



Elettronica Digitale

Anno accademico 2009-2010

Corso di Laurea in *Ingegneria Informatica* (J-Z)

Vincenzo d'Alessandro

Informazioni generali

Materiale didattico

- 1) Testo di riferimento: “Elettronica digitale”, Paolo Spirito, McGraw-Hill, terza edizione, aprile 2006.
- 2) Diapositive presentate a lezione; queste ultime verranno messe a disposizione nello spazio “download” del sito www.docenti.unina.it (Vincenzo d’Alessandro) dopo ogni lezione. Tali diapositive *non si intendono sostitutive del libro di testo*.
- 3) Ulteriori dispense (messe a disposizione nel suddetto sito).
- 4) Note per simulazioni circuitali (tipo PSPICE) e di layout (Microwind2) *non* obbligatorie per sostenere l’esame (nel sito).

Altre informazioni

- 1) Indirizzo e-mail: vindales@unina.it.
- 2) Numero di telefono: 081-7683509.
- 3) Ricevimento *per appuntamento*.
- 4) Ufficio: secondo piano del Dipartimento di Ingegneria Biomedica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIBET), complesso via Claudio 21, stanza 2.15.

Modalità d'esame

- 1) Prova orale.
- 2) Sono previsti 3 appelli tra gennaio e febbraio. Di contro, non sono previste prove nel mese di dicembre.
- 3) Un risultato negativo non preclude la candidatura all'appello successivo.

Richieste

E' gradita la segnalazione via email di errori (anche di battitura!) nelle diapositive.

Cenni sulla fisica dei semiconduttori

E' pratica comune suddividere i materiali in *conduttori* ed *isolanti*, in base al valore di resistività dei materiali stessi. La convenzione è quella di definire conduttori i materiali caratterizzati da resistività $< 10^{-2} \Omega\text{cm}$ ed isolanti i materiali con resistività $> 10^5 \Omega\text{cm}$.

Tuttavia nella “regione intermedia” si trova una classe di materiali, i *semiconduttori*, che riveste una importanza significativa nel settore dell'elettronica allo stato solido. Questo è fondamentalmente dovuto al fatto che *la resistività di un materiale semiconduttore può essere modificata in modo controllato e con elevata precisione*.

Il materiale semiconduttore di maggiore impiego nella tecnologia dei circuiti integrati è il silicio (Si) [dal latino *silex* = pietra dura, selce], anche se i primi transistori elettronici furono realizzati in germanio (Ge). Numerosi sono infatti i vantaggi dell'impiego del silicio rispetto al germanio:

- Il germanio presenta una barriera energetica minore ($E_G = 0.67 \text{ eV}$ a temperatura ambiente rispetto a 1.12 eV del silicio), e quindi correnti di perdita (*leakage*) maggiori.
- Il silicio permette l'*accrescimento* e la *deposizione* del biossido di silicio (SiO_2) in superficie; tale materiale possiede ottime caratteristiche dielettriche ed è adoperato:
 - 1) per passivare (cioè proteggere) la superficie del wafer;
 - 2) per la diffusione/impiantazione selettiva del drogante (infatti il coefficiente di diffusione dei droganti nell'ossido è molto basso);
 - 3) come ossido “sottile” di gate dei transistori MOS.

Negli ultimi tempi molti materiali innovativi hanno fatto la loro comparsa nel settore dei dispositivi elettronici a semiconduttore, come arseniuro di gallio (GaAs), carburo di silicio (SiC), e nitruro di gallio (GaN).

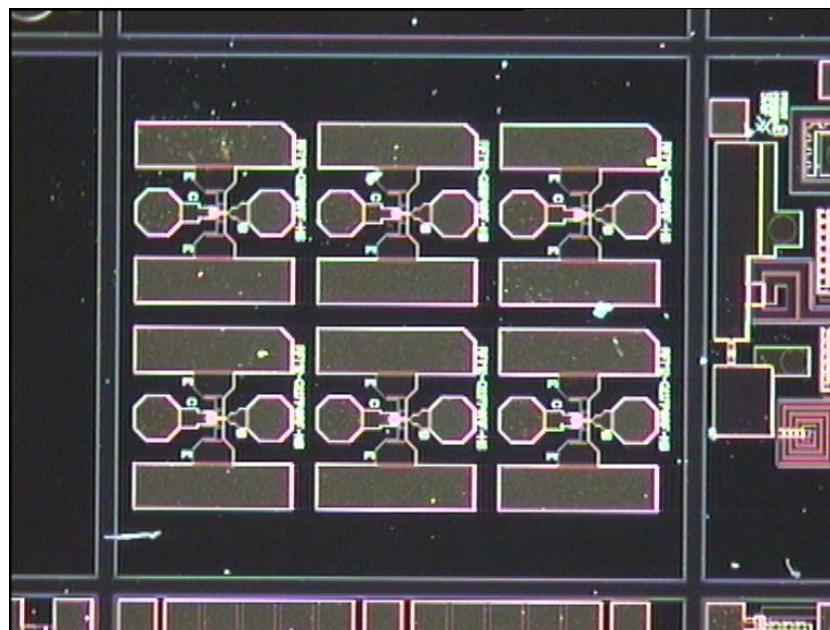
In particolare, l'arseniuro di gallio, “eterna promessa”, di tanto in tanto è stato ritenuto il materiale che avrebbe sottratto al silicio la *leadership* nella tecnologia dei circuiti integrati. I primi studi sull'arseniuro di gallio iniziarono negli anni '20, ovvero quasi 30 anni prima dell'invenzione del primo transistor bipolare e stanno ancora continuando allo stato attuale. Vantaggi rilevanti del GaAs rispetto al silicio sono:

- ☺ L'elevata mobilità degli elettroni (5 volte rispetto al Si), che rende il GaAs particolarmente adatto per applicazioni ad elevata frequenza operativa (> 1 GHz).
- ☺ L'elevata banda proibita (1.42 eV a temperatura ambiente), che ne riduce le correnti di dispersione.
- ☺ Il fatto di avere banda proibita “diretta” che lo rende adatto ad applicazioni optoelettroniche.

Tuttavia esiste anche una notevole serie di svantaggi:

- ☹ I substrati sono più costosi di quelli realizzati in silicio e presentano una elevata difettosità. In effetti il “problema primordiale” consta nel fatto che il GaAs è - a differenza del silicio - un materiale composto. Il processo di ottenimento della struttura GaAs a partire da gallio ed arsenico “puri” è complesso e fortemente dipendente dalla temperatura. Una delle conseguenze è, quindi, l’alta - ed inevitabile - difettosità rispetto al silicio (molti ordini di grandezza in più!). In particolare, esso è soggetto alla presenza di difetti “*anti-site*”, in cui l’atomo di gallio e quello di arsenico “commutano” di posizione nella struttura reticolare.
- ☹ Il processo tecnologico è molto complesso e la tecnologia è ancora “un passo indietro” rispetto a quella del silicio. E’ possibile produrre wafer di 2 pollici, ma già il passaggio a wafer di 3 pollici causa un crollo verticale della resa. Invece, nel caso del silicio è ben noto che vengono ottenuti wafer di 8 pollici senza problemi. Una bassa resa fa aumentare, ovviamente, il costo per unità d’area.
- ☹ Le fette di GaAs sono estremamente fragili e soggette a danneggiamenti.
- ☹ Il livello di integrazione è basso.
- ☹ E’ complicato accrescere ossidi aventi buone qualità dielettriche.

- ☹ La conducibilità termica del GaAs è pari a circa 1/3 di quella del silicio ($0.44 \times 10^{-4} \text{ W}/\mu\text{mK}$ a fronte di $1.44 \times 10^{-4} \text{ W}/\mu\text{mK}$). Questo provoca di frequente effetti elettrotermici che causano una riduzione dell'affidabilità dei componenti ed, in casi gravi, la loro distruzione. Pertanto è necessario sviluppare ed adottare degli opportuni dissipatori di calore (con conseguente aumento di ingombro e costo).



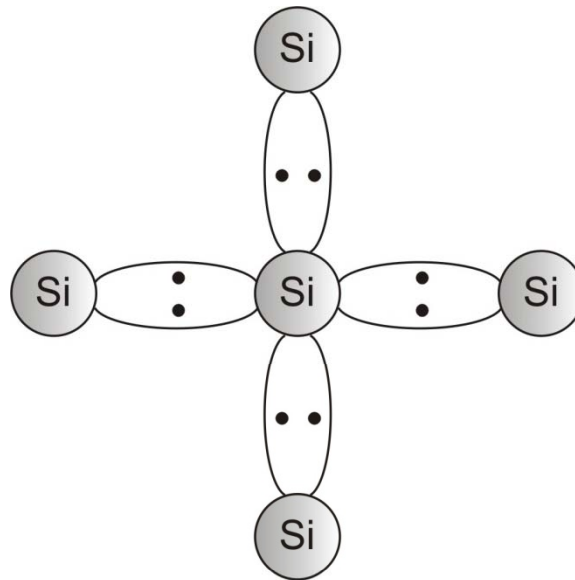
HBT basati su GaAs dell'azienda californiana Skyworks Inc.

Allo stato attuale solo il 2% del mercato dei circuiti integrati è incentrato sul GaAs, e si ritiene che questa percentuale non possa migliorare in tempi brevi, proprio per la complessità delle problematiche da risolvere. Una frase esemplificativa di A. Srivastava sul GaAs è “... *its shaky* (= vacillante, precario) *present and promising but distant future*”. Le applicazioni sono quasi tutte di “nicchia” (viene adoperato solo quando servono specificamente le sue peculiarità; di solito quando c’è necessità di prestazioni elevate). In particolare, nel 40% dei casi, le applicazioni sono militari o spaziali.

Sulla base di quanto detto, d’ora in avanti si farà riferimento al silicio; si analizzerà in primis la struttura del silicio *puro* o *intrinseco* (ovvero non drogato) e successivamente si farà riferimento al silicio *impuro* o *estrinseco* (ovvero drogato) di tipo P e di tipo N.

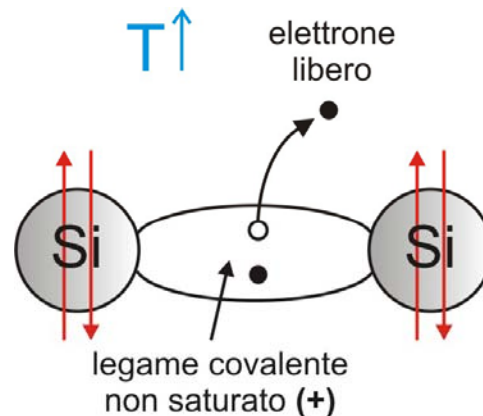
Semiconduttori intrinseci (puri)

Un cristallo puro (o *intrinseco*) di silicio possiede una struttura cristallina regolare dove gli atomi sono vincolati nelle loro posizioni reticolari e condividono i 4 elettroni (detti di *valenza*) dell'orbita più esterna (il silicio è *tetravalente*) con altri 4 atomi di silicio. I legami con questi 4 atomi sono detti *legami covalenti*. Ogni atomo "completa" la sua orbita più esterna raggiungendo gli 8 elettroni.



La schematizzazione bidimensionale in figura rappresenta in un piano ciò che in realtà è disposto nello spazio. Infatti gli atomi di un semiconduttore formano un modello geometrico uniforme detto *reticolo cristallino*. Nel caso del silicio e del germanio gli atomi si dispongono ai vertici di un tetraedro regolare.

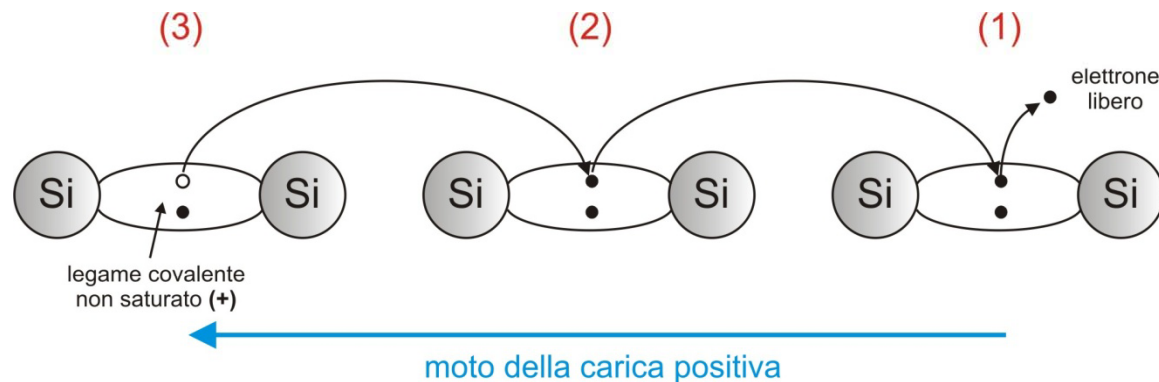
Se la temperatura tende a 0 K, tutti i legami covalenti - o quasi - sono intatti e pochi elettroni sono “liberi” e quindi disponibili per la conduzione di corrente elettrica sotto l’azione di un campo elettrico applicato. All’aumentare della temperatura, invece, gli atomi prendono a vibrare intorno alla loro posizione reticolare;¹ questa “energia vibrazionale” viene trasmessa agli elettroni impegnati nel legame covalente. Pertanto, alcuni elettroni acquisiscono energia sufficiente per “liberarsi” dal legame (processo di *ionizzazione*). La concentrazione di elettroni liberi aumenta, ovviamente, all’aumentare della temperatura. Quando viene applicato un campo elettrico, gli elettroni liberi (dotati di carica negativa) si muovono in verso opposto rispetto a quello del campo stesso.



Lo spostamento dell’elettrone liberato lascia dietro di sé un legame covalente non saturato, o *legame vacante*, di cui fanno parte un elettrone ed una vacanza, o *lacuna*. Il legame non saturato ha carica positiva (prima della ionizzazione il sistema era neutro).

¹ Il reticolo cristallino (in cui si immaginano gli atomi fermi nelle loro posizioni reticolari) è, in realtà, un *concetto ideale*, dato che gli atomi sarebbero fermi solo a 0 K.

Può capitare che un elettrone liberatosi da un legame adiacente salti nel legame non saturato, lasciando dietro di sé una lacuna, e così via. In pratica si tratta di un moto di elettroni che si liberano e poi neutralizzano la carica positiva di un legame covalente non saturato adiacente.



Mentre gli elettroni si muovono in un verso, i legami non saturati si muovono nel verso opposto. Si tenga presente che i legami non saturati sono dotati di carica positiva perché il numero di elettroni complessivo associato ad uno dei due atomi di silicio è insufficiente a bilanciare la carica dei protoni del nucleo di tale atomo. E' bene notare che questo flusso di carica è diverso da quello di un elettrone libero soggetto all'azione di un campo elettrico. In questo caso, infatti, si ha un flusso dovuto alla reiterata neutralizzazione di cariche positive associate a legami covalenti non saturati (in termini "energetici", questi elettroni si "muovono" nella banda di valenza). Questo "passaggio" di corrente può essere descritto in modo efficiente se ci si riferisce - invece che agli elettroni - al moto del legame non saturato, e cioè della "lacuna" (avente carica positiva) nel verso opposto.

Pertanto i fenomeni di conduzione all'interno di un dispositivo elettronico a semiconduttore sono associati a portatori di carica negativa (elettroni) e positiva (lacune). I transistori sono detti "bipolari" se i fenomeni di conduzione in essi sono dovuti ad ambo i tipi di portatore (come i transistori bipolari a giunzione o BJT); sono detti "unipolari" se sono dovuti ad un solo tipo di portatore (come i MOS; negli NMOS la conduzione è affidata agli elettroni e nei PMOS alle lacune).

Fino a questo momento si è trattato del caso di un semiconduttore puro (o *intrinseco*, cioè non drogato). In un semiconduttore intrinseco si ha che la concentrazione di elettroni liberi generati termicamente (n) è uguale a quella di lacune libere (p) [= legami covalenti non saturati]. Questa concentrazione "comune" prende il nome di *concentrazione intrinseca dei portatori* e si indica con n_i ("i" sta per "intrinseco"; nel silicio a temperatura ambiente è pari a $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

Apparentemente si tratta di un rilevante quantitativo di portatori di carica liberi. In realtà tale numero è esiguo; ciò sta a significare che non è possibile ottenere una conduzione di corrente significativa attraverso una barra di silicio non drogato.

Semiconduttori estrinseci (impuri)

Una importante caratteristica dei materiali semiconduttori consta nel fatto che è possibile cambiarne in modo controllato le proprietà attraverso l'introduzione di *impurità* (o *drogante*). Il processo attraverso cui avviene questa introduzione prende il nome di *drogaggio* del materiale. Il semiconduttore drogato è altresì detto *impuro* o *estrinseco*.

Un semiconduttore viene drogato *allo scopo di controllarne il numero di portatori* (e quindi la resistività). Infatti, mentre in un semiconduttore intrinseco si ha che $n = p$, in un semiconduttore estrinseco predominano i portatori di una specie, in dipendenza dalla particolare impurità che viene inserita.

L'introduzione dei droganti convenzionali è di tipo sostituzionale:² l'atomo di impurità va ad occupare delle posizioni reticolari normalmente occupate dagli atomi del semiconduttore intrinseco. Ovviamente è richiesta una certa energia (1) per "spostare" l'atomo di silicio dalla sua posizione reticolare e farlo divenire interstiziale e (2) per collocare il drogante nel sito reticolare rimasto vuoto.

A seconda che l'impurità sia un elemento trivalente oppure pentavalente (il silicio è tetraivalente) si ottiene:

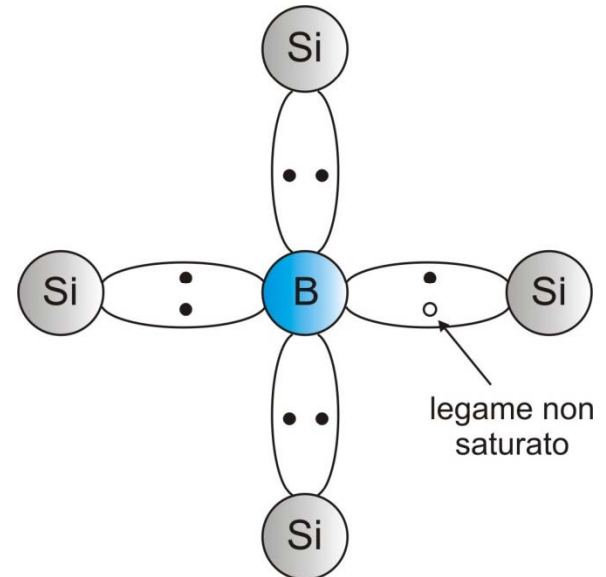
- Un semiconduttore di tipo P
- Un semiconduttore di tipo N

² Si tratta di atomi la cui dimensione è tale da non consentire una collocazione interstiziale, ovvero *non* in un sito reticolare.

Semiconduttori di tipo P

Dato il reticolo cristallino del silicio, sostituiamo un atomo di silicio con un elemento del III gruppo (III colonna) della “tabella periodica”, come il boro (B), il gallio (Ga) o l’indio (In). Questi elementi sono detti *trivalenti*, perché presentano 3 elettroni di valenza. Nel momento in cui l’atomo di boro (ad esempio) prende il posto di un atomo di silicio, i 3 elettroni dell’orbitale più esterno vanno a formare legami covalenti con 3 atomi di silicio. Pertanto 1 dei legami con i 4 atomi di silicio circostanti rimane non saturato.

Allora può capitare che un elettrone proveniente da un legame covalente Si-Si vicino si sposti per occupare il legame non saturato, lasciando dietro di sé una carica positiva (lacuna) e facendo diventare l’atomo sostituzionale di boro uno ione carico negativamente. E’ possibile dimostrare che è sufficiente solo una ridotta quantità di energia per “eccitare” un elettrone in modo che esso saturi il legame incompleto associato al boro: infatti a temperatura ambiente *quasi tutti* i legami non saturati generati dalla presenza del boro vengono riempiti con un elettrone, dando così origine ad una lacuna.

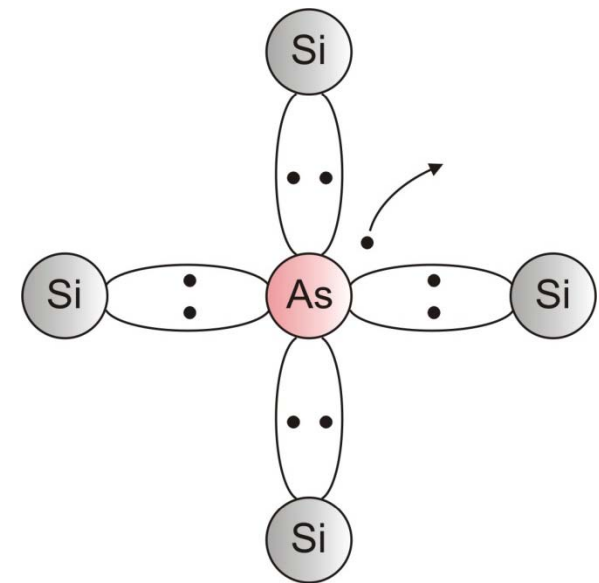


Dato che le impurità del III gruppo “accettano” elettroni dal silicio, esse vengono dette *accettori* o *accettatori* (*acceptors*). Il semiconduttore viene detto drogato di *tipo P*.

Semiconduttori di tipo N

Dato il reticolo cristallino del silicio, sostituiamo un atomo di silicio con un elemento del V gruppo (V colonna) della “tabella periodica”, come l’arsenico (As) o il fosforo (P). Questi elementi sono detti *pentavalenti*, perché presentano 5 elettroni di valenza. Nel momento in cui l’atomo di arsenico (ad esempio) prende il posto di un atomo di silicio, 4 dei 5 elettroni dell’orbitale più esterno vanno a formare legami covalenti con 4 atomi di silicio. Pertanto 1 elettrone di arsenico *non* è impegnato nei legami covalenti.

Questo elettrone è legato debolmente al nucleo dell’atomo di As per effetto della carica positiva in eccesso nel nucleo stesso; infatti è sufficiente solo una ridotta energia di ionizzazione per rompere questo debole legame e far sì che l’elettrone sia disponibile per il fenomeno della conduzione. A temperatura ambiente *quasi tutti* gli atomi di impurità “cedono” un elettrone. Ovviamente l’atomo sostituzionale di arsenico diviene uno ione cui risulta associata una carica positiva (prima della ionizzazione il sistema era neutro).



Dato che le impurità del V gruppo “donano” elettroni al silicio, esse vengono dette *donori* o *donatori* (*donors*). Il semiconduttore viene detto drogato di *tipo N*.

Osservazione 1: se la maggior parte delle impurità è di tipo donatore, e cioè il semiconduttore è drogato di tipo N, allora il numero di elettroni liberi (e quindi disponibili per la conduzione) è maggiore del numero di lacune libere. Gli elettroni vengono quindi detti *portatori maggioritari*, mentre le lacune sono dette *portatori minoritari*. Vale il viceversa se il semiconduttore è drogato di tipo P.

Osservazione 2: è bene rilevare che il semiconduttore drogato si mantiene *elettricamente neutro* dal punto di vista macroscopico (cioè rivisto nella sua globalità): ad ogni carica di un tipo è associata una carica di tipo opposto.

Osservazione 3: l'impurità risulta "attiva" (e, cioè, adempie al suo compito che è quello di accettare oppure cedere un elettrone) solo se è collocata in posizione sostituzionale, ovvero in un sito reticolare di un atomo di silicio.

In conclusione, le popolazioni di elettroni (portatori di carica negativa) e lacune (portatori di carica positiva) possono essere variate aggiungendo impurità a cristalli di semiconduttore altrimenti puri. Questo permette - come si vedrà nel seguito - la realizzazione di giunzioni P-N (zone di tipo P che si "affacciano" su zone di tipo N), che permettono il flusso "controllato" di corrente (significativa) e sono alla base del funzionamento dei dispositivi elettronici a semiconduttore.

La conduzione di corrente

Si tenga anzitutto presente che il verso della corrente è convenzionalmente scelto come positivo nel verso opposto al moto degli elettroni e nello stesso verso del flusso delle lacune.

Esistono due meccanismi che portano alla conduzione di corrente; si può avere, infatti, una corrente di “trascinamento” o “deriva” (*drift*) ed una corrente di “diffusione” (*diffusion*).

La corrente di trascinamento è legata alla presenza di un campo elettrico applicato; è possibile ricavare che, in questo caso, l'espressione della densità di corrente è data da

$$J = J_N + J_P = qn\mu_N E + qp\mu_p E$$

dove E è il campo elettrico; q è la carica dell'elettrone [a meno del segno] ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ C), n e p sono le concentrazioni di elettroni e lacune; μ_N e μ_p sono le mobilità [cm^2/Vs] di elettroni e lacune (descrivono l'attitudine dei portatori a muoversi nel reticolo sotto l'azione di un campo elettrico applicato). L'espressione può essere riscritta in tal modo:

$$J = (qn\mu_N + qp\mu_p) E = \sigma E$$

dove σ è la conducibilità del materiale (legge di Ohm in forma locale).

Per quanto detto in precedenza, in un semiconduttore estrinseco solo una delle due componenti è significativa, in quanto è molto elevato il rapporto tra le concentrazioni dei portatori.

La corrente di diffusione è legata, invece, alla presenza di una variazione spaziale della concentrazione dei portatori. I portatori (secondo la tendenza all'uniformità della natura) tendono a muoversi dalla regione in cui la concentrazione è maggiore a quella in cui è minore.

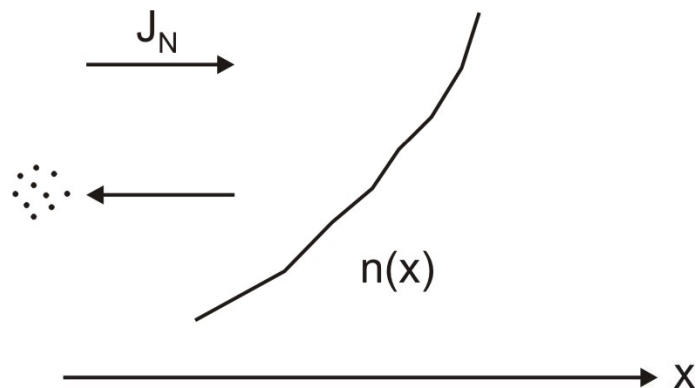
Nel caso degli elettroni, la corrente è diretta nel verso della crescita della concentrazione degli elettroni stessi e l'espressione è

$$J_N = qD_N \frac{dn}{dx}$$

dove D_N è la cosiddetta *diffusività* degli elettroni, ed è data dal prodotto tra tensione termica e mobilità secondo la ben nota *relazione di Einstein*:

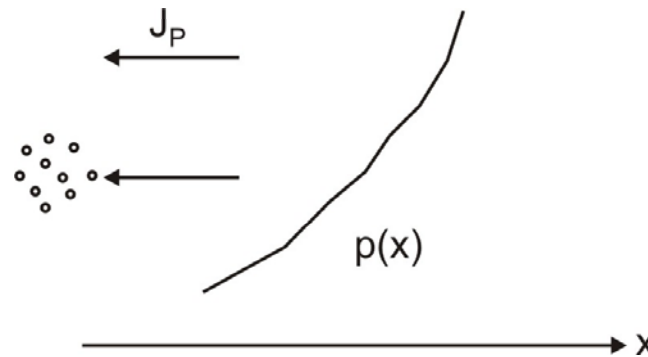
$$D_N = V_T \mu_N = \frac{kT}{q} \mu_N$$

k è la costante di Boltzmann (8.62×10^{-5} eV/K) e T è la temperatura del cristallo in gradi Kelvin.



Nel caso delle lacune, la corrente è diretta nel verso del decadimento della concentrazione delle lacune stesse e l'espressione è

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$



Osservazione: il fenomeno della conduzione per diffusione è analogo a quanto avviene in un gas. I portatori di carica si muovono in modo casuale nel reticolo per effetto dell'agitazione termica. A questo movimento corrisponde un flusso netto nullo in una certa direzione se la concentrazione è uniforme; di contro, il flusso diviene diverso da zero se c'è un gradiente di concentrazione non nullo. Tale flusso cessa nel momento in cui la concentrazione diviene uniforme.

La densità di corrente complessiva associata ad un certo portatore è data dalla *somma* della componente di trascinamento e di quella di diffusione.