

DR044410
 GINZIONE PN
 DIODO
 BJT

Elettronica
 Classe III

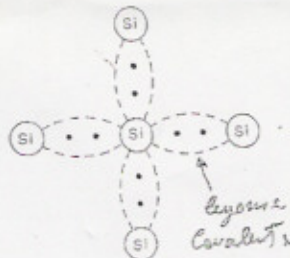


Fig. 3.1 - Rappresentazione bidimensionale del reticolo cristallino del silicio.

Nel presente capitolo vengono descritti da un punto di vista fisico i principali dispositivi che entrano a far parte degli apparati elettronici, con particolare riferimento a quelli a semiconduttore. L'applicazione pratica di alcuni essi (diodi) è già stata esaminata nel cap. 2°; quella dei rimanenti verrà data a partire dal cap. 10°, con le necessarie premesse dei cap. 5°, 6°, 8°, 9°.

Lo studio fisico, oggetto del presente capitolo, ha caratteri prevalentemente alitativo. Nel capitolo successivo verranno forniti da un punto di vista analitico alcuni elementi di fisica dei semiconduttori, che ne completeranno la descrizione.

1 - Semiconduttori

I materiali, a seconda della loro attitudine alla conduzione della corrente elettrica, possono essere suddivisi in tre categorie: conduttori (conductors); semiconduttori (semiconductors); isolanti (insulators).

Un materiale semiconduttore presenta evidentemente una conduttività elettrica (electrical conductivity) migliore di quella di un isolante e peggiore di quella di un conduttore. I materiali più usati nei dispositivi (devices) a semiconduttore sono a tutt'oggi il germanio (germanium) e soprattutto il silicio (silicon).

Elettroni di valenza. Per dedurre le proprietà elettriche e chimiche dei materiali conviene innanzi tutto considerare in ogni atomo (atom), preso sepa-

ratamente, il numero di elettroni (electrons) dell'orbita più esterna¹ e confrontarlo col numero massimo che essa può contenere.

Sia il germanio che il silicio sono elementi tetravalenti, vale a dire presentano quattro elettroni nell'orbita più esterna, chiamati elettroni di valenza² (valence electrons). Otto è il numero massimo di elettroni che tale orbita può contenere.

Legami covalenti. In fig. 3.1 è stato schematizzato il reticolo cristallino di un semiconduttore, mettendo in evidenza, per ciascun atomo, gli elettroni di valenza. Questa schematizzazione rappresenta in piano ciò che in realtà è disposto nello spazio. Infatti l'insieme degli atomi di un semiconduttore forma un modello geometrico uniforme, chiamato reticolo cristallino (crystal lattice), nel quale gli atomi di silicio (o di germanio) si dispongono ai vertici di un tetraedro regolare³. Dalla fig. 3.1 si può notare che ogni atomo può completare la sua orbita esterna (outermost orbit), contenente al massimo 8 elettroni, utilizzando gli elettroni di valenza dei quattro atomi adiacenti, e realizzare così una struttura particolarmente stabile. Infatti cia-

¹ Secondo il tradizionale schema di Bohr l'atomo è costituito da un nucleo, intorno al quale, disposti in diverse orbite ellittiche, ruotano gli elettroni, di carica negativa e , il cui numero totale N corrisponde al numero atomico. Poiché l'atomo è normalmente neutro, la carica positiva del nucleo deve essere uguale numericamente a quella complessiva degli elettroni, cioè N . Gli N elettroni si distribuiscono nelle varie orbite (ciascuna delle quali è caratterizzata da un numero massimo di elettroni contenibili) a partire da quella più vicina al nucleo, in modo da completarle successivamente. Gli elettroni dell'orbita più esterna, normalmente incompleta, si dicono elettroni di valenza.

² La valenza di un elemento (cioè la sua attitudine a legarsi con uno o più atomi di idrogeno) è espressa da un numero (il cui valore massimo è 3), che coincide con quello degli elettroni dell'orbita più esterna rispetto al nucleo.

³ Ai fini della realizzazione dei componenti (diodi e transistori) è poi indispensabile una struttura monocristallina del cristallo, che deve inoltre presentare una purezza elevatissima.

¹ Si stanno attualmente studiando dispositivi che utilizzano nuovi tipi di semiconduttori ad es., l'arseniuro di gallio).

un elettrone di valenza risulta « condiviso » da due atomi adiacenti ed è, perciò, fortemente legato al nucleo. Tale legame è chiamato legame covalente (covalent bond) ed è rappresentato da linee tratteggiate in fig. 3.1: esso risulta difficile da rompersi, appunto perché unisce fra loro due atomi adiacenti.

Corrente di elettroni e corrente di lacune. In un solido cristallino la conducibilità elettrica dipende dalla esistenza di elettroni liberi¹: di conseguenza quella del cristallo di germanio o di silicio è piccola, perché gli elettroni di valenza, pur essendo 4, sono tutti fortemente legati al nucleo. Perché in un semiconduttore si abbia conduzione, cioè perché si formino trascorrenti, è necessario rompere alcuni legami covalenti, fornendo energia. Ad esempio energia termica (thermal energy). Già la temperatura ambiente è sufficiente a rompere alcuni anche se in numero molto limitato. La conduzione elettrica nei semiconduttori, però, non dipende soltanto dalla presenza di elettroni liberi, come avviene nei conduttori, ma anche dalla presenza di lacune nei legami covalenti, chiamata buco (hole) o lacuna (in fig. 3.2 è rappresentata da un piccolo cerchio bianco). Si pensi, infatti, che un legame covalente sia incompleto, cioè che si sia formata una lacuna: è allora facile che un elettrone di valenza di un atomo vicino, pur non avendo energia sufficiente per diventare un elettrone libero, lasci il suo posto covalente per riempire la lacuna vicina. Ovviamente la realtà fisica consiste nello spostamento elementare da un punto A ad un punto B di un elettrone (carica negativa di massa molto piccola), colmando così la lacuna e creandone una nuova in A. Conviene tuttavia immaginare che sia stata rimossa (carica positiva, uguale ed opposta a quella dell'elettrone) a com-

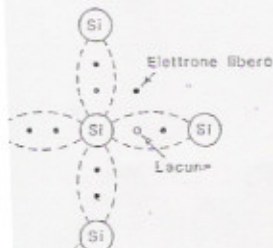


Fig. 3.2 - Formazione di cariche libere a causa della rottura di un legame covalente.

