

Capitolo 3

Introduzione alle tecnologie elettroniche

Abbiamo quotidianamente a che fare con una gran quantità di dispositivi elettronici di tutti i tipi; un elenco molto riduttivo comprende

- computer
- *smartphone*
- telefoni fissi
- televisori
- elettrodomestici
- registratori
- radioricevitori
- trasmettitori
- lettori CD, DVD
- telecomandi
- strumenti di misura
- dispositivi di controllo di vario genere (temperatura, pressione, ...)
- dispositivi di sicurezza per automobili (ABS, ASR, ESP, ...)
- dispositivi di allarme
- lettori ottici
- lettori di impronte digitali
- ...

Ormai ci siamo abituati a scorrere le dita per cambiare le pagine su uno *smartphone*, a far riconoscere le nostre impronte digitali per usare i nostri privilegi di accesso, a premere energicamente il pedale del freno della nostra autovettura (quando serve), senza temere che le ruote si blocchino. Tutte queste attività, che oramai diamo per scontate, ci sono diventate familiari grazie a uno straordinario sviluppo della tecnologia elettronica, che non ha paragoni con nessun altro tipo di tecnologia. Nella parte introduttiva, riguardante la storia dell'informatica, e nel capitolo 2 dedicato all'informazione, abbiamo brevemente reso conto di questa rivoluzione microelettronica, che sta incidendo in modo profondo persino nella struttura della nostra società. In questo capitolo vorremmo andare un po' più nello specifico, soprattutto per comprendere le radici concettuali di questo sviluppo tecnologico; queste sono legate in modo essenziale con la logica Booleana da una parte, e con la possibilità di miniaturizzare a livello microscopico i dispositivi che la manipolano dall'altra.

3.1 Il bit (elettro)meccanico: l'interruttore

Il punto di partenza concettuale di tutta la parabola tecnologica che ci ha portato dai primi circuiti elettrici ai moderni e sofisticati dispositivi elettronici è l'*interruttore*. Tutti sanno che questo è il più semplice dispositivo elettrico che si possa concepire, idoneo solamente a interrompere il flusso di una corrente; in figura 3.1 vediamo il suo simbolo elettrico e una realizzazione commerciale. Il motivo per cui l'interruttore è così importante è legato al fatto che esso può assumere due *stati*, e cioè *spento* e *acceso*. Spento significa che la lamina metallica che lo costituisce è alzata e c'è un'interruzione del circuito; acceso significa invece che la lamina metallica è abbassata, il circuito è chiuso ed è possibile un flusso di corrente.

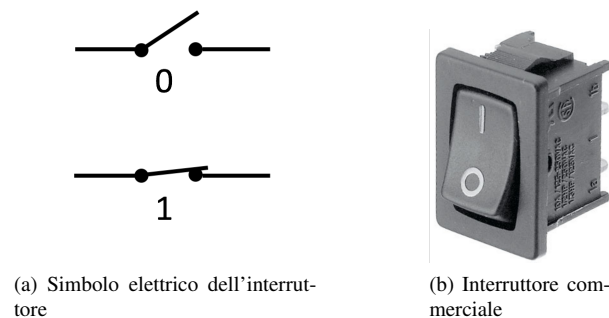


Figura 3.1: Interruttore

E' convenzione usare il simbolo 0 per caratterizzare l'interruttore spento e il simbolo 1 per caratterizzare l'interruttore acceso. Il fatto che il suo funzionamento sia rappresentato dai due stati 0 e 1, consentì a Shannon, come ricordato nel paragrafo 1.1, di agganciarlo alla *Logica Booleana* (o *Logica Binaria*), che è lo strumento concettuale che Boole elaborò nella metà del XIX secolo; vedremo nel seguito come si realizzò questa connessione. Per intanto possiamo anticipare il fatto che i due stati 1 e 0 sono sempre associati alla presenza o all'assenza di una certa grandezza fisica, tipicamente una tensione, una corrente o una carica elettrica, nel nostro ambito elettronico; nel nostro caso 1 significa il fatto che c'è tensione a valle dell'interruttore.

L'interruttore è un dispositivo ad azionamento manuale; questo esclude di poterlo usare in tutte quelle situazioni in cui lo stesso sia inaccessibile, o sia molto distante, oppure si pretenda un funzionamento *automatico* (cioè non manuale). Ecco allora che all'inizio dell'ottocento si costruiscono i primi interruttori comandati a distanza, i cosiddetti *relè*, che consentono un controllo *remoto* dell'interruttore mediante l'uso di una corrente elettrica di azionamento. Il principio di funzionamento è il seguente: una corrente (continua o alternata, a seconda dei casi) scorre in una induttanza (detta anche *bobina* o *solenoid*), costituita da un filo di rame avvolto a spire molto strette su un rocchetto di supporto; il valore dell'induttanza viene aumentato in modo considerevole inserendo un nucleo ferromagnetico all'interno della bobina; in tal modo si costruisce un *elettromagnete*.

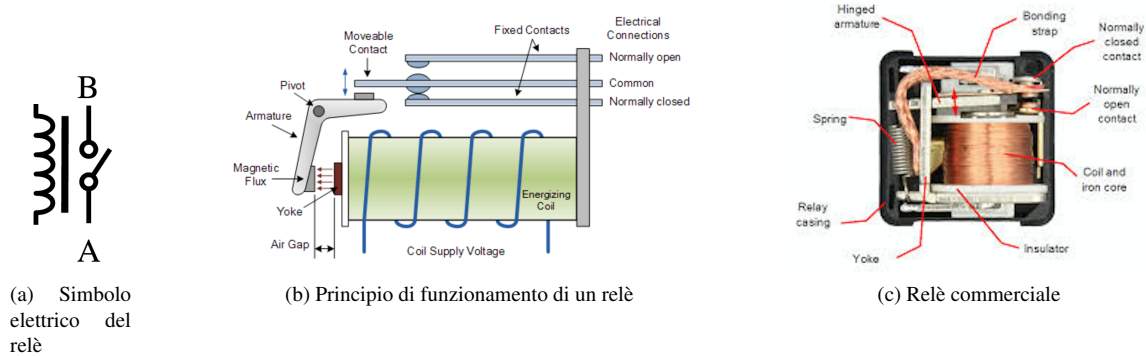


Figura 3.2: Struttura e funzionamento di un relè

Quando c'è corrente si forma un flusso magnetico intenso all'interno del nucleo ferromagnetico, in grado di attirare un'ancoretta metallica che a sua volta, vincendo la resistenza di una molla, muove l'interruttore. Il relè è dunque un interruttore comandato da una corrente. Poiché i contatti dell'interruttore possono essere anche molto grossi, un relè può essere usato per controllare un grosso flusso di corrente a partire da una piccola corrente, cioè quella necessaria per eccitare l'elettromagnete. Questa è dunque un'altra funzione del relè: con un piccolo interruttore, in grado di sopportare la sola corrente di eccitazione della bobina, siamo in grado di controllare un carico che assorbe una corrente molto grande.

Poiché il relè è un interruttore, sia pure comandato in corrente, anche per esso si possono usare le due costanti binarie 1 e 0 per descrivere il suo funzionamento. Come vedremo nel seguito l'alfabeto binario è il cardine logico di tutta la tecnologia digitale, e infatti i primi calcolatori furono realizzati con relè, anche se questa tecnologia durò molto poco, poiché venne quasi subito soppiantata da quella dei tubi termoionici. Il principale svantaggio di questa tecnologia è relativo ai tempi necessari e all'energia necessari per cambiare stato; i tempi sono molti alti, trattandosi di un dispositivo elettromeccanico; pure l'energia è considerevole, poiché bisogna spostare un'ancoretta metallica, vincendo per altro la resistenza di una molla.

3.2 Il bit termoionico: i tubi a vuoto

Il secondo passo nello sviluppo tecnologico che portò alla costruzione dei moderni calcolatori si compì con l'invenzione del cosiddetto *tubo termoionico*. Esso è una derivazione diretta della lampadina, poiché è costituito da un bulbo di vetro nel quale viene praticato il vuoto. Al suo interno c'è un filamento metallico, che si riscalda per effetto Joule al passaggio di una corrente elettrica, emettendo una debole luce rossastra. In prossimità del filamento permane una nube elettronica costituita dagli elettroni che sfuggono agli orbitali dei rispettivi atomi; ciò a causa dell'elevata energia cinetica accumulata dagli elettroni e dovuta all'agitazione termica derivante dall'alta temperatura del filamento, che nei tubi termoionici essa si attesta intorno ai 450-600 °C. In realtà, se escludiamo i primi modelli di tubo denominati *a riscaldamento diretto*, solitamente il filamento riscalda l'interno di una superficie metallica cilindrica chiamata *catodo* (3.3a), ricoperta di ossidi speciali che facilitano la fuoriuscita degli elettroni dagli orbitali (tipicamente ossidi di cesio).

3.2.1 Il diodo a vuoto

Se ora, all'interno del tubo, mettiamo una placchetta metallica chiamata *anodo*, e la polarizziamo positivamente rispetto al catodo, gli elettroni della nube elettronica vengono attratti dall'anodo e si stabilisce un flusso unidirezionale di corrente (fig. 3.3b).

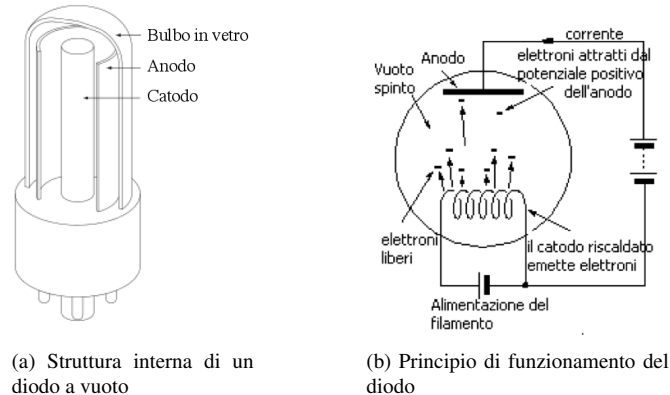


Figura 3.3: Struttura e principio di funzionamento del diodo a vuoto

Un dispositivo di questo genere, interessato da un flusso unidirezionale di corrente, si chiama *diodo*; trattandosi di un diodo realizzato con la tecnologia dei tubi termoionici si specifica ulteriormente usando la locuzione *diodo a vuoto*.

