatore di corrente"**, poiché si lascia attraversare dalla corrente solo in un verso (polarizzazione in diretta). Nel verso opposto (polarizzazione in inversa) il diodo **non può essere attraversato dalla corrente**.



ESEMPIO DI RADIO A VALVOLE



LE DUE POLARIZZAZIONI DEL DIODO



ESEMPIO DI CPU  
MOBILE-ITX CPU MODULE-HAND-5  
CREDITS: WIKIMEDIA

## IL TRANSISTOR BJT

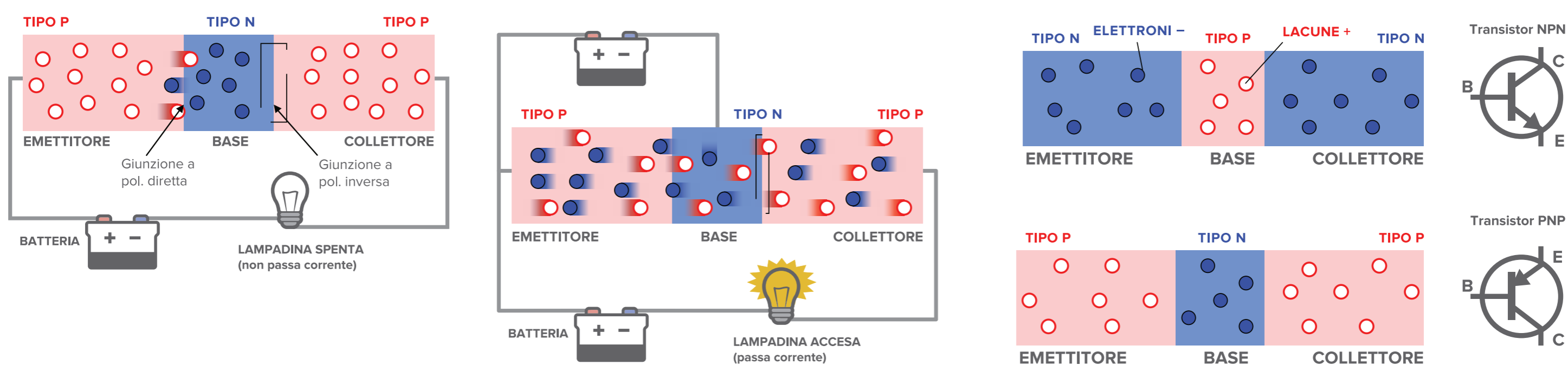
Unendo tre blocchi di semiconduttore con drogaggi alternati, del tipo PNP o NPN, si ottiene il cosiddetto **transistor a giunzione bipolare (BJT)**. I tre blocchi prendono il nome di **EMETTITORE**, **BASE** e **COLLETTORE**, e quando i due blocchi esterni sono collegati ad un generatore di fatto costituiscono con la base una coppia di giunzioni PN a polarità opposte.

Il **transistor** agisce da **interruttore e amplificatore di corrente**, regolando il passaggio della corrente in base alla tensione tra emettitore e base: una piccola variazione di tale tensione produce infatti una enorme variazione della corrente che attraversa la coppia emettitore-collettore. **Per via delle sue proprietà**, il transistor ha **infinite applicazioni**: innanzitutto, grazie al suo stato binario (la corrente passa/non passa), può agire come **interruttore o cella di memoria (0/1)**, utile per calcoli di tipo logico (è infatti l'**unità fondamentale della CPU**, il processore che esegue le operazioni all'interno del computer); in secondo luogo, esso trova impiego in tutte quelle **applicazioni che richiedono l'amplificazione di un segnale elettrico, a cominciare dalla radio**.

## SEMPRE PIÙ PICCOLI...

All'inizio del Novecento esistevano già i precursori di diodi e transistor, i cosiddetti **"tubi a vuoto"** o **"valvole termoioniche"** (diodo a vuoto e triodo a vuoto). Per funzionare questi dispositivi richiedevano che al loro interno fosse praticato il vuoto, erano **particolarmente ingombranti e consumavano molta energia**: la corrente veniva, infatti, emessa portando un filamento metallico a incandescenza.

**Oggi** i transistor hanno dimensioni dell'ordine di alcuni **nanometri** (miliardesimo di metro): in un microprocessore di un computer, di pochi cm di lato, ve ne sono milioni. A livello di ricerca si stanno realizzando **transistor delle dimensioni di un atomo**, e questo terreno è particolarmente affascinante perché **governato dalle leggi della Meccanica Quantistica...**



# CREAZIONI... LUMINOSE!

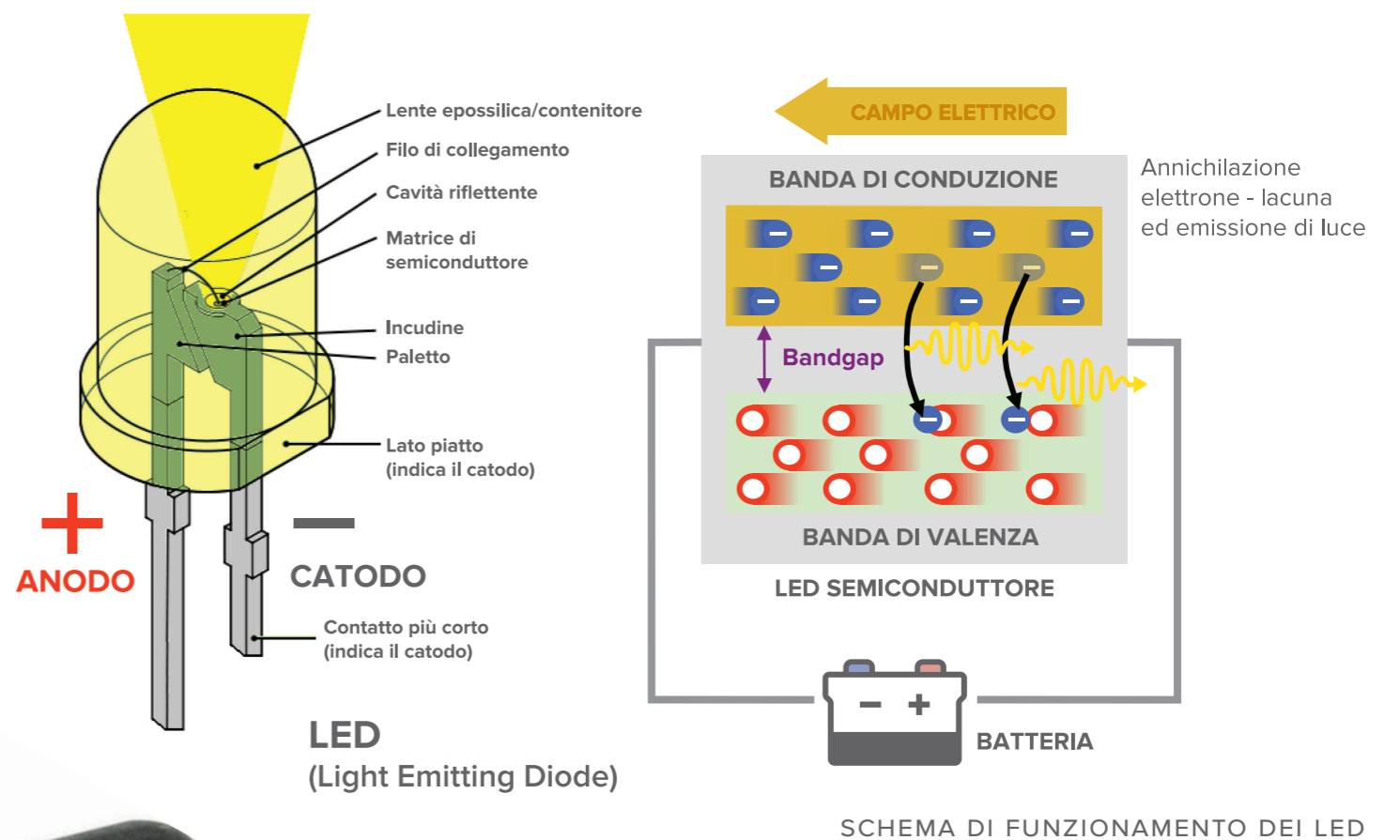
## IL LED

DIODO A EMISSIONE DI LUCE  
O LIGHT-EMITTING DIODE

Quando un elettrone passa da uno stato in banda di conduzione ad uno stato vuoto in banda di valenza si libera energia. Questo processo si può descrivere dicendo che un elettrone e una lacuna si sono «ricombinati».

Sotto opportune condizioni, facendo fluire elettroni e lacune in un diodo a semiconduttore a giunzione pn polarizzato in diretta, essi si ricombinano in grande numero liberando energia sotto forma di luce. Se il salto di energia ha valore opportuno tale luce è visibile ed ha un solo colore, determinato dall'ampiezza del salto. È, quindi, possibile controllare il colore della luce emessa «ingegnerizzando» opportunamente il diodo.

I LED stanno rimpiazzando le vecchie lampade ad incandescenza nell'illuminazione domestica e pubblica a causa del loro consumo energetico molto più ridotto, legato al fatto che la luce è emessa senza riscaldamento. Inoltre, la loro possibilità di miniaturizzazione offre molteplici applicazioni nell'elettronica di consumo.



## FOTODIODI

Il fotodiodo è un diodo a semiconduttore (a giunzione PN) polarizzato in inversa in cui, in condizione di illuminazione opportune, si generano coppie elettrone lacuna che rendono possibile la conduzione di corrente elettrica (tanto più intensa quanto più intensa è l'illuminazione).



UN FOTODIODO

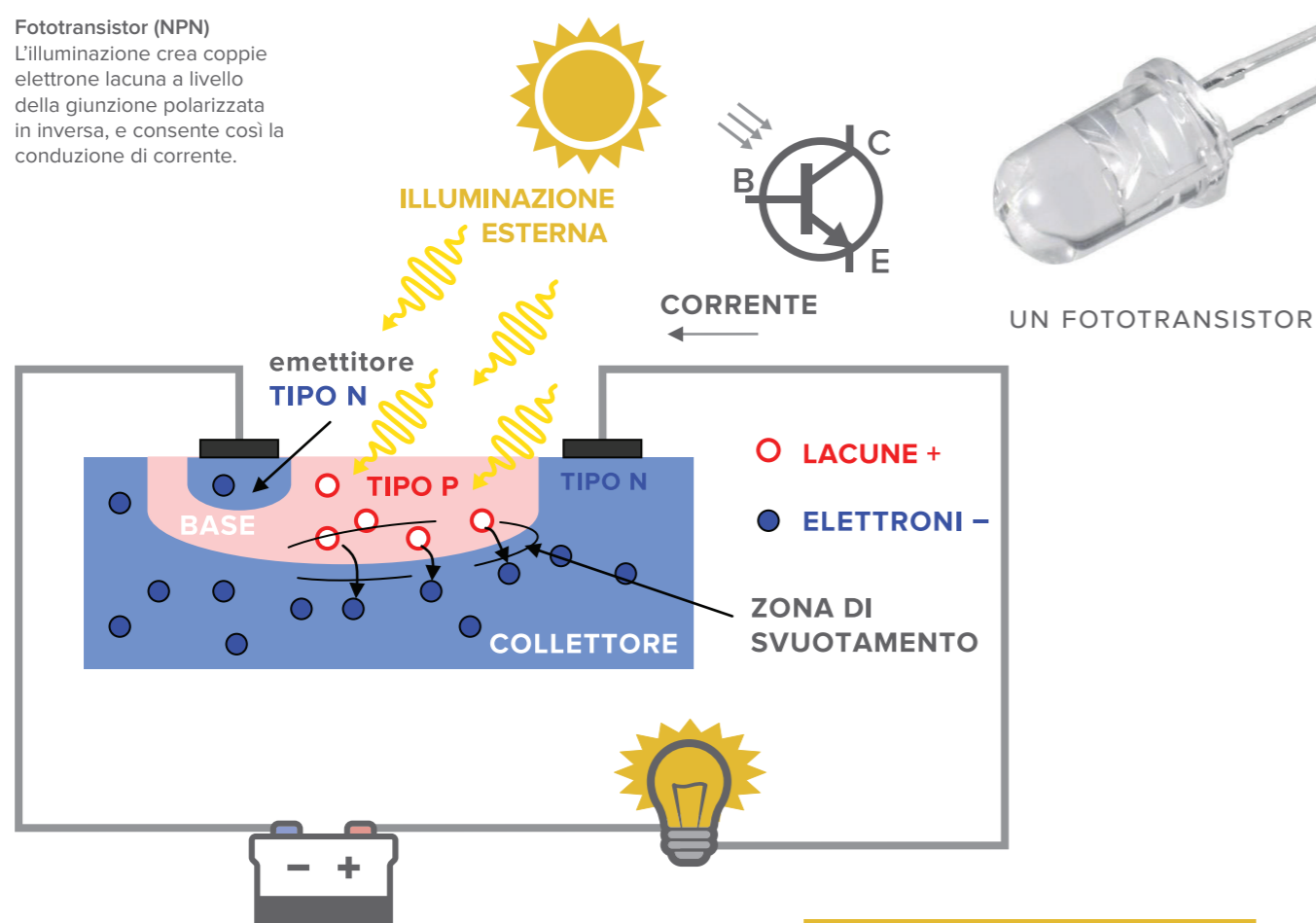
## LA CELLA SOLARE (O «FOTOVOLTAICA»)