Si dicono liberi (free) quegli elettroni che, non essendo legati ad alcun atomo, possono muoversi liberamente entro il materiale di cui fanno parte. Se si applica un campo elettrico, gli elettroni liberi si muovono nella sua direzione, dando luogo ad una corrente elettrica.

piere il cammino opposto, cioè da B ad A. Per la nuova lacuna si può ripetere quanto già detto, concludendo che una lacuna può compiere un movimento macroscopico entro il cristallo: in realtà, però, avvengono tanti piccoli spostamenti di tanti elettroni diversi, ciascuno dei quali lascia il legame covalente in una coppia di atomi per assumerne uno analogo in una coppia vicina. Allorché l'applicazione di un campo elettrico orienta nella sua direzione tali spostamenti, è consuetudine parlare di corrente di lacune, immaginandole entità fisiche in movimento, dotate di carica uguale ed opposta rispetto a quella dell'elettrone e di massa circa uguale. Ad una tale corrente sono applicabili le normali leggi dell'Elettromagnetismo.

Analogia di Shockley. Si può comprendere meglio il fenomeno descritto utilizzando la seguente analogia attribuita a Shockley.

« Il piano inferiore di un'autorimessa a due piani risulta completamente pieno di automobili, mentre quello superiore è completamente vuoto. In queste condizioni non si può avere movimento di automobili (elettroni) in nessuno dei due piani (mancano, cioè, sia elettroni liberi che lacune). Se si porta un'auto dal piano inferiore a quello superiore, in ciascun piano può esserci movimento di automobili. L'auto che si trova nel piano superiore può muoversi liberamente (elettrone libero), mentre nel piano inferiore è possibile soltanto spostare di uno spazio un'auto alla volta. Guardando il piano inferiore dall'alto del soffitto, un osservatore vedrebbe muoversi non una determinata automobile (elettrone), ma uno stesso spazio vuoto (lacuna) ».

Conduzione intrinseca. Mentre da un lato, a causa dell'agitazione termica (thermal agitation), si producono con continuità nuove coppie elettrone-lacuna (electron-hole pair), dall'altro, a causa della naturale ricombinazione (recombination)¹, altre coppie scompaiono. In un semiconduttore puro², complessivamente neutro, il numero di lacune è naturalmente sempre uguale a quello degli elettroni liberi³. Il numero di coppie aumenta notevolmente con la temperatura e così la conduttività⁴, normalmente assai modesta⁵. La conduzione che si può manifestare in un materiale semiconduttore puro viene chia-

¹ Una volta che si sia formata una coppia elettrone-lacuna, la lacuna può sussistere solo per breve tempo: essa viene, infatti, colmata o da un elettrone libero (e si ha allora la vera ricombinazione) o da un elettrone di una coppia di atomi adiacenti (che scambia il suo legame covalente, dando luogo ad una nuova lacuna).

² Costituito, cioè, esclusivamente da atomi di silicio (o di germanio).

³ Dell'ordine di $2 \cdot 10^{12}$ per il germanio e di $2 \cdot 10^{10}$ per il silicio.

⁴ In un conduttore, invece, gli elettroni di valenza sono tutti liberi già a temperatura ambiente, essendo debolmente legati al proprio nucleo. Di conseguenza con la temperatura aumenta soltanto il numero di collisioni di tali elettroni, determinando una diminuzione della conduttività.

⁵ La resistività ρ a 300°K è dell'ordine di $60\text{ k}\Omega\text{ cm}$ per il silicio e di $60\text{ }\Omega\text{ cm}$ per il germanio, contro $2\text{ }\mu\Omega\text{ cm}$ per un buon conduttore (ad es., il rame) e $10^{12}\text{ M}\Omega\text{ cm}$ per un buon isolante (ad es., il polistirolo).

data conduzione intrinseca (intrinsic conductivity); essa è legata alla formazione di coppie elettrone-lacuna ed è, quindi, funzione essenzialmente della temperatura. Questi cristalli sono perciò utili per realizzare resistenze che variano con la temperatura.

3.2 - Semiconduttori drogati

Ai fini di aumentare la conducibilità a temperatura ambiente di un conduttore puro è necessario accrescere notevolmente il numero delle cariche mobili, siano esse elettroni o lacune. È possibile ottenere ciò in maniera controllata immettendo nel materiale base (silicio o germanio) quantità infinitesime di elementi aventi una diversa struttura atomica, chiamati impurità (impurities). Gli atomi di impurità, naturalmente, prendono il posto di altrettanti atomi nel reticolo cristallino del semiconduttore.

Per arricchire il semiconduttore di elettroni liberi si utilizzano impurità pentavalenti (valenza 5). Come appare in fig. 3.3-a, solo quattro dei cinque elettroni di valenza della impurità possono formare legami covalenti. Di conseguenza il quinto elettrone risulta debolmente legato al proprio nucleo¹; già alla temperatura

Per arricchire il semiconduttore di lacune si utilizzano impurità trivalenti (valenza 3). Come appare in fig. 3.3-b, tutti e tre gli elettroni di valenza della impurità formano legami covalenti. Di conseguenza nel reticolo cristallino uno dei legami non può essere completato: pertanto a causa dell'assenza di un elettrone si

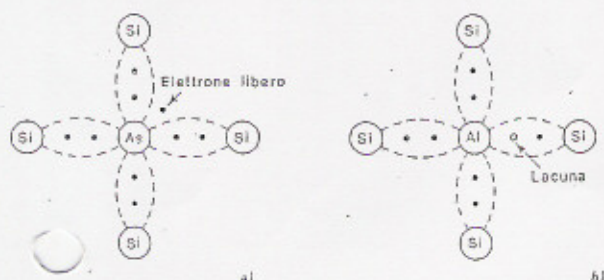


Fig. 3.3 - Cristallo di silicio con impurità pentavalente (a) e trivalente (b).