Si osservi il diverso comportamento del diodo con l'anodo polarizzato positivamente (figura 3.4a) e negativamente (figura 3.4b). Nel caso di anodo positivo si stabilisce un flusso continuo di elettroni, dal catodo all'anodo, cui corrisponde un flusso convenzionale di corrente nel senso opposto (la convenzione è che il senso di scorrimento è quello delle cariche positive). Se viceversa si polarizza l'anodo negativamente, il flusso di corrente si blocca, poiché il potenziale dell'anodo respinge gli elettroni,

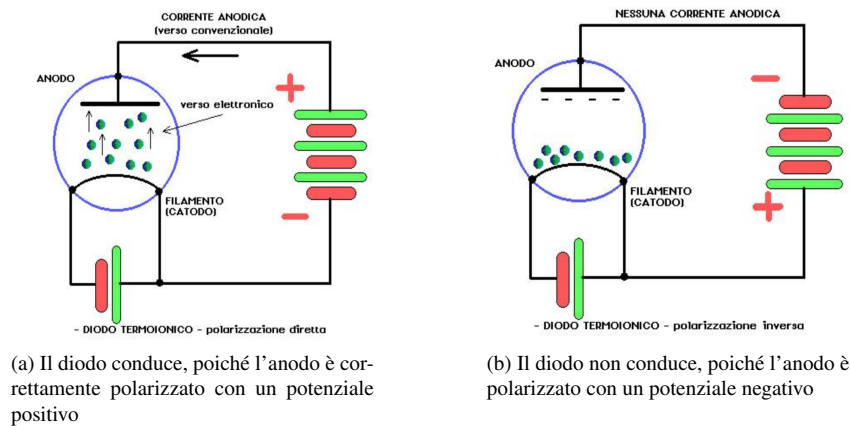


Figura 3.4: Il diodo a vuoto conduce solo se correttamente polarizzato

Il legame che esiste tra la tensione e la corrente anodica non è lineare, ma segue la seguente legge di Child-Langmuir

$$I_a = kV_a^{3/2} \quad (3.1)$$

dove la costante k è la *perveanza* del tubo; in figura 3.5 si vede l'andamento della curva per tre diversi diodi a vuoto commerciali.

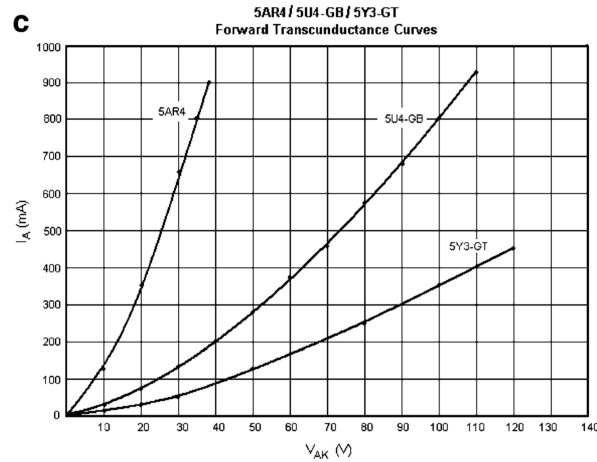


Figura 3.5: Curve caratteristiche di alcuni diodi a vuoto commerciali

I diodi hanno diverse applicazioni, la principale delle quali è quella di trasformare la tensione alternata in tensione continua; ciò si realizza grazie al fatto che il flusso di corrente è solo unidirezionale, e quindi vengono preservate le sole semionde (p.es.) positive, tagliando quelle negative.

3.2.2 Il triodo

Noi non siamo interessati direttamente al diodo, ma alla sua diretta derivazione, cioè il *triodo*. Se tra anodo e catodo si interpone un terzo elettrodo, denominato *griglia* (figura 3.6a), costituito da un filo metallico molto sottile e avvolto a spirale intorno al catodo, il flusso di corrente anodica può essere controllato dal potenziale (negativo) con il quale viene caricata la griglia. Il fenomeno è ben evidente nella figura 3.7, nella quale si vede che se la griglia supera, in negativo, la cosiddetta *tensione di interdizione*, si crea una barriera negativa di potenziale (figura 3.7a) che blocca il flusso della corrente (zona tratteggiata). Nella figura 3.7b si vede invece la distribuzione del potenziale esattamente alla tensione di interdizione (in questo caso -12 V), mentre aumentando in senso positivo la tensione di griglia (portandola p.es. a -6 V) il potenziale positivo riesce a trapassare il piano della stessa, consentendo di attirare gli elettroni (3.7c) e attivando quindi un flusso di corrente. La possibilità, da parte della

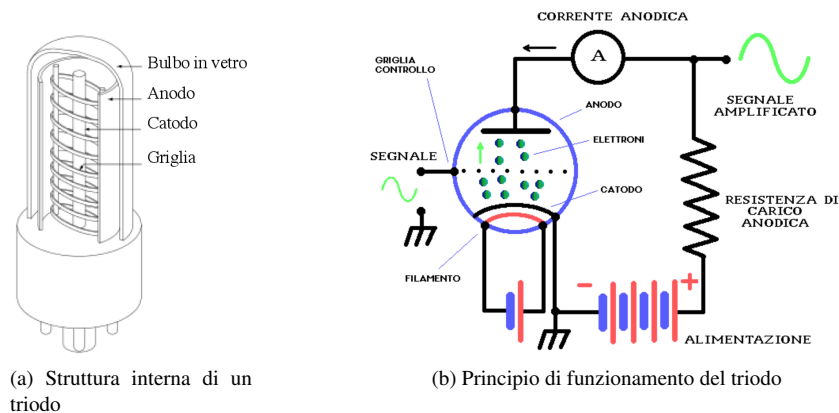


Figura 3.6: Struttura e principio di funzionamento del triodo a vuoto

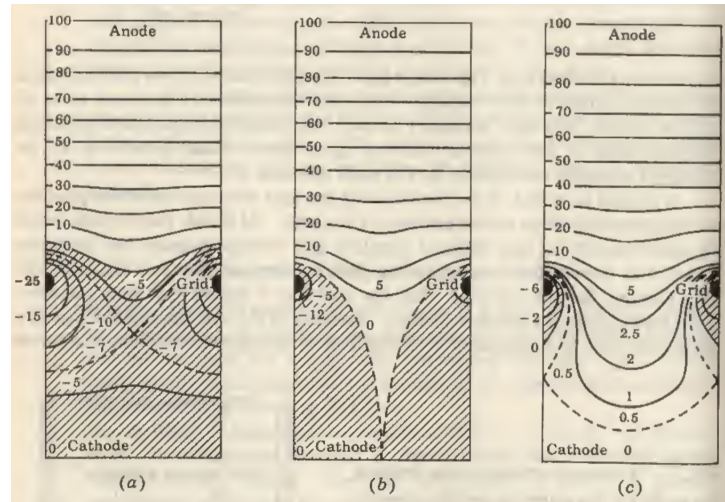


Figura 3.7: Contorno equipotenziale in Volts sul piano degli elettrodi di un triodo. In (a) la griglia è alimentata con una tensione inferiore a quella di interdizione ($V_g = -25\text{ V}$); in (b) esattamente al valore di interdizione ($V_g = -12\text{ V}$); in (c) a metà del valore di interdizione ($V_g = -6\text{ V}$)

griglia, di consentire o bloccare un flusso di corrente usando solo piccole variazioni del proprio potenziale negativo, implica che una piccola variazione della tensione di griglia (che per altro è molto vicina al catodo), moduli una grossa variazione della corrente anodica; da ciò nasce l'attitudine del tubo termoionico ad *amplificare* i segnali (ma di ciò si parlerà nei corsi di Elettronica).

3.2.3 Curve caratteristiche del triodo

Se riportiamo su un diagramma la variazione della corrente anodica in funzione della tensione anodica, per valori costanti della tensione di griglia, si ottengono le cosiddette *curve caratteristiche* del triodo, rappresentate in figura 3.8. Si può osservare che, fissata una certa tensione di griglia (p.es. $V = -2, 0\text{ V}$), l'andamento qualitativo della curva è simile a quello del diodo, rappresentato in figura 3.5. L'equazione in questo caso dipende da entrambe le tensioni V_g di griglia e V_a anodica; quest'ultima incide sulla corrente tramite il coefficiente μ , detto *fattore di amplificazione*, che è sostanzialmente costante e indipendente dalla corrente.

$$I_a = k(V_g + V_a/\mu)^{3/2} \quad (3.2)$$

Se scendiamo con la V_g su valori molto negativi (p.es. $< -3, 5\text{ V}$ nel caso del tubo associato al diagramma di figura 3.8) per ottenere una certa corrente anodica (p.es. $0, 5\text{ mA}$) dobbiamo aumentare in modo molto significativo la tensione anodica. Se invece manteniamo costante la tensione anodica, ci sarà una certa tensione V_{int} per la quale si ha l'interdizione.

Per comprendere bene il funzionamento del triodo bisogna polarizzarlo correttamente e vedere cosa succede variando i parametri. Nel circuito di figura 3.9a il triodo è alimentato da una tensione E tramite la *resistenza di carico*. La somma della tensione V_a e di quella ai capi della resistenza deve equilibrare la tensione E . Se la tensione V_a va a zero (p.es. a seguito di un cortocircuito tra gli elettrodi del tubo) la corrente anodica vale $I_a = V_a/R$. Questa condizione di funzionamento corrisponde al punto all'estrema sinistra sulla retta gialla di figura 3.9b sull'asse delle ordinate, in corrispondenza di $I_a = 3\text{ mA}$ (in questo caso si è assunto che sia $R = 100\text{ k}\Omega$). Se invece spegniamo il filamento del tubo, lo stesso smette di funzionare, non scorre più corrente, la caduta di tensione sulla R è nulla e tutta la tensione E di alimentazione si presenta ai capi del triodo, cioè $V_a = E$. Questa condizione di funzionamento corrisponde al punto all'estrema destra sulla retta gialla di figura 3.9b sull'asse delle ascisse, in corrispondenza di $V_a = 300\text{ V}$.

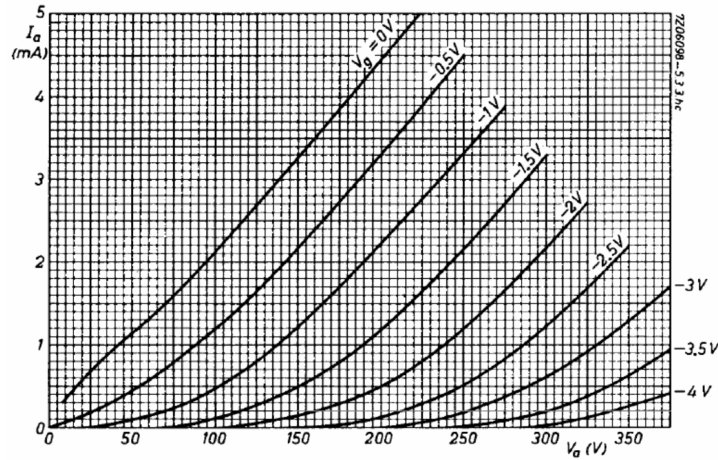


Figura 3.8: Curve caratteristiche del triodo

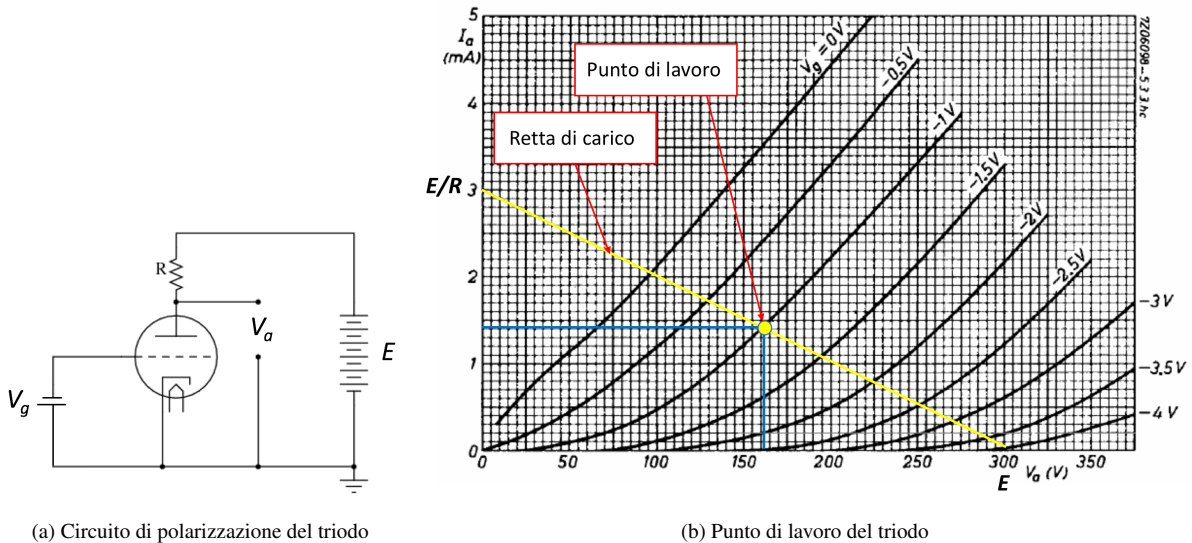


Figura 3.9: Circuito di polarizzazione e punto di lavoro del triodo

Qualunque altro punto di lavoro intermedio tra questi due estremi giace sulla retta gialla, chiamata *retta di carico*. Per variare il punto di lavoro basta variare la tensione di griglia; se usiamo il valore $V_g = -1 \text{ V}$, il punto di lavoro si trova intersecando la curva per $V_g = -1 \text{ V}$ costante con la retta di carico, come si vede in figura 3.9b; per questa condizione si può leggere direttamente sul diagramma la tensione e la corrente anodica; i valori sono rispettivamente $V_a = 160 \text{ V}$ e $I_a = 1,4 \text{ mA}$.

Il funzionamento del triodo consente di controllare la tensione e la corrente anodica agendo solamente sulla tensione di griglia la quale, essendo polarizzata negativamente, non assorbe corrente; dunque si ha sempre $I_g = 0$. Ciò significa che possiamo controllare il flusso di una corrente (anodica) senza che ci sia assorbimento di corrente nel circuito di controllo (il circuito di griglia) e quindi senza che si dissipi potenza. Questo costituisce un salto di qualità enorme rispetto ai relè, che invece richiedono un'ingente dissipazione di potenza nel circuito di eccitazione. Un altro vantaggio rilevante è la velocità di commutazione, che è più bassa di alcuni ordini di grandezza rispetto a quella dei relè; qua non c'è nulla di elettromeccanico, non c'è alcuna massa da spostare per attivare l'eccitazione e

i tempi di commutazione sono legati alla sola geometria del tubo, alle tensioni in gioco e agli altri parametri dello stesso.

Come anticipato precedentemente, grazie al fattore di amplificazione μ dell'equazione 3.2, il triodo ha una naturale propensione ad amplificare i segnali alternati presenti sulla griglia; se infatti torniamo alla figura 3.9b e immaginiamo di variare la V_g nell'intorno del punto di lavoro, p.es. tra 0 e -2 V , la tensione anodica varierà tra 97 e 223 V; ciò significa che una variazione di 2 V in ingresso determina una variazione di $223 - 97 = 126\text{ V}$ in uscita; in questo senso il triodo è un *amplificatore* di segnali. Questa funzionalità del triodo viene sfruttata nell'elettronica analogica, laddove ci sia appunto da amplificare segnali analogici. Nel nostro caso dobbiamo invece usare il triodo come interruttore comandato; questa funzionalità è evidenziata nella figura 3.10 ed è quella associata alla logica Booleana.

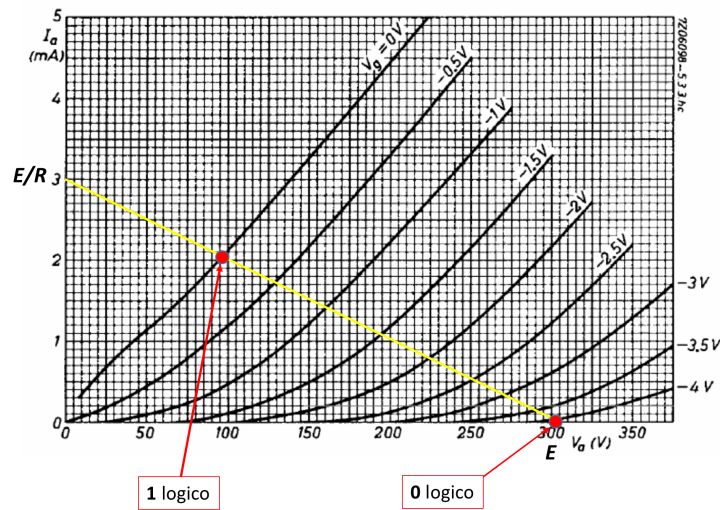


Figura 3.10: Triodo usato secondo la logica binaria

Se la griglia viene posta al potenziale di 0 V, la corrente anodica corrispondente è pari a circa 2 mA; questa è una condizione di piena conduzione, che possiamo associare alla variabile logica 1. Se invece imponiamo $V_g = -4\text{ V}$ portiamo il triodo in interdizione, la corrente anodica si annulla e questa condizione viene associata alla variabile logica 0. Ovviamente la corrispondenza è del tutto convenzionale (si potrebbe invertire 0 con 1) e la si potrebbe attuare anche rispetto alla tensione anodica, in modo che, p.es., la condizione di interdizione caratterizzata da $V_a = 300\text{ V}$ corrisponda a 1, mentre la condizione di piena conduzione caratterizzata da $V_a = 97\text{ V}$ corrisponda a 0.

Subito dopo i primi computer elettromeccanici, che furono costruiti usando i relè, la tecnologia dei tubi a vuoto prese il sopravvento e durò fino ai primi anni '60. Ricordiamo che l'ENIAC, derivato dal primo computer sperimentale a tubi termoionici (l'ABC" di Atanasov e Berry), conteneva 17468 tubi.

I tubi termoionici, pur essendo di gran lunga migliori dei relè, hanno diversi difetti; sono ingombranti, fragili, e richiedono una potenza notevole per il riscaldamento del filamento e del catodo. Nei primi anni '50 si stava però preparando la tecnologia dei semiconduttori, che avrebbe trasformato completamente il mondo dei computer.

3.3 Il bit allo stato solido: il transistor

Nel 1948, nei laboratori *Bell* nasceva un piccolo dispositivo elettronico chiamato *transistor*, destinato a rivoluzionare lo sviluppo dell'elettronica. Così come il triodo può farsi derivare, storicamente e tecnicamente, dal diodo, anche il transistor trae le proprie origini dal *diodo a cristallo*, elemento circuitale entrato nella tecnica

elettronica negli anni della seconda guerra mondiale. Il funzionamento dei transistori e dei diodi è basato sulla conduzione elettrica dei cristalli *semiconduttori*. L'impiego dei semiconduttori nella tecnica elettronica risale ai primi del 900, poiché i cristalli di *galena* (solfuro di piombo) furono impiegati per le prime radio, mentre il selenio e l'ossido di rame vennero impiegati per realizzare i cosiddetti *raddrizzatori a secco*. Tuttavia è solo dopo gli esperimenti alla Bell che si sviluppò il transistor come lo conosciamo oggi.

E' sempre stato noto che, prendendo come elemento di raffronto la resistività, i semiconduttori stanno, per così dire, in mezzo fra conduttori e isolanti, essendo più vicini ai primi che non ai secondi (da ciò il nome di *semi*-conduttori). Altrettanto nota è la proprietà che, a differenza dei metalli, essi hanno una resistività che diminuisce all'aumentare della temperatura; ben poco era però noto sul meccanismo di conduzione unilaterale presentata dai semiconduttori in determinate condizioni. Sappiamo ora che la difficoltà principale nello studio del comportamento dei semiconduttori sorgeva dal fatto che tracce anche minime di impurità hanno effetti rilevanti sulle proprietà degli stessi. Tali difficoltà furono superate sostituendo la galena col *germanio* e col *silicio* nei rivelatori a cristallo che nella seconda guerra mondiale furono usati nei radar. Il silicio e il germanio hanno la possibilità di essere ottenuti con un grado estremo di purezza, così che su di essi si è potuto sperimentare con rigore la teoria della conduzione elettrica nei semiconduttori formulata precedentemente. Alcune nozioni essenziali di questa teoria, pienamente sufficienti per la comprensione del funzionamento dei diodi e dei transistori, possono essere espresse in forma elementare; a esse dedicheremo i prossimi paragrafi.

3.3.1 Struttura dei semiconduttori

Il germanio (Ge) è un elemento tetravalente, del gruppo dello stagno, che ha numero atomico 32. Allo stato puro esso si presenta in forma policristallina, ma con particolari processi termici può essere ottenuto sotto forma di grossi cristalli isolati. Ciascun atomo è legato mediante legami covalenti a quattro atomi vicini (1, 2, 3, 4), posti ai vertici di un tetraedro regolare, in maniera tale che la distanza fra due qualunque dei cinque atomi è sempre la medesima (si veda la figura [3.11a](#)). L'atomo di germanio è formato da un nucleo positivo e da 32 elettroni; il

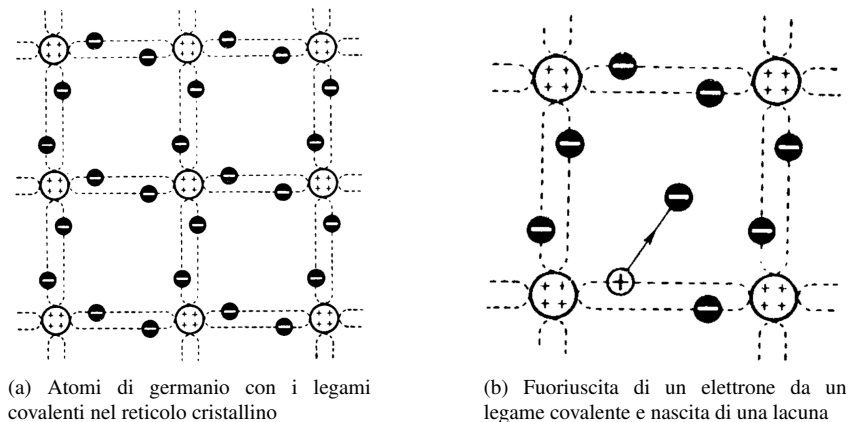


Figura 3.11: Legami covalenti e nascita di una lacuna in un cristallo di germanio

nucleo e 28 elettroni formano la parte inerte dell'atomo mentre i quattro elettroni rimanenti, cioè gli elettroni di valenza dell'orbita esterna, sono i responsabili dell'attività chimica ed elettrica dell'atomo e producono il legame con gli atomi vicini del reticolo cristallino. La configurazione degli atomi nel cristallo di germanio non è statica: la presenza di energia termica causa un'incessante vibrazione degli atomi del reticolo attorno alle loro posizioni di equilibrio. In conseguenza di ciò, già a temperatura ordinaria, alcuni elettroni di valenza possono acquistare energia sufficiente per rompere il rispettivo legame covalente, cioè per svincolarsi dal complesso di forze che li tengono avvinti al reticolo; tali elettroni rimangono liberi nello spazio vuoto interno al cristallo (enorme rispetto a quello occupato dagli atomi) e si muovono in maniera del tutto disordinata e casuale, come le molecole di un gas, senza sentire alcun effetto elettrico da parte degli atomi circostanti.

Se al cristallo è applicato un campo elettrico esterno, al moto casuale (moto termico) degli elettroni liberi si sovrappone una loro migrazione complessiva verso l'elettrodo positivo, così che ha luogo entro il cristallo una vera e propria corrente elettronica. Alla fuoruscita di ogni elettrone dal legame che lo teneva vincolato al reticolo corrisponde un altro importante fenomeno; nel posto lasciato libero dall'elettrone uscito si viene a manifestare un intenso campo elettrico (prima neutralizzato dalla presenza dell'elettrone) che tende ad attirare un nuovo elettrone nel vuoto formatosi: potrà essere catturato l'elettrone sfuggito o un altro elettrone libero, ma è più comune il fatto che il posto vuoto sia occupato da un elettrone di valenza di un atomo adiacente, quando l'agitazione termica lo porta in condizione favorevole per essere catturato. Con ciò la situazione non è sanata perché lo stato di squilibrio elettrico si è trasferito al nuovo atomo che ha perso un elettrone; si ripete allora il meccanismo di cattura di un nuovo elettrone da un atomo adiacente e così via. In tal modo, il posto lasciato vuoto dall'elettrone sfuggito per effetto termico si sposta entro il cristallo: lo spostamento è del tutto casuale e avviene unicamente sotto l'effetto della vibrazione termica degli atomi, ma assume una direzione e un verso preferenziale se il cristallo è sottoposto a un campo elettrico esterno che facilita la cattura in una direzione e in un verso piuttosto che negli altri. Poiché la mancanza di un elettrone in una regione inizialmente neutra equivale alla presenza di una carica positiva, lo spostarsi del posto vuoto equivale allo spostarsi di una carica positiva esattamente uguale e opposta a quella negativa dell'elettrone; a tale carica fittizia positiva diamo il nome di *lacuna*. Con tale convenzione possiamo allora dire che quando, sotto l'effetto dell'energia termica, si verifica la rottura di un legame covalente, si liberano nel cristallo un elettrone e una lacuna (si veda figura 3.11b), con cariche uguali e opposte, che si muovono liberamente entro il cristallo. Il moto è di per sé disordinato (moto termico), ma se il cristallo è sottoposto a un campo elettrico, acquista il carattere di migrazione ordinata (nel verso del campo per le lacune e nel verso opposto per gli elettroni), cioè di una corrente nel verso del campo.

Gli elettroni e le lacune prodotti per effetto termico non sussistono indefinitamente nel cristallo: infatti ogni elettrone libero, muovendosi casualmente entro il cristallo, finisce per cadere nel campo elettrico prodotto dalla fuoruscita di un altro elettrone. Esso sparisce perciò come elettrone libero e contemporaneamente sparisce la carica positiva corrispondente al posto vuoto: in definitiva si annulla contemporaneamente una lacuna. Si trova che in condizioni ordinarie la vita media di un elettrone (e corrispondentemente di una lacuna) è dell'ordine di un centinaio di microsecondi. Fra il numero di coppie di elettroni-lacune che si formano e quello delle coppie che si estinguono nasce uno stato di equilibrio per cui, a una determinata temperatura, il numero di coppie presenti entro il cristallo è mediamente costante; a temperatura ambiente esso è dell'ordine di $25 \cdot 10^{12}$ per cm^3 e cresce fortemente con la temperatura.

La presenza delle coppie libere entro il cristallo provoca in esso una certa conducibilità intrinseca: essa è legata al numero di copie elettroni-lacune presenti e dipende perciò dalla temperatura. Si tratta di una conducibilità molto modesta: la resistività corrispondente, a temperatura ambiente, ha un valore di $\rho = 0,5 \Omega m$, pari a circa 30 milioni di volte quella del rame. Essa diminuisce fortemente al crescere della temperatura.

La formazione di coppie elettrone-lacuna può avvenire, oltre che per effetto termico, anche per altre cause, di cui fondamentali sono l'illuminazione e l'introduzione di atomi estranei (impurità chimiche). La luce che incide sul cristallo può, coi suoi fotoni, fornire energia sufficiente per lo sradicamento di elettroni di valenza dei legami che li vincolano al reticolo: hanno allora origine delle lacune, che si comportano in maniera identica a quelli prodotti per effetto termico; il fenomeno viene sfruttato nei cosiddetti *fotodiodi* e *fototransistor*. Della nascita di coppie di elettroni e lacune per effetto di impurità chimiche, argomento di fondamentale importanza per l'attuazione dei diodi e transistori, diremo nel prossimo paragrafo.

Le proprietà viste per il germanio valgono qualitativamente anche per il silicio, elemento tetravalente di numero atomico 14; in esso occorre però maggiore energia per rompere i legami covalenti. Ne deriva che, a temperatura ordinaria, il numero di coppie di elettrone-lacuna presenti è minore che nel germanio e pertanto la sua resistività intrinseca risulta ancora maggiore di quella del germanio, pari a circa $\rho = 640 \Omega m$.

3.3.2 Semiconduttori di tipo *n* e di tipo *p*.

Tracce anche minime di impurità alterano fortemente la conducibilità del germanio; è particolarmente interessante, per la sua applicazione nei transistori, l'effetto che si ha quando l'impurità è costituita da un elemento tri-

valente (boro, gallio, indio) o pentavalente (fosforo, arsenico, antimonio), da elementi, cioè, i cui atomi posseggano rispettivamente tre o cinque elettroni di valenza invece dei quattro del germanio.