Il Sole è una fonte praticamente infinita di luce, con emissione prevalente nel visibile. Illuminando con la luce del Sole un semiconduttore, l'energia della luce può spostare elettroni da una banda piena ad una vuota generando così una coppia elettrone-lacuna, utilizzabili per produrre una corrente. Sulla base di questo principio le celle fotovoltaiche a semiconduttore possono produrre energia elettrica sotto forma di corrente a partire dalla luce solare. Nella pratica tutto ciò avviene in una giunzione PN.

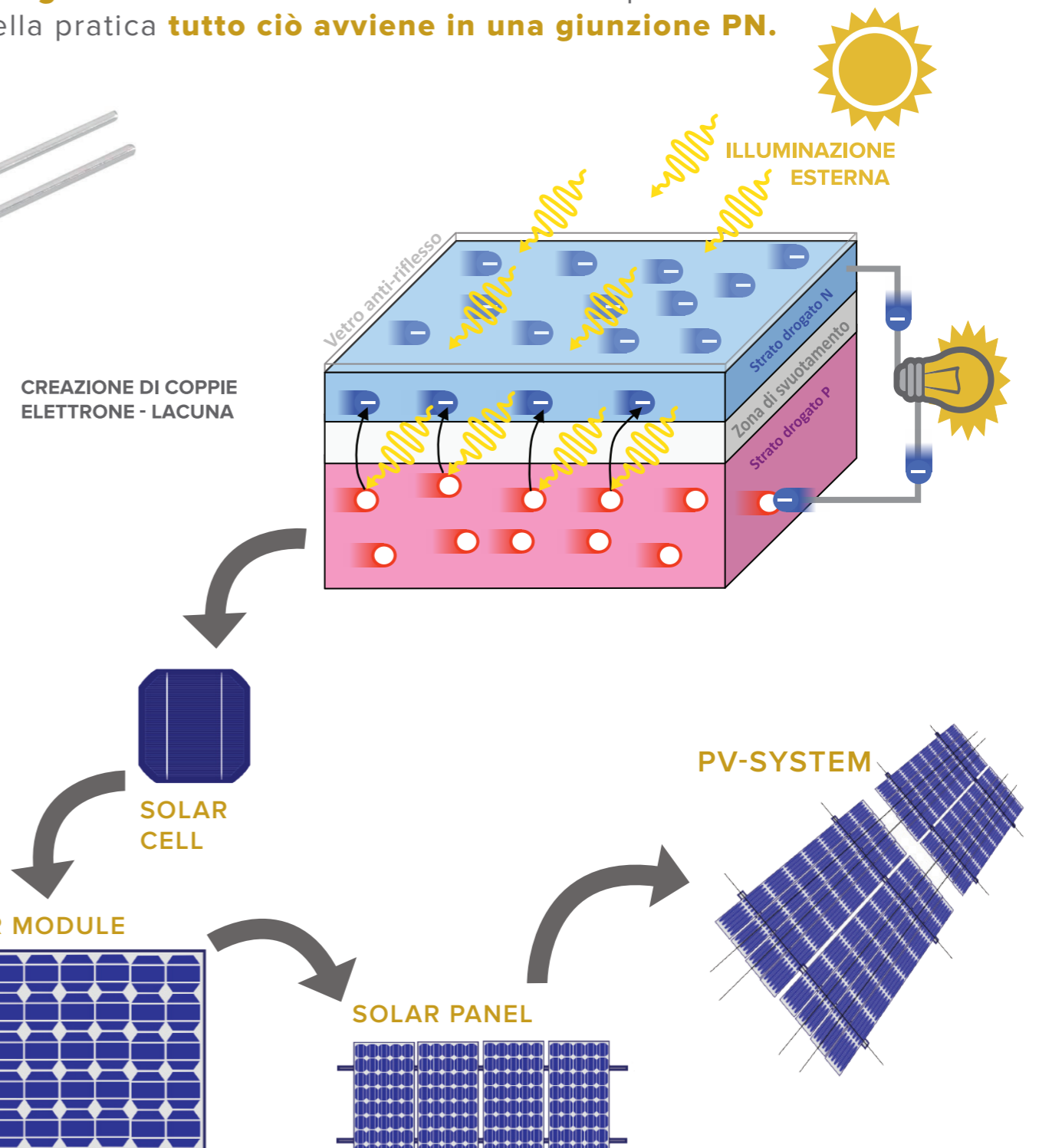
## FOTOTRANSISTOR

Un fototransistor è un transistor BJT nel quale, illuminando la giunzione a polarizzazione inversa tra la base ed il collettore, similmente a quanto accade nel fotodiodo, si genera una corrente. Tuttavia il fototransistor ha una sensibilità alla luce molto maggiore grazie al fatto che la corrente di elettroni generata dalla luce nella giunzione viene successivamente amplificata dal transistor.

Fototransistor (NPN)  
L'illuminazione crea coppie elettrone lacuna a livello della giunzione polarizzata in inversa, e consente così la conduzione di corrente.

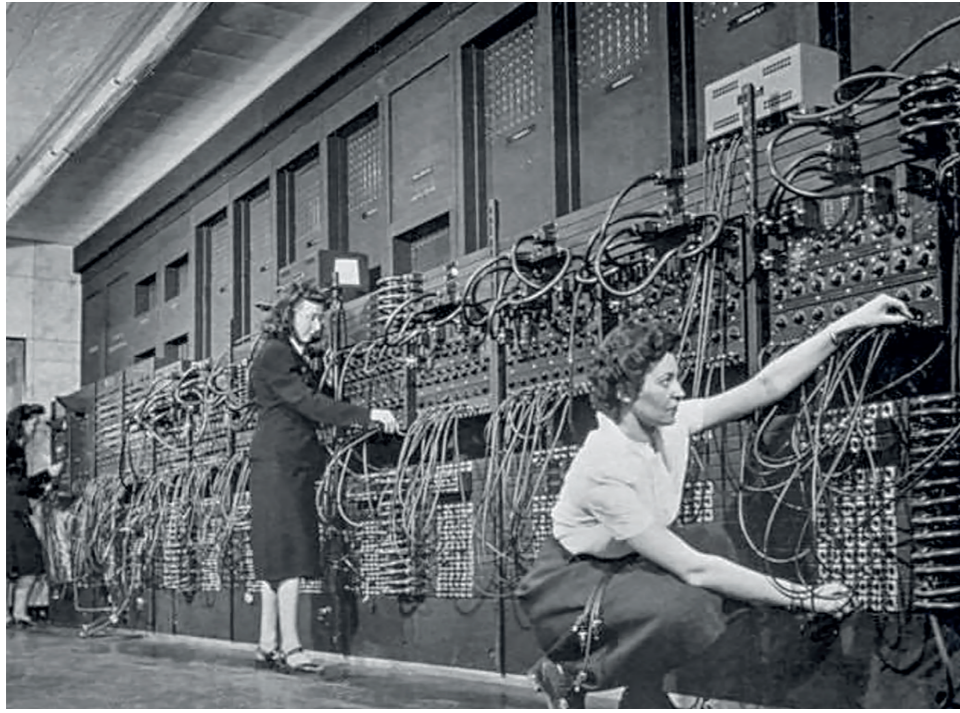


FUNZIONAMENTO DEL FOTOTRANSISTOR

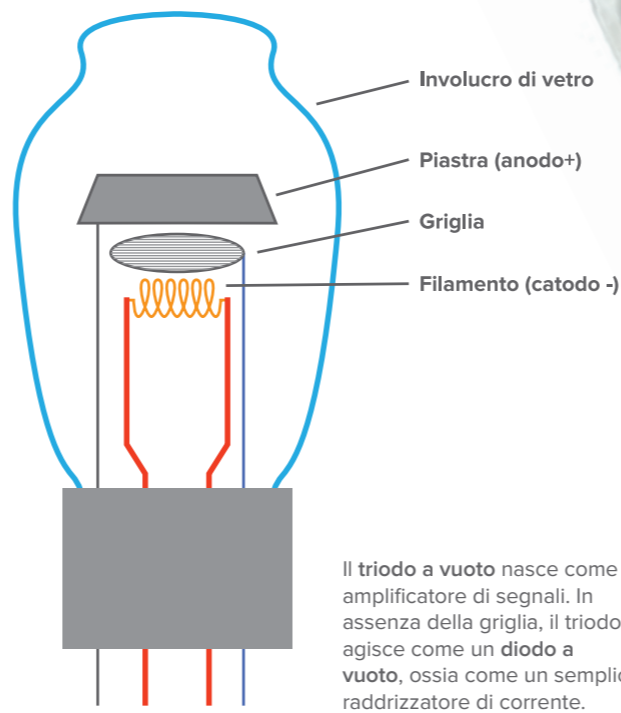


CELLA FOTOVOLTAICA A SEMICONDUTTORE E COMPOSIZIONE DEI MODULI FOTOVOLTAICI

# UNA LUNGA STORIA...



ENIAC (ELECTRONIC NUMERICAL INTEGRATOR AND COMPUTER) A PHILADELPHIA, PENNSYLVANIA.



Il triodo a vuoto nasce come amplificatore di segnali. In assenza della griglia, il triodo agisce come un diodo a vuoto, ossia come un semplice raddrizzatore di corrente.

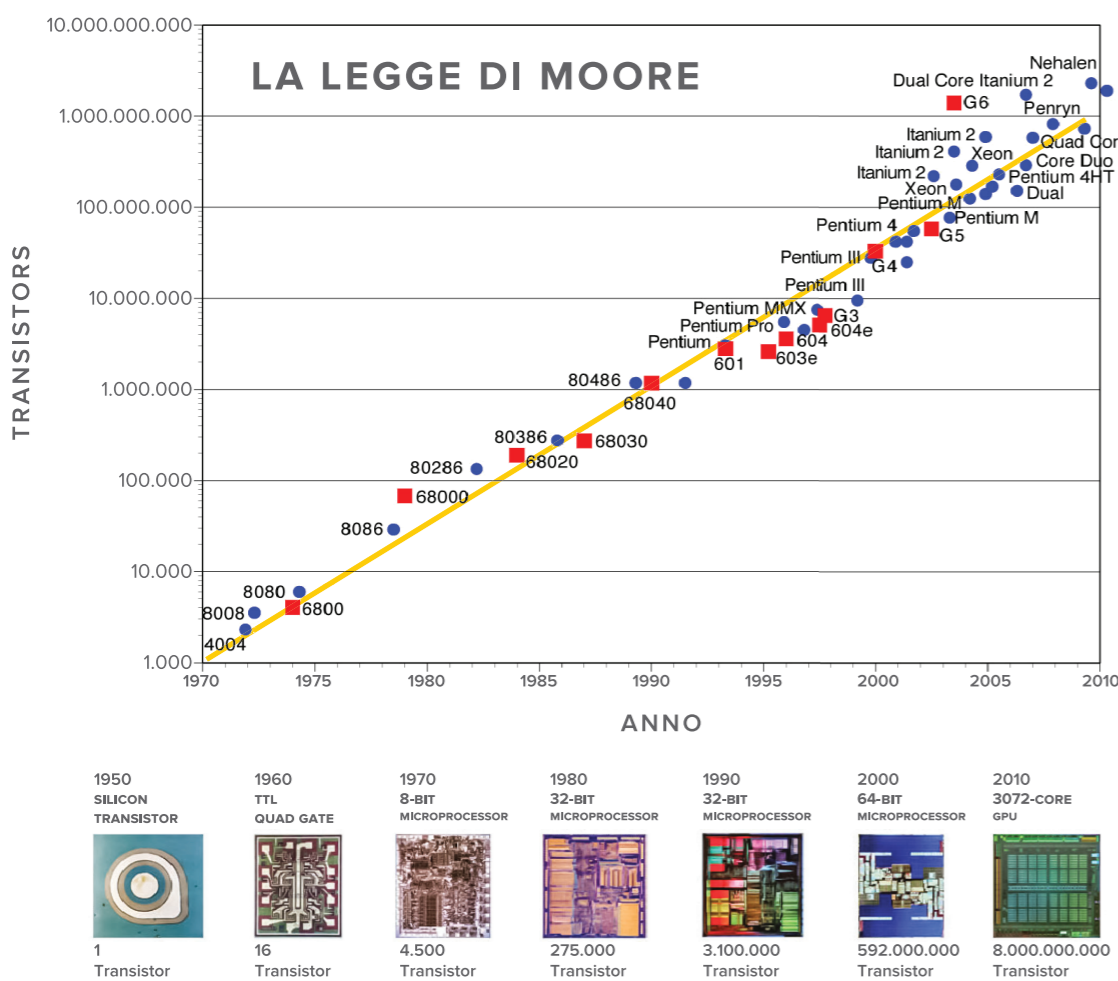


## ...AL TRANSISTOR...

## DALLE VALVOLE...

Uno dei primi computer della storia, **ENIAC (1946)**, funzionava con **18.000 valvole termoioniche**, e per questo motivo occupava **un intero piano di un grattacielo di Philadelphia**; quando veniva messo in funzione, l'illuminazione delle strade della città si abbassava.

Il transistor a stato solido fu inventato da **Shockley, Brattain e Bardeen nel 1948** utilizzando il germanio e valse ai suoi ideatori il Premio **Nobel per la Fisica** nel 1959. Tali dispositivi, a basso consumo energetico e dalle dimensioni contenute, consentirono la **nascita dell'elettronica di largo consumo** e la conseguente rivoluzione digitale che ha cambiato radicalmente il nostro modo di vivere.

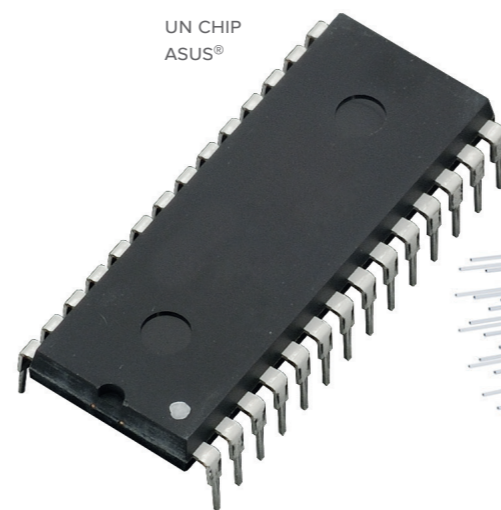


SHOCKLEY, BRATTAIN E BARDEEN E IL LORO TRANSISTOR

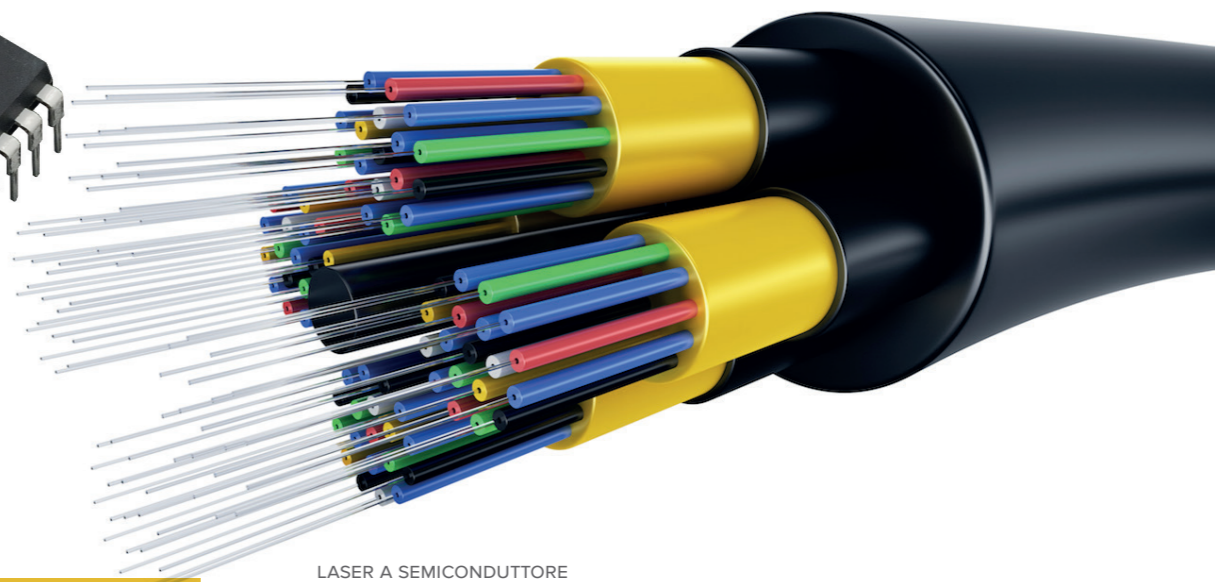
## ...AI CHIP

Il **circuito integrato (1958)** è un circuito elettronico miniaturizzato dove i vari componenti sono realizzati simultaneamente grazie a un unico processo fisico-chimico. **Il primo chip della storia conteneva un circuito integrato a 10 componenti.**

La scala di integrazione di un circuito integrato dà una indicazione della sua complessità, indicando grosso modo quanti transistor sono contenuti in esso: **la capacità di "calcolo" di un chip aumenta con il numero dei suoi transistor, in accordo con la Legge di Moore.** Formulata originariamente nel 1965, essa afferma che **ogni 18 mesi raddoppia il numero di transistor dentro un processore** e, fino ad oggi, si è dimostrata immancabilmente vera.



ESEMPIO DI CABLAGGIO A FIBRA OTTICA



LASER A SEMICONDUCTORE

## DALL'ELETTRONICA... ALLA FOTONICA

La parola Fotonica è stata usata per la prima volta alla fine degli anni '60, per descrivere un campo di ricerca avente come scopo **l'uso della luce per la realizzazione di funzioni fino ad allora realizzate con dispositivi elettronici, come ad esempio telecomunicazioni ed elaborazione di dati.**

Dopo l'invenzione del **LASER** (anni '60) e la costruzione del **diodo LASER** (anni '70), la realizzazione e l'impiego delle **fibre ottiche** e dei **cristalli fotonici** per trasmettere la luce (anni '90) hanno consentito la **rivoluzione delle telecomunicazioni del tardo XX secolo e fornito l'infrastruttura per lo sviluppo di INTERNET.**