¹ Il legame è costituito dalla sola forza di attrazione coulombiana. Mentre nel semiconduttore puro occorre un'energia di 1,1 eV per liberare un elettrone nel silicio e di 0,7 eV nel germanio, nel semiconduttore così detto drogato bastano rispettivamente 0,04 eV per il silicio e 0,01 eV per il germanio.

ambiente, la sua energia termica è sufficiente a liberarlo.

Poiché il numero di elettroni liberi, praticamente uguale al numero degli atomi dell'impurità pentavalente, risulta molto maggiore di quello delle coppie elettrone-lacuna proprie del semiconduttore, la conducibilità del materiale viene notevolmente aumentata¹. Il semiconduttore così drogato² viene detto di tipo n, cioè ricco di cariche negative mobili.

Nei semiconduttori di tipo n i droganti vengono chiamati donatori (donors): quelli normalmente utilizzati sono l'arsenico, il fosforo e l'antimonio.

forma una lacuna, che equivale ad una carica positiva debolmente legata al proprio nucleo².

Poiché il numero di lacune, praticamente uguale al numero degli atomi dell'impurità trivalente, risulta molto maggiore di quello delle coppie elettrone-lacuna proprie del semiconduttore, la conducibilità del materiale viene notevolmente aumentata¹. Il semiconduttore così drogato² viene detto di tipo p, cioè ricco di cariche positive mobili.

Nei semiconduttori di tipo p i droganti vengono chiamati accettori (acceptors): quelli normalmente utilizzati sono l'indio, il gallio e l'alluminio.

Si tenga presente che il semiconduttore drogato si mantiene eletticamente neutro macroscopicamente: infatti è costituito da atomi (sia del semiconduttore che del drogante) singolarmente neutri.

È opportuno precisare che nella conduzione intrinseca la formazione di un elettrone libero comporta necessariamente la formazione di una lacuna, e viceversa: mediante il drogaggio, invece, si liberano elettroni nei cristalli di tipo n, senza che corrispondentemente si formino lacune, e viceversa nei cristalli di tipo p.

Si osservi, inoltre, che nel drogaggio non vengono praticamente modificati né la struttura del reticolo cristallino originario né, quindi, il meccanismo della conduzione: infatti la concentrazione del drogante è piccolissima, dell'ordine di una parte su qualche milione, e pochissimi sono, quindi, gli atomi di semiconduttore sostituiti da quelli del drogante.

Per concludere, nel semiconduttore drogato sono presenti due tipi di cariche mobili:

le cariche minoritarie (minority carriers), cioè le coppie elettrone-lacuna

¹ Nel silicio la concentrazione delle cariche libere passa dall'ordine di 10^{10} per cm^3 nel semiconduttore puro a quello di 10^{17} per cm^3 in quello drogato. Corrispondentemente la resistività passa dall'ordine di 60 k Ω cm a quello di 1 Ω cm.

² Si dice drogaggio (doping) la tecnica mediante la quale vengono introdotte nel semiconduttore le impurità (droganti).

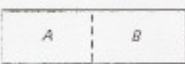


Fig. 3.4 - Cristallo drogato con due zone a diversa concentrazione.

proprie del semiconduttore, la cui concentrazione è fortemente crescente con la temperatura:

le cariche maggioritarie (majority carriers), dovute al drogante, tutte dello stesso segno, praticamente indipendenti dalla temperatura perché sono tutte liberate già a temperatura ambiente.

Ma la conduzione che si può manifestare in un semiconduttore puro, dovuta alle cariche minoritarie, è detta conduzione intrinseca, quella che si può manifestare in un semiconduttore drogato, dovuta prevalentemente alle cariche maggioritarie, è detta conduzione estrinseca (extrinsic conductivity).

Corrente di diffusione e corrente di drift. Si consideri il cristallo drogato di fig. 3.4 e si faccia l'ipotesi che la concentrazione delle cariche mobili non sia uniforme: ad esempio, la concentrazione sia maggiore nella zona A rispetto alla zona B. Analogamente a quanto avverrebbe in un gas, si verifica un movimento aleatorio (random) delle cariche libere (dalla zona A a maggior concentrazione verso la zona B a minor concentrazione) e, quindi, una corrente: essa assume il nome di corrente di diffusione (diffusion current), sempre per similitudine col fenomeno analogo che avviene nei gas. Tale corrente cessa quando la concentrazione delle cariche mobili è diventata uniforme.

Ora che la concentrazione è diventata uniforme ed è quindi nulla la corrente di diffusione, si supponga di applicare alla barretta di fig. 3.4 un campo elettrico: sotto la sua azione le cariche libere si muovono ordinatamente, dando luogo alla così detta corrente di drift (drift current).

Se il campo elettrico (electric field) si applica ad una barretta in cui la concentrazione delle cariche mobili non è uniforme, coesistono, almeno per un certo tempo, la corrente di diffusione e quella di drift. La corrente di drift non è sostanzialmente quella di diffusione, le cui particelle sono molto più veloci: di conseguenza la corrente di diffusione si esaurisce rapidamente².

3.3 - Giunzione p-n

Introducendo in un cristallo puro di silicio o di germanio impurità di tipo p da un estremo ed impurità di tipo n dall'altro, la superficie di separazione, nell'interno del cristallo, tra un tipo di impurità e l'altro viene chiamata giunzione p-n (p-n junction). Poiché la concentrazione delle cariche libere è completamente diversa nelle due zone (fig. 3.5-a), nasce una corrente di diffusione: elettroni e lacune attraversano la giunzione in senso opposto.

Alcune lacune, che si trovano nella zona di tipo p, attraversano la giunzione e, in prossimità di essa, si ricombinano con gli elettroni della zona di tipo n.

Alcuni elettroni liberi, che si trovano nella zona di tipo n, attraversano la giunzione e, in prossimità di essa, si ricombinano con le lacune della zona di tipo p.

Tale ricombinazione determina una diminuzione delle cariche libere in una piccola regione a cavallo della giunzione, chiamata strato di smottamento (depletion layer o transition region). Una giunzione può essere allora rappresentata schematicamente come in fig. 3.5-b: in essa sono rappresentati solo gli atomi delle impurità, pensati come ioni, cioè come cariche fisse, con accanto la corrispondente carica mobile (lacuna nella zona p, elettrone nella zona n).

Si osservi che in prossimità della giunzione

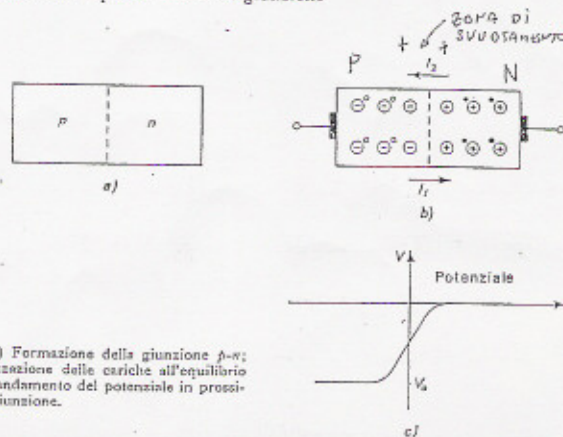


Fig. 3.5 - a) Formazione della giunzione p-n; b) schematizzazione delle cariche all'equilibrio termico; c) andamento del potenziale in prossimità della giunzione.

¹ È la tipica corrente che si manifesta, ad esempio nei conduttori: il termine drift, letteralmente « deriva », sta a significare il movimento unidirezionale, al contrario di quello aleatorio determinato dalla diffusione.

² La velocità di diffusione è dell'ordine di quella della luce; quella di drift, molto minore, proporzionale all'intensità del campo elettrico, almeno finché non è troppo intenso.

gli ioni negativi della zona p sono privi delle corrispondenti lacune, sia perché queste sono diffuse nella zona n , sia perché si sono ricombinate con elettroni provenienti dalla zona n .

gli ioni positivi della zona n sono privi dei corrispondenti elettroni, sia perché questi sono diffusi nella zona p , sia perché si sono ricombinati con lacune provenienti dalla zona p .

Immediatamente ai lati della giunzione, dunque, vi sono cariche fisse negative a sinistra e positive a destra¹: lontano dalla giunzione, invece, ogni carica fissa è elettricamente neutralizzata dalla corrispondente carica mobile di segno opposto. La presenza di cariche non neutralizzate (*uncovered charges*) ai lati della giunzione determina la creazione di un campo elettrico e , quindi, di una differenza di potenziale, di valore massimo² V_0 , distribuita come in fig. 3.5-c: viene così ostacolata l'ulteriore diffusione delle cariche mobili di tipo maggioritario³. Soltanto quelle dotate di energia sufficiente a vincere la barriera di potenziale, cioè $W = qV_0$, possono attraversare la giunzione: la corrente di diffusione, quindi, diminuisce all'aumentare di V_0 .

Bisogna ricordare, però, che nel cristallo sono presenti anche le cariche minoritarie; in particolare

degli elettroni nella zona di tipo p delle lacune nella zona di tipo n .

La barriera di potenziale agevola il passaggio attraverso la giunzione di tali cariche minoritarie, che originano, quindi, una corrente di *drift*. In corrispondenza alla giunzione coesistono, dunque, sia una corrente di *diffusione* I_1 sia una corrente di *drift* I_2 , dirette però in senso opposto (fig. 3.5-b). Al crescere di V_0 si riduce la corrente di diffusione, inizialmente preponderante, finché non diventa uguale a quella di *drift*: diventando nulla la carica complessiva che attraversa la giunzione, la d.d.p. V_0 non può variare ulteriormente e si giunge ad una situazione di equilibrio.

Valori tipici di V_0 e della larghezza L del *depletion layer*⁴ sono:

$$V_0 = 0,9 \text{ V}, \quad L = 0,5 \text{ } \mu\text{m} (0,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm})$$

per il silicio.

¹ Per questa ragione il *depletion layer* viene anche chiamato *zona della carica spaziale* (*space-charge layer*).

² La d.d.p. V_0 viene chiamata *potenziale di contatto* (*contact potential*), sempre esistente al contatto fra due materiali elettricamente diversi.

³ La carica positiva non neutralizzata della zona n respinge le lacune provenienti dalla zona p .

La carica negativa non neutralizzata della zona p respinge gli elettroni provenienti dalla zona n .

Contatti ohmici. Per l'utilizzazione della barretta di semiconduttore nella quale è stata formata la giunzione $p-n$, è necessario metallizzare le due estremità, realizzando i così detti contatti ohmici. Per contatto ohmico (*ohmic contact*) si intende il contatto metallo-semiconduttore realizzato in modo tale che la sua c.d.t. non dipenda né dal verso né dall'entità della corrente che lo attraversa. La d.d.p. in corrispondenza ai due contatti metallici (fig. 3.5-b), supposti dello stesso materiale ed opportunamente realizzati, compensa esattamente quella V_0 ai capi della giunzione: la d.d.p. fra i terminali metallici a circuito aperto è, quindi, nulla⁵.

3.4 - Polarizzazione di una giunzione $p-n$

Polarizzare una giunzione $p-n$ significa applicare ai terminali metallici, di cui si è detto sopra, una d.d.p. V . Poiché la d.d.p. V a circuito aperto è nulla, come si è detto al termine del par. precedente, quella applicata dall'esterno risulta localizzata ai capi della giunzione $p-n$, la cui d.d.p., di valore V_0 a circuito aperto, diventa a circuito chiuso:

$$V_0' = V_0 + V. \quad (3.1)$$

Se V ha polarità concorde con quella di V_0 , l'altezza della barriera di potenziale aumenta: si dice che la giunzione è polarizzata inversamente (*reverse biased*).

Se V , invece, ha polarità discorde da quella di V_0 , la barriera di potenziale diminuisce in altezza: si dice che la giunzione è polarizzata direttamente (*direct biased*).

Giunzione polarizzata inversamente. In fig. 3.6-a il polo negativo della batteria V è collegato alla zona p e quello positivo alla zona n .

La d.d.p. V è allora concorde con quella V_0 e l'altezza della barriera di potenziale viene aumentata. Diminuisce di conseguenza la corrente di diffusione e prevale, quindi, quella di *drift*. Infatti,

lacune della zona p vengono attratte dal polo negativo della batteria V .

elettroni liberi della zona n vengono attratti dal polo positivo della batteria V .

Il *depletion layer* si allarga, aumenta cioè il numero di ioni non neutralizzati

⁴ Ciò deve avvenire per il principio di conservazione dell'energia. Se, infatti, la d.d.p. V_0 si manifestasse agli estremi aperti della barretta, chiudendoli su di un carico nascerrebbe una corrente: verrebbe quindi prodotta energia dal nulla. La giustificazione analitica del fenomeno viene fornita dalla teoria quantistica.

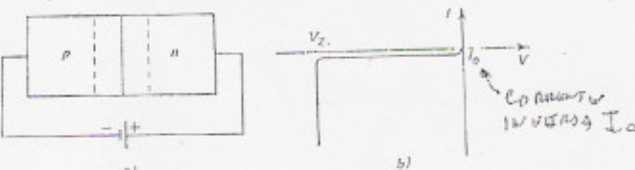


Fig. 3.6 - Giunzione $p-n$ polarizzata inversamente (a) e sua caratteristica voltamperometrica (b).

ai lati della giunzione e , quindi, l'altezza della barriera di potenziale. Al crescere del valore assoluto della tensione V , la corrente di diffusione diminuisce fino ad annullarsi: rimane, allora, la sola corrente di *drift* I_0 indipendente da V . Tale corrente viene detta *inversa* (*reverse current*): essa è rappresentata in fig. 3.6-b. La corrente inversa è dell'ordine del μA per il germanio e del nA per il silicio⁶: essa dipende fortemente dalla temperatura, crescendo con essa circa esponenzialmente.

Tensione di rottura. Se la tensione V che polarizza inversamente la giunzione $p-n$ assume valori troppo elevati, avviene la così detta rottura (*breakdown*): la corrente inversa cresce rapidamente a tensione pressoché costante (fig. 3.6-b), determinando la distruzione della giunzione, se non viene opportunamente limitata tale corrente e, quindi, la potenza dissipata sulla giunzione stessa. Il fenomeno può essere dovuto a due cause: l'effetto Zener oppure l'effetto valanga o entrambi.

L'effetto Zener è prevalente per tensioni di breakdown inferiori alla decina di Volt. Esso determina un aumento delle cariche minoritarie dovuto alla rottura di nuovi legami covalenti ad opera del campo elettrico, divenuto particolarmente intenso.

L'effetto valanga (*avalanche effect*) prevale quando la tensione di rottura è superiore alla decina di Volt. Ad opera dell'elevato campo elettrico le cariche che attraversano la giunzione per *drift* acquistano una velocità molto elevata. Nell'urto contro gli atomi di semiconduttore, l'elevata energia cinetica ceduta è sufficiente a rompere nuovi legami covalenti, determinando una moltiplicazione «a valanga» delle cariche disponibili per la conduzione.

Il *breakdown* può avvenire per tensioni molto diverse, secondo il drogaggio

⁵ Si ricordi che la corrente di *drift* è dovuta alle cariche minoritarie (lacune di n che passano in p ed elettroni liberi di p che passano in n), cioè alle coppie elettrone-lacuna del cristallo base, il cui numero dipende esclusivamente, e fortemente, dalla temperatura.

⁶ Essa è la somma della corrente di dispersione superficiale e della corrente di *drift*.

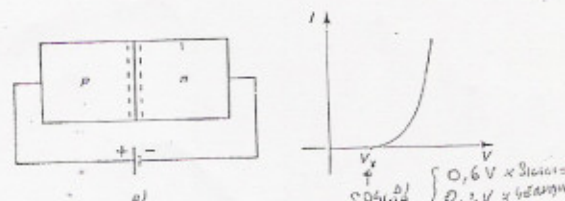


Fig. 3.7 - Giunzione $p-n$ polarizzata direttamente (a) e sua caratteristica voltamperometrica (b).

gio: da pochi Volt ad oltre mille Volt. Il fenomeno viene sfruttato vantaggiosamente nei *diodi Zener* (par. 2.9) al fine di ottenere una tensione circa costante al variare della corrente. In questi dispositivi la tensione di rottura può variare da 2 a 200 Volt circa.

Giunzione polarizzata direttamente. In fig. 3.7-a il polo positivo della batteria è collegato alla regione di tipo p e quello negativo a quella di tipo n . La d.d.p. V è allora discorde da quella V_0 e l'altezza della barriera di potenziale viene diminuita. Sulla corrente di *drift* prevale quella di diffusione, che può assumere valori molto maggiori della prima, tanto più quanto maggiore è V .

Il meccanismo della conduzione diventa il seguente⁷. Nel circuito esterno circolano, naturalmente, soltanto elettroni, uscenti dal polo negativo ed entranti in quello positivo della batteria.

Da un lato elettroni escono dal polo negativo della batteria, entrano e si diffondono nella zona n .

Dall'altro lato elettroni della zona p entrano nel polo positivo della batteria, che ha determinato la rottura dei loro legami covalenti e la formazione di nuove lacune.

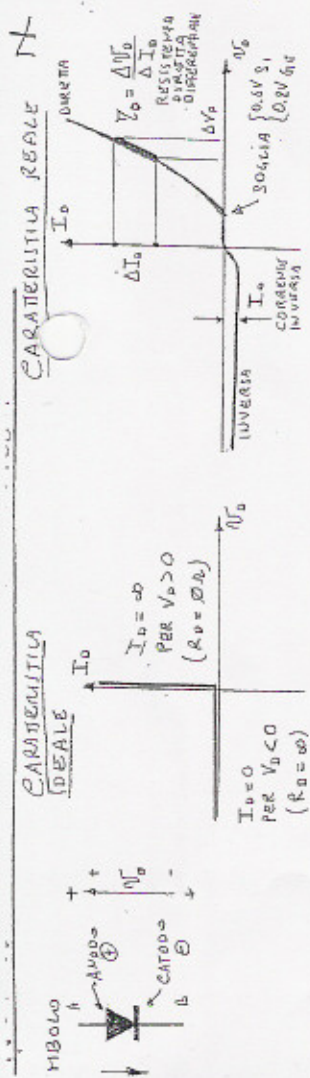
La corrente nel cristallo, prevalentemente di diffusione, è costituita da elettroni e lacune:

lacune passano da p a n e qui si ricombinano.

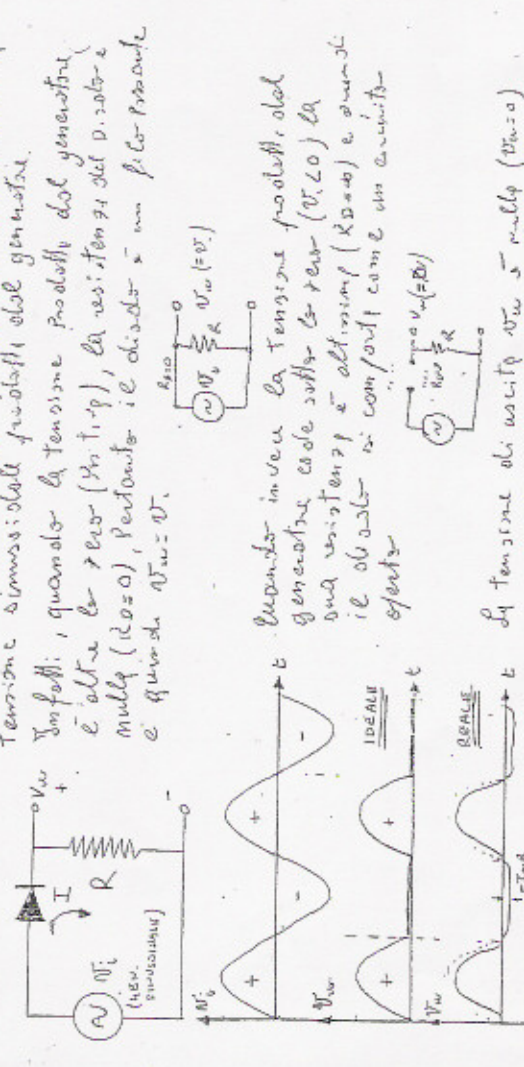
elettroni liberi passano da n a p e qui si ricombinano.

Tale corrente, prevalentemente di diffusione, si dice diretta (*direct current*):

⁷ Si veda anche il par. 4.6.



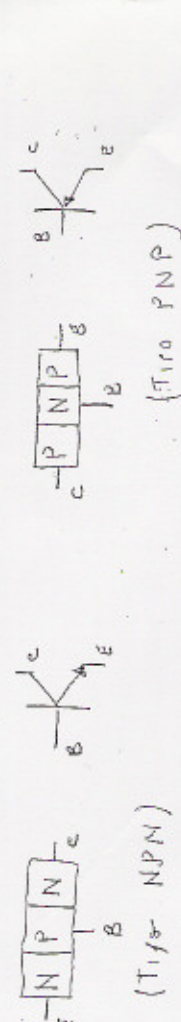
Il diodo è un dispositivo elettronico che permette lo scorrimento della corrente in un solo verso (nono direzionale dall'anodo al catodo) stando alla sua caratteristica corrente/tensione e quella di figura caratteristica (ideale). Insieme in un circuito permette di realizzare la tensione sinusoidale prodotta dal generatore.



La tensione di uscita v_{out} è nulla ($v_{out}=0$) quando il diodo è in conduzione (c.d.).
 Per polarizzazione inversa, la corrente non è nulla ma è dell'ordine del nA (I_0 costante inversa). Tale corrente è dovuta alla corrente minoritaria e parzialmente alla temperatura. \Rightarrow su $V_D < 0$ la $v_{out} = -I_0 R$. (vedi grafico a lato).
 Per polarizzazione diretta la corrente non scende fino a $V_D \approx 0.6V$ a $0.7V$ circa. Per polarizzazione diretta la resistenza offerta dal diodo non è nulla ma è un valore intorno al 100 Ω (resistenza offerta dal diodo). Infatti la curva della resistenza è molto ripida nel punto di lavoro. Infatti la resistenza è molto alta per $V_D < 0.6V$ e molto bassa per $V_D > 0.6V$.
 La resistenza di carico R_L è molto alta per $V_D < 0.6V$ e molto bassa per $V_D > 0.6V$.
 La tensione di uscita v_{out} è nulla ($v_{out}=0$) quando il diodo è in conduzione (c.d.).
 Per polarizzazione inversa, la corrente non è nulla ma è dell'ordine del nA (I_0 costante inversa). Tale corrente è dovuta alla corrente minoritaria e parzialmente alla temperatura. \Rightarrow su $V_D < 0$ la $v_{out} = -I_0 R$. (vedi grafico a lato).
 Per polarizzazione diretta la corrente non scende fino a $V_D \approx 0.6V$ a $0.7V$ circa. Per polarizzazione diretta la resistenza offerta dal diodo non è nulla ma è un valore intorno al 100 Ω (resistenza offerta dal diodo). Infatti la curva della resistenza è molto ripida nel punto di lavoro. Infatti la resistenza è molto alta per $V_D < 0.6V$ e molto bassa per $V_D > 0.6V$.
 La resistenza di carico R_L è molto alta per $V_D < 0.6V$ e molto bassa per $V_D > 0.6V$.
 La tensione di uscita v_{out} è nulla ($v_{out}=0$) quando il diodo è in conduzione (c.d.).

TRANSISTOR (BIPOLAR TRANSISTOR)

TRANSISTOR > TRANSFER - RESISTOR (INVENTATO/SCOPERTO 1945)
 È costituito da due giunzioni fra tre blocchi di semiconduttore drogati. Ne esistono due tipi:



Ha tre terminali: BASE (B), COLLETORE (C), EMITTORE (E)
 PARAMETRIZZAZIONE (NPN)

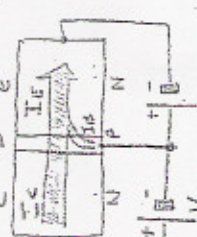
Nonostante, è fatta da due giunzioni CB che funzionano in verso opposto, la cui corrente di uscita è controllata (Base) da quella di ingresso (Base) e quella di uscita (Collector) $I_C \approx I_E$
 ottenendo la base in quanto

Le correnti provenienti dal collector si sommano con quelle della base. Pertanto la corrente di base è piccola rispetto a quella del collector e di emettitore

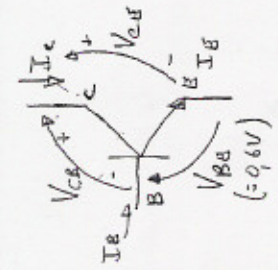
$$I_C \gg I_B \quad I_C \approx I_E$$

Il transistor funziona come AMPLIFICATORE DI CORRENTE, ovvero, con un poco corrente di base I_B è possibile controllare la corrente di collector I_C .
 Infatti la I_C è proporzionale alla I_B (corrente di comando)

$I_C = \beta I_B$ La costante di proporzionalità è HFE (amplification factor) di corrente. $[V_{BE} \text{ tipicamente intorno a } 0.7V; V_{CE} \text{ da } 5V \text{ a } 100V]$
 La grandezza che prende in considerazione del BJT sono 6: Le correnti nei tre terminali (I_E, I_B, I_C) e le tensioni fra di essi (V_{CE}, V_{BE}, V_{BC})



Le si grandene ma e tutte indipendenti
 infatti, per i camp di KICKOFF.

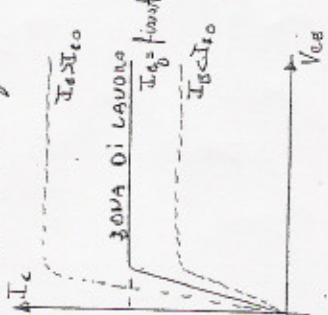


$\sum I = 0 \Rightarrow I_B + I_C + I_E = 0$ (si consideri il BJT come un nodo)
 $\sum V = 0 \Rightarrow V_{CE} - V_{BE} - V_{EE} = 0$ (si consideri il BJT come un loop)
 Se si tiene conto che $V_{BE} = 0.6V$ (per il silicio) in quanto B/E è una giunzione polarizzata direttamente, si possono trovare le variabili rimanenti.

6 GRANDI - 3 EQUAZIONI = 3 parametri indipendenti.
 Si scelgono come parametri indipendenti: V_{CE}, I_C e I_B .
 Per questi ultimi, è possibile calcolare gli altri (V_{CE}, V_{BE}, I_E) utilizzando le equazioni sopra (*).
 In effetti esiste un'altra equazione fra I_C e I_E data dalla relazione di proporzionalità $I_C = HFE \cdot I_B$. Tale relazione si può esprimere ricavata dalla forma grafica di seguito.

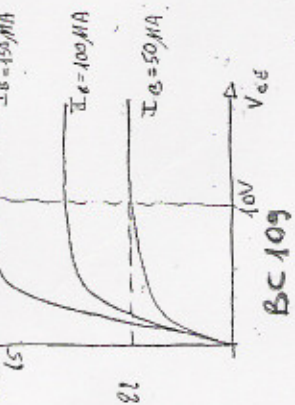
CARATTERISTICHE DI COLLEZIONE (VALORI DATI ANCHE IN FIG. 374)

Le proporzionalità ($I_C = HFE \cdot I_B$) fra le correnti di base e di collettore e l'effetto ricavo del grafico sotto ricavato.
 Sperimentalmente, si osservano che per I_B , aumentando la V_{CE} , I_C aumenta proporzionalmente all'inverso, dopo di che, allargando un po' la scala, si osserva un valore costante $I_C = HFE \cdot I_B$. La zona di lavoro del BJT è proprio dopo il ginocchio, o, ancora quello dove la I_C rimane fissa al variare di V_{CE} .



Se si cambia il valore della I_B il fenomeno si ripete, ripartendo da lavoro si allargano un po' un valore di I_C osservando che si ottengono curve, non una famiglia di curve delle caratteristiche di collettore.

Per esempio di controllo di corrente $V_{CE} = 10V$ (Anche a 120, Transistor BC109)
 Calcolo di HFE



1) Fissato $V_{CE} = 10V$
 2) Fissare due curve ($I_B = 50 \mu A$ e $I_B = 150 \mu A$)
 $\Rightarrow \Delta I_B = 100 \mu A (= 150 \mu A - 50 \mu A)$
 3) Si osservano le corrispondenti variazioni di $I_C = 65 \mu A$ (per $I_B = 150 \mu A$)
 $I_C = 28 \mu A$ (per $I_B = 50 \mu A$)
 $\Delta I_C = 65 \mu A - 28 \mu A = 43 \mu A$

$$HFE = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{43 \mu A}{100 \mu A} = 0.43 \cdot 10^3 = 430$$

NB cambiando il valore V_{CE} ($\approx V_{CE} = 5V$) HFE varia, per la V_{CE} (Esce dai comuni camp per 300 e 600).

RETE DI PARIAMETRI DEL BJT (VEDI ANCHE IN FIG. 370)

Il transistor, per funzionare in regime di amplificazione di polarizzazione.
 (NB) Tutte le tensioni sono riferite a massa ($V_{CE}, V_i, V_{CE(sat)}$)

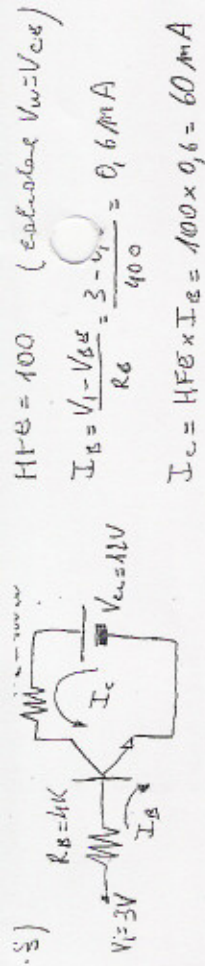


1) Amplificatore di tensione
 $V_{CE} = I_C \cdot R_C + V_{CE(sat)}$
 2) Amplificatore di corrente

$$V_i = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

V_{CE} è l'alimentazione ed è nota ($\approx V_{CE} = 5V$). V_i è in verso la tensione di comando che è variabile da parte dell'operatore. Per avere β è un segnale in ingresso nella base del BJT. Tutte le grandezze del transistor (e quindi la tensione $V_{BE} = V_{CE}$) sono definite in base al valore di N_i .

Infatti, $I_B = \frac{V_i - V_{BE}}{R_B} \Rightarrow I_C = HFE \cdot I_B \Rightarrow V_{CE} = V_{CE(sat)} + I_C \cdot R_C$
 (MAGGIORE DI INGRESSO) (CORRENTE DI COLLEZIONE)



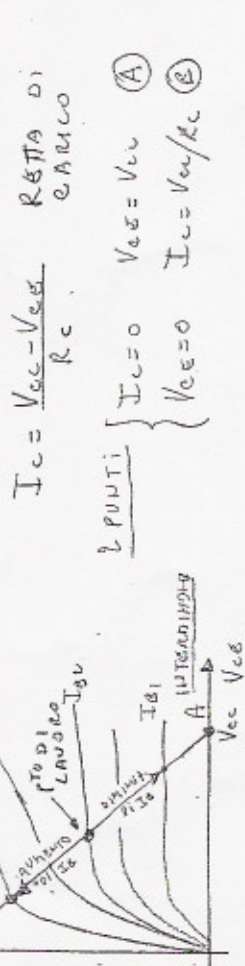
$HFE = 100$ (calcolare $V_{CE} = V_{CC}$)
 $I_B = \frac{V_i - V_{BE}}{R_B} = \frac{3 - 0.7}{4000} = 0.6 \text{ mA}$
 $I_C = HFE \times I_B = 100 \times 0.6 = 60 \text{ mA}$

$V_i = V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 60 \text{ mA} \times 0.1 \text{ k}\Omega = 12 - 6 = 6 \text{ V}$
 NB se $\begin{cases} V_i \text{ aumenta} \Rightarrow I_C \text{ aumenta} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \text{ diminuisce} \\ V_i \text{ diminuisce} \Rightarrow I_C \text{ diminuisce} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \text{ aumenta} \end{cases}$

Aumentando V_i di 1V ($\Delta V_i = 1 \text{ V} \Rightarrow V_i = 3 \text{ V} \rightarrow 4 \text{ V}$) calcola
 $V_i = 4 \text{ V} \Rightarrow V_{CE} = 3.5 \text{ V}$ (ovvero $\Delta V_{CE} = -2.5 \text{ V}$)
 $G = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_i} = \frac{-2.5}{1} = -2.5$ (AMPLIFICAZIONE)
 GUADAGNO DI TENSIONE DELLA RETE A BJT

La rete amplifica variazioni di tensione di 1,5 volte.

ANALISI GRAFICA
 Si riporta la rete che rappresenta l'equazione di carico del grafico della caratteristica di collezione.

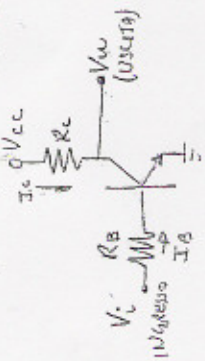


NB 1) All'aumentare di V_i , I_B aumenta e si aumenta I_C , ma quest'ultimo non può superare il valore $I_{Cmax} = \frac{V_{CC}}{R_C}$
 SATURATIONE $\Rightarrow V_{CE} = 0$ (PTO B)
 2) $V_i < V_{BE} \Rightarrow I_B = 0$ Comunque in ogni caso analitico
 $\Rightarrow I_C = 0$ e $V_{CE} = V_{CC}$ INTERDIZIONE (PTO A)
 SATURATIONS $\Rightarrow V_{CE} = 0$ ($I_C = V_{CC}/R_C$)
 INTERDIZIONE $\Rightarrow I_C = 0$ ($V_{CE} = V_{CC}$)

I - DI LAVORO: graficamente si trova una grafico che ottimizza i valori relativi alle grandezze V_{CE} , I_B , I_C e I_C (che p loro volta ottimizzano le altre V_{CE} , V_{BE} , I_B)

Quando il BJT è inserito nella pila a rete di polarizzazione, il PTO di lavoro è costretto ad essere la legge relative all'equazione della Retta di carico, e quindi, al valore di I_B si spostano di esp nei limiti, o saturazione ($V_{CE} = 0$) e di interdizione ($I_C = 0$).

TRANSISTOR COME PORTA NOT



Nella zona lineare, la rete si comporta da amplificatore di tensione (ZONA INTERMEDIA). In questo caso la zona di interesse sono quelle esterne (saturazione $V_{CE} = 0$ livello basso e interdizione $V_{CE} = V_{CC}$ livello alto). Il punto di lavoro deve quindi trovarsi in una delle zone esterne.

Per $V_i = 0 \Rightarrow$ INTERDIZIONE $\Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$ (livello alto) questa situazione è buona e non occorre particolari considerazioni di progetto.

" $V_i = \text{Alto} \Rightarrow$ Saturazione $\Rightarrow V_{CE} = 0$ questa condizione non è ideale, infatti è necessario calcolare R_B e R_C in modo tale che V_i alto di abbia saturazione.