5 B Boro 10,81	6 C Carbonio 12,011	7 N Azoto 14,007
13 Al Alluminio 26,981...	14 Si Silicio 28,085	15 P Fosforo 30,973...
31 Ga Gallio 69,723	32 Ge Germanio 72,63	33 As Arsenico 74,921...
49 In Indio 114,818	50 Sn Stagno 118,710	51 Sb Antimonio 121,760

Figura 3.12: Particolare della tavola periodica degli elementi che interessano i dispositivi semiconduttori

Se tracce di queste sostanze sono mescolate al germanio fuso (ad esempio, in ragione di un atomo estraneo per ogni milione di atomi di germanio), nella cristallizzazione avviene che gli atomi estranei entrano a far parte del reticolo cristallino in maniera identica agli atomi di germanio. Essendo pochissimi rispetto agli atomi di germanio, gli atomi estranei sono normalmente circondati completamente da atomi di germanio. Ciò posto, consideriamo il caso di un atomo estraneo pentavalente, per esempio l'arsenico (As) (si veda la figura 3.13b): i quattro atomi di germanio più vicini formano quattro legami covalenti con quattro dei suoi cinque elettroni di valenza. I quattro elettroni entrano così a far parte della struttura reticolare con legami identici a quelli degli atomi di germanio. Il quinto elettrone di valenza, invece, che non partecipa ai legami covalenti, con una minima energia (sempre presente a temperatura ordinaria) si svincola dall'atomo estraneo e diviene libero di muoversi entro il cristallo (nello stesso modo degli elettroni nati per effetto termico) contribuendo così alla sua conducibilità. L'atomo estraneo, che ha perso il suo quinto elettrone di valenza, diviene uno ione positivo, vincolato al reticolo dai legami covalenti coi quattro atomi di germanio che lo circondano: essendo immobile esso non contribuisce in alcun modo alla conducibilità del cristallo. Nel caso di impurità trivalenti, per esempio il boro (B) (si veda la figura 3.13a), poiché

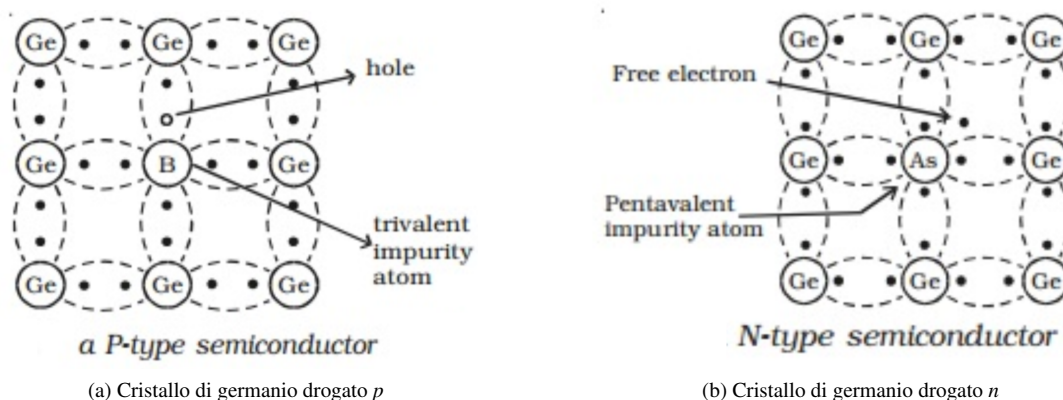


Figura 3.13: Impurità di tipo *n* e *p* all'interno di un cristallo di germanio

ogni atomo estraneo che entra a far parte del reticolo cristallino ha tre soli elettroni di valenza, uno dei quattro legami covalenti che l'uniscono ai quattro atomi di germanio che lo circondano rimane incompleto per assenza di un elettrone. Ciò crea uno squilibrio elettrico, cui corrisponde un intenso campo elettrico, il quale finisce per catturare un elettrone da qualche atomo di germanio adiacente. Quando ciò avviene, l'atomo estraneo (trivalente) viene a possedere un elettrone in più e diviene uno ione negativo che rimane a far parte stabilmente del reticolo

cristallino; il posto lasciato vuoto dall'elettrone catturato si comporta come una carica positiva che si sposta entro il cristallo, cioè è una lacuna che ha il medesimo comportamento delle lacune nate per effetto termico nel germanio puro. Essa contribuisce ad aumentare la conducibilità del cristallo; nessun effetto, invece, ha sulla conducibilità l'ione negativo, che è immobile entro il reticolo.

Dunque, la presenza di atomi estranei pentavalenti dà origine ad altrettanti elettroni liberi, mentre la presenza di atomi estranei trivalenti dà origine ad altrettante lacune. Il numero di elettroni nel primo caso e di lacune nel secondo, generati dalla presenza di tracce anche minime di impurità, è molto maggiore del numero degli elettroni e lacune generati a temperatura ordinaria per effetto termico; pertanto, in presenza di impurità, la conducibilità nel germanio è enormemente maggiore della conducibilità intrinseca, ed è quasi esclusivamente dovuta al movimento di elettroni nel caso di impurità pentavalenti e di lacune nel caso di impurità trivalenti.

I cristalli di germanio puro, cui siano state aggiunte determinate quantità di impurità pentavalenti o trivalenti, sono alla base del funzionamento dei diodi e dei transistori. Il germanio *drogato* (così si usa dire!) con atomi pentavalenti si suole chiamare germanio di tipo *n*, per indicare che la conducibilità è prevalentemente dovuta a cariche negative (elettroni); il germanio drogato con atomi trivalenti si dice di tipo *p*, per indicare che la conducibilità è dovuta a cariche mobili positive.

La conducibilità dei due tipi di germanio dipende dalla percentuale di atomi estranei introdotti nel reticolo cristallino: mentre nel germanio puro, a temperatura ordinaria, è come abbiamo visto di $\rho = 0,5 \Omega m$, con un drogaggio debole (1 atomo estraneo di fronte a 250 milioni di atomi di germanio) la resistività del germanio diviene $\rho = 0,1 \Omega m$. Con un drogaggio moderato (un atomo estraneo ogni 14 milioni di atomi di germanio) la resistività scende a $\rho = 10^{-2} \Omega m$, mentre si abbassa a $\rho = 10^{-4} \Omega m$ nei cristalli fortemente drogati (un atomo estraneo ogni 250000 di germanio); tanto per avere un'idea di questi valori, si tenga presente che la resistività del carbone, usato per le spazzole delle macchine elettriche, è dell'ordine di $\rho = 0,2 \div 1 \cdot 10^{-4} \Omega m$.

Ge puro	Ge drogato 1 atomo su 250 mln	Ge drogato 1 atomo su 14 mln	Ge drogato 1 atomo su 250000
$0.5 \Omega m$	$0.1 \Omega m$	$10^{-2} \Omega m$	$10^{-4} \Omega m$

Figura 3.14: Tabella delle resistività del germanio per diversi livelli di drogaggio.

3.3.3 Meccanismo della conduzione nei semiconduttori di tipo *n* e di tipo *p*

Analizziamo ora il meccanismo con cui avviene il passaggio di corrente in un semiconduttore (germanio o silicio) drogato di tipo *n* o di tipo *p*, collegato esternamente mediante due elettrodi metallici (si veda la figura 3.15). Consideriamo dapprima il conduttore ottenuto con germanio di tipo *n*, indicato nella figura 3.15a. Ricordia-

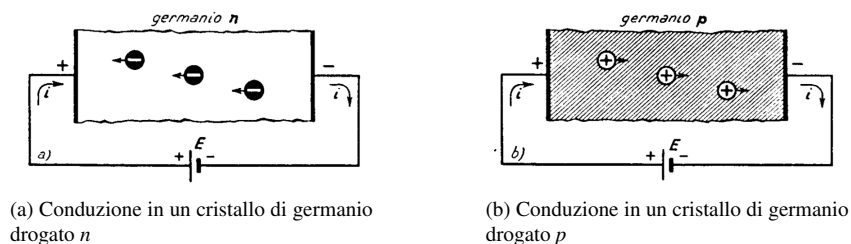


Figura 3.15: Meccanismo di conduzione di un cristallo di germanio drogato *p* o *n*

mo che entro il cristallo vi sono elettroni liberi (simboleggiati in figura dai cerchietti neri), staccatisi dagli atomi estranei pentavalenti; essi si muovono di moto termico fra gli atomi di germanio e gli atomi pentavalenti (ionizzati positivamente) fissati al reticolo cristallino. Se, mediante una tensione E applicata agli elettrodi si crea un campo elettrico, si produce un moto ordinato di elettroni che si spostano respinti dall'elettrodo negativo ed attirati da quello positivo. Man mano che gli elettroni giungono nelle vicinanze dell'elettrodo positivo, essi vengono catturati

da questo e immessi nel circuito esterno: contemporaneamente nel cristallo, vicino all'elettrodo negativo, viene a crearsi una regione vuota di elettroni, nella quale predomina quindi la carica positiva degli ioni vincolati al cristallo (non più controbilanciata dalla carica distribuita degli elettroni liberi). Tale carica esercita un effetto attrattivo sugli elettroni presenti nell'elettrodo negativo: questi, pertanto, dal circuito esterno penetrano nel cristallo, in misura tale da controbilanciare la fuoriuscita di elettroni che si ha dall'altra parte verso il circuito esterno. In definitiva si ha un continuo flusso di elettroni, cioè una corrente elettronica, sia attraverso il cristallo che nel circuito esterno e quindi una corrente i che ha il verso convenzionale indicato in figura.

Diversa è la situazione nel conduttore attuato con semiconduttore di tipo p , indicata nella figura 3.15b, in esso gli atomi trivalenti estranei si sono impossessati ciascuno di un elettrone appartenente ad atomi di germanio, divenendo ioni negativi. Il posto lasciato vuoto dall'elettrone sottratto viene occupato da un elettrone strappato ad un altro atomo e così via. Dunque, mentre gli ioni negativi estranei e gli atomi di germanio sono immobili nel reticolo, il posto vuoto si sposta casualmente come fosse un elettrone libero positivo (lacuna). In presenza di tensione E applicata ai due elettrodi metallici, il moto delle lacune acquista un carattere preferenziale verso l'elettrodo negativo; da questo le lacune attirano elettroni e con essi si combinano neutralizzandosi. Contemporaneamente, dalla parte opposta del cristallo, l'elettrodo positivo strappa elettroni nelle immediate adiacenze, dando origine ad altrettante lacune che si spostano verso l'elettrodo negativo, e così via. In definitiva, quindi, dalla parte dell'elettrodo negativo entrano nel cristallo elettroni che neutralizzano le lacune; dall'altra parte vengono strappati elettroni dal cristallo (ed immessi nel circuito esterno) con conseguente formazione di lacune. Nel circuito esterno vi è ancora (e non può essere altrimenti) una corrente elettronica come nel caso della figura 3.15b, mentre entro il cristallo vi è un moto di cariche positive: il verso convenzionale della corrente i che scorre nel circuito coincide col senso del moto delle lacune.

Per completare il quadro della conduzione nei cristalli drogati p e n occorre tenere conto della conduzione intrinseca; indipendentemente dall'esistenza delle impurità, nel cristallo si ha la formazione di un certo numero di coppie elettrone-lacuna per effetto termico. Perciò nel germanio n , oltre agli elettroni (cariche mobili, o portatori di maggioranza) vi sono sempre anche lacune (portatori di minoranza) che partecipano, sia pure in misura assai minore, alla conduzione. Analogamente nel germanio p , se è vero che i portatori di maggioranza sono le lacune, vi sono anche degli elettroni (portatori di minoranza) che partecipano alla conduzione. A temperatura ordinaria i portatori di minoranza hanno effetto scarso sulla conduzione (seppure non trascurabile), ma acquistano importanza sempre maggiore al crescere della temperatura perché il numero di coppie generate per effetto termico cresce con la temperatura.

3.3.4 Diodo a giunzione $p-n$

Se due cristalli di germanio (o di silicio), uno di tipo p e l'altro di tipo n , sono portati a contatto intimo fra loro, ha luogo un fenomeno interessante: alcune lacune del germanio p e alcuni elettroni del germanio n , nel loro incessante moto caotico, attraversano la giunzione - cioè la superficie di contatto fra i due tipi di germanio - continuando a muoversi dalla parte opposta. I due cristalli di germanio, che originariamente erano allo stato neutro, tendono ora ad assumere una carica diversa: il germanio p (Ge- p) acquista una carica negativa, perché perde lacune che penetrano nel germanio n e riceve elettroni da questo; il germanio n (Ge- n) acquista invece una carica positiva, perché perde elettroni e riceve lacune dal Ge- p (si veda la figura 3.16). Con questo processo automatico di carica, però, si viene a creare una barriera di potenziale attraverso la giunzione che si oppone al moto delle cariche attraverso essa: infatti il Ge- n (che si porta a potenziale positivo rispetto a quello p) respinge le lacune del Ge- p che tendessero ad avvicinarsi alla giunzione, mentre il Ge- p , che diviene negativo, respinge gli elettroni che dal Ge- n tendessero ad attraversare la giunzione. In definitiva, fra i due cristalli di germanio si stabilisce a regime una differenza di potenziale tale che ogni corrente attraverso la giunzione è resa impossibile: il complesso dei due cristalli di germanio è divenuto qualcosa di analogo ad un condensatore carico.

Connettiamo ora due elettrodi metallici ai cristalli di germanio della giunzione e applichiamo una differenza di potenziale fra loro (figura 3.17). Se la polarizzazione è tale da aumentare la barriera di potenziale esistente fra il germanio p e quello n (polarizzazione *inversa*), nessuna corrente è possibile attraverso alla giunzione. Se invece la differenza di potenziale applicata è tale da eliminare la barriera di potenziale, il fluire di lacune dal germanio p

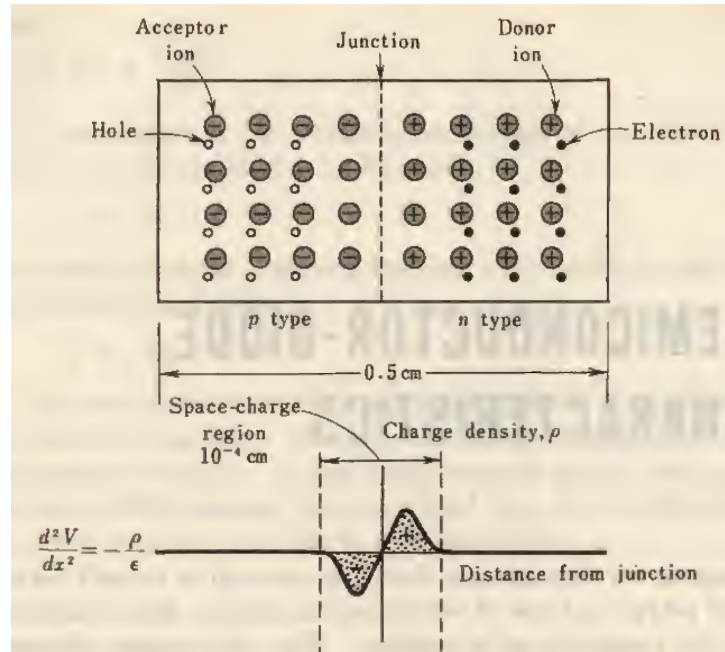


Figura 3.16: Barriera di potenziale di una giunzione $p-n$

al germanio n e degli elettroni dal germanio n a quello p non trova alcun ostacolo, e avviene con le caratteristiche viste precedentemente. Si ha dunque una corrente nel circuito che ha il verso convenzionale indicato nella figura 3.17b (corrente entrante nel Ge- p ed uscente dal Ge- n): se la tensione applicata è tale non soltanto da eliminare la barriera di potenziale ma addirittura da creare una differenza di potenziale in senso opposto (Ge- p positivo rispetto al Ge- n) il moto delle lacune e degli elettroni è agevolato, e la corrente ha valore maggiore. In base a ciò si deduce che la giunzione $p-n$ ha proprietà conduttrici unidirezionali: essa lascia passare corrente (nel verso $p-n$) solo quando la tensione applicata è tale da rendere positivo il Ge- p rispetto al Ge- n ; questa condizione è detta di *polarizzazione diretta*.

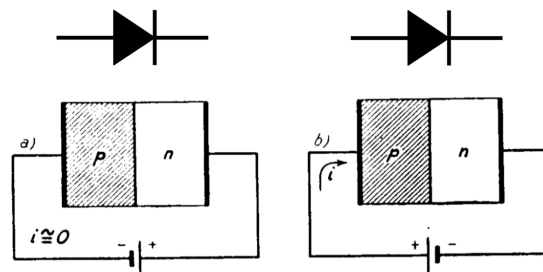


Figura 3.17: Diodo polarizzato inversamente (a) e direttamente (b)

L'esistenza di un verso preferenziale nel passaggio di corrente attraverso la giunzione $p-n$ è alla base del funzionamento dei diodi a semiconduttore. Tali dispositivi, grazie alla loro conduzione praticamente unilaterale, possono essere usati come raddrizzatori in alternativa dei tubi a vuoto. Come per questi, la conoscenza fondamentale delle proprietà dei diodi a giunzione si ottiene dall'esame della curva caratteristica, ottenuta determinando sperimentalmente il valore della corrente in funzione della tensione applicata fra gli elettrodi della giunzione.

Nella figura 3.18a è indicato l'andamento generale della caratteristica di un diodo commerciale al germanio, usato quale raddrizzatore per alimentatori: tale andamento è grosso modo assimilabile a quello della caratteristica di un diodo a vuoto, ma ne differisce sia per gli ordini di grandezza delle tensioni e delle correnti, sia per l'esistenza di una corrente inversa non nulla, ma anche per la diversa legge che lega tensione e corrente, che in questo caso è di tipo esponenziale

$$I_a = I_d \left(e^{\frac{V_a}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Nella relazione (3.3) I_d è la corrente di diffusione della giunzione, η è una costante che vale circa 1 per il germanio e 2 per il silicio, mentre V_T è una tensione equivalente dovuta alla temperatura, di valore pari a circa $26mV$. L'andamento della corrente inversa, mal deducibile dalla figura 3.18a, è riportato in scala più ampia nella figura 3.18b; la corrente è nulla quando è nulla la differenza di potenziale fra gli elettrodi, ma cresce al crescere della tensione inversa fino a raggiungere un valore massimo costante, detta *corrente inversa di saturazione* I_{C0} ; essa corrisponde al moto di tutte le coppie elettrone-lacuna generate per effetto termico: il suo valore dipende fortemente dalla temperatura.

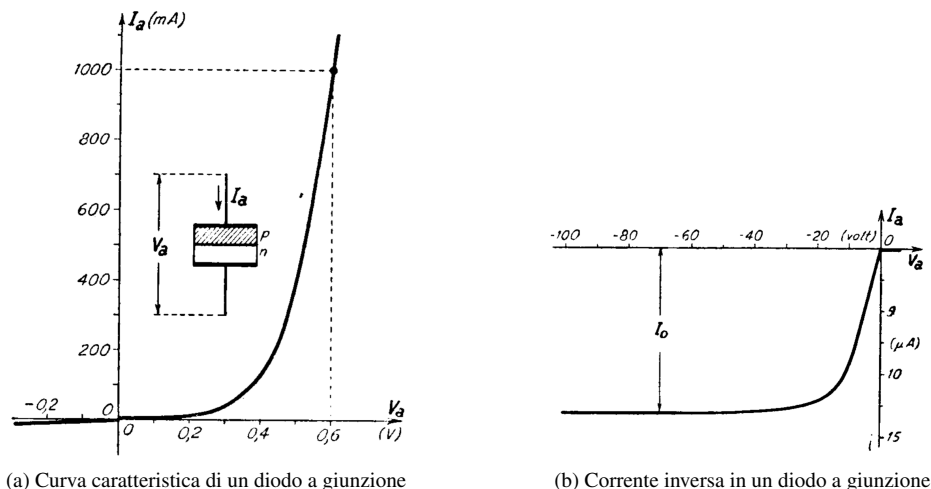


Figura 3.18: Curva caratteristica e corrente inversa per un diodo a giunzione

Le proprietà raddrizzatrici del diodo a giunzione risultano evidenti osservando che la corrente diretta di figura 3.18a ha il valore di $1 A$ per una tensione applicata di soli $0,6 V$, mentre occorrono $10 V$ di tensione inversa per ottenere una corrente di una decina di microampere, e anche con tensioni assai forti non si raggiungono $15 \mu A$. I valori descritti sono particolari del diodo considerato, ma i rapporti fra corrente diretta ed inversa rimangono sostanzialmente i medesimi in ogni caso. Nei diodi al silicio, anzi, la corrente inversa è, in proporzione, ancora minore; per contro la sua dipendenza dalla temperatura è più sentita nei diodi al silicio che in quelli al germanio. La forte corrente diretta che i diodi a giunzione sono in grado di far passare con tensioni applicate piccolissime, rappresenta un vantaggio notevole rispetto ai diodi a vuoto, sfruttabile specialmente nel raddrizzamento delle correnti alternate.

3.3.5 La struttura del transistor

Supponiamo ora che nella giunzione $p-n$ uno dei due elementi della stessa, ad esempio il germanio di tipo n , sia drogato molto più debolmente rispetto all'altro. Allora il numero di elettroni che si muovono all'interno della giunzione è molto minore di quello delle lacune, e si viene ad avere la singolare situazione in cui nel germanio n si muovono più lacune che elettroni: in tali condizioni si suole dire che si è avuta iniezione di lacune dal germanio

p al germanio n . Similmente si può fare in modo che sia il germanio p a essere drogato molto più debolmente rispetto al germanio n . In tal caso si avrà un'iniezione di elettroni dal germanio n al germanio p . Nell'uno o nell'altro caso, se uno dei due elementi della giunzione è drogato debolmente, il numero delle sue cariche libere è piccolo e quindi è piccolo in proporzione anche il numero degli elettroni e lacune che incontrandosi fra loro si neutralizzano. Piccola, pertanto, risulta la corrente nel circuito esterno: in effetti, con un drogaggio molto leggero di uno dei due elementi della giunzione, è possibile mantenere le due parti allo stesso potenziale con una corrente molto esigua.

Il processo di emissione, con l'inevitabile, seppure piccolo, passaggio di corrente nel circuito di polarizzazione della giunzione, è fondamentale per il funzionamento del transistor: la parte di giunzione drogata debolmente si dice *base*, mentre si dice *emettitore* il cristallo più drogato. Se l'emettitore è un cristallo di tipo p esso inietta lacune nella base che è di tipo n (fig. 3.19a); se l'emettitore è un cristallo di tipo n , esso inietta elettroni nella base di tipo p (fig. 3.19b).

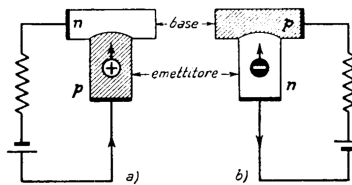


Figura 3.19: Base ed emettitore in due giunzioni $p-n$ e $n-p$

Se sulla base viene saldato un secondo elemento di germanio dello stesso tipo di quello dell'emettitore, che si dice *collettore*, si realizza un *transistore*, che è un dispositivo a tre elettrodi; la costituzione schematica del transistor risulta pertanto quella indicata nella figura 3.20

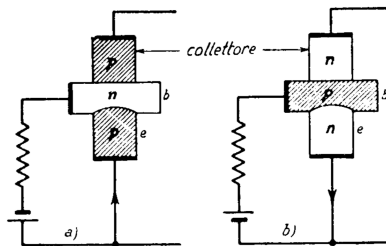


Figura 3.20: Transistor di tipo pnp e npn

Si hanno dunque, a seconda del tipo di germanio prescelto per l'emettitore, due tipi diversi di transistori che si denominano rispettivamente pnp (fig. 3.20a) e npn (fig. 3.20b).

Consideriamo ora il transistor di tipo npn ; nell'ipotesi che, mediante una tensione esterna V_{be} tra base ed emettitore, la base sia mantenuta a un potenziale maggiore di quello dell'emettitore, gli elettroni di questo si muovono liberamente attraverso la giunzione np , si diffondono entro alla base e, attraverso questa, entrano nel collettore. Se questo venisse lasciato isolato (come in fig. 3.20b) esso si caricherebbe negativamente, a causa dell'apporto di elettroni, e ogni diffusione di questi dalla base cesserebbe. Se invece, com'è indicato nella figura 3.21a, il collettore è polarizzato positivamente rispetto all'emettitore (e di conseguenza alla base), gli elettroni penetrati nel collettore si dirigono verso l'elettrodo positivo e attraverso esso ritornano all'emettitore tramite il circuito esterno.

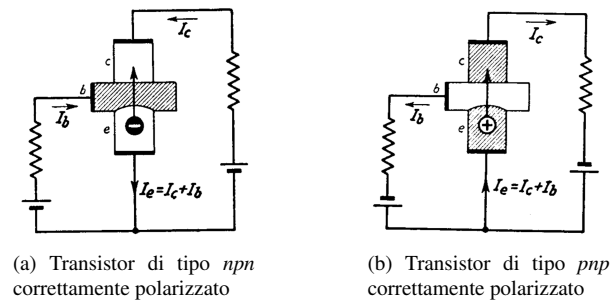


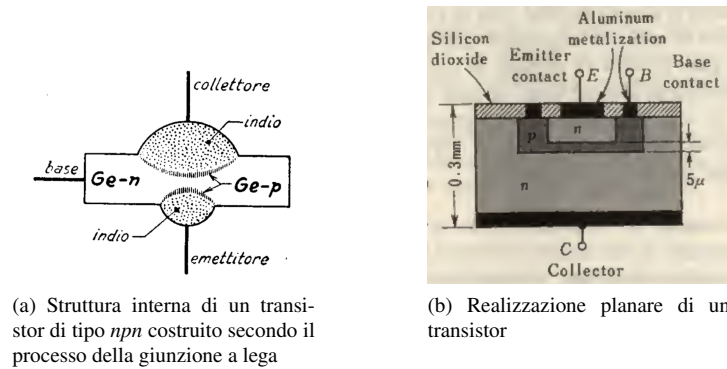
Figura 3.21: Polarizzazione dei transistor dei due tipi

Si ottiene in tal modo una corrente I_c nel circuito collettore-emettitore, il cui valore può essere anche assai ragguardevole, specialmente se confrontato con quello della corrente I_b , che si ha nel circuito di polarizzazione della base. La corrente I_c viene sfruttata nel funzionamento del transistor così come accade per la corrente anodica nei tubi elettronici; il suo valore può essere regolato con grande facilità agendo sulla differenza di potenziale fra base ed emettitore.

Se aumentiamo la tensione V_{be} tra base ed emettitore, un maggior numero di elettroni penetra nella base e diffondendosi attraverso essa entra nel collettore. Qui gli elettroni si dirigono verso l'elettrodo positivo e da questo entrano nel circuito esterno producendo un aumento della corrente.

Se, viceversa, la tensione V_{be} viene diminuita, diminuisce il numero di elettroni iniettati nella base e quindi la corrente nel collettore. In definitiva, come nel triodo si ha una corrente anodica agevolmente regolabile dalla tensione di griglia, così nel transistor si ha una corrente di collettore il cui valore è facilmente regolabile agendo sulla differenza di potenziale fra base ed emettitore. Occorre però tenere sempre presente che, a differenza di quanto accade normalmente per i triodi, nel circuito di regolazione base-emettitore circola una corrente I_b che provvede a reintegrare nella base le cariche positive (lacune) neutralizzate dagli elettroni in transito; il suo valore dipende, come quello di I_c , dalla differenza di potenziale fra base ed emettitore, ma è sempre molto più piccolo di I_c .

Quanto è stato detto per i transistori *npn* vale anche, coi dovuti cambiamenti di segno, per i transistori *pnp*. In questi (fig. 3.21b) il collettore deve essere polarizzato negativamente rispetto all'emettitore e alla base, per favorire il deflusso delle lacune dalla base al collettore; le lacune si dirigono allora verso l'elettrodo negativo del collettore, e ivi si neutralizzano a spese di elettroni che giungono dal circuito esterno. Sono tali elettroni che nel circuito esterno danno luogo alla corrente I_c (corrente di collettore) che naturalmente ha verso opposto a quella che si ha nei transistori *npn*; anche la corrente di base, che provvede a reintegrare nella base gli elettroni catturati dalle lacune in transito, ha segno opposto a quella che si ha nei transistori *npn*. L'azione di comando sulla corrente di collettore da parte della V_{be} si esplica nei transistori *pnp* come in quelli *npn*; più in generale, a parte i segni, non c'è una differenza essenziale di funzionamento fra i transistori dei due tipi. Non esiste, invece, per i transistori *pnp*, la possibilità di stabilire un'analogia coi triodi, a causa dei segni delle correnti e delle tensioni che sono opposte, dato che entro il transistor *pnp* si muovono cariche positive (lacune), mentre nel triodo si muovono solo elettroni. Nella figura 3.22a si vede la struttura di un transistor realizzato secondo la tecnica più frequente per i transistor di piccole potenze, quella della *giunzione a lega*. Si parte da una piastrina di germanio, tagliata da un cristallo di tipo *n*, che costituirà la base; sulle due facce di essa si comprimono due dischetti di indio (elemento trivalente) e il tutto viene posto entro appositi forni, e portato a una temperatura tale che le gocce di indio fondano. L'indio fuso si dissolve parzialmente entro il germanio formando una lega con esso; arrestando al momento giusto questo processo si vengono a ottenere, fra la lega di indio e il germanio, due regioni di separazione, che risultano di tipo *p*. Sono tali regioni, insieme con la zona centrale di tipo *n*, che costituiscono il transistor; gli elettrodi sono poi saldati alle due gocce d'indio e a un fianco della piastrina di germanio. Le due gocce d'indio sono di dimensioni diverse, così che una delle regioni di tipo *p* risulta più vasta dell'altra; essa è usata per il collettore onde rendere più agevole la raccolta delle lacune che dall'emettitore giungono attraverso la base, resa sottilissima nella zona interposta fra emettitore e collettore. La figura 3.22b mostra invece la struttura di tipo *planare* per i transistor, usate per potenze maggiori e per la realizzazione dei transistor all'interno dei circuiti integrati.



(a) Struttura interna di un transistor di tipo npn costruito secondo il processo della giunzione a lega
 (b) Realizzazione planare di un transistor

Figura 3.22: Due diverse tecniche di costruzione di un transistor

3.3.6 Curve caratteristiche di uscita del transistor

Anche per il transistor è possibile tracciare una serie di curve caratteristiche, che servono per capire il comportamento dello stesso e per dimensionare i vari circuiti di polarizzazione. Nei corsi di Elettronica si studieranno nel dettaglio tutte le possibili configurazioni (emettitore comune, base comune, ecc) e le soluzioni circuitali (push-pull, totem-pole, darlington...); per i nostri scopi è sufficiente capire il funzionamento di base. Contrariamente al triodo, il cui circuito d'ingresso non assorbe corrente e dunque potenza, il circuito d'ingresso del transistor, dato dalla base, viene comandato in corrente; ecco allora che le curve d'uscita sono a corrente costante. Se riportiamo su un diagramma la variazione della corrente di collettore in funzione della tensione di collettore, per valori costanti della corrente di base, si ottengono le curve caratteristiche del transistor rappresentate in figura 3.23. Si può osservare che, fissata una certa corrente di base (p.es. $I_b = -50 \mu A$), l'andamento qualitativo della

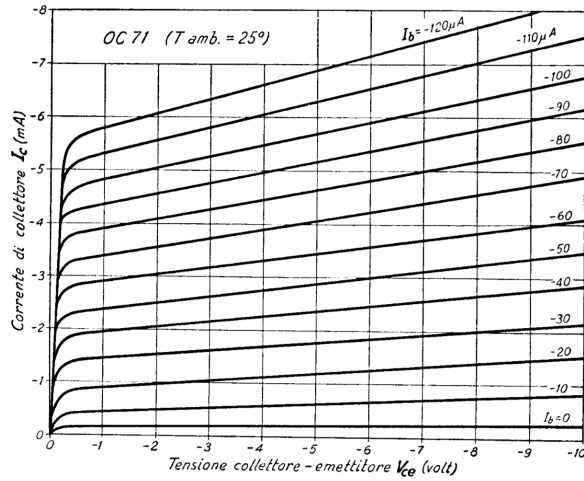


Figura 3.23: Curve caratteristiche di un transistor pnp

curva è piuttosto diverso da quello del triodo; la curva è data sostanzialmente dalla composizione di due rette, raccordate da una curva a gomito. Ciò significa che il transistor ha due zone di funzionamento ben distinte, quella prima del gomito, chiamata regione di saturazione, e quella dopo il gomito, che è la regione attiva, di normale impiego quando si usa il transistor come amplificatore. Se scendiamo con la I_b su valori prossimi o uguali a $0V$, per ottenere una certa corrente di collettore (p.es. $0, 2mA$) dobbiamo aumentare in modo molto significativo la tensione V_{CE} tra collettore ed emettitore. Se invece manteniamo costante la tensione V_{CE} , polarizzando debolmente in modo contrario la giunzione base-emettitore si arriva

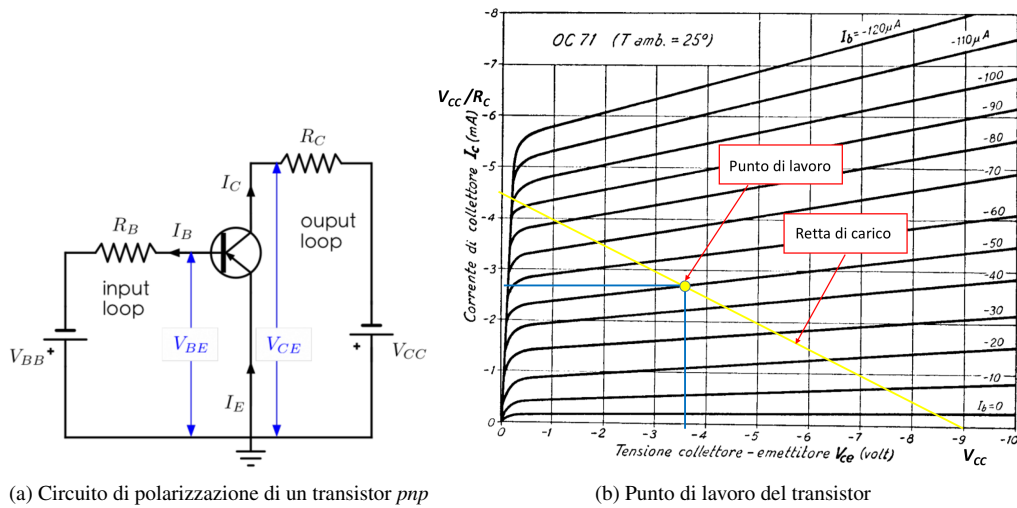


Figura 3.24: Circuito di polarizzazione e punto di un transistor *pnp*

all'interdizione, cioè al blocco della corrente di collettore.

A parte il fatto che il transistor è comandato in corrente, e che rispetto al triodo ha delle curve di forma diversa, per il resto il dimensionamento del circuito procede come per il triodo. Nel circuito di figura 3.24a il transistor è alimentato da una tensione V_{CC} tramite la resistenza di carico R_C . La somma della tensione V_{CE} e di quella ai capi della resistenza deve equilibrare la tensione V_{CC} . Se la tensione V_{CC} va a zero (p.es. a seguito di un cortocircuito tra gli elettrodi del transistor), la corrente di collettore vale $I_C = V_{CC}/R_C$. Questa condizione di funzionamento corrisponde al punto all'estrema sinistra sulla retta gialla di figura 3.24b, sull'asse delle ordinate, in corrispondenza di $I_C = -4,5 \text{ mA}$ (in questo caso si è assunto che sia $R_C = 2 \text{ k}\Omega$). Se invece polarizziamo inversamente la giunzione base-emettitore, non scorre più corrente sul circuito di uscita, la caduta di tensione sulla R_C è nulla e tutta la tensione V_{CC} di alimentazione si presenta ai capi del transistor, cioè $V_{CE} = V_{CC}$. Questa condizione di funzionamento corrisponde al punto all'estrema destra sulla retta gialla di figura 3.24b, sull'asse delle ascisse, in corrispondenza di $V_a = -9 \text{ V}$. Qualunque altro punto di lavoro intermedio tra questi due estremi giace sulla retta gialla, chiamata anche in questo caso *retta di carico*. Per variare il punto di lavoro basta variare la corrente di base; se usiamo il valore $I_b = -50 \mu\text{A}$, il punto di lavoro si trova intersecando la curva per $I_b = -50 \mu\text{A}$ costante con la retta di carico, come si vede in figura 3.24b; per questa condizione si possono leggere direttamente sul diagramma la tensione e la corrente di collettore; i valori sono rispettivamente $V_a = -3,6 \text{ V}$ e $I_a = -2,7 \text{ mA}$. Senza entrare nel merito delle equazioni di funzionamento del transistor, che sono alquanto complesse e che fanno riferimento al modello matematico di *Ebers-Mall*, possiamo solo dire che, così come succede per il triodo, una piccola variazione della grandezza d'ingresso - in questo caso la corrente I_B - determina una rilevante variazione della grandezza d'uscita, cioè la corrente di collettore. Il fenomeno è ben evidente dalla figura 3.24b: se spostiamo il punto di lavoro incrementando la corrente di base al valore $I_B = -70 \mu\text{A}$, la corrente di collettore I_C varia da $I_a = -2,7 \text{ mA}$ a $I_a = -3,5 \text{ mA}$, determinando un rapporto $\Delta I_C/\Delta I_B$ pari a 35. In prima approssimazione, e limitatamente al caso dei grandi segnali, l'equazione che lega la I_C alla I_B è la seguente

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0} \quad (3.4)$$

dove I_{CB0} è la *corrente inversa di saturazione* tra base e collettore, mentre β rappresenta il *guadagno di corrente*. Il punto di lavoro del transistor illustrato in figura 3.24b è quello che si usa nell'elettronica analogica, quando si vuole impiegare il transistor come amplificatore. Nel nostro caso dobbiamo invece usare il transistor come interruttore comandato; questa funzionalità è evidenziata nella figura 3.25 ed è quella associata alla logica Booleana. Se la corrente di base supera il valore $I_B = -100 \mu\text{A}$, allora la tensione V_{CE} diventa indipendente da I_B e si attesta su un valore praticamente costante V_{CEsat} , detto *tensione di saturazione* che vale circa $0,2 - 0,3 \text{ V}$ per il germanio e $0,6 - 0,7$ per il silicio. Questa è una condizione di piena conduzione, che possiamo associare alla

variabile logica 1.

Se invece imponiamo polarizziamo in modo debolmente inverso la giunzione base-emettitore, portiamo il transistor in interdizione, la corrente di collettore si annulla e questa condizione viene associata alla variabile logica 0. Anche in questo caso la corrispondenza è del tutto convenzionale (si potrebbe invertire 0 con 1) e la si potrebbe attuare anche rispetto alla tensione V_C , in modo che, p.es., la condizione di interdizione caratterizzata da $V_{CE} = -9 V$ corrisponda a 1, mentre la condizione di saturazione caratterizzata da $V_{CE} = 0,2 V$ corrisponda a 0.

Subito dopo i primi computer a tubi, tra cui il famoso ENIAC, i transistor presero rapidamente il sopravvento, visto che tra le due tecnologie esiste un rapporto di volumi e di potenze di diversi ordini di grandezza. Tanto per fare un paragone si pensi che l'ENIAC, il primo calcolatore interamente elettronico, funzionava grazie a 17468 tubi termoionici, equivalenti ad altrettanti transistor, e utilizzava 160 kW di potenza elettrica praticamente solo per tenerli accesi (pari alla potenza richiesta da 80 forni elettrici di tipo domestico). Un moderno computer contiene miliardi di transistori e consuma più o meno un millesimo di quella potenza.

I transistor offrono in genere vantaggi enormi rispetto ai tubi termoionici, il cui impiego attuale è limitato ad alcune nicchie nell'ambito industriale, dove servono tensioni di lavoro di oltre 20kV. Ma l'aspetto più rilevante è che grazie alla tecnologia planare, cui abbiamo fatto cenno in figura 3.22b la tecnologia dei transistor apre la strada a quella dell'integrazione su larga scala, che porta ai circuiