

32. LA CORRENTE ELETTRICA CONTINUA

Inizieremo ora lo studio delle **correnti elettriche**, cioè *dei fenomeni che si osservano nei corpi conduttori quando le cariche elettriche fluiscono in essi*. Per ora ci limiteremo a studiare il caso della **corrente continua**, ossia il caso in cui i fenomeni studiati sono *indipendenti dal tempo*, nel senso che essi si presentano, negli istanti successivi, sempre con le stesse caratteristiche.

Il caso delle correnti elettriche dipendenti dal tempo, cioè delle correnti che variano da istante a istante, correnti variabili verrà studiato successivamente.

32.1. La corrente elettrica

Un corpo conduttore è caratterizzato dal fatto che contiene un numero piuttosto elevato di *portatori di carica elettrica*, ossia di corpuscoli dotati di una carica elettrica, alcuni positiva altri negativa, che sono liberi di muoversi entro il conduttore; abbiamo anche detto che, nel caso dei metalli, questi portatori di carica, sono elettroni (negativi), detti *elettroni di conduzione*, mentre nel caso dei conduttori liquidi e gassosi sono ioni di entrambi i segni. Per il momento però non è necessario specificare la natura dei portatori di carica; ci basta sapere che essi sono presenti nel conduttore e che il loro numero, in ogni punto, è sempre così grande che, nonostante la piccolezza, della carica elettrica che ciascuno possiede, essi possono nel loro complesso trasportare attraverso il conduttore correnti elettriche anche molto elevate.

Per comprendere quali siano le condizioni in cui un conduttore è percorso da una corrente elettrica, ricordiamo che la condizione necessaria e sufficiente affinché un corpo conduttore si trovi in *equilibrio elettrico*, ossia *non sia percorso da correnti*, è che il campo elettrico \mathbf{E} sia eguale a zero in tutti i suoi punti interni, ossia *è necessario che tutti i suoi punti siano allo stesso potenziale*. È chiaro che se, invece, fra due punti A e B di un conduttore esiste una differenza di potenziale, esso non può trovarsi in equilibrio elettrico: i portatori di carica in esso presenti si mettono in moto: come si dice, *il conduttore è percorso da una corrente elettrica*. Si consideri, per esempio, il caso di un conduttore di forma cilindrica (Fig. 32.1) e si supponga che il punto A della sua sezione S_A sia a un potenziale V_A maggiore del potenziale V_B del punto B della sua sezione S_B :

$$[32.1] \quad V_A - V_B > 0.$$

In queste condizioni, in ogni punto interno al conduttore c'è un campo elettrico \mathbf{E} diretto nel verso che va dal punto A , a potenziale maggiore, verso il punto B , a potenziale più basso. Questo campo elettrico esercita la forza

$$[32.2] \quad \mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$$

su ogni portatore di carica, dotato della carica q , che si trovi in un punto qualsiasi interno al conduttore. Se la carica q del portatore è positiva, la forza \mathbf{F} è diretta nel verso del campo elettrico \mathbf{E} , ossia nel verso che va da A verso B , mentre se q è negativa, \mathbf{F} ha il verso opposto.

In queste condizioni, una generica sezione S del conduttore, intermedia tra le sezioni S_A e S_B , è

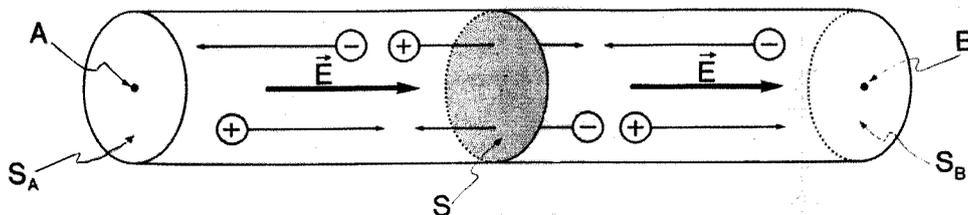


Fig. 32.1. Se fra i punti A e B delle due sezioni S_A ed S_B di un conduttore cilindrico è applicata una differenza di potenziale ($V_A - V_B$), in ogni punto interno del conduttore c'è sempre un campo elettrico \mathbf{E} , che esercita forze aventi verso opposto sui portatori di carica positiva e su quelli di carica negativa, presenti in ogni punto del conduttore. In queste condizioni, la generica sezione S è attraversata da una corrente, il cui verso viene fissato convenzionalmente eguale al verso del moto dei portatori di carica positiva; ad essa però contribuiscono tutti i portatori di carica, sia positivi che negativi, che attraversano la sezione S in versi opposti.

attraversata da portatori di carica positiva che vanno da A verso B e da portatori di carica negativa che vanno in verso opposto, ossia da B verso A . Sia gli uni che gli altri contribuiscono al passaggio della corrente, il cui verso è fissato con la seguente *convenzione*: come **verso della corrente elettrica** che passa in un conduttore si adotta quello che va dai punti a potenziale più elevato ai punti a potenziale più basso.

In altre parole, si fissa come *verso della corrente* il verso in cui si muovono i portatori di carica positiva, indipendentemente dal fatto che, in un particolare conduttore, siano effettivamente presenti portatori dotati di carica di questo segno; nei conduttori metallici, per esempio, i portatori di carica sono solo elettroni, ossia corpuscoli negativi i quali, quando il conduttore è percorso da corrente, si muovono in verso opposto a quello che è stato adottato per la corrente. Agli effetti dello studio delle proprietà generali delle correnti elettriche, non ha alcuna importanza sapere se essa è dovuta al moto di portatori positivi che vanno da A verso B o di portatori negativi che vanno da B verso A o di portatori di entrambi i segni.

Va sottolineato il fatto, già detto e sul quale torneremo, che *in un conduttore si ha passaggio di corrente da un punto A verso un punto B tutte e sole le volte che il potenziale V_A in A è maggiore del potenziale V_B in B .*

32.2. La intensità della corrente

Le considerazioni del paragrafo precedente possono essere precisate in maniera quantitativa introducendo una nuova grandezza fisica: si chiama **intensità della corrente elettrica** che passa in un conduttore (indicata, di solito con il simbolo i) la quantità di carica elettrica ΔQ che attraversa una sezione di conduttore nell'intervallo di tempo Δt , divisa per Δt , quindi avremo

$$[32.3] \quad i_m = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

per la intensità di corrente media, mentre per quella istantanea

$$[32.4] \quad i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Ponendo in queste relazioni $\Delta t = 1\text{s}$, si può anche dire che l'intensità i della corrente è la quantità di elettricità che attraversa una sezione del conduttore nell'unità di tempo.

Si tratta di una grandezza *scalare*. Nel **Sistema Internazionale** l'unità di intensità di corrente è l'**ampere**^(*) (simbolo A) che in un primo momento si può pensare come l'intensità di una corrente che trasporta, attraverso una sezione di un conduttore, la carica di 1 coulomb in un secondo: $1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$.

In realtà l'ampere è la quarta grandezza fondamentale nel S.I. Fra i multipli e i sottomultipli dell'ampere quelli più usati sono il milliampere (mA) e il microampere (μA).

Per misurare l'intensità della corrente che percorre un conduttore si usano strumenti detti **amperometri**.

Siamo ora in grado di precisare che cosa si intenda per **corrente continua**: si dice che *una corrente è continua quando la sua intensità i si mantiene costante al passare del tempo*; ciò significa che la quantità di carica elettrica ΔQ , che attraversa una sezione del conduttore è proporzionale a Δt , qualunque sia il valore dell'intervallo di tempo considerato.

Nel caso delle **correnti variabili nel tempo**, invece, la loro intensità i varia da istante a istante.

32.3. Il circuito elettrico

Vogliamo ora esaminare le condizioni che devono essere soddisfatte affinché in un conduttore possa effettivamente passare una corrente continua, ossia una corrente la cui intensità si mantiene costante al passare del tempo.

La risposta è che il conduttore considerato deve far parte, o, come si dice, deve essere *inserito in un circuito elettrico* e che in questo deve essere inserito anche un *generatore di tensione continua* (d.d.p.

^(*) In onore del fisico francese A. M. Ampère (1775-1836).

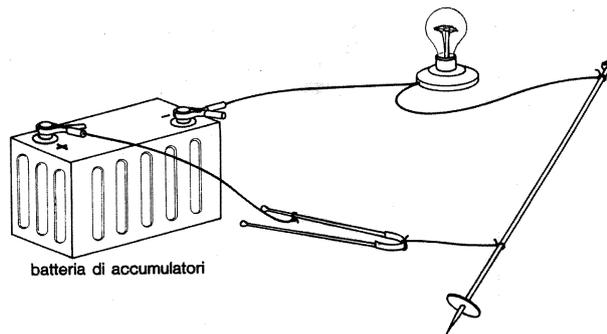


Fig. 32.2.

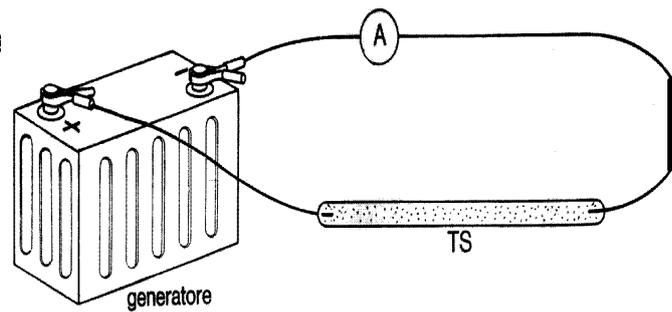


Fig. 32.3.

costante nel tempo). Questa ultima espressione indica una vasta categoria di apparecchi, aventi in comune certe proprietà caratteristiche, che verranno discusse. I generatori elettrostatici sono una categoria particolare di generatori di tensione continua; un'altra categoria è costituita dalle pile elettriche, che si usano correntemente nelle torce elettriche, nelle radio portatili, ecc. Ogni generatore possiede due poli o morsetti, fra i quali esso mantiene una differenza di potenziale; quello a potenziale più elevato è chiamato *polo positivo* ed è di solito marcato con il segno + (oppure è verniciato in rosso), quello a potenziale più basso è detto *polo negativo* ed è di solito marcato con il segno - (o è verniciato in verde).

In questo paragrafo vogliamo fissare però l'attenzione sul circuito elettrico e non sul generatore. *Il circuito elettrico è sempre costituito, oltre che dal generatore di tensione continua, da uno o più conduttori, connessi in maniera continua, che collegano il polo positivo con il polo negativo del generatore* (Fig. 32.2).

La corrente continua passa nei vari conduttori, nel verso che va dal polo positivo al polo negativo del generatore, e, nell'interno del generatore, nel verso che va, dal polo negativo a quello positivo (Fig. 32.3): per questa ragione si dice che *la corrente circola nel circuito*.

Il circuito più semplice si ha quando fra i due poli del generatore è inserito un solo conduttore costituito da un filo metallico (per esempio di rame o di alluminio). Spesso però il circuito è costituito da più componenti: quello della Fig. 32.3 comprende, ad esempio oltre al generatore, due tratti di filo di rame, un amperometro (A), che serve per misurare l'intensità della corrente, e un "tubo di scarica" (TS), in cui la corrente passa in un gas, come accade nei tubi delle réclame luminose. I portatori di carica che trasportano la corrente attraverso questi diversi componenti sono diversi: nei componenti metallici sono elettroni di conduzione, nel gas del tubo di scarica sono ioni positivi e negativi, e nel generatore sono diversi a seconda del tipo di generatore; se è un pila sono ioni positivi e negativi, se è una dinamo sono elettroni.

Talvolta in un circuito, oltre a componenti dei tipi sopra descritti, sono inseriti componenti di un tipo del tutto diverso, per esempio di valvole o tubi termoelettronici. Qui basta dire che, in generale, essi sono costituiti da una ampolla (di vetro o di metallo) in cui è fatto il vuoto, attraverso le cui pareti passano due (o più) elettrodi metallici, uno dei quali emette elettroni: sono questi elettroni che, muovendosi nel vuoto dall'elettrodo emettitore all'altro elettrodo, costituiscono i portatori di carica.

La cosa essenziale affinché in un circuito possa passare la corrente continua, è che esso sia **chiuso**, ossia non abbia interruzioni, nel senso che i diversi conduttori che lo compongono costituiscano una successione continua. Se a un certo istante questa continuità viene meno, cioè se, a un certo istante, si interrompe il circuito, la corrente cessa di passare: si dice allora che il circuito è **aperto**.

32.4. La conduzione dei corpi solidi: conduttori, semiconduttori, isolanti

In questo paragrafo preciseremo, nel caso dei corpi solidi, quanto si è detto in generale precedentemente sul comportamento elettrico delle diverse sostanze. Alcuni solidi sono ottimi **conduttori** della elettricità, mentre altri sono ottimi **isolanti**; fra queste due categorie estreme esistono numerosi solidi dotati di proprietà intermedie, che sono chiamati **semiconduttori**. Che cosa significhi "proprietà intermedie" sarà precisato.

I solidi propriamente detti hanno una struttura cristallina, che in alcuni casi è chiaramente visibile, dato che il corpo si presenta come un cristallo macroscopico, mentre in altri è più riposta, in quanto il corpo consiste di un agglomerato di microcristalli, le cui dimensioni possono essere di qualche centesimo o millesimo di millimetro o anche meno. Ciò si verifica, per esempio, nei metalli, che sono i migliori

conduttori dell'elettricità, e in molte sostanze isolanti, come lo zolfo o il quarzo, quale si trova in molti minerali.

Il diverso comportamento elettrico delle diverse sostanze cristalline è determinato dal tipo di *legame chimico* con cui gli atomi corrispondenti si legano tra loro, dando luogo alla formazione del cristallo (o microcristallo). La espressione "legame chimico" significa "forza attrattiva che si esercita tra atomi (o gruppi di atomi)", forza che, in ultima analisi, è sempre di origine elettrica, cioè dovuta alle forze di Coulomb che si esercitano fra i nuclei e gli elettroni costituenti gli atomi. Questi legami chimici possono essere di diversi tipi, che (semplificando un po' le cose) possono essere ridotti a tre tipi principali: **legame ionico**, **legame covalente** e **legame metallico**.

Il **legame ionico** si ha, in generale, nei sali, come, per esempio, il sale da cucina (cloruro di sodio, NaCl). In un cristallo di questo sale gli atomi di Na e di Cl sono disposti, alternati, ai vertici di un reticolo cubico. Ma in realtà si tratta di un cristallo ionico.

I cristalli ionici sono isolanti perché, per esempio nel caso del NaCl, gli elettroni degli ioni Na^+ e Cl^- sono in numero tale da riempire completamente i corrispondenti strati elettronici e le forze esercitate su di essi dai relativi nuclei sono così forti da impedire loro di allontanarsi. Quindi nel cristallo non esistono corpuscoli carichi liberi di muoversi, cioè *non esistono portatori di carica*. Quando un cristallo (o un agglomerato di microcristalli) di questo tipo è posto in un campo elettrico, il solo fenomeno che si verifica è la sua polarizzazione.

Il legame covalente è caratteristico degli elementi carbonio (C), silicio (Si), germanio (Ge), ecc., appartenenti al Gruppo IV del Sistema Periodico.

Il legame covalente ha una importanza eccezionale perché è proprio esso che rende possibile la formazione di tutte le *sostanze organiche*, nelle quali gli atomi di carbonio formano lunghe catene con ramificazioni più o meno complicate. Quando queste sostanze sono allo stato solido, formano i cosiddetti **cristalli molecolari** (zucchero, naftalina, antracene, ecc.) tenuti insieme soltanto da legami covalenti. Quando sono allo stato puro, questi cristalli sono sempre ottimi *isolanti*.

Anche i cristalli degli elementi del Gruppo IV (C, allo stato di diamante, Si, Ge) sono dovuti a legami covalenti: sono cristalli covalenti.

Il diamante è *sempre* isolante, perché tutti gli elettroni (anche quelli che vengono scambiati) sono fortemente legati. Invece i cristalli di silicio e di germanio sono isolanti *soltanto se estremamente puri e tenuti a bassa temperatura*; ma se sono portati a temperatura ambiente, alcuni degli elettroni si staccano dalle corrispondenti coppie di atomi e vagano nel cristallo. Poiché essi sono portatori di carica, il cristallo diventa debolmente conduttore, cioè è un *semiconduttore*.

Infine il **legame metallico** dà luogo a cristalli metallici che sono sempre buoni conduttori. Per chiarire la loro natura, fissiamo l'attenzione sui metalli del Gruppo I del Sistema Periodico, cioè sui metalli alcalini (Li, Na, K, Cs) e sui metalli nobili (Cu, Ag, Au), tutti monovalenti: cioè i loro atomi hanno un certo numero di strati elettronici completamente occupati e un elettrone, che sta, da solo, nello strato più esterno; ad esso compete una energia di ionizzazione piuttosto piccola.

Quando questi elementi sono allo stato solido, questo elettrone di valenza si stacca dal corrispondente atomo; perciò il cristallo è costituito da un reticolo di ioni metallici, attraverso il quale si muove, quasi liberamente, un gas di elettroni: gli elettroni di valenza. Sono chiamati **elettroni di conduzione**, perché sono proprio essi i portatori di carica che rendono possibile il passaggio della corrente, quando fra due punti del cristallo (o dell'agglomerato di microcristalli) viene stabilita una differenza di potenziale. Il comportamento di questo gas di elettroni è regolato da una equazione di stato molto diversa da quelle del gas perfetto e dei gas reali ed è così complessa che non può essere qui studiata. Diciamo soltanto che anche allo zero assoluto gli elettroni di conduzione si muovono nel cristallo in tutte le direzioni, con energie cinetiche aventi valori discreti e ben determinati, che vanno da zero a un valore massimo. Questo gas è chiamato *mare (o gas) di Fermi*, dal nome del fisico italiano Enrico Fermi (1901-1954) che per primo ne stabilì le leggi.

In modo analogo si può discutere il comportamento elettrico degli altri metalli (oppure delle corrispondenti leghe)^(*). Il risultato generale, che deve essere sempre tenuto presente, è che *in un conduttore metallico esiste un "mare" di elettroni di conduzione che permea un reticolo di ioni positivi*: questi oscillano lievemente (a causa della agitazione termica), mentre gli elettroni di conduzione si muovono in tutte le

(*) I conduttori che si usano comunemente sono i metalli come Al, Cu, Ag e non Na o K perché questi ultimi danno luogo, per esempio con l'umidità dell'aria, a reazioni chimiche che talvolta assumono carattere violento. I metalli di uso corrente, invece reagiscono chimicamente con maggiore difficoltà; in particolare, a contatto con l'aria (e con il vapore acqueo o altri gas in essa contenuti), essi formano tutto al più uno stato superficiale di ossido di spessore così piccolo da non essere importante agli effetti della conduzione.

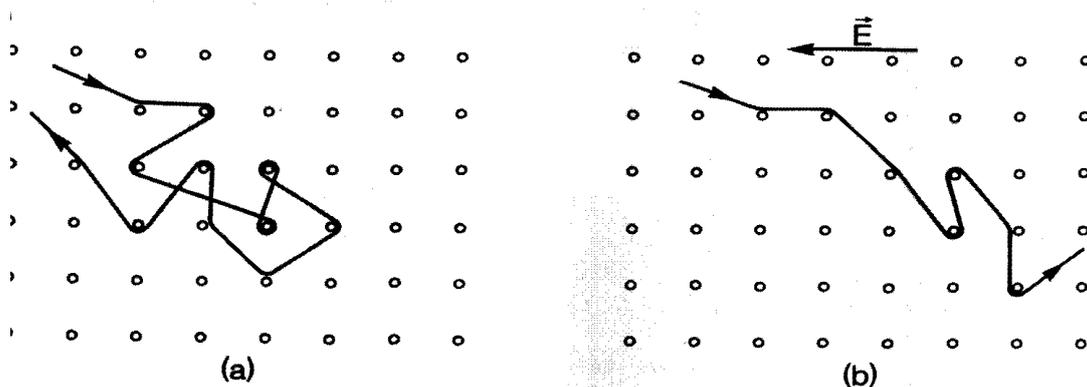


Fig. 32.4. (a) Rappresentazione schematica, nel piano della figura, del moto di n elettroni di conduzione fra gli ioni del reticolo di un metallo, in assenza di campo elettrico; (b) se nel cristallo c'è un campo elettrico \mathbf{E} , questo esercita su ogni elettrone di conduzione la forza $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$, la quale determina un moto di insieme degli elettroni di conduzione nella direzione del campo, ma in verso opposto.

direzioni nell'intero metallo con velocità che sono dell'ordine di 10^6 m/s. Questo moto non è completamente libero: esso è visualizzato dalla linea nera della Fig. 32.4(a), che rappresenta schematicamente, in un piano, come, in assenza di un campo elettrico esterno, uno di essi vaghi da uno ione a un altro in modo più o meno disordinato: questo moto può essere descritto come un succedersi di tratti rettilinei (o quasi) separati da **urti** contro gli ioni del reticolo. Quando si stabilisce una differenza di potenziale fra due punti del cristallo, in questo c'è un campo elettrico che, oltre a polarizzare gli ioni del reticolo, determina un moto di insieme degli elettroni di conduzione nella direzione del campo elettrico, ma in verso opposto (Fig. 32.4(b)).

È naturale ora porsi due domande: prima di tutto *quale sia il numero degli elettroni di conduzione contenuti in un cm^3 di un metallo*, per esempio il rame. Per rispondere, basta calcolare il numero di atomi contenuti in un 1 cm^3 di rame, dato che, come si è detto, ciascuno contribuisce al mare di Fermi con 1 elettrone. Eseguendo il calcolo si trova

$$[32.5] \quad n = 8.4 \times 10^{22} \frac{\text{elettroni di conduzione}}{\text{cm}^3 \text{ di rame}}.$$

Valori di questo stesso ordine di grandezza si trovano anche per gli altri metalli. Come si vede, si tratta di un numero enorme.

Il secondo quesito consiste nel domandarsi quale sia la *velocità di insieme con cui si muovono gli elettroni di conduzione, quando, in un dato conduttore, passa una corrente di intensità assegnata*.

È facile vedere che, se in un filo di metallo della sezione di 1 mm^2 passa una corrente di intensità pari a 1 A, la velocità di insieme degli elettroni risulta

$$[32.6] \quad v_{\text{insieme}} = 0.745 \times 10^{-4} \text{ m/s} \approx 10^{-4} \text{ m/s}$$

come si vede da questo esempio, la velocità di insieme degli elettroni di conduzione, dovuta al passaggio della corrente, è molto bassa, soprattutto se confrontata con quella che gli stessi elettroni possiedono per moto spontaneo, che, come si è detto, è dell'ordine di 10^6 m/s. Questa ultima, però, è una *velocità disordinata*, cioè una velocità posseduta dai singoli elettroni che si muovono in tutte le direzioni, mentre la velocità di insieme è una *velocità ordinata*, avente la stessa direzione e verso per tutti gli elettroni; mentre il moto di agitazione termica, rapidissimo, non dà luogo a un trasporto di elettricità, il moto di insieme, lentissimo, dà luogo a una corrente che, nell'esempio riportato, ha l'intensità di 1 A.

Oltre ai corpi cristallini, esistono i corpi amorfi (vetro, pece, ecc.), i quali sono comunemente chiamati solidi, mentre, in realtà, devono essere considerati come fluidi dotati di elevatissima viscosità. Quasi tutti questi corpi sono isolanti elettrici, ma non mancano tra essi né i conduttori né i semiconduttori.

Alcuni materiali, come il germanio, il silicio, il carbonio, hanno un comportamento intermedio tra i conduttori e gli isolanti. Queste sostanze sono chiamate **semiconduttori**. Come abbiamo già detto, nei metalli la conduzione dell'elettricità avviene per opera degli elettroni liberi, gli elettroni di conduzione, che in media sono, a temperatura ambiente, circa 10^{22} per cm^3 . A questa temperatura o a temperature più basse i semiconduttori hanno pochi elettroni liberi, ma il numero di tali elettroni aumenta alle alte temperature. In pratica i semiconduttori si comportano come isolanti alle basse temperature e diventano conduttori quando la temperatura aumenta.

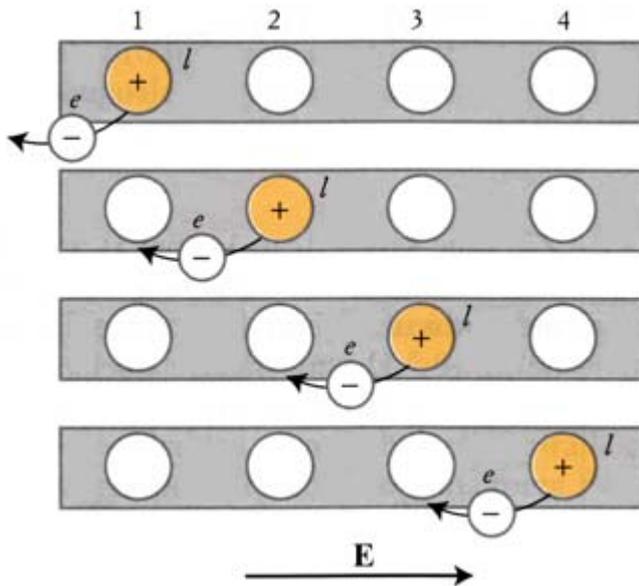


Fig. 32.5. Le lacune si muovono nello stesso verso del campo e gli elettroni in verso opposto.

Le lacune si muovono nello stesso verso del campo elettrico \mathbf{E} , mentre gli elettroni si muovono in verso opposto (Fig. 32.5).

Alla temperatura ambiente vi sono sufficienti elettroni liberi per rendere conduttore il silicio. Questi semiconduttori sono chiamati semiconduttori intrinseci. Alla fine degli anni quaranta alcuni fisici americani della Bell Telephone Company scoprirono che era possibile aumentare in modo considerevole la conducibilità dei semiconduttori inserendo nel reticolo cristallino delle impurezze, cioè atomi di altri cristalli. Il processo è chiamato *drogaggio* e i semiconduttori così trattati prendono il nome di *semiconduttori a impurezze* o *semiconduttori drogati*.

Il silicio può essere drogato con arsenico. Dato che l'arsenico ha cinque elettroni di valenza, è presente un elettrone non legato, libero, che può facilmente diventare un elettrone di conduzione. Un semiconduttore drogato in questo modo è chiamato semiconduttore di tipo *n* perché la conducibilità è assicurata essenzialmente dagli elettroni che sono portatori di carica negativa (Fig. 32.6(a)).

È possibile anche drogare il silicio con atomi di gallio (o di boro). Il gallio e il boro possiedono solo tre elettroni di valenza e quindi per ogni atomo di gallio (o di boro) aggiunto al silicio si forma una lacuna

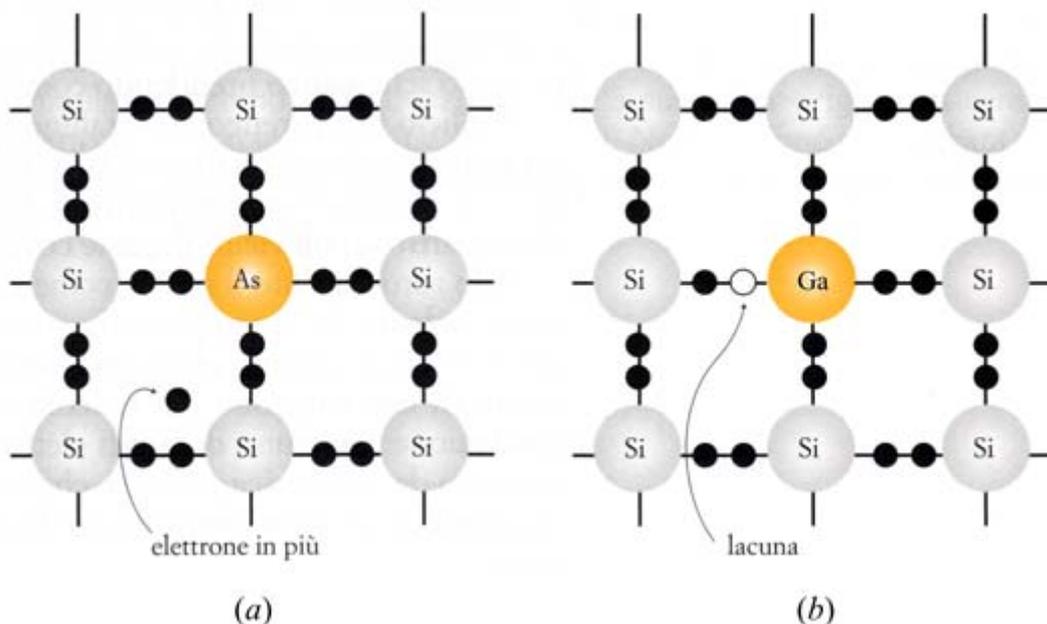


Fig. 32.6. (a) Un atomo di impurità, arsenico, è inserito nel reticolo cristallino del silicio. Il quinto elettrone dell'arsenico è libero e può diventare un elettrone di conduzione. Il semiconduttore è di tipo *n*. (b) Il silicio drogato con il gallio. La conduzione della corrente elettrica avviene per opera delle lacune positive. Il semiconduttore è di tipo *p*.

(Fig. 32.6(b)). Gli elettroni, muovendosi, si trasferiscono nelle lacune e queste a loro volta si spostano contribuendo alla conduzione della corrente elettrica. Questo tipo di conduttore è detto semiconduttore di tipo *p* perché i portatori di carica sono le lacune positive (Fig. 32. 6(b)).

Semiconduttori di tipo *n* e di tipo *p* possono essere uniti tra loro e la loro superficie di separazione prende il nome di **giunzione *pn***.

Quesiti

32.1. Calcolare il numero degli elettroni di conduzione contenuti in un cm^3 di rame.

32.2. Se in un filo di rame della sezione di 1 mm^2 passa una corrente di intensità pari a 1A, qual è la velocità di insieme degli elettroni risulta di rame.
