

# 48

Il diabete è una patologia sociale che riguarda più di tre milioni d'italiani; ne soffre il 20% degli ultra settantacinquenni. I malati devono pungersi le dita più volte al giorno per misurare il livello del glucosio nel sangue e iniettarsi l'insulina, che non è prodotta in sufficienza dal pancreas.

 Leggi la risposta  
nell'eBook

**Quali nanotecnologie sono in corso di studio per rendere la terapia del diabete meno invasiva?**

UNC SCHOOL OF MEDICINE/UNC HEALTH CARE

## LA FISICA DELLO STATO SOLIDO

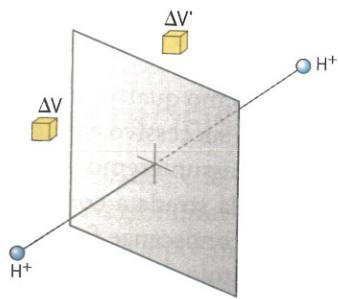
### 1 I LEGAMI CHIMICI NELLE MOLECOLE E NEI CRISTALLI



L'idrogeno è l'elemento più antico. Secondo il modello cosmologico del Big Bang i nuclei dei suoi atomi (i protoni) si sono formati entro il primo secondo di tempo dalla nascita dell'Universo, avvenuta 13,8 miliardi di anni fa. È questa l'età di tutto l'idrogeno che esiste, sia quello presente nelle **nubi interstellari** sia quello che fa parte delle molecole d'acqua negli oceani e nel nostro corpo.

L'idrogeno è anche l'elemento più semplice. Conviene quindi cominciare dalla sua molecola,  $H_2$ , per capire come si aggregano gli atomi nelle varie sostanze chimiche.

#### La molecola di idrogeno



**FIGURA 1 ▶**  
La molecola di idrogeno è simmetrica per riflessione rispetto al piano equidistante dai due nuclei.

La molecola dell'idrogeno è formata da due atomi indistinguibili, per cui, come mostra la **FIGURA 1**, il sistema costituito dai suoi due nuclei è simmetrico rispetto al piano da essi equidistante. Aggiungiamo a questo sistema un elettrone e cerchiamo di dedurre le proprietà della funzione d'onda stazionaria  $\Psi$  che lo descrive.

Nel capitolo «La fisica quantistica» abbiamo visto che  $\Psi$  è un'ampiezza di probabilità. Ciò significa che il suo

modulo quadrato, che dipende dal punto, è direttamente proporzionale alla probabilità che l'elettrone si trovi nell'intorno del punto considerato.

Poiché il sistema dei due nuclei è simmetrico per riflessione rispetto al piano rappresentato nella figura, l'elettrone ha la stessa probabilità di essere in un volumetto  $\Delta V$ , posto da un lato del piano, o di essere nel corrispondente volumetto  $\Delta V'$  di uguale grandezza, posto dall'altro lato. In altri termini, per ragioni di simmetria, il modulo quadrato di  $\Psi$  deve essere lo stesso in punti speculari rispetto al piano.

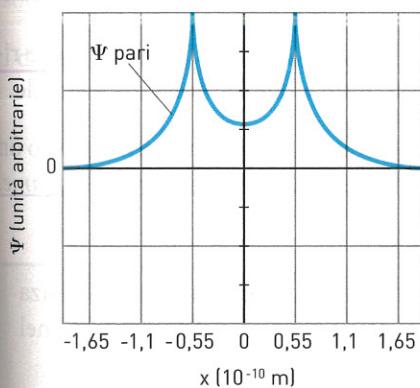
Di conseguenza, la funzione  $\Psi$  può essere di due tipi. Infatti, lo stesso modulo quadrato da un lato e dall'altro del piano si ottiene soltanto in due casi:

- con una  $\Psi_{\text{pari}}$ , che in punti simmetrici ha lo stesso modulo e lo stesso segno;
- con una  $\Psi_{\text{dispari}}$ , che in punti simmetrici ha lo stesso modulo e segno opposto.

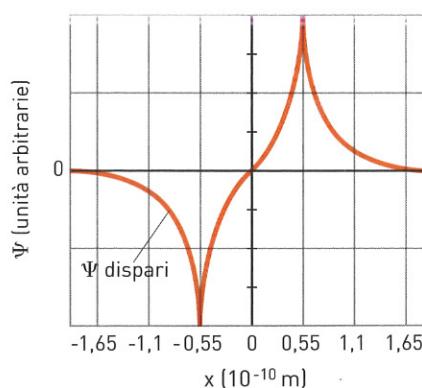
Rappresentiamo le due ampiezze di probabilità, che indichiamo rispettivamente con i simboli  $\Psi_{\text{pari}}$  e  $\Psi_{\text{dispari}}$ , in funzione della posizione lungo l'asse che congiunge i due nuclei e fissiamo l'origine dell'asse nel punto medio tra i nuclei (cioè nel punto di intersezione con il piano di simmetria).

Osserviamo che, nell'origine, una funzione dispari deve essere uguale a se stessa e anche al proprio opposto; quindi il suo valore deve essere nullo.

■ Un elettrone con funzione d'onda  $\Psi_{\text{pari}}$  ha un'alta probabilità di trovarsi nella regione centrale della molecola, dove l'attrazione dei protoni è più intensa.



■ Invece, un elettrone descritto dalla funzione  $\Psi_{\text{dispari}}$ , che si annulla nell'origine, ha una probabilità molto bassa di trovarsi vicino al centro.



A causa di questa differenza, alle due funzioni d'onda stazionarie corrispondono due diversi livelli di energia.

Per il sistema formato da un elettrone e dai due nuclei, il livello più basso dell'energia totale è quello associato alla funzione pari. Tale funzione, infatti, descrive un elettrone che con maggiore probabilità si trova vicino al centro della molecola, dove il potenziale elettrico è minore: questo elettrone è più legato ai due nuclei.

La molecola neutra di idrogeno ha due elettroni, ma il suo stato è simile a quello che abbiamo descritto per un elettrone singolo. Il secondo elettrone va infatti a occupare, con numero quantico di spin opposto, lo stesso *orbitale molecolare* rappresentato dalla funzione  $\Psi_{\text{pari}}$ . Con due elettroni l'energia totale del sistema è ancora minore, perché le forze attrattive tra il secondo elettrone e i nuclei prevalgono sulla repulsione tra i due elettroni.

## L'energia di legame

Finora abbiamo immaginato di comporre una molecola di idrogeno aggiungendo ai due nuclei un elettrone alla volta. Possiamo anche ottenere la molecola avvicinando l'uno all'altro due atomi di idrogeno neutri.

Se i due atomi sono nello stato fondamentale, e finché sono molto lontani, in ciascuno di essi l'elettrone occupa un orbitale a simmetria sferica, che circonda il nucleo. Tutti e due gli atomi hanno un'energia di  $-13,6 \text{ eV}$ , come prevede la formula di Bohr. Però, all'avvicinarsi dei due atomi, i livelli di energia si sdoppiano.

Se, dunque, un medesimo livello e due identiche funzioni d'onda, separate nello spazio, descrivono singolarmente gli atomi nel loro stato fondamentale, nella molecola si hanno, in corrispondenza, due livelli distinti e due funzioni d'onda differenti.

Queste funzioni d'onda risolvono l'equazione di Schrödinger scritta per la molecola nel suo complesso e sono, appunto, la funzione  $\Psi_{\text{pari}}$  con energia minore, e la funzione  $\Psi_{\text{dispari}}$  con energia maggiore, che abbiamo illustrato in precedenza.

Nello stato fondamentale entrambi gli elettroni della molecola si trovano nell'orbitale descritto da  $\Psi_{\text{pari}}$  e si distinguono per il numero quantico di spin.

L'energia calcolata per la molecola di idrogeno nello stato fondamentale è  $-31,7 \text{ eV}$ . Pertanto, la differenza tra l'energia totale dei due atomi isolati e l'energia della molecola è

$$2(-13,6 \text{ eV}) - (-31,7 \text{ eV}) = 4,5 \text{ eV}.$$

Il fatto che questa quantità sia positiva, cioè che la molecola abbia energia minore rispetto all'insieme dei due atomi quando sono lontani, indica che la molecola è stabile.

Le interazioni che tengono uniti i due atomi nella molecola di idrogeno costituiscono un **legame chimico** e l'energia necessaria a rompere la molecola è detta *energia di legame*. In generale,

**l'energia di legame** di una molecola composta da due atomi è uguale alla differenza (positiva) tra l'energia minima dei due atomi isolati e l'energia della molecola nel suo stato fondamentale.

In buon accordo con il valore misurato sperimentalmente, la teoria quantistica fornisce quindi, per la molecola di idrogeno, un'energia di legame di  $4,5 \text{ eV}$ . Altre energie di legame sono raccolte nella tabella seguente.

| ENERGIE DI LEGAME ( $B$ ) IN $\text{kJ/mol}$ DI ALCUNE MOLECOLE BIATOMICHE |   |              |   |
|--|---|--------------|---|
| molecola   | $B \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$ | molecola     | $B \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$ |
| $\text{H}_2$   | 436   | $\text{l}_2$ | 151   |
| $\text{N}_2$   | 944   | HF           | 565   |
| $\text{O}_2$   | 496   | HCl          | 431   |
| $\text{F}_2$   | 158   | HBr          | 366   |
| $\text{Cl}_2$  | 242   | HI           | 299   |
| $\text{Br}_2$  | 193   | CO           | 1074  |

## Legame covalente

Il legame della molecola di idrogeno è detto *covalente*.

Ha un **legame covalente** ogni volta che una coppia di elettroni è condivisa tra due atomi.

In questo tipo di legame nessuno dei due elettroni appartiene più a un singolo atomo, ma entrambi appartengono alla molecola nel suo insieme.

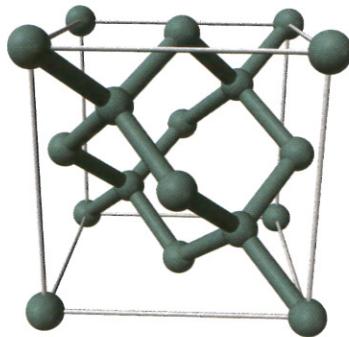
In molecole formate da atomi identici, come quella di idrogeno o anche quelle di elio ( $O_2$ ) e di azoto ( $N_2$ ), gli elettroni sono condivisi in modo paritetico: con uguale probabilità possono trovarsi dall'una o dall'altra parte rispetto al centro della molecola. Questi legami sono chiamati *omopolari*.

E nella molecola d'acqua ( $H_2O$ ), tra i due atomi di idrogeno e l'atomo di ossigeno si creano due legami covalenti, ma in questo caso si tratta di legami *polar*: in ciascuno di essi la maggiore probabilità che gli elettroni condivisi si trovino dalla parte dell'atomo di ossigeno ed è minore la probabilità che si trovino dalla parte dell'atomo di idrogeno.

## Legami nei cristalli

I chimici tengono assieme le singole molecole, ma anche gli aggregati solidi: per esempio i cristalli di atomi neutri, come il diamante, quelli di ioni, come il cloruro di sodio, i metalli, e i cristalli fatti di molecole, come il ghiaccio.

Questi cristalli sono costituiti da atomi di carbonio uniti da legami covalenti (FIGURA 2).



◀ FIGURA 2

La struttura del reticolo cristallino del diamante (e anche del silicio e del germanio). Ogni atomo, rappresentato da una sfera, forma quattro legami covalenti, rappresentati da bastoncini, con altrettanti atomi posti ai vertici di un tetraedro regolare.

Il carbonio ha quattro *elettroni di valenza*, cioè quattro elettroni nel guscio più esterno.

Nel reticolo cristallino del diamante ogni atomo di carbonio condivide uno dei suoi elettroni di valenza con ciascuno dei quattro atomi di carbonio più vicini.

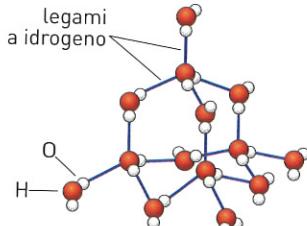
Il silicio e il germanio, che nella tavola periodica degli elementi appartengono allo stesso gruppo del carbonio, formano cristalli con struttura identica a quella del diamante.

Le sostanze sono le caratteristiche del cristallo di cloruro di sodio. In esso ogni atomo di sodio dona un elettrone a un atomo di cloro; così, la struttura reticolare si mantiene unita grazie alle forze attrattive tra ioni di segno opposto.

Questo tipo di interazione è chiamata **legame ionico** e può essere considerata un caso particolare di legame covalente polare.

Un legame chimico ancora diverso si ha nei metalli. Come infatti suggeriscono le proprietà di conduzione elettrica e di conduzione del calore, all'interno di questi materiali vi sono elettroni completamente liberi di muoversi.

Gli elettroni di conduzione di un metallo sono condivisi da tutti gli atomi e sono descritti da funzioni d'onda che si estendono su dimensioni macroscopiche.



**FIGURA 3**  
I legami a idrogeno nel ghiaccio.

### AL VOLO

#### UN LEGAME POSSIBILE?

- È possibile che la molecola  $H_2$  formi un legame a idrogeno con la molecola di qualche composto contenente idrogeno?

Ciò significa che il legame metallico non si forma soltanto tra atomi vicini, ma interessa l'intero reticolo cristallino.

In sostanza il reticolo è fatto di ioni positivi, tenuti assieme dalle interazioni attrattive con il «mare di elettroni» in cui sono immersi. Nel loro complesso gli ioni e gli elettroni formano un sistema legato: è questo il motivo per cui occorre energia per strappare a un metallo anche solo un elettrone, come dimostra, per esempio, l'effetto fotoelettrico.

Tra atomi, nelle molecole e nei cristalli, si producono dei legami relativamente forti, che si rompono a condizione che vengano spese energie di qualche elettronvolt per legame. Legami fino a cento volte più deboli si formano tra molecole polari, cioè molecole, come quella dell'acqua, che hanno una distribuzione elettronica sbilanciata e quindi presentano un polo positivo e uno negativo.

Le molecole d'acqua sono i «mattoni» dei cristalli di ghiaccio, cementati dal legame a idrogeno (FIGURA 3).

In generale, per avere legami a idrogeno, servono molecole polari che contengano almeno un atomo di idrogeno. Questo atomo, pur rimanendo strettamente legato alla molecola di appartenenza, di cui costituisce il polo positivo (o una delle estremità positive), tende a stare vicino per attrazione elettrostatica al polo negativo di un'altra molecola.

Sono legami a idrogeno anche quelli che uniscono i due filamenti della doppia elica del DNA.

### PROBLEMA MODELLO | 1 L'ENERGIA DI UNA MOLECOLA

L'energia minima di un atomo di azoto (N) è pari a  $-14,5$  eV e l'energia di legame della molecola di azoto  $N_2$  è  $944$  kJ/mol.

- Calcola l'energia della molecola di azoto nel suo stato fondamentale.

#### ■ DATI

$$\begin{aligned} E_{\text{legame}} &= 944 \text{ kJ/mol} \\ E_{\text{atomo}} &= -14,5 \text{ eV} \end{aligned}$$

#### ■ INCognite

Energia della molecola di azoto:  $E_{\text{molecola}} = ?$

### L'IDEA

- Uso la definizione di energia di legame  $E_{\text{legame}}$ :

$E_{\text{legame}} = 2 E_{\text{atomo}} - E_{\text{molecola}}$ , dove  $E_{\text{atomo}}$  è l'energia minima del singolo atomo e  $E_{\text{molecola}}$  è l'energia della molecola.

### LA SOLUZIONE

#### Calcolo l'energia di legame in eV di una molecola di azoto $N_2$

Poiché una mole di azoto contiene un numero di molecole pari al numero di Avogadro  $N_A = 6,02 \times 10^{23}$  posso

vere che:

$$E_{\text{legame}} = \frac{944 \times 10^3 \text{ J/mol}}{6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1,57 \times 10^{-18} \text{ J} = 9,81 \text{ eV}$$

Ho ricordato che  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{19} \text{ J}$ .

### Calcolo l'energia di una molecola nello stato fondamentale

definizione di energia di legame  $E_{\text{legame}}$  so che:

$$E_{\text{legame}} = 2 E_{\text{atomo}} - E_{\text{molecola}}$$

ricito il termine per l'energia di una molecola  $E_{\text{molecola}}$ :

$$E_{\text{molecola}} = 2 E_{\text{atomo}} - E_{\text{legame}} = 2 \times (-14,5 \text{ eV}) - 9,81 \text{ eV} = -38,8 \text{ eV}$$

l'energia della molecola è negativa come ci aspettiamo dato che il sistema è legato e si è scelto lo zero dell'energia potenziale all'infinito.

## R NON SBAGLIARE

Le energie di una molecola o di un atomo si esprimono normalmente in eV: ricordati di trasformare tutte le energie in eV prima di procedere a calcolare somme e sottrazioni.

attenzione nei calcoli al segno (positivo o negativo) delle energie

## BANDE DI ENERGIA NEI SOLIDI CRISTALLINI

Siamo ora al caso di un cristallo le considerazioni che abbiamo fatto nel paragrafo precedente per la molecola di idrogeno.

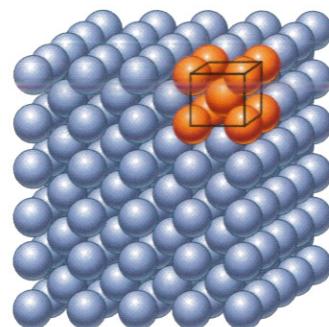
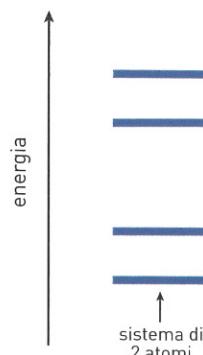
Atomi (o ioni) di un cristallo sono disposti con regolarità nello spazio, a distanze di ordine delle dimensioni atomiche.

O già descritto la struttura cristallina del diamante, uguale a quella del silicio e del carbonio. Come altro esempio, la FIGURA 4 mostra la struttura del litio, il cui reticolo è una ripetizione, nelle tre dimensioni, di un cubo che ha un atomo a ogni vertice e uno al centro. Il cristallo di ferro ha la stessa struttura.

Sappiamo, allora, di comporre un cristallo fatto di atomi identici, avvicinando tra loro atomi, inizialmente molto distanti. Sappiamo che:

Atomi dello stesso tipo, reciprocamente molto lontani, hanno gli stessi livelli energetici;

- se i due atomi vengono avvicinati, ogni livello energetico si sdoppia in due livelli non coincidenti.



**FIGURA 4**

La struttura del reticolo cristallino del litio e del ferro.

Se avviciniamo tre atomi uguali, da ogni livello energetico dell'atomo singolo derivano tre livelli distinti; per  $N$  atomi, ogni livello si scinde in un insieme di  $N$  livelli vicinissimi l'uno all'altro.

Un cristallo è formato da un numero enorme di atomi (dell'ordine di  $10^{23}$ ). Pertanto,

ciascuno degli stati meno legati dell'atomo singolo dà luogo, nel cristallo, a un insieme di stati distinti, ai quali corrispondono livelli energetici diversi, ma così vicini da costituire una **banda di energia** praticamente continua.

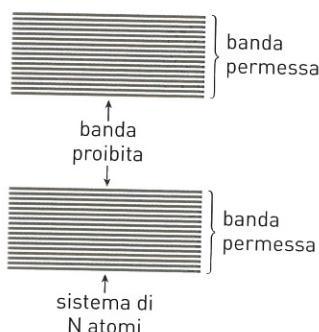


FIGURA 5

In un cristallo i livelli energetici permessi sono raggruppati in bande.

La formazione delle bande di energia coinvolge soprattutto gli elettroni più esterni degli atomi. Quelli più interni, che sono molto legati ai nuclei, risentono poco della presenza degli atomi vicini.

La scissione dei livelli fa sì che nei cristalli si generino intervalli energetici accessibili agli elettroni del cristallo, o *bande permesse*, e intervalli vietati, o *bande proibite*.

Gli elettroni del cristallo possono avere energie comprese entro i limiti di qualunque banda permessa; non possono avere, invece, energie appartenenti a una banda proibita.

Una banda proibita è l'intervallo, in inglese detto «gap», che separa in energia due bande permesse successive (FIGURA 5).

Le energie delle bande sono permesse o proibite al cristallo nel suo insieme. Dato che, tuttavia, in un cristallo sono gli elettroni a compiere transizioni energetiche, per semplicità si usa parlare di «energie degli elettroni» e quindi si dice che i livelli di una banda sono accessibili o vietati «agli elettroni» del cristallo.

Analogamente, per semplicità, si tralascia di distinguere tra gli stati quantici e le relative energie: si dice, per esempio, «banda di energia occupata da elettroni» o anche «banda piena» e «banda vuota», quando, più rigorosamente, ciò che gli elettroni occupano, nel rispetto del principio di esclusione di Pauli, sono gli stati quantici disponibili associati alla banda.

## Isolanti e conduttori

Se applichiamo a un cristallo un campo elettrico, gli elettroni del cristallo possono creare una corrente, ma lo fanno solo se sono in grado di compiere una transizione verso un livello energetico di poco superiore a quello di partenza.

Perché inizi a scorrere una corrente, infatti, molti elettroni devono mettersi in lento movimento tutti assieme, acquistando una velocità di deriva che è estremamente bassa rispetto alle velocità tipiche dei loro moti casuali. Ciò comporta un aumento di energia molto piccolo.

Proprio perché piccolo, tale aumento non è sempre possibile. Può avvenire a condizione che gli elettroni abbiano, sopra al proprio livello di energia, livelli contigui ancora disponibili, cioè non occupati da altri elettroni. Invece,

nei materiali isolanti la banda di energia più elevata tra quelle che contengono elettroni, che è detta **banda di valenza**, è completamente piena ed è separata dalla banda vuota superiore da un ampio gap (di diversi elettronvolt).

ta ragione, negli isolanti, l'applicazione di un campo elettrico non cambia affatto le energie degli elettronni e non produce alcuna corrente. Viceversa,

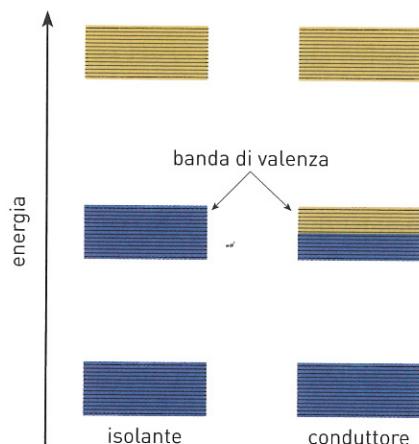
negli materiali conduttori la banda di valenza è *completamente occupata solo parzialmente*, per cui, senza che sia violato il principio di esclusione, può accogliere altri elettronni provenienti da livelli energetici inferiori.

Questa spiegazione significa che, nei conduttori, alcuni elettroni sono liberi di aumentare un poco la propria energia e così produrre una corrente in risposta all'applicazione di un campo elettrico. Nella FIGURA 6 i livelli energetici occupati sono colorati in blu, mentre quelli vuoti sono in giallo.

## SEMICONDUTTORI

I semiconduttori, come il silicio e il germanio, sono solidi cristallini con una resistività intermedia tra quella dei conduttori e quella degli isolanti. La teoria quantistica delle bande di energia spiega questa loro caratteristica.

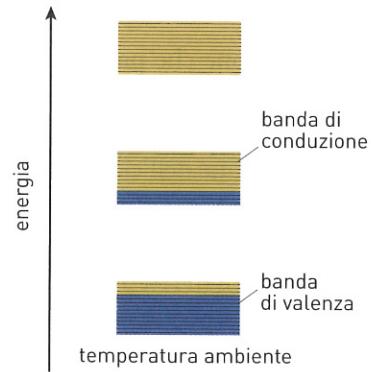
Se alla temperatura  $T = 0 \text{ K}$  un cristallo perfetto di silicio è un isolante, perché il piccolo gap (di 1,11 eV) tra la banda di valenza, completamente occupata, e la banda vuota successiva.



◀ FIGURA 6

Negli isolanti la banda di valenza è completamente occupata; nei conduttori lo è parzialmente.

- A temperatura ambiente, però, alcuni elettroni acquistano per agitazione termica abbastanza energia da raggiungere i livelli inferiori della prima banda più alta, superando il gap.



La banda di conduzione è quella permessa che si trova subito al di sopra della banda di valenza e chiamata banda di conduzione.

A temperatura ambiente la banda di valenza di un semiconduttore è quasi piena, ma non lo è del tutto, perché una piccola parte degli elettronni ha superato il gap ed è passata alla banda di conduzione.

Per calcolare le leggi della statistica di Fermi-Dirac, di cui abbiamo parlato nel capitolo «Teoria quantistica», si determina la probabilità  $P$  che in un semiconduttore, in funzione della temperatura assoluta  $T$ , un elettrone dei livelli superiori della banda di valenza acquisti per agitazione termica l'energia necessaria per passare alla banda di conduzione.

**AL VOLO****IL GAP DEL GERMANIO**

Nel germanio la larghezza del gap è  $E_g = 0,67$  eV.

- Qual è all'incirca, alla temperatura  $T = 300$  K, la probabilità con cui un elettrone del germanio supera il gap?

$[10^{-6}]$

- Verifica che questa probabilità aumenta di un ordine di grandezza se la temperatura aumenta di 50 K.

di conduzione. Se  $E_g$  è la larghezza del gap, e se il prodotto  $k_B T$  è molto minore di  $E_g$  ( $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K =  $8,62 \times 10^{-5}$  eV/K è la costante di Boltzmann), si trova un risultato semplice: l'espressione che fornisce l'ordine di grandezza di  $\mathcal{P}$  è

$$\mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}. \quad [1]$$

Nel silicio, nel germanio e nel diamante la condizione di validità della [1],  $k_B T \ll E_g$ , è soddisfatta a temperatura ambiente e, a maggior ragione, alle temperature inferiori.

Perché il diamante, che ha la stessa struttura del silicio e del germanio, non è un semiconduttore? Perché la larghezza del suo gap è  $E_g = 5,5$  eV, per cui, alla temperatura  $T = 300$  K, si ha  $\mathcal{P} \approx e^{-106} \approx 0$ . Di fatto, in questo cristallo, nessuno degli elettroni di valenza passa alla banda di conduzione. Nel caso del silicio, che ha  $E_g = 1,11$  eV, per la stessa temperatura si ottiene  $\mathcal{P} \approx e^{-21} \approx 10^{-10}$ , che è una probabilità molto piccola, ma sufficiente a permettere la conduzione elettrica.

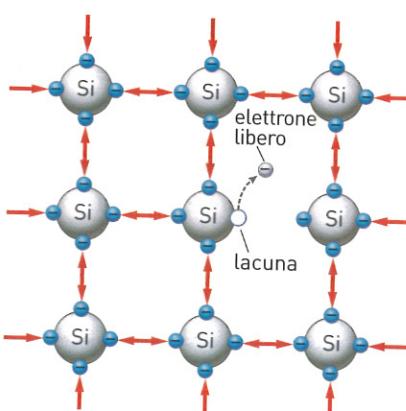
La [1] descrive in modo quantitativo delle proprietà che sono facili da giustificare anche intuitivamente: la frazione di elettroni che passa alla banda di conduzione è minore se il gap è maggiore, e quindi cambia da un materiale all'altro. Per un dato materiale essa aumenta al crescere della temperatura; quindi, portando un semiconduttore a una temperatura maggiore la sua resistività diminuisce, invece di aumentare come accade nei metalli.

**I portatori positivi di carica**

Nella banda di conduzione gli elettroni di un semiconduttore sono liberi di muoversi, come gli elettroni di conduzione dei metalli. Nei semiconduttori, tuttavia, gli elettroni non sono gli unici portatori di carica mobili e la conduzione elettrica avviene anche secondo un altro meccanismo.

Per ogni elettrone che passa alla banda di conduzione a causa dell'agitazione termica, nella banda di valenza rimane un posto vuoto, chiamato lacuna.

Alla conduzione dell'elettricità in un semiconduttore contribuiscono sia gli elettroni della banda di conduzione sia le lacune della banda di valenza, che si comportano come cariche mobili *di segno positivo*.



**FIGURA 7** ►  
Un elettrone che si libera, cioè passa alla banda di conduzione, lascia una lacuna in un legame.

Già conosciamo la struttura reticolare del cristallo di silicio, che è uguale a quella del diamante. La FIGURA 7 è una rappresentazione semplificata, bidimensionale, di questo cristallo e dei legami che, in esso, ciascun atomo forma con i quattro atomi più vicini.

Le sfere grigie rappresentano i nuclei di silicio circondati dagli elettroni dei gusci più interni, le sferette azzurre rappresentano gli elettroni di valenza (quattro per atomo) e le doppie frecce indicano le coppie di elettroni condivise nei legami.

Dire che la banda di valenza è completamente occupata (vicino allo zero assoluto) è come dire che gli elettroni sono tutti legati: ognuno localizzato in un legame tra due atomi vicini.

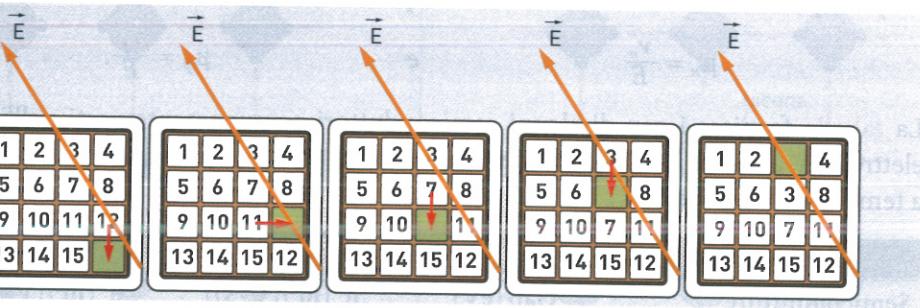
parte, il fatto che alcuni elettroni passino alla banda di conduzione (a temperatura ambiente) significa che essi sfuggono ai legami e si allontanano liberamente attraccristallo.

mostra la figura precedente, un elettrone che si libera lascia una lacuna nel suo legame. Dove c'è una lacuna, c'è anche un atomo di silicio ionizzato, ossia una positiva che localmente non è più bilanciata.

na può essere riempita e neutralizzata da un elettrone proveniente da un legame. Questo secondo elettrone, a sua volta, lascia una lacuna nel legame di provenienza che può accogliere un terzo elettrone eccetera.

entre gli elettroni legati migrano di legame in legame, le lacune compiono attracreticollo spostamenti opposti. In presenza di un campo elettrico  $\vec{E}$ , esse creano come se fossero particelle di carica positiva in movimento.

a, nessuna particella positiva si sposta attraverso il reticolo. Piuttosto, nel reticolo qualcosa di simile al gioco del quindici (FIGURA 8): il giocatore è il campo  $\vec{E}$ ; le numerate sono gli elettroni legati, che  $\vec{E}$  sposta da un legame all'altro (nel verso opposto di  $\vec{E}$  stesso); il posto libero, che a ogni mossa fatta in un verso si sposta opposto, è una lacuna.



◀ FIGURA 8

Una lacuna somiglia al posto libero del gioco del quindici, che si sposta in verso opposto rispetto alla pedina adiacente che va a riempirlo.

### RICORDA

- La prima legge di Ohm definisce la resistenza elettrica  $R$  di un conduttore attraverso la relazione

$$i = \frac{\Delta V}{R},$$

in cui  $i$  è l'intensità della corrente attraverso il conduttore e  $\Delta V$  è la differenza di potenziale tra i suoi estremi.

- La seconda legge di Ohm mette in relazione  $R$  con la lunghezza  $l$  del conduttore, la sua area trasversale  $A$  e la resistività  $\rho$  del materiale di cui è fatto:

$$R = \rho \frac{l}{A}.$$

## Conducibilità dei semiconduttori

delle lacune, per il fatto di essere così complicato e di coinvolgere gli elettroni non gli elettroni liberi della banda di conduzione, che si muovono indipendentemente dalle lacune), è più lento di quello degli elettroni liberi. In effetti, fissato il campo, la velocità di deriva  $v_n$  degli elettroni libri di un dato semiconduttore è sempre maggiore della velocità di deriva  $v_p$  delle sue lacune.

«La corrente elettrica nei metalli» abbiamo visto che l'intensità della corrente, nel cilindro conduttore di area trasversale  $A$  che abbia solo elettroni come portatori di carica, è espressa da

$$i = e n A v_n, \quad [2]$$

il numero di elettroni di conduzione per unità di volume.

nsideriamo anche la corrente dovuta alle lacune e indichiamo con  $p$  il loro numero per unità di volume, la formula precedente diventa

$$i = e A (n v_n + p v_p).$$

do le due leggi di Ohm al cilindro, di lunghezza  $l$  e resistività  $\rho$ , troviamo

$$i = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\Delta V}{l} \frac{A}{\rho} = E \frac{A}{\rho},$$

o anche, utilizzando la **conducibilità**  $\sigma$  che per definizione è il reciproco della resistività  $\rho$ ,

$$i = E A \sigma. \quad [3]$$

Dal confronto delle formule [2] e [3] otteniamo la seguente espressione per  $\sigma$

The diagram illustrates the derivation of the formula for conductivity  $\sigma$ . It shows the following components and their relationships:

- carica elementare [C]** and **conducibilità [S/m]** are inputs to the formula.
- densità numerica [ $m^{-3}$ ], rispettivamente di elettroni e lacune** is also an input.
- velocità di deriva [m/s], rispettivamente di elettroni e lacune** is also an input.
- campo elettrico [V/m]** is an input.
- The final result is  $\sigma = e \left( n \frac{v_n}{E} + p \frac{v_p}{E} \right)$ .

[4]

L'unità di misura della conducibilità  $\sigma$  è il siemens (indicato con S e uguale al reciproco dell'ohm) diviso per il metro.

Dalla [4] notiamo che, per un dato semiconduttore,  $\sigma$  dipende dalle densità numeriche  $n$  e  $p$  dei portatori di carica e anche dalle rispettive **mobilità**, così definite:

$$\mu_n = \frac{v_n}{E} \quad e \quad \mu_p = \frac{v_p}{E}. \quad [5]$$

La **tavola** fornisce i gap di alcuni semiconduttori comunemente usati nell'industria elettronica, assieme alle mobilità degli elettroni di conduzione e delle lacune, misurate a temperatura ambiente.

| GAP E MOBILITÀ DEI PORTATORI |          |                               |                               |
|------------------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|
| Semiconduttore               | Gap (eV) | $\mu_n$ ( $m^2/(V \cdot s)$ ) | $\mu_p$ ( $m^2/(V \cdot s)$ ) |
| Si                           | 1,11     | 0,19                          | 0,05                          |
| Ge                           | 0,67     | 0,38                          | 0,18                          |
| InAs (arseniuro di indio)    | 0,36     | 3,3                           | 0,046                         |
| GaAs (arseniuro di gallio)   | 1,35     | 0,88                          | 0,04                          |

## Il drogaggio

Si chiamano **semiconduttori intrinseci** i cristalli semiconduttori privi di impurità.

Nei semiconduttori intrinseci, nonostante vi siano due meccanismi indipendenti di conduzione elettrica, la corrente scorre più difficilmente che nei metalli. Più che dalla mobilità di elettroni e lacune, la scarsa conducibilità di questi materiali dipende dal fatto che in essi la densità dei portatori di carica è bassa.

Per confronto, nel rame, che è un ottimo conduttore, la mobilità degli elettroni è minore di tutte le mobilità elencate nella tabella precedente e vale soltanto  $0,0035 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . Tuttavia il rame ha, come ordine di grandezza,  $10^{23}$  portatori per centimetro cubo, mentre il germanio, a temperatura ambiente, ne ha  $10^{14}$  e il silicio ne ha  $10^{10}$ .

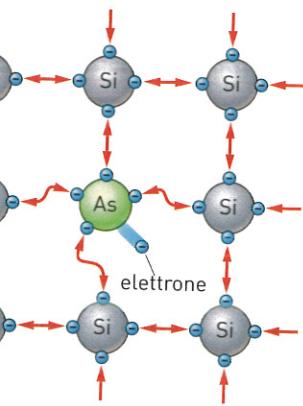
Per aumentare la conducibilità di un semiconduttore si ricorre al **drogaggio**, spesso chiamato *doping*, con il termine inglese.

are un semiconduttore significa introdurre delle *impurezze*, cioè atomi di elementi estranei, all'interno del suo reticolo cristallino.

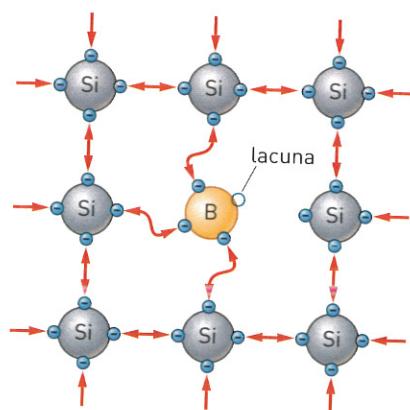
riamo un cristallo di silicio in cui siano contenuti atomi di un altro elemento, in numero di uno su un milione. Supponiamo che questi atomi siano distribuiti uniformemente in tutto il cristallo in modo che al suo interno vi sia, ogni tanto, un atomo al posto di uno di silicio.

lementi che si usano comunemente per drogare i cristalli di silicio vi sono l'arsenico (As) e il boro (B). L'arsenico ha cinque elettroni di valenza e quindi può formare quattro legami covalenti; invece il boro può completare solo tre legami, perché ha tre elettroni di valenza.

ito a un atomo Si, un atomo As mette a disposizione quattro legami con gli atomi Si adiacenti, mentre il boro mettendo in comune un elettrone con ciascuno di essi, e libera il suo elettrone.



- Invece, un atomo B completa tre legami e lascia un atomo Si adiacente con un elettrone spaiato: in altri termini, il suo legame con uno degli atomi Si contiene una lacuna.



ne liberato da un atomo di arsenico si aggiunge a quelli della banda di con-

atomi di arsenico, e anche quelli degli altri elementi che appartengono allo stesso gruppo della tavola periodica, come l'antimonio o il fosforo, svolgono il ruolo di portatori di elettroni.

In un semiconduttore intrinseco gli elettroni di conduzione e le lacune si generano a causa dell'agitazione termica, per cui la densità degli elettroni liberi è sempre uguale a quella delle lacune. Invece, in un semiconduttore drogato con atomi donatori gli elettroni liberi sono molti di più rispetto alle lacune, mentre in un semiconduttore drogato con atomi accettori gli elettroni liberi sono pochi di più rispetto alle lacune.

Un semiconduttore così arricchito di elettroni liberi prende il nome di **semiconduttore n**, in cui *n* sta per «negativo», a sottolineare il fatto che in esso la conduzione elettronica è prevalentemente agli elettroni. Si dice, in tal caso, che gli elettroni sono i *portatori maggioritari* e le lacune i *portatori minoritari*.

Un semiconduttore drogato con atomi di boro fornisce al cristallo una lacuna in più, senza che venga liberato un elettrone di conduzione.

### AL VOLO

#### LA CARICA COMPLESSIVA DI UN SEMICONDUTTORE DROGATO

- Un cristallo semiconduttore di tipo *n* ha una carica complessiva positiva o negativa? Oppure è neutro?
- E un cristallo semiconduttore di tipo *p*?

Gli atomi di boro, per le loro proprietà chimiche, tendono ad attrarre («accettare») un elettrone dai legami vicini e a formare quattro legami completi: per questo motivo le lacune da essi aggiunte al cristallo sono mobili, al pari di quelle che si formano nei legami tra atomi di silicio; sempre per questo motivo gli atomi di boro e gli atomi dello stesso gruppo, come quelli di alluminio o di gallio, sono chiamati accettori.

Un cristallo drogato con atomi accettori è detto **semiconduttore di tipo p**: *p* come «positivo», perché in esso i portatori maggioritari sono le lacune, mentre gli elettroni sono minoritari.

Drogando un cristallo di silicio con un atomo di arsenico o di boro su un milione, si ottengono, come ordine di grandezza,  $10^{17}$  portatori di carica mobili per centimetro cubo.

### Le densità dei portatori di carica all'equilibrio

#### AL VOLO

##### PORTATORI MAGGIORITARI E MINORITARI

Nel silicio puro, a temperatura ambiente, la densità numerica degli elettroni di conduzione è  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  ed è uguale a quella delle lacune.

- Se il silicio è drogato con  $10^{16}$  atomi donatori per centimetro cubo, quali sono, alla stessa temperatura, le due densità?

$[10^{16} \text{ cm}^{-3}; 10^4 \text{ cm}^{-3}]$

Per un cristallo semiconduttore in equilibrio, in cui non scorre corrente e che è mantenuto a una temperatura costante, l'analisi statistica da cui discende il risultato [1] fornisce anche la densità numerica  $n$  degli elettroni di conduzione e la densità numerica  $p$  delle lacune. Queste densità dipendono dalla natura chimica del cristallo, dal drogaggio e dalla temperatura.

Se sono rispettate le condizioni di validità della [1], e se il cristallo non è altamente drogato (in pratica, se gli atomi estranei sono meno di uno su mille), si dimostra che vale la relazione

$$n p = n_i^2, \quad [6]$$

dove  $n_i$  è la *densità di portatori intrinseca*, cioè la densità degli elettroni di conduzione (uguale a quella delle lacune) che a parità di temperatura, nel materiale considerato, si ha in assenza di drogaggio.

La formula [6] mostra che

il prodotto tra le densità  $n$  e  $p$  dei due tipi di portatori non varia con il drogaggio, per cui il drogaggio aumenta la densità dei portatori di un tipo, ma contemporaneamente riduce la densità dei portatori dell'altro.

### PROBLEMA MODELLO 2 QUANTI ELETTRONI SALTANO NELLA BANDA DI CONDUZIONE?

Un cristallo di silicio (Si) ha un gap di energia tra la banda di valenza e la banda di conduzione di larghezza 1,1 eV, mentre l'arseniuro di alluminio (AsAl) ha un gap largo circa il doppio, cioè pari a 2,2 eV.

- Calcola l'ordine di grandezza della probabilità che un elettrone dei livelli superiori della banda di valenza salti alla banda di conduzione alla temperatura ambiente di 20 °C, sia per il silicio che per l'arseniuro di alluminio.
- Come cambiano entrambi i risultati alla temperatura di 500 °C?

#### ■ DATI

Gap di energia per il silicio:  $E_{\text{Si-gap}} = 1,1 \text{ eV}$ ,

Gap di energia per AsAl:  $E_{\text{AsAl-gap}} = 2,2 \text{ eV}$

$T_1 = 20^\circ\text{C}$

$T_2 = 500^\circ\text{C}$

#### ■ INCognite

Probabilità che un elettrone superi il gap nel silicio e nell'arseniuro di alluminio a  $T_1$ :

$$n_{\text{Si-1}} = ? \quad n_{\text{AsAl-1}} = ?$$

Probabilità che un elettrone superi il gap nel silicio e nell'arseniuro di alluminio a  $T_2$ :

$$n_{\text{Si-2}} = ? \quad n_{\text{AsAl-2}} = ?$$

## L'IDEA

- Calcolo l'ordine di grandezza della probabilità  $\mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$  per i due materiali con gap diverso.
- Ripeto il calcolo al variare della temperatura.

## LA SOLUZIONE

### Caso 1: temperatura di 20 °C.

#### Calcolo la probabilità $\mathcal{P}$ che un elettrone passi nella banda di conduzione.

$$\text{Silicio: } \mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_{g-Si}}{2k_B T}} = e^{-\frac{1,1 \text{ eV}}{2 \times (8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times (293 \text{ K})}} = 3,5 \times 10^{-10}$$

$$\text{Arseniuro di alluminio (AsAl): } \mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_{g-AsAl}}{2k_B T}} = e^{-\frac{2,2 \text{ eV}}{2 \times (8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times (293 \text{ K})}} = 1,2 \times 10^{-19}$$

Nonostante nell'arseniuro di alluminio il gap sia solo di larghezza doppia, vi è una probabilità molto più bassa per l'arseniuro di alluminio che anche un solo elettrone passi nella banda di conduzione.

### Caso 2: temperatura di 500 °C .

#### Calcolo la probabilità $\mathcal{P}$ che un elettrone passi nella banda di conduzione.

$$\text{Silicio: } \mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_{g-Si}}{2k_B T}} = e^{-\frac{1,1 \text{ eV}}{2 \times (8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times (773 \text{ K})}} = 2,6 \times 10^{-4}$$

$$\text{Arseniuro di alluminio (AsAl): } \mathcal{P} \approx e^{-\frac{E_{g-AsAl}}{2k_B T}} = e^{-\frac{2,2 \text{ eV}}{2 \times (8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times (773 \text{ K})}} = 6,8 \times 10^{-8}$$

All'aumentare della temperatura entrambi i cristalli si comportano come semiconduttori, infatti molti elettroni passano nella banda di conduzione.

## PROBLEMA MODELLO | 3 DENSITÀ DI PORTATORI DI CARICA

Un cristallo di germanio purissimo ha densità 5,32 g/cm<sup>3</sup>, massa molare 72,6 g/mol e resistività 5200 Ω · m. La densità degli elettroni di conduzione  $n$  (cioè il numero di elettroni di conduzione per unità di volume) è uguale alla densità delle lacune  $p$  poiché si tratta di un semiconduttore intrinseco. Utilizzando i coefficienti di mobilità riportati nella tabella del testo calcola:

- la densità  $n$  degli elettroni di conduzione espressa in cm<sup>-3</sup>;
- il rapporto tra la densità  $n$  degli elettroni di conduzione e la densità  $N$  di atomi del semiconduttore.

### DATI

Densità:  $d = 5,32 \text{ g/cm}^3$

Massa molare:  $M = 72,6 \text{ g/mol}$

$\rho = 5200 \Omega \cdot \text{m}$

$\mu_n = 0,38 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$\mu_p = 0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

$n = p$

### INCognite

Densità di elettroni di conduzione:  $n = ?$

Rapporto tra la densità  $n$  degli elettroni di conduzione e la densità  $N$  di atomi del semiconduttore:  $n/N = ?$

## L'IDEA

- Utilizzo l'equazione che mette in relazione la mobilità e la resistività di un semiconduttore, cioè  $\sigma = e \left( n \frac{v_n}{E} + p \frac{v_p}{E} \right)$ .
- Calcolo la densità di atomi a partire dalla densità del materiale e dalla massa molare: prima trovo il numero di moli per cm<sup>3</sup> ( $n_{moli} = \frac{d}{M}$ ) poi il numero di atomi per m<sup>3</sup>, cioè la densità di atomi ( $N = n_{moli} \cdot N_A$ ).

## LA SOLUZIONE

### Calcolo la densità di portatori di carica (elettroni)

Pongo  $n = p$  ed esplicito  $n$  dalla relazione che lega mobilità e resistività, ricordando che  $\sigma = \frac{1}{\rho}$ :

$$n = \frac{1}{\rho e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{(5200 \Omega \cdot \text{m}) \times (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (0,38 + 0,18) \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}^2}} = 2,1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$$

### Calcolo la densità di atomi

Dalla densità  $d$  e dalla massa molare  $M$  ricavo il numero di moli di germanio per centimetro cubo.

$$n_{moli} = \frac{d}{M} = \frac{5,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{72,6 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,073 \text{ mol/cm}^3$$

Quindi ricavo il numero di atomi di germanio per metro cubo.

$$N = n_{moli} \cdot N_A = (0,073 \times 10^6) \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \times (6,022 \times 10^{23}) \text{ mol}^{-1} = 4,4 \times 10^{28} \text{ atomi/m}^3$$

### Calcolo il rapporto tra la densità di elettroni di conduzione e la densità di atomi

$$\frac{n}{N} = \frac{2,1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}}{4,4 \times 10^{28} \text{ atomi/m}^3} = 4,8 \times 10^{-14}$$

Ci sono dunque in media cinque elettroni di conduzione ogni 10<sup>14</sup> atomi di germanio.

## PER NON SBAGLIARE

Nei semiconduttori vi sono meno portatori di carica rispetto ai conduttori, ma la mobilità è maggiore.

## 4 IL DIODO A SEMICONDUTTORE

Un medesimo cristallo semiconduttore può essere drogato in modo che al suo interno vi siano una zona di tipo  $n$  e una di tipo  $p$ , separate nettamente da una superficie (detta *giunzione*). Così si ottiene un dispositivo chiamato **diodo a giunzione** o **diodo a semiconduttore**; in esso, da una parte della giunzione, i portatori maggioritari di carica sono gli elettroni  $e$ , dall'altra, sono le lacune.

A causa dell'agitazione termica alcuni elettroni liberi vanno dalla parte  $n$ , dove sono presenti con densità molto maggiore, alla parte  $p$ , attraversando la giunzione; contemporaneamente alcune lacune si spostano in verso contrario.

Un elettrone che migra verso il semiconduttore di tipo  $p$  trova presto una lacuna da riempire e una lacuna che penetra nel semiconduttore di tipo  $n$  incontra un elettrone da catturare.

Il processo per il quale un elettrone libero occupa una lacuna è detto **ricombinazione**: in esso la lacuna scompare, mentre l'elettrone, da libero, diventa legato a un atomo, cioè passa dalla banda di conduzione alla banda di valenza.

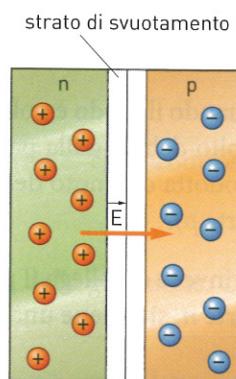
La ricombinazione degli elettroni con le lacune produce, ai due lati della giunzione, un sottile strato privo di portatori di carica mobili, detto **strato di svuotamento** (FIGURA 9).

Inoltre, gli elettroni liberi che abbandonano la parte *n* verso la parte *p* si lasciano alle spalle delle cariche positive fisse: gli ioni dei donatori, che sono positivi perché hanno ceduto un elettrone.

Analogamente, a causa della diffusione delle lacune, nella parte *p* restano delle cariche negative fisse, ossia gli ioni degli accettori.

La separazione delle cariche positive da quelle negative, tra un lato e l'altro della giunzione, genera un campo elettrico nello strato di svuotamento, orientato dalla parte *n* (divenuta positiva) alla parte *p* (negativa).

Questo campo elettrico si oppone all'ulteriore diffusione dei portatori di carica. I valori tipici della *differenza di potenziale di barriera* a esso associata sono 0,6-0,7 V per il silicio e circa la metà per il germanio.



◀ FIGURA 9

Lo strato di svuotamento di un diodo a semiconduttore è privo di portatori di carica mobili; in esso è presente un campo elettrico  $E$ , che punta dalla parte *n* verso la parte *p*.

## La polarizzazione del diodo

Il diodo a giunzione agisce da *raddrizzatore* di corrente elettrica, perché fa passare la corrente agevolmente in un verso, ma solo in misura trascurabile nel verso opposto.

Ciò è utile, per esempio, quando si alimentano dispositivi in corrente continua mediante un trasformatore collegato a una rete che trasporta corrente alternata; la corrente che si ottiene grazie al diodo non ha intensità costante, ma comunque non contiene le parti in cui il suo flusso cambia verso.

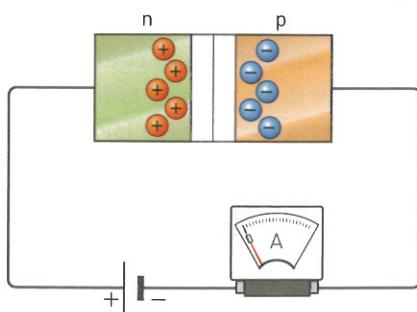
Proprio per sottolineare questa proprietà il simbolo circuitale del diodo è quello mostrato nella FIGURA 10; la «freccia» contenuta nel simbolo indica il verso in cui la corrente può fluire agevolmente.

Connettendo il polo positivo di un generatore di tensione alla parte *n* e quello negativo alla parte *p* del diodo, si produce una **polarizzazione inversa** (FIGURA 11).



◀ FIGURA 10

Simbolo circuitale del diodo; la freccia indica il verso in cui può scorrere una corrente elettrica rilevante.



◀ FIGURA 11

Quando un diodo è polarizzato inversamente, il suo strato di svuotamento, privo di portatori maggioritari, è più esteso.

In questo modo il campo elettrico prodotto dal generatore intensifica quello che già è presente attorno alla giunzione. Il polo negativo e il polo positivo attraggono, rispettivamente,

mente, le lacune della parte *p* e gli elettroni liberi della parte *n* e lo strato di svuotamento si allarga.

Quando il diodo è polarizzato inversamente, attraverso la giunzione scorre una corrente molto debole dalla parte *n* verso la parte *p*, detta *corrente di saturazione inversa*, che è prodotta dal moto dei portatori minoritari (lacune dalla parte *n* ed elettroni liberi dalla parte *p*).

Se invece si collega il polo positivo del generatore con la parte *p* e il polo negativo con la parte *n*, si ottiene una **polarizzazione diretta** (FIGURA 12).

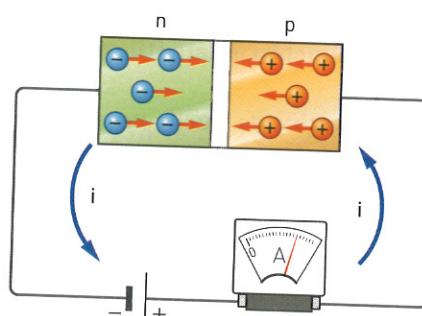


FIGURA 12 ▶

Nel caso di polarizzazione diretta lo strato di svuotamento si restringe.

Il campo elettrico applicato attenua quello preesistente, che impediva il moto delle lacune e degli elettroni liberi, e restringe lo strato di svuotamento.

Pertanto le lacune della parte *p* riprendono a migrare verso la parte *n* e, viceversa, gli elettroni liberi della parte *n* ricominciano a scorrere verso la parte *p*. Elettroni e lacune si ricombinano nelle immediate vicinanze della giunzione, via via che il generatore inietta nuovi elettroni nella zona *n* e nuove lacune (di fatto rimuovendo elettroni) nella zona *p*. Attraverso la giunzione passa dunque una corrente nel verso da *p* a *n*, che incontra una bassa resistenza e la cui intensità aumenta molto rapidamente all'aumentare della differenza di potenziale.

L'andamento della corrente è descritto, in funzione della differenza di potenziale  $\Delta V$  applicata (presa con segno positivo o negativo a seconda che la polarizzazione sia diretta o inversa), dall'equazione del diodo:

$$i = i_s \left( e^{\frac{q\Delta V}{\eta k_B T}} - 1 \right). \quad [7]$$

Nella [7],  $i_s$  è l'intensità della corrente di saturazione inversa (tipicamente ha valore compresi tra  $10^{-15}$  A e  $10^{-10}$  A),  $q$  la carica elementare,  $k_B$  la costante di Boltzmann,  $T$  la temperatura assoluta. Il parametro  $\eta$  è un coefficiente numerico che vale circa 2 per il silicio e circa 1 per il germanio. L'intensità  $i$  della corrente che attraversa la giunzione risulta negativa nel caso di polarizzazione inversa: il segno serve a distinguere tra i due versi della corrente.

### La cella fotovoltaica

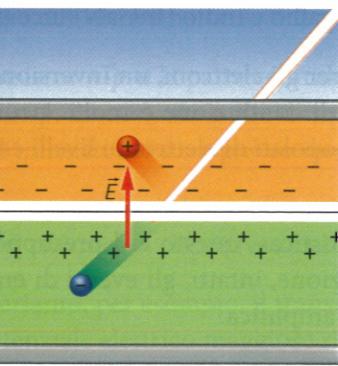
Non solo l'agitazione termica, ma anche la luce può fornire agli elettroni della banda di valenza di un semiconduttore l'energia necessaria per superare il gap. Secondo un processo analogo all'effetto fotoelettrico, per ogni fotone assorbito che abbia energia superiore alla larghezza del gap, un elettrone passa alla banda di conduzione. Si crea così una coppia di portatori di carica mobili: l'elettrone stesso, liberato del legame, e la lacuna rimasta al suo posto.

sto principio si basa, al livello microscopico, la produzione di energia elettrica **centrale fotovoltaica**. Ogni pannello della centrale, o dell'impianto fotovoltaico, è fatto dall'unione di tante celle.

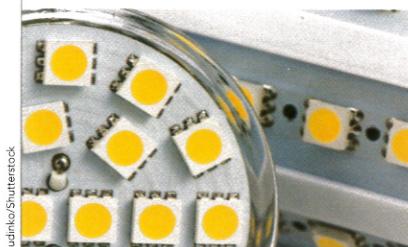
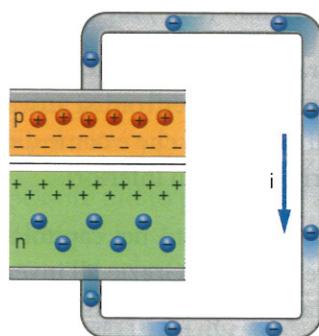
**Cella fotovoltaica** è un diodo a giunzione di ampia superficie, che produce energia elettrica trasformando l'energia della luce solare.

attraversa lo strato di tipo *p*, che è sottile, e arriva alla zona della giunzione. Qui il moto dei fotoni produce nuove coppie elettrone-lacuna.

I lettronni vengono accelerati verso il lato *n* della giunzione dal campo elettrico  $\vec{E}$  presente nello strato di tipo *n*, che punta da *n* a *p*, mentre le lacune vengono spinte da  $\vec{E}$  verso il lato *p*.



- In questo modo si accumulano cariche positive sul lato *p* e cariche negative sul lato *n*, e le due parti della giunzione si comportano come i poli di un generatore: collegati a un circuito esterno, fanno scorrere corrente.



## e il laser a semiconduttore

Nel capitolo «La corrente elettrica nei liquidi e nei gas» abbiamo visto che l'efficienza di un **laser a LED** surclassa quella di tutti gli altri tipi di lampade. I LED sono così efficienti perché convertono l'energia elettrica direttamente in luce visibile, senza passaggi intermedi, che sempre comportano perdite di energia.

E anche la cella fotovoltaica, anche il LED (acronimo di *Light-Emitting Diode*) è un diodo a giunzione, ma funziona al contrario, cioè emette luce sfruttando la ricombinazione tra elettroni di conduzione e lacune.

Si è visto che, dal fondo della banda di conduzione di un semiconduttore, un elettrone in una lacuna posta in cima alla banda di valenza, viene rilasciata un'energia uguale alla larghezza del gap. Nel silicio e nel germanio questa energia si trasforma in energia interna del reticolo cristallino; in altri semiconduttori, tra cui l'arseniuro di gallio, invece emessa come un fotone, di frequenza  $f = \frac{E_g}{h}$ .

Per questo, perché un cristallo semiconduttore sia utilizzabile come LED, le ricombinazioni che avvengono al suo interno devono essere sufficientemente numerose e frequenti. Un semiconduttore intrinseco non è adatto allo scopo, perché la densità delle sue coppie elettrone-lacuna è troppo bassa. Non può funzionare nemmeno un semiconduttore doppiamente drogato, perché, in base alla formula [6], se in esso ci sono molti elettron-

**AL VOLO****UN LED AD ARSENIURO DI GALLIO**

► Qual è la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica emessa da un LED ad arseniuro di gallio, che ha un gap di larghezza uguale a 1,35 eV?

[918 nm]

► Si tratta di luce visibile?

ni di conduzione, allora le lacune che possono catturarli sono poche; viceversa, se sono molte le lacune, sono pochi gli elettroni.

Per avere assieme una grande densità di elettroni di conduzione e una grande densità di lacune servono:

- una giunzione *p-n* ad alto droggaggio;
- una forte polarizzazione diretta.

Se queste condizioni sono rispettate, nello stretto strato di svuotamento attorno alla giunzione penetrano moltissimi elettroni e lacune: lì i portatori di diverso segno si ricombinano con una rapidità tale da generare, nei LED per l'illuminazione, fino a qualche watt di potenza luminosa.

Usando semiconduttori diversi, con gap di ampiezze opportune, oggi si costruiscono LED che irridiano in qualunque porzione dello spettro visibile, oltre che nell'infrarosso. Per esempio, con l'arseniuro di gallio e alluminio ( $\text{AlGaAs}$ ) si produce luce rossa, con il fosfuro di gallio ( $\text{GaP}$ ) luce verde, con il nitruro di gallio e indio ( $\text{InGaN}$ ) luce blu.

Nello strato di svuotamento di un LED si genera, per gli elettroni, un'inversione di popolazione: molti elettroni si trovano nella banda di conduzione e molte lacune nella banda di valenza, il che è come dire che sono più popolati di elettroni i livelli energetici superiori che i livelli inferiori.

Come abbiamo visto nel capitolo «La fisica quantistica», questo è il presupposto per costruire un laser. Grazie all'inversione di popolazione, infatti, gli eventi di emissione stimolata prevalgono sull'assorbimento e la luce si amplifica.

**Un laser a semiconduttore** differisce costruttivamente da un LED per il fatto che in esso le due facce perpendicolari al piano della giunzione sono lisce e parallele, e riflettono parzialmente la luce all'interno del cristallo.

Così, passando più volte avanti e indietro nella zona della giunzione, i fotoni prodotti per emissione stimolata, che si moltiplicano a valanga, producono un fascio coerente e monocromatico che contiene molta energia.

Nei LED più semplici la giunzione *p-n* è realizzata in un singolo cristallo, drogato con accettori in una sua parte e con donatori nella parte restante. In questo caso il gap è lo stesso attraverso tutto il cristallo.

In alcuni LED, tuttavia, e in tutti i laser a semiconduttore, per ottenere una maggiore efficienza si fa uso di una o più *eterogiunzioni*, cioè di interfacce tra materiali semiconduttori diversi, con gap diversi. Mediante le eterogiunzioni si possono sagomare in modo vantaggioso le bande di energia, in funzione della posizione lungo l'asse longitudinale del dispositivo.



I laser a semiconduttore sono i tipi di laser più comuni: sono usati, per esempio, per la lettura e la scrittura di DVD e Blu-ray Disc e per la **lettura di codici a barre**, per le comunicazioni in fibra ottica e per la stampa, anche in alcune stampanti 3D.

## TRANSISTOR E I CIRCUITI INTEGRATI

transistor è un dispositivo a semiconduttore a tre terminali, cioè dotato di tre connes-  
tive. Il suo nome, fusione dei due termini inglesi «transfer» e «resistor», ne  
la funzione: controllare, variando elettronicamente la resistenza, il trasferimen-  
segna dal terminale di ingresso a quello di uscita.

o **transistor**, detto «a punta di contatto», fu costruito nel 1947 dagli statunitensi  
Ernest S. Mottley (1908-1991) e Walter H. Brattain (1902-1987). Nel 1956 i due ricevettero  
o Nobel assieme a William B. Shockley (1910-1989), che realizzò il primo tran-  
doppia giunzione.

### Transistor bipolar

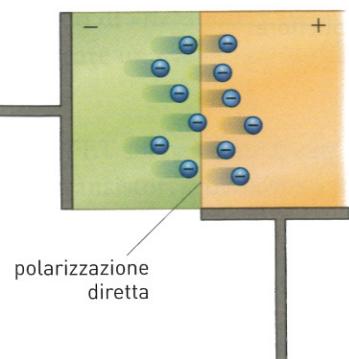
sistor a doppia giunzione, o **transistor bipolare**, è un dispositivo a semicondut-  
ui una regione con droggaggio di un tipo è chiusa a sandwich tra due regioni con  
io dell'altro tipo.

nsistor *n-p-n* la parte centrale è di tipo *p* e le due laterali sono di tipo *n*; nel tran-  
*n-p*, invece, una parte di tipo *n* è inserita tra due parti di tipo *p*. In entrambi i  
transistor si susseguono due giunzioni *p-n* di polarità opposta.

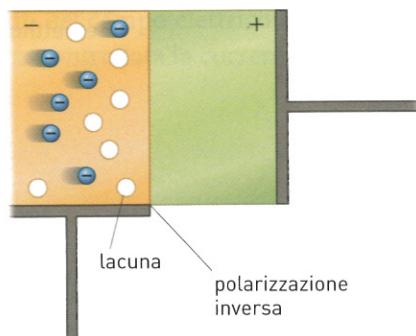
ne centrale si chiama *base* e ha sempre uno spessore molto piccolo. Le altre due  
si chiamano, rispettivamente, *emettitore* e *collettore*.

eriamo, per esempio, il transistor *n-p-n* e supponiamo di mantenere il collettore  
potenziale elettrico maggiore rispetto all'emettitore (FIGURA 13). In questo caso,

etroni della regione di tipo *n*  
sano la giunzione emettito-  
che è polarizzata direttamente;



- però si ricombinano con le lacune della base e non superano la giunzione base-collettore, polarizzata inversamente.



zione tra base e collettore è attraversata soltanto dalla corrente di saturazione  
dovuta al moto dei portatori minoritari; quindi la corrente nel circuito esterno  
egna l'emettitore al collettore ha un'intensità trascurabile.

scorrere corrente è necessaria una spinta che aiuti gli elettroni a scavalcare la  
potenziale elettrico della base deve essere intermedio tra quello dell'emettitore e  
del collettore, ma più elevato di quanto non sia quando semplicemente si collega  
il collettore al polo positivo e l'emettitore al polo negativo del medesimo generatore  
one. In altri termini,

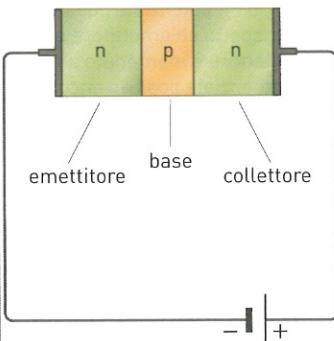
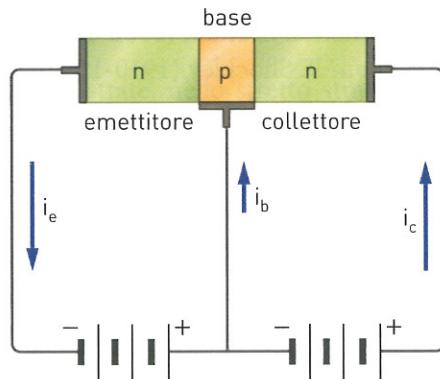


FIGURA 13

Per far scorrere corrente  
attraverso un transistor  
bipolare, non è sufficiente  
applicare una differenza di  
potenziale tra il collettore e  
l'emettitore.

attraverso il transistor passa corrente se il potenziale della base, pur mantenuto inferiore al potenziale del collettore, viene innalzato rispetto a quello dell'emettitore.

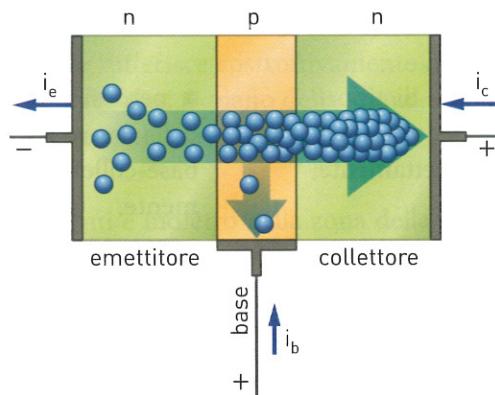
Per alimentare un transistor si devono quindi usare due generatori, come è schematizzato nella FIGURA 14.



**FIGURA 14 ▶**

In un transistor di tipo *n-p-n* la base è mantenuta a un potenziale positivo rispetto all'emettitore e il collettore è mantenuto a un potenziale positivo ancora maggiore.

In queste condizioni la polarizzazione diretta della giunzione emettitore-base è più forte e porta nella base un numero maggiore di elettroni. Poiché la base è sottile (circa un decimo di micrometro nei transistor bipolari più piccoli), una frazione consistente degli elettroni riesce a passare per diffusione oltre la giunzione base-collettore, polarizzata inversamente; riesce, cioè, a penetrare nel collettore prima di ricombinarsi con le lacune della base (FIGURA 15).



**FIGURA 15 ▶**

La corrente di base  $i_b$ , prodotta dalle ricombinazioni che avvengono nella base, è molto più debole della corrente di collettore  $i_c$ .

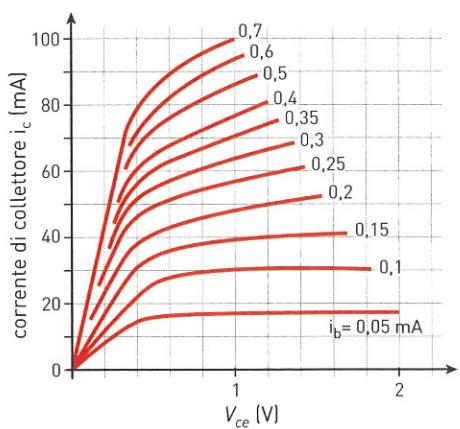
Una volta passati nel collettore, gli elettroni risentono soltanto della forza elettrica associata alla differenza di potenziale tra base e collettore; quindi fluiscono senza ostacoli nel circuito esterno.

Si creano, così, la corrente di emettitore  $i_e$  e quella di collettore  $i_c$ , oltre alla debole corrente di base  $i_b$ , dovuta alle ricombinazioni elettrone-lacuna che avvengono nella parte centrale del dispositivo.

Se il potenziale della base viene abbassato, la corrente di emettitore diminuisce e quindi diminuisce anche la corrente di collettore  $i_c$ ; viceversa, se il potenziale della base viene alzato,  $i_c$  aumenta. Dunque,

variando la tensione  $V_{be}$  tra base ed emettitore, si controlla la corrente di collettore entro limiti piuttosto ampi.

caratteristiche della FIGURA 16 descrivono la corrente di collettore  $i_c$  in funzione della tensione  $V_{ce}$  tra collettore ed emettitore, per diversi valori della corrente di base  $i_b$ .



Si nota che, fissata per esempio  $V_{ce}$  a 1,4 V, se  $i_b$  passa da 0,20 mA a 0,25 mA (aumentando di 50  $\mu$ A),  $i_c$  passa da 50 mA a 60 mA, cioè compie una variazione 200 volte grande. È evidente, quindi, che

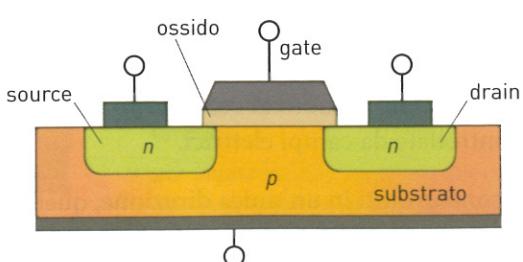
il transistor funziona da *amplificatore di corrente*.

Se la giunzione emettitore-base è polarizzata inversamente, un transistor bipolare produce affatto (si trova in *regime di interdizione*). Sfruttando questa proprietà, il transistor può essere usato come *interruttore*, per aprire o chiudere un circuito a seconda della tensione applicata tra base ed emettitore.

## Transistor a effetto di campo

Il transistor più usato nell'industria elettronica si chiama MOSFET e non appartiene alla classe dei transistor bipolari, ma a quella dei **transistor a effetto di campo**, o meglio (eponimo di «field-effect transistor»). L'effetto del campo elettrico, a cui allude il nome, serve di creare un canale che conduca in maniera controllata la corrente attraverso il dispositivo.

MOSFET sta per «metal-oxide-semiconductor FET» e si riferisce ai materiali di costruzione del transistor, schematizzato nella FIGURA 17.



Il MOSFET ha come *substrato* un cristallo di silicio, con leggero drogaggio di un tipo ( $p$  nella figura), in cui si distinguono due regioni, *source* e *drain*, che hanno un drogaggio elevato dell'altro tipo. La parte di substrato che separa le due regioni è coperta da un sottile strato isolante di diossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Una terza parte del dispositivo, il *gate*, è uno strato metallico depositato sull'ossido.

◀ FIGURA 16

Curve caratteristiche di un transistor *n-p-n*.

◀ FIGURA 17

La struttura schematica di un MOSFET. Il gate è uno strato metallico depositato sull'ossido; altri terminali metallici sono a contatto di source, drain e substrato.

Rispettivamente, source, drain e gate corrispondono all'emettitore, al collettore e alla base del transistor bipolare.

Se il gate è mantenuto a potenziale elettrico maggiore rispetto al substrato, subito sotto lo strato isolante si crea un sottile canale conduttore, ricco di elettroni.

Infatti, il campo elettrico generato dalla carica positiva che si accumula sul gate respinge le lacune e attrae gli elettroni di conduzione del substrato, presenti in esso come portatori minoritari.

Il canale conduttore connette elettricamente source e drain. Se una differenza di potenziale è applicata anche tra questi due terminali, nel transistor scorre corrente.

Come si vede nella figura, i terminali del MOSFET sono quattro. Usualmente il substrato è collegato a terra, così come il source. Il drain è invece mantenuto a potenziale positivo. La quantità di corrente che, nel verso convenzionale, scorre dal drain al source è controllata dal potenziale del gate.

Se al gate non è applicato alcun potenziale non vi è nemmeno passaggio di corrente.

Il MOSFET può funzionare da amplificatore, perché piccole differenze di potenziale tra gate e substrato portano a segnali intensi tra drain e source; più spesso, però, è utilizzato come interruttore, con il gate aperto o chiuso e il canale conduttore acceso o spento.

I due stati «acceso» e «spento» rappresentano le cifre 1 e 0 del sistema numerico binario, su cui si basa la gestione dei dati nei computer. Proprio i MOSFET, collegati a piccoli gruppi in circuiti digitali chiamati *porte logiche*, eseguono i calcoli sulle sequenze di uni e di zeri nei microprocessori. Se il microprocessore è il «cervello» del computer (e di tanti altri dispositivi elettronici che elaborano dati in formato digitale), i milioni se non miliardi di MOSFET che esso contiene sono i suoi neuroni.

Nell'elettronica digitale si usano di preferenza i MOSFET perché, rispetto ai transistor bipolar, consumano meno energia e sono più semplici da fabbricare e da miniaturizzare.

## I circuiti integrati

Negli anni Quaranta dello scorso secolo, prima che fosse inventato il transistor, qualche computer c'era già, ma occupava il volume di una stanza: al posto degli attuali MOSFET aveva le valvole, ingombranti tubi a vuoto al cui interno le correnti erano prodotte per effetto termoionico e controllate da campi elettrici.

Da allora i computer si sono evoluti in un'unica direzione, quella della miniaturizzazione, cioè hanno racchiuso sempre più potenza di calcolo (più transistor e il più possibile veloci) in sempre meno spazio.

Negli anni Cinquanta i transistor sostituirono le valvole, ma i primi computer fatti di transistor singolarmente incapsulati contenevano ancora masse di fili elettrici e di resistori di collegamento. Un grande salto in avanti fu fatto nel 1958, quando fu prodotto il primo **circuito integrato**: un circuito completo, costruito in un unico cristallo di silicio.

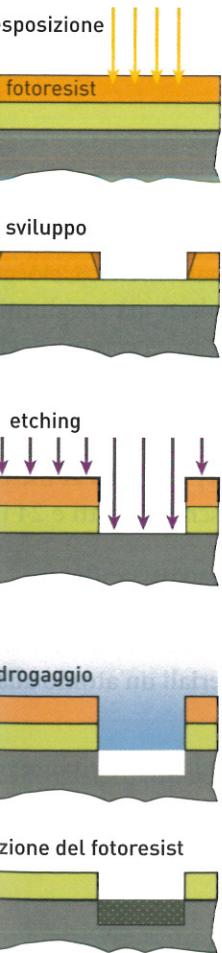
ricazione di un circuito integrato comincia con un lungo tubo di silicio cristallizzato artificialmente, che viene tagliato in fette sottili, chiamate wafer.

In singolo wafer, che può avere uno spessore di alcuni decimi di millimetro e una trenta centimetri di diametro, si ricavano centinaia di chip, quadrati o rettangolari, ciascuno dei quali contiene un identico circuito, con milioni o anche migliaia di transistor.

nente sul wafer viene prodotto uno strato superficiale di diossido di silicio. I trattamenti successivi a cui è sottoposto il wafer sfruttano la **fotolitografia**, una tecnica di produzione a stampa basata sull'uso di una *maschera* e di un liquido polimerico, chiamato *foresist*. Questo liquido ha la proprietà di essere impressionato dalla radiazione ultravioletta, così come le pellicole fotografiche sono impressionate dalla luce visibile.

Guardando la FIGURA 18 si nota che la maschera è ricavata da una lastra trasparente alla radiazione ultravioletta, su cui, a contrasto, le forme da stampare sono disegnate come zone opache. Illuminando la maschera e attraversando poi un sistema di lenti, la radiazione ultravioletta proietta le forme sul wafer, che è coperto di foresist.

**FIGURA 18** illustra, in modo semplificato, come si fa a drogare selettivamente il wafer con l'aiuto della fotolitografia.



Un tipo di foresist diventa solubile in apposito solvente nelle zone esposte alla radiazione ultravioletta e resta insolubile nelle zone schermate dalla maschera.

Durante lo *sviluppo* si tolgono le parti della pellicola di foresist diventate solubili.

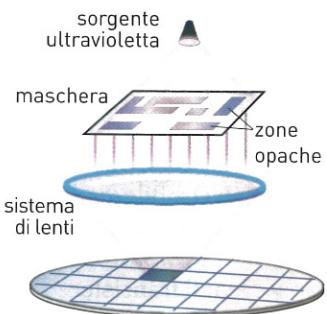
Poi si procede alla rimozione, *etching* in linguaggio tecnico, dello strato di ossido nelle zone non protette dal foresist. L'ossido può essere sciolto con acido fluoridrico oppure asportato a secco, sfruttando l'azione di un gas ionizzato (*plasma etching*).

Il substrato di silicio messo a nudo è ora pronto a ricevere le impurezze. Il droggaggio può avvenire:

- per *diffusione*, lasciando che gli atomi delle impurezze, allo stato gassoso, penetrino nel substrato grazie all'agitazione termica;
- per *impiantazione ionica*, accelerando con un campo elettrico gli atomi ionizzati delle impurezze contro il substrato.

Si rimuove il foresist. A questo punto il wafer è drogato solo nelle zone selezionate dalla maschera ed è pronto a essere nuovamente coperto da uno strato uniforme di ossido.

Il processo si ripete più volte con altre maschere, fino al completamento di tutte le connessioni necessarie. Al termine, sempre con una tecnica fotolitografica, si effettua la *metallizzazione*, cioè si costruiscono le connessioni elettriche.



**FIGURA 18**  
La fotolitografia usa la radiazione ultravioletta per proiettare una maschera su ognuna delle porzioni in cui è suddiviso il wafer. Sul foresist che ricopre il wafer restano stampate le forme disegnate sulla maschera.

**AL VOLO****LA LEGGE DI MOORE**

Nel 2011 i microprocessori erano arrivati a contenere un miliardo di transistor.

- Quanti transistor c'erano in un microprocessore nell'anno della tua nascita?



Witt/Bar/Shutterstock

Tutte le operazioni descritte sono eseguite su scala micrometrica o addirittura nanometrica. Poiché anche solo un grano di polvere vanificherebbe gli sforzi, la produzione avviene in **camera bianca**, cioè in un ambiente in cui l'aria è accuratamente filtrata e gli operatori sono completamente coperti da tute speciali.

Nel 1975, constatando empiricamente a quale ritmo stava procedendo la miniaturizzazione nell'industria microelettronica, l'imprenditore e informatico statunitense Gordon Moore affermò che il numero di transistor presenti in un microprocessore sarebbe raddoppiato ogni due anni.

All'incirca fino al 2012 questa tendenza, nota come *legge di Moore*, è stata confermata. Così, con la rapidità prevista, si è arrivati dalla microelettronica alla nanoelettronica e alle nanotecnologie.

**PROBLEMA MODELLO 4**
**Amplificare la corrente**

→ su [amaldipiu.zanichelli.it](http://amaldipiu.zanichelli.it) a pag. 302 PDF  
→ nell'eBook

## 6 LE NANOTECNOLOGIE

Perché si parla di «nanotecnologie», al plurale? Per dare spazio alla diversità degli strumenti con cui si può studiare e modificare la materia su scala nanometrica, cioè al livello atomico-molecolare; inoltre, per includere la varietà dei risultati già raggiunti e delle aree di interesse (nanoelettronica, nanomateriali, nanomedicina eccetera) degli scienziati e ingegneri del «nano».

Nel 1959 il fisico statunitense Richard Feynman prefigurò la possibilità di manipolare il mondo nanometrico in un seminario dal titolo «There's plenty of room at the bottom» («C'è moltissimo spazio là in basso»), in cui discuteva come scrivere tutti e 24 i volumi dell'*Encyclopaedia Britannica* sulla capocchia di uno spillo.

Il termine «nanotecnologia» (al singolare) fu coniato successivamente, nel 1974, da Norio Taniguchi, professore dell'Università di Tokyo, per indicare l'insieme dei metodi per «la separazione, il consolidamento e la deformazione dei materiali un atomo alla volta o una molecola alla volta».

Taniguchi si riferiva ai processi di lavorazione caratteristici della microelettronica, come la fotolitografia che abbiamo descritto nel paragrafo precedente, portati al livello estremo di precisione: guardava quindi alle nanotecnologie in verso discendente o, come si dice, aveva un *approccio top-down*. In senso più generale,

sono **nanotecnologie** tutte le conoscenze e tutti i metodi che si possono applicare per manipolare la materia a qualche scopo pratico, per organizzarla in nuove forme utili e per controllare le sue funzioni, su una scala dimensionale che va da 1 nm a 100 nm.

coli precedenti, in alcune schede «Le nuove tecnologie», abbiamo descritto di-  
umenti e risultati nanotecnologici. La **tabella** richiama gli argomenti trattati.

### STRUMENTI, PRODOTTI E PROSPETTIVE: CIÒ CHE ABBIAMO GIÀ INCONTRATO SULLE NANOTECNOLOGIE

veda

**microscopio a forza atomica:** come  
fare la forza per osservare le nano-  
strutture  
p. 11 «I principi della dinamica e la  
attività galileiana», pag. 353)

**diffrazione non è più un limite:**  
**microscopio al nanoscopio**  
p. 28 «L'interferenza e la diffrazio-  
ne della luce», pag. 991)

**FIB:** una macchina utensile per la  
microelettronica e le nanotecno-  
logie (cap. 31 «Il potenziale elettrico»,  
pag. 1084)

**microscopio a effetto tunnel**  
p. 45 «La fisica quantistica»,  
pag. 1604)

**conduttori di plastica**  
p. 33 «La corrente elettrica conti-  
nuo», pag. 1168)

**magnetoresistenza gigante**  
p. 37 «Il campo magnetico»,  
pag. 1316)

**nanomotori per vincere il moto**  
crowniano  
p. 20 «Il modello microscopico del-  
la materia», a pag. 700)

**l'effetto Doppler inverso e il mantel-  
lo dell'invisibilità**  
p. 41 «La relatività del tempo e del-  
lo spazio», pag. 1480)

#### Argomento

Per produrre immagini con risoluzione nanometrica, il **microscopio a forza atomica** (AFM) fa scorrere appena al di sopra della superficie del campione una punta sottilissima, fissata a un'asta flessibile. La punta è debolmente attratta o respinta dagli atomi superficiali e la sua deflessione è amplificata da un fascio laser. L'AFM distingue i singoli atomi e può essere utilizzato per posizionarli.

Con il **microscopio STED** si osservano cellule viventi distinguendo dettagli di dimensioni nanometriche. Il funzionamento dello STED si basa sull'uso di marcatori fluorescenti e di due fasci laser. Un fascio eccita i marcatori e provoca così l'emissione di luce dall'interno della cellula osservata, mentre l'altro fascio sopprime tutta la fluorescenza tranne quella emessa in una zona del diametro di qualche nanometro. L'immagine è ricostruita raccogliendo la fluorescenza residua ed effettuando una scansione.

Il **fascio ionico focalizzato** (FIB) è uno strumento simile al microscopio elettronico a scansione (SEM); tuttavia, mentre il SEM usa elettroni per produrre immagini, il FIB usa ioni di gallio per tagliare, incidere o costruire strutture nanometriche, oltre che per osservarle.

Il **microscopio a scansione a effetto tunnel** (STM) porta una punta ultrasottile a qualche decimo di nanometro da una superficie conduttrice, applica una differenza di potenziale elettrico tra la punta e la superficie e fa muovere avanti e indietro la punta. Attraverso la punta passa una debole corrente elettrica proporzionale alla distanza dagli atomi della superficie. L'STM distingue gli atomi singolarmente misurando la corrente; li può inoltre spostare a uno a uno, sfruttando la forza esercitata dalla punta.

Le **plastiche elettroluminescenti** degli schermi OLED sono prodotte con metodi di nanofabbricazione.

La **magnetoresistenza gigante** (GMR) è l'effetto fisico su cui si basa il funzionamento delle attuali testine di lettura del disco rigido dei computer. Una testina GMR è una nanostruttura in cui si alternano strati ferromagnetici dello spessore di pochi atomi e strati conduttori non ferromagnetici ugualmente sottili, e ha la proprietà di convertire variazioni piccolissime di campo magnetico in grandi variazioni di resistenza elettrica.

La medicina del futuro potrà usare nanomacchine dotate di **nanomotori**, capaci di trasformare in energia meccanica altre forme di energia prese dall'ambiente. Senza un sistema di propulsione, una nanoparticella immersa in un ambiente liquido, per esempio in un vaso sanguigno o in una cellula, si muoverebbe in modo disordinato a causa dell'agitazione termica.

Lavorando alla nanoscala si possono costruire **metamateriali a indice di rifrazione negativo**, che differiscono dai materiali ordinari per il fatto di deviare la luce secondo un angolo opposto. Questo comportamento ottico anomalo è il presupposto per avere, un giorno, il mantello dell'invisibilità: una stoffa che renda trasparente tutto ciò che avvolge.

## Quanto è grande una nanostruttura

Un nanometro è un miliardesimo di metro. L'ordine di grandezza di un atomo di idrogeno è 0,1 nm; la larghezza di una molecola di DNA è 2,5 nm; le grandi molecole delle proteine hanno dimensioni comprese tra 5 nm e 50 nm; i virus vanno da 75 nm a 100 nm; un cappello è spesso 100  $\mu\text{m} = 10^5$  nm.

Sei atomi di carbonio legati coprono all'incirca la lunghezza di un nanometro.

Una nanoparticella ha dimensioni comprese tra uno e cento nanometri; una nanostruttura, per esempio filiforme o piana, ha almeno una dimensione appartenente a questa scala; un materiale nanostrutturato presenta, su questa scala, delle regolarità.

Da questi dati si vede che un singolo atomo è fuori dalla nanoscala, al di sotto del limite inferiore. Per ottenere una particella nanometrica o per strutturare un materiale su scala nanometrica bisogna mettere assieme più atomi.

Ciò suggerisce che esista un altro modo per lavorare su scala nanometrica: accanto all'approccio top-down (dall'alto verso il basso) che abbiamo già descritto, e che è un adattamento dei metodi microtecnologici alla scala più piccola, è possibile usare un *approccio bottom-up* (dal basso verso l'alto), ossia costruire oggetti nanometrici partendo dagli atomi, usandoli come mattoni da posizionare nel modo voluto.

## Le speciali proprietà della scala nanometrica

Le proprietà fisiche e chimiche di un materiale non dipendono solo dalla sostanza, cioè dagli atomi di cui è composto, ma anche dalle dimensioni. Una nanoparticella o un materiale nanostrutturato possono differire da un volume macroscopico dello stesso materiale per resistenza meccanica, bagnabilità in acqua o in un altro liquido, reattività chimica, comportamento magnetico; possono anche avere proprietà ottiche diverse, per esempio riflettere meglio la luce o cambiare colore, e avere una diversa capacità di condurre corrente elettrica o calore.

Alla nanoscala, le proprietà dei materiali sono dominate dagli effetti quantistici.

Ha un ruolo importante, per esempio, l'effetto tunnel, in base al quale funziona il microscopio STM e funzionano anche le memorie flash. L'effetto tunnel, che è assente dal mondo macroscopico, è una conseguenza del comportamento ondulatorio delle particelle subatomiche e permette a queste particelle di oltrepassare una barriera di energia potenziale, con probabilità tanto maggiore quanto minore è lo spessore della barriera. Per effetto tunnel, gli elettroni possono muoversi più o meno facilmente attraverso una nanostruttura a seconda delle sue caratteristiche geometriche.

Il caso dell'oro illustra bene come cambiano l'aspetto e il comportamento di un materiale quando cambia la scala dimensionale.

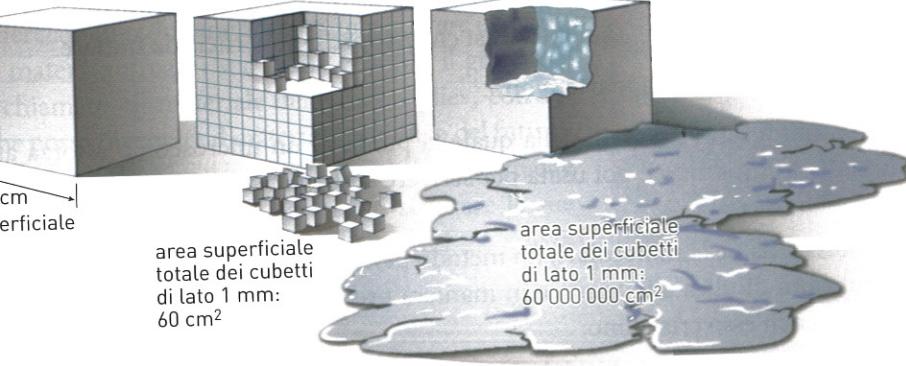


Le **nanoparticelle d'oro disperse in acqua** non sono gialle, ma appaiono rosse o viola. Alla nanoscala, infatti, il moto degli elettroni dell'oro è confinato, per cui il materiale risponde diversamente all'interazione con la luce.

nanoparticelle hanno oggi importanti applicazioni, anche in campo medico: per esempio, si accumulano selettivamente nei tumori, sono sfruttate per localizzare con precisione le cellule malate e distruggerle in modo mirato con un fascio laser, e non per le cellule sane circostanti.

I nanoscali contano poco i volumi, ma contano molto le aree delle superfici e delle interfacce.

Figura 19 fa capire intuitivamente perché.



Un cubo con spigolo di 1 cm ha un volume di  $1 \text{ cm}^3$  e un'area superficiale di  $6 \text{ cm}^2$ . Se lo stesso volume di  $1 \text{ cm}^3$  è riempito di cubetti di spigolo 1 mm, si trova che l'area superficiale dell'insieme dei cubetti è  $60 \text{ cm}^2$ . Se il centimetro cubo è riempito di nanocubi di spigolo 1 nm, l'area superficiale totale diventa  $6 \times 10^7 \text{ cm}^2 = 6000 \text{ m}^2$ .

Per questo, rispetto alla materia ordinaria, un rapporto tra area superficiale e volume è estremamente maggiore, i materiali nanostrutturati interagiscono di più con le molecole circostanti. Per questa proprietà, nanomateriali appositamente studiati sono oggi utilizzati come catalizzatori.

## e si lavora alla scala nanometrica

Le nanotecnologie sono piuttosto nuove, ma alcuni nanomateriali artificialmente prodotti sono usati da secoli. I **colori delle vetrate** delle chiese medioevali, per esempio, sono dovuti a nanoparticelle d'oro e d'argento inglobate nel vetro.

Le nanotecnologie come le intendiamo oggi sono nate nel 1981, dopo che già era stato dato il loro nome: esse nascono con la costruzione del microscopio a scansione a tunnello (STM), grazie al quale è stato per la prima volta possibile ottenere immagini degli atomi e spostarli a uno a uno.

L'STM, che può essere utilizzato solo con campioni conduttori, nel 1986 è arrivato il microscopio a forza atomica (ATM), che ha anch'esso risoluzione atomica e ha il vantaggio di funzionare con qualsiasi tipo di campione.

L'ATM e l'STM sono strumenti fondamentali per le moderne nanotecnologie, che permettono la capacità di vedere e muovere individualmente gli atomi e le molecole. La produzione di nanomateriali e dispositivi nanometrici si chiama *nanofabbricazione*. Come abbiamo detto,

◀ FIGURA 19

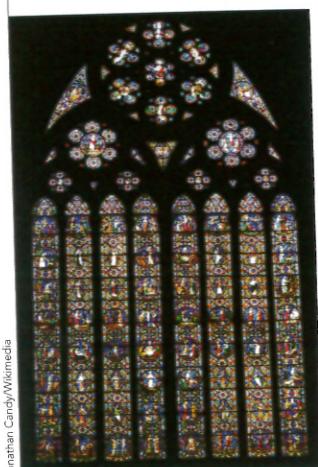
Se si divide un cubo in tanti cubetti di lato uguale alla parte  $n$ -esima del suo lato, l'area superficiale totale dei cubetti che si ottengono è  $n$  volte maggiore di quella del cubo di partenza.

## AL VOLO

### UN CENTIMETRO CUBO DI NANOCUBI

Un cubo che ha lo spigolo di 1 cm è diviso in cubetti con spigolo di 1 nm.

- ▶ Quanti sono i cubetti allineati lungo uno spigolo del cubo di partenza?
- ▶ Quanti sono i cubetti in totale?
- ▶ Dimostra che l'area superficiale totale dei cubetti misura  $6000 \text{ m}^2$ .



Jonathan Candy/Warmedia

le nanotecnologie usano due tipi di metodi, il **top-down**, che riduce grossi pezzi di materiale lavorandoli fino alla nanoscala, e il **bottom-up**, che assembla nuove strutture a partire dai componenti (atomi o molecole).

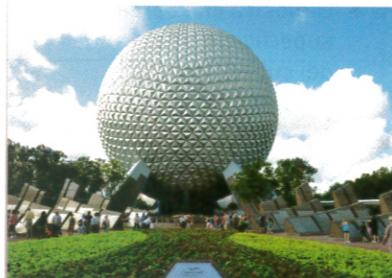
Nella prima di queste due categorie rientrano, per esempio:

- la **litografia a fascio elettronico**, simile alla fotolitografia di cui abbiamo già parlato, che però fa a meno della maschera e, al posto della radiazione ultravioletta, usa un fascio di elettroni con lunghezza d'onda minore, garantendo una precisione migliore;
- la **litografia a nanostampa**, che non proietta una maschera, ma preme uno stampo nanometrico direttamente sul fotoresist che ricopre la superficie da trattare.

Alla seconda categoria appartengono:

- la **nanolitografia dip-pen**, nella quale la punta di un microscopio a forza atomica è bagnata in un fluido e poi usata per scrivere su un substrato, come una penna intinta nell'inchiostro;
- l'**epitassia da fasci molecolari**, un metodo per depositare su un substrato cristallino, in condizioni di ultra alto vuoto e in maniera precisamente controllata, un rivestimento sottile, anch'esso cristallino;
- la **depositazione di strati atomici**, che permette di depositare su una superficie uno strato di materiale dello spessore di un atomo;
- l'**auto-assemblaggio**, cioè i processi nei quali si sfruttano le reciproche interazioni tra atomi, tra molecole o tra nanoparticelle per lasciare che queste parti componenti si uniscano spontaneamente in strutture organizzate.

I nanomateriali così prodotti possono essere più resistenti, più leggeri, più durevoli del normale; possono essere idrorepellenti, antiriflettenti, impenetrabili ai raggi ultravioletti, autopulenti, antimicobici e altro ancora.



ebertuan/Wikimedia

#### FIGURA 20 ▶

Modello della molecola  $C_{60}$ , un fullerene sferico del diametro di 1,1 nm, formato da 60 atomi di carbonio.

### Fullereni, nanotubi e grafene

Tre tappe importanti nello sviluppo delle nanotecnologie hanno come protagonista il carbonio.



Jynto/Wikimedia

■ Nel 1985 Richard Smalley, Robert Curl e Harold Kroto, chimici della Rice University, in Texas, scoprono i **fullereni**, molecole di carbonio di dimensioni nanometriche a struttura cava, con forma sferica o ellissoidale (FIGURA 20). Il nome di queste molecole, formate da un unico strato di atomi disposti ai vertici di maglie esagonali e pentagonali, deriva dalla loro somiglianza con le **cupole geodetiche** dell'architetto Richard Buckminster Fuller.

Nel 1991 il fisico giapponese Sumio Iijima scoprì che il carbonio produce anche strutture cave di forma cilindrica: i **nanotubi** (FIGURA 21), che possono avere, a seconda di come è orientata la rete delle loro maglie rispetto all'asse, le proprietà elettriche dei buoni conduttori o dei semiconduttori e che, dal punto di vista meccanico, sono leggeri, flessibili e molto resistenti alla compressione e alla trazione. Oggi i nanotubi di carbonio servono a migliorare le proprietà meccaniche di alcuni materiali compositi, impiegati tra l'altro per la costruzione di attrezzature sportive. Per

anostrutture, però, sono state proposte e dimostrate nei laboratori molte potenzialazioni, per esempio per migliorare le prestazioni delle batterie elettriche, per creare nuovi sensori, per realizzare dispositivi a semiconduttore di dimensioni estremamente ridotte.

nel 2004 Andre Geim, fisico dell'Università di Manchester, insieme a Kostya S. Novoselov, mostrò il **grafene** (mostrato a fianco in un'immagine a scansione a tunnello), cioè un cristallo bidimensionale formato da uno strato di atomi di carbonio organizzati in maglie esagonali: in sostanza, un singolo piano del reticolo strutturale della grafite. Fino a oggi esiste solo un prodotto commerciale che contiene grafene, una polvere da usare come materia prima in stampanti 3D. Ma il grafene è chiamato «il materiale delle meraviglie», con l'ipotesi che possa diventare il materiale multiuso del futuro. Attualmente si concentra il lavoro di molti ricercatori, che stanno esplorando i modi possibili di sfruttare le sue proprietà meccaniche, chimiche, di interazione con la radiazione elettromagnetica e di conduzione.

## Cosa aspettarsi in prospettiva

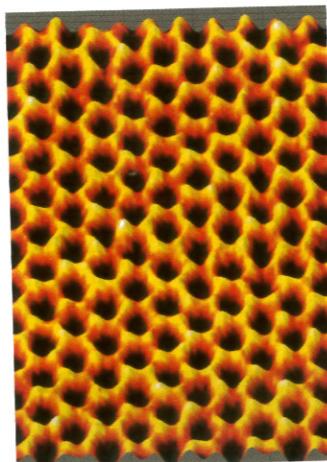
Nel mercato esistono molti prodotti che contengono componenti nanofabbricati: testine di lettura del disco rigido dei computer, schermi OLED (a LED organici), marmette, creme solari, specchi che non si appannano e tessuti antimacchia. Stanno nascendo vernici nanotecnologiche resistenti alla **corrosione** e nanorivestimenti per i paraurti degli autoveicoli. Si stanno sperimentando nanomateriali per estendere gli alimenti, capaci di prolungare la loro durata e la loro sicurezza, eventualmente con l'uso di nanosensori che sappiano rilevare la presenza di agenti patogeni. Nonostante, le nanotecnologie sono ancora agli inizi.

Le nuove nanomateriali saranno più resistenti, più leggeri e più durevoli dei materiali tradizionali che si usano per costruire edifici, strade, automobili e così via.

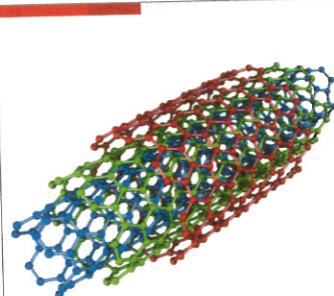
Probabilmente le nanotecnologie renderanno le nostre case, i nostri mezzi di trasporto e le nostre attività più efficienti dal punto di vista energetico, per mezzo di nuove celle a combustibile, nuove batterie e nuovi pannelli solari; ci aiuteranno a purificare l'acqua potabile e a preservare il pianeta, con sensori di inquinamento e sistemi per prevenire e ridurre i danni ambientali.

Se i transistor costruiti sulla nanoscala avremo computer ancora più potenti ed energeticamente efficienti di quelli attuali, e dotati di una maggiore capacità di memoria. Infatti così come i transistor hanno dato un supporto fisico ai bit, cioè alle cifre binarie 1 e 0, utilizzate nel calcolo computerizzato, è probabile che con qualche nanostruttura si riuscirà a creare un supporto fisico conveniente al qubit, l'unità di informazione su cui si basa la nuova tecnologia di calcolo costruita sulle leggi quantistiche: il calcolo quantistico potrebbe essere milioni di volte più potente del calcolo tradizionale.

Altri promessi vengono, infine, dalla nanomedicina: già in fase di sperimentazione clinica vi sono nanoparticelle capaci di rilasciare farmaci chemioterapici in modo mirato, direttamente nelle cellule malate, riducendo al minimo i danni collaterali; vi sono anche nanoparticelle che migliorano il funzionamento e la sicurezza degli scanner per la RMN, la resonanza magnetica o per la TAC.



Eric Wieser/Wikimedia

**FIGURA 21**

I nanotubi possono essere a parete singola o multipla e presentare diametri compresi tra 0,4 nm e 100 nm.



### La nanobiomimetica: a scuola dalla natura

■ Ponendo dei ragni in un ambiente umido cosparso di nanotubi di carbonio, un gruppo di ricercatori dell'Università di Trento ha ottenuto, nel 2015, una ragnatela più resistente del kevlar (la fibra di rinforzo dei giubbotti antiproiettile). Come nanofabbriche viventi, i ragni hanno incorporato nel loro filo i nanotubi: se l'esperimento funzionerà anche con i bachi da seta, comunemente allevati su larga scala, la produzione di questo nanomateriale sarà facile e a basso costo.



Chen-Pan Liao/Wikimedia

■ Alla Scuola Normale Superiore di Pisa si studia la possibilità di usare la proteina verde fluorescente, prodotta dalla medusa *Aequorea victoria*, come sensore biologico di acidità e di concentrazione di ioni  $\text{Cl}^-$ . Questo tipo di sensore sarebbe utile nella cura dell'epilessia, per localizzare le precise zone del cervello in cui è necessario l'intervento terapeutico: una nanoparticella potrebbe traghettare il sensore a destinazione dentro i neuroni e trasportare, assieme, anche il farmaco da rilasciare.



Denise Allen/Flickr

Questi sono due esempi di **nanobiomimetica**, cioè di imitazione o di utilizzo diretto di strutture, meccanismi e principi in base ai quali gli esseri viventi svolgono le loro funzioni su scala nanometrica.

La natura è una banca dati che contiene moltissime soluzioni già funzionanti, di cui spesso ci si appropria per creare sinteticamente nuovi materiali o dispositivi.

Le nanotecnologie biomimetiche possono:

- ▶ imitare i meccanismi della natura;
- ▶ incorporare processi naturali.

Poiché la natura ha la varietà tra le sue principali caratteristiche, le cose da copiare o da prendere sono le più diverse. Per farcene un'idea vediamo altri due esempi.

Alla prima delle due categorie elencate appartiene la fabbricazione di materiali che riproducano la **pelle delle dita del geco**.

I polpastrelli del geco sono ricoperti di peli sottili, ciascuno dei quali termina con un ciuffo di fibre nanometriche. Queste strutture sono degli adesivi reversibili: le forze che le tengono attaccate alle superfici sono di natura elettrostatica, legami deboli intermolecolari che si formano e poi, facilmente, si sciogliono.

Il primo nastro adesivo strutturato come i polpastrelli del geco fu costruito nel 2003 da Andre Geim (lo scopritore del grafene) con metodi nanolitografici. In sperimentazioni successive la pelle del geco è stata riprodotta utilizzando nanotubi di carbonio, con un approccio bottom-up.

Alla seconda categoria appartiene l'uso di alcune molecole proteiche come motori per nanomacchine.

Le proteine che fungono da nanomotori sono naturalmente presenti nelle cellule e trasformano in energia meccanica l'energia chimica immagazzinata dall'ATP (la «benzina» dei viventi). Modificando geneticamente queste proteine, oggi si riesce a farle attaccare a nanoparticelle sintetiche.

Per trasportare sensori e farmaci entro le cellule, la medicina del futuro potrebbe utilizzare le nanomacchine a motore così ottenute.



Bjørn Christian Tørrissen/Wikimedia

## a di legame

Il caso di una molecola composta da due atomi è uguale alla differenza (positiva) tra l'energia minima dei due atomi isolati e l'energia della molecola nel suo stato fondamentale.

## di energia

costituita da un insieme di stati distinti, ai quali corrispondono livelli energetici diversi così vicini che si possono considerare continui.

sono *bande permesse* quelle che individuano intervalli energetici accessibili agli elettroni del cristallo; sono *bande proibite* quelle che individuano intervalli energetici inaccessibili agli elettroni.

Una banda proibita che separa due bande permesse successive si chiama *gap*.

## planti

Una banda di energia più elevata tra quelle che contengono elettroni, detta *banda di valenza*, è completamente piena ed è separata dalla banda vuota superiore da un ampio gap (di diversi eV).

## Conduttori

- La banda di valenza è occupata solo parzialmente per cui, senza che sia violato il principio di esclusione, può accogliere elettroni provenienti da livelli energetici inferiori.

## onduttori

Altre temperature ambiente la banda di valenza di un semiconduttore è quasi piena, ma non del tutto, perché una piccola parte degli elettroni ha superato il gap ed è passato nella *banda di conduzione*.

La probabilità che a temperatura ambiente un elettrone passi nella banda di conduzione dipende dalla larghezza del gap e quindi cambia da un materiale all'altro: per il silicio è dell'ordine di  $10^{-10}$ . La conduzione elettrica di un semiconduttore contribuiscono sia gli elettroni della banda di conduzione sia le lacune della banda di valenza che si comportano come cariche di segno positivo.

## raggio di un semiconduttore

Si esegue per aumentare la conducibilità introducendo delle impurezze all'interno del reticolo cristallino.

### emiconduttore di tipo n

Sono quelli in cui la conduzione elettrica è dovuta prevalentemente agli elettroni.

Sono stati drogati con atomi *donatori* di elettroni, come l'arsenico e l'antimonio.

### Semiconduttore di tipo p

- Quelli in cui la conduzione elettrica è dovuta prevalentemente alle lacune.
- Sono stati drogati con atomi *accettori* di elettroni, come il boro e il gallio.

## o a semiconduttore (o a giunzione)

È un semiconduttore drogato in modo da avere una zona di tipo *n* e una zona di tipo *p* separate da una superficie chiamata *giunzione*.

Nello strato di svolgimento ai due lati della giunzione si crea un campo elettrico che va da *n* a *p*. A seconda di come viene connesso a un generatore, funziona da raddrizzatore di corrente perché fa passare la corrente in un verso, ma solo in misura trascurabile nel verso opposto.

### Polarizzazione inversa

Si ha quando il polo positivo del generatore è connesso alla parte *n* e quello negativo alla parte *p*: in questo caso attraverso la giunzione scorre una debole corrente di saturazione inversa *i<sub>s</sub>*, che va da *n* a *p*.

### Polarizzazione diretta

- Si ha quando il polo negativo del generatore è connesso alla parte *n* e quello positivo alla parte *p*: in questo caso attraverso la giunzione scorre una corrente  $i = i_s \left( e^{\frac{q\Delta V}{nkT}} - 1 \right)$  che va da *p* a *n*.

## sistor

A seconda della polarizzazione, funziona come amplificatore di corrente o come interruttore.

### Bipolare (o a doppia giunzione)

È un dispositivo a semiconduttore in cui una regione con un certo droggaggio (*base*) è chiusa a sandwich tra due regioni con droggaggio dell'altro tipo (*emettitore* e *collettore*). Ne esistono di due tipi: *npn* e *pnp*.

### A effetto di campo (o MOSFET)

- È formato da un substrato di silicio con un leggero droggaggio di un certo tipo, in cui si distinguono due regioni, *source* e *drain*, con droggaggio dell'altro tipo; la parte di substrato che separa le due regioni è ricoperta di ossido di silicio (isolante) e su di esso è depositato uno strato metallico chiamato *gate*.

# ESERCIZI

## 48

### LA FISICA DELLO STATO SOLIDO

#### 1 I LEGAMI CHIMICI NELLE MOLECOLE E NEI CRISTALLI

##### DOMANDE

###### 1 PENSACI BENE

L'idrogeno molecolare  $H_2$  contiene due elettroni e due protoni. A quale dei due atomi di idrogeno H appartengono i due elettroni?

###### 2 COSA SUCCIDE SE

Per rompere una molecola è necessario fornire un'energia di dissociazione pari all'energia di legame, il cui valore per alcune molecole biameriche (idrogeno, azoto, ossigeno, fluoro ecc) è all'incirca di qualche eV. L'energia a disposizione durante un urto a temperatura ambiente ha un ordine di grandezza pari a  $k_B T$ , dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann.

► Confronta l'energia di dissociazione con l'energia a disposizione durante un urto a temperatura ambiente: cosa succede se due molecole biameriche si urtano? Può rompersi il legame?

###### 3 PENSACI BENE

Nel legame metallico, gli elettroni di conduzione sono vincolati oppure liberi di muoversi nel reticolo?

##### PROBLEMI

###### PROBLEMA MODELLO 1

###### L'energia di una molecola

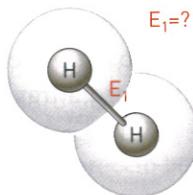
→ a pag. 1696

###### 4

L'energia di legame di una mole di idrogeno biamericico vale 436 kJ/mol.

► Calcola il valore sperimentale, espresso in elettronvolt, dell'energia di legame nella molecola di idrogeno.

[4,53 eV]



###### 5

L'energia di legame di una mole di ossigeno biamericico vale 496 kJ/mol.

► Calcola il valore sperimentale, espresso in elettronvolt, dell'energia di legame nella molecola di ossigeno.

[5,15 eV]

###### 6

Una molecola ha un'energia di legame di 11,2 eV.

- Calcola in J l'energia di una mole di molecole nel loro stato fondamentale.
- Utilizza i dati della tabella delle energie di legame per individuare il tipo di molecola.

[ $1,08 \times 10^6$  J/mol; CO]

###### 7

Un fotone di radiazione visibile ha lunghezza d'onda 500 nm. L'energia di legame di una molecola di  $F_2$  è di 1,6 eV.

- Calcola l'energia del fotone e confrontala con quella di legame della molecola di fluoro. Quale delle due ha maggiore valore?
- Cosa puoi concludere riguardo al comportamento di  $F_2$  esposto alla luce visibile?

[2,49 eV]

#### 2 LE BANDE DI ENERGIA NEI SOLIDI CRISTALLINI

##### DOMANDE

###### 8 PENSACI BENE

All'interno di una banda i livelli di energia sono continui o discreti?

###### 9 PENSACI BENE

Un elettrone di conduzione ha un'energia corrispondente a un certo livello energetico. La velocità associata a tale energia corrisponde alla velocità di deriva oppure alla velocità media tra due urti successivi con il reticolo?

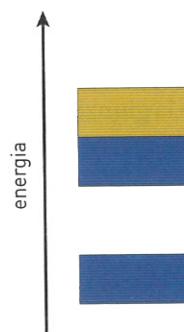
###### 10 COSA SUCCIDE SE

Rifletti sul modello a bande per la conduzione. Cosa accadrebbe se gli elettroni si comportassero come bosoni?

###### 11 PENSACI BENE

In alcuni materiali la prima banda vuota è contigua all'ultima completamente piena (disegno a fianco).

► Questi materiali risultano conduttori o isolati?



##### PROBLEMI

###### 12

In un gas di elettroni racchiuso in un cubo di lato 1 cm ci sono livelli di energia permessi e altri proibiti. Risolven-

equazione di Schrödinger, si trova che ci sono circa 21 stati permessi all'interno di un intervallo di energia compreso tra 4,0 eV e 4,1 eV.

Calcola la differenza di energia media tra due stati accesi.

Cosa puoi concludere sui livelli discreti?

$$[10^{-22} \text{ eV}]$$

Diamante è un ottimo isolante poiché l'intervallo di energia tra la banda di valenza e la banda di conduzione è di 5 eV. Per il silicio tale intervallo di energia è pari a 1,1 eV.

Calcola l'energia disponibile per agitazione termica a una temperatura ambiente di 20 °C, che ha un ordine di grandezza pari a  $k_B T$ .

Affronta il valore appena calcolato con gli intervalli di energie dati per il diamante e il silicio. Cosa puoi concludere sul comportamento del diamante e del silicio?

$$[0,03 \text{ eV}]$$

Cristallo di germanio ha un gap di energia pari a 0,67 eV.

Calcola la frequenza e lunghezza d'onda di un fotone che ha energia appena sufficiente da provocare una transizione dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

$$[1,6 \times 10^{14} \text{ Hz}; 1,9 \mu\text{m}]$$

## MICONDUTTORI

### NDE

**C A I CONCETTI** La conducibilità di un cristallo semiconduttore aumenta quando il cristallo viene esposto a radiazione elettromagnetica di frequenza opportuna. Cosa puoi interpretare questo fenomeno?

**SUCCEDE SE** Cosa succede alla resistività di un cristallo di germanio quando lo si porta a temperature più alte?

**C I BENE** Quali fattori determinano se un semiconduttore si comporta come un isolante o come un conduttore?

**A I CONCETTI** In un semiconduttore omogeneo di quale tipo qual è la relazione tra la densità  $n$  di elettroni e la densità  $p$  di lacune?

**SUCCEDE SE** La mobilità degli elettroni nel silicio è dieci volte minore della mobilità degli elettroni nel germanio. Che cosa succede alla velocità dei portatori di carica se la temperatura raddoppia a parità di campo elettrico applicato?

- 20 Come varia la mobilità dei portatori di carica di semiconduttori diversi all'aumentare del campo elettrico applicato?

### PROBLEMI

#### PROBLEMA MODELLO 2

**Quanti elettroni saltano nella banda di conduzione?**

→ a pag. 1704

#### PROBLEMA MODELLO 3

**Densità di portatori di carica**

→ a pag. 1705

- 21 Nel fosfuro di indio (InP) la velocità di deriva delle lacune vale  $1,4 \times 10^{-2}$  m/s quando è applicato un campo elettrico di 95 V/m.

▶ Quanto vale la mobilità delle lacune nel fosfuro di indio?

$$[1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})]$$

- 22 Considera un cristallo di silicio il cui gap è 1,1 eV.

▶ Di quanti ordini di grandezza varia il numero di elettroni che passano nella banda di conduzione quando la temperatura raddoppia aumentando da 300 K a 600 K?

[5]

- 23 Considera un cristallo di germanio (gap 0,67 eV) mantenuto a una temperatura di 27 °C.

▶ Calcola la probabilità che un elettrone superi il gap di energia e passi alla banda di conduzione.

▶ Calcola l'ordine di grandezza della temperatura necessaria affinché la probabilità di superare il gap aumenti di  $10^2$  volte rispetto al valore appena calcolato.

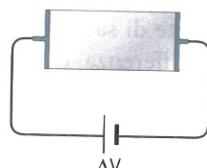
$$[2,4 \times 10^{-6}; 4 \times 10^2 \text{ K}]$$

- 24 Considera un cavo di rame, materiale comunemente utilizzato nei circuiti elettrici. La massa molare del rame è  $M = 63,5 \text{ g/mol}$ , la densità del rame è  $d = 8960 \text{ kg/m}^3$  e il numero di elettroni di conduzione per il rame è in media 1,0 per atomo.

▶ Calcola la densità dei portatori di carica nel rame, cioè il numero di elettroni di conduzione per metro cubo.

$$[8,5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}]$$

- 25 Un cristallo di germanio intrinseco (cioè non drogato), a temperatura ambiente, è lungo 4,02 cm. Tra i suoi estremi è applicata una differenza di potenziale di 7,00 V.



$$\begin{aligned}l &= 4,02 \text{ cm} \\ \Delta V &= 7,00 \text{ V} \\ V_0 &=? \\ V_1 &=?\end{aligned}$$

- ▶ Calcola la velocità di deriva degli elettroni e delle lacune in tali condizioni.

[66 m/s; 31 m/s]

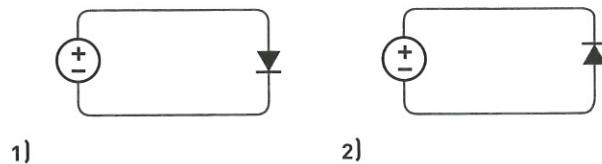
- 26** Un cristallo di arseniuro di gallio, a temperatura ambiente, è lungo 3,15 cm. Tra i suoi estremi è applicata una differenza di potenziale di 5,00 V.
- ▶ Calcola la velocità di deriva degli elettroni e delle lacune in tali condizioni.

[ $1,4 \times 10^2$  m/s; 6,4 m/s]

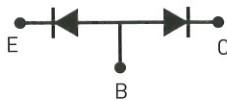
## 4 IL DIODO A SEMICONDUTTORE

### DOMANDE

- 27** **APPLICA I CONCETTI** In quali dei circuiti rappresentati passa corrente elettrica? Perché?



- 28** **PENSACI BENE** Che cosa significa che un conduttore è ohmico? Il diodo è un conduttore ohmico?
- 29** **APPLICA I CONCETTI** Considera due diodi a giunzione collegati in serie.



Si collega il primo in polarizzazione diretta e il secondo in polarizzazione inversa (*back to back*, cioè orientati in direzione opposta): passa corrente nel circuito?

### PROBLEMI

- 30** Un LED è costruito con una giunzione *p-n* di materiale semiconduttore con un gap di energia di 2,0 eV.
- ▶ Determina il colore della luce emessa e la sua lunghezza d'onda.

[ $6,2 \times 10^{-7}$  m, arancione]

- 31** Considera l'equazione del diodo relativa a un diodo al germanio alla temperatura di 20 °C.
- ▶ Calcola il rapporto  $i/i_s$  tra l'intensità di corrente e l'intensità della corrente di saturazione inversa per i seguenti valori di differenza di potenziale applicata:  $\Delta V_1 = -0,5$  V e  $\Delta V_2 = +0,5$  V.

[ $-1; 5 \times 10^8$ ]

- 32** In laboratorio vuoi confrontare la potenza richiesta per il funzionamento di un laser a diodo e di uno a gas. Sai che la potenza in ingresso di un laser a diodo è 10 mW e il rendimento è pari al 25%. Invece, un laser a HeNe ha un rendimento dello 0,1% e produce un fascio laser di potenza 1 mW.

- ▶ Calcola la potenza luminosa emessa dal laser a diodo.
- ▶ Calcola la potenza in ingresso del laser a HeNe.
- ▶ Cosa puoi concludere confrontando i due tipi di laser?

[2,5 mW; 1 W]

## 5 I TRANSISTOR E I CIRCUITI INTEGRATI

### DOMANDE

- 33** **PENSACI BENE** Due diodi in serie polarizzati uno direttamente e l'altro inversamente non permettono il passaggio di corrente. Un transistor a doppia giunzione, formato cioè da due giunzioni *n-p* e *p-n*, si comporta invece da amplificatore di corrente. Perché?
- 34** **PENSACI BENE** Se in un transistor *n-p-n* la differenza di potenziale tra base ed emettitore è negativa, si tratta di una polarizzazione diretta o inversa?

- 35** **APPLICA I CONCETTI** Il transistor può comportarsi come amplificatore dell'intensità di corrente con un fattore di guadagno pari a 100 o più. Ciò avviene a spese energetiche di quale meccanismo?

- 36** **PENSACI BENE** Nel regime di interdizione il transistor permette il passaggio di corrente?

### PROBLEMI

- 37** **PROBLEMA MODELLO 4**  
**Amplificare la corrente**  
→ su [amaldipiu.zanichelli.it](http://amaldipiu.zanichelli.it) a pag. 302 PDF  
→ nell'eBook

- 37** Considera le curve caratteristiche del transistore nel paragrafo 5, con una differenza di potenziale tra collettore ed emettitore di 1,4 V. Durante il funzionamento, la corrente di base varia da 0,10 mA a 0,25 mA.

- ▶ Stima la variazione subita dalla corrente di collettore.

[30 mA]

## 6 LE NANOTECNOLOGIE

### DOMANDE

- 38** Qual è il vantaggio di utilizzare un'impostazione bottom-up per lavorare a scale nanometriche?

Una molecola ha all'incirca la dimensione di 1 nm e i transistor più piccoli realizzati in laboratorio (nanotransistor) possono raggiungere oggi dimensioni anche inferiori a 10 nm.

## PROBLEMI GENERALI

Il cristallo di silicio puro ha una resistività di  $2140 \Omega \cdot m$ . La mobilità di elettroni e lacune è riportata nella tabella del paragrafo 3.

Calcola la densità dei portatori di carica.

$$[1,2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}]$$

Considera l'equazione del diodo per un diodo al germanio alla temperatura di  $20^\circ\text{C}$ .

Trova il valore della tensione applicata per cui si ha:  
 $i = i_s$ ,  $i = 10 i_s$ ,  $i = 100 i_s$ ,  $i = 1000 i_s$ .

$$[0,017 \text{ V}; 0,060 \text{ V}; 0,12 \text{ V}; 0,17 \text{ V}]$$

Nelle curve caratteristiche considera fissa la corrente di base al valore  $0,35 \text{ mA}$ . La differenza di potenziale fra collettore ed emettitore varia invece da  $1,2 \text{ V}$  a  $0,60 \text{ V}$ .

Stima la variazione della corrente di collettore.

$$[10 \text{ mA}]$$

Nel fosfuro di indio (InP) la mobilità degli elettroni è  $4,60 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . Considera che vi sia applicato un campo elettrico di  $175 \text{ V/m}$ .

Quanto vale la velocità degli elettroni nel fosfuro di indio sottoposto a questo campo elettrico?

$$[8,05 \times 10^7 \text{ m/s}]$$

Per i diodi al germanio che si trovano normalmente in commercio la corrente di saturazione è dell'ordine del microampere. Considera che il diodo si trovi alla temperatura ambiente di  $20^\circ\text{C}$  e che vi venga applicata, in un primo momento, una differenza di potenziale di  $0,010 \text{ V}$ . Successivamente la differenza di potenziale viene portata a  $0,10 \text{ V}$  e quindi a  $0,35 \text{ V}$ .

Calcola l'intensità di corrente che circola nel diodo nei tre diversi casi.

$$[5 \times 10^{-7} \text{ A}; 5 \times 10^{-5} \text{ A}; 1 \text{ A}]$$

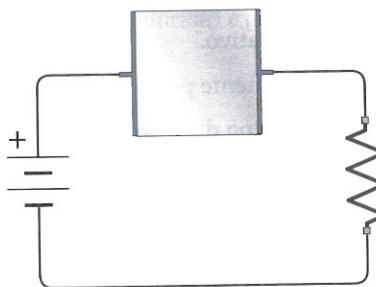
Considera un cristallo di germanio (gap pari a  $0,67 \text{ eV}$ ) alla temperatura di  $27^\circ\text{C}$ .

Calcola quale deve essere la variazione di temperatura affinché la probabilità di trovare un elettrone nella banda di conduzione aumenti di un fattore 1000.

$$[3,4 \times 10^2 \text{ K}]$$

- Fai un confronto di scale di lunghezza e cerca l'ordine di grandezza della dimensione di un virus, di una cellula e di una coccinella.

- 7** Il circuito rappresentato nella figura viene utilizzato per testare le caratteristiche elettriche di un semiconduttore.

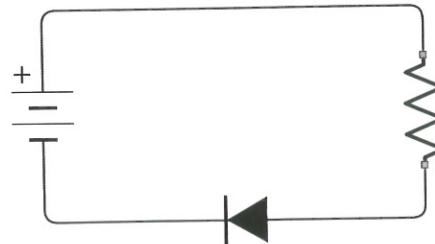


Quando il semiconduttore è un cristallo di silicio puro, di lunghezza  $5,0 \text{ cm}$ , diametro  $4,0 \text{ mm}$  e resistività  $2,3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ , nel circuito della figura si misura un'intensità di corrente di  $1,3 \mu\text{A}$ . Il cristallo di silicio puro viene successivamente sostituito con uno drogato grazie all'aggiunta di atomi di fosforo. Il nuovo cristallo ha le stesse dimensioni del precedente, ma resistività pari a  $8,7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ . La resistenza del resistore in serie col cristallo di silicio vale  $50 \Omega$ .

- Calcola la nuova intensità di corrente nel circuito.

$$[0,22 \text{ A}]$$

- 8** Un circuito è costituito da un generatore che alimenta una resistenza  $R$  di  $100 \Omega$  collegata in serie a una lampada a LED con una tensione di giunzione pari a  $1,8 \text{ V}$ . L'intensità di corrente di lavoro è pari a  $15 \text{ mA}$ .



- Calcola la potenza che il generatore (considerato ideale) deve fornire per alimentare il circuito.

$$[0,050 \text{ W}]$$

**TEST**

- 1** L'ordine di grandezza dell'energia di legame di molte molecole biameriche, misurato in elettronvolt, varia:
- A** tra  $10^{-19}$  e  $10^{-18}$ .
  - B** tra  $10^{-1}$  e  $10^0$ .
  - C** tra  $10^0$  e  $10^1$ .
  - D** tra  $10^{18}$  e  $10^{19}$ .
- 2** Il valore dell'energia di legame:
- A** è sempre positivo.
  - B** è sempre negativo.
  - C** è alternativamente positivo o negativo.
  - D** dipende dal tipo di legame.
- 3** Un conduttore metallico può avere (più di una risposta è giusta):
- A** la banda di energia più alta occupata parzialmente.
  - B** la banda di energia più bassa occupata parzialmente.
  - C** tutte le bande di energia parzialmente occupate.
  - D** elettroni di conduzione che possono muoversi attraverso tutto il cristallo.
- 4** Un semiconduttore viene detto di tipo *n* quando:
- A** nella sua banda di valenza sono presenti delle lacune.
  - B** nella sua banda di conduzione sono presenti degli elettroni.
  - C** nel cristallo sono presenti atomi di un elemento donatore.
  - D** nel cristallo sono presenti atomi di un elemento accettore.
- 5** Il moto delle lacune in un semiconduttore avviene:
- A** dal polo negativo della differenza di potenziale esterna al polo positivo.
  - B** dal polo positivo della differenza di potenziale esterna al polo negativo.
  - C** dalla banda di conduzione alla banda di valenza.
  - D** dalla banda di valenza alla banda di conduzione.
- 6** Nella giunzione *p-n* si forma uno strato sottile, detto strato di svuotamento, caratterizzato:
- A** dalla presenza di cariche negative.
  - B** dalla presenza di lacune.
  - C** dall'assenza di portatori di carica mobili.
  - D** dalla presenza di elettroni.
- 7** La corrente che attraversa un diodo è intensa quando la differenza di potenziale applicata ha il polo positivo in corrispondenza:
- A** della zona di giunzione.
  - B** dello strato di svuotamento.
  - C** del semiconduttore di tipo-*p*.
  - D** del semiconduttore di tipo-*n*.
- 8** Un transistore si comporta come un amplificatore di:
- A** carica.
  - B** potenza.
  - C** corrente.
  - D** tensione.
- 9** Il transistore è un dispositivo complesso formato da:
- A** una giunzione *p-n*.
  - B** due giunzioni *p-n* con la stessa polarità.
  - C** due giunzioni *p-n* di polarità opposta.
  - D** tre giunzioni *p-n* con polarità alternata.
- 10** Per circuiti integrati si intendono circuiti in cui:
- A** sono realizzati separatamente tutti i singoli componenti.
  - B** sono realizzati su un'unica piastrina di silicio tutti i resistori, su un'altra tutti i transistori e così per ogni componente del circuito.
  - C** sono realizzati su un'unica piastrina tutti gli elementi.
  - D** sono realizzati su un'unica piastrina tutti i componenti e anche le connessioni.

**SO L'ESAME****QUESITO** IN UN'ORA

Risposta: Esegua qual è il meccanismo microscopico che permette la produzione di energia elettrica in una cella fotovoltaica.

**QUESITO** IN UN'ORA

At  $300\text{ K}$  la densità di portatori di carica nel silicio intrinseco si può considerare uguale a  $n_i = 9,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ . Considera un campione di silicio di tipo- $n$  che ha una densità di portatori minoritari  $p = 7,8 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ . In queste condizioni la mobilità dei portatori maggioritari è  $\mu_n = 0,135 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , mentre quella dei portatori minoritari è  $\mu_p = 0,045 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .

Calcola la resistività di questo materiale.

[0,038  $\Omega \cdot \text{m}$ ]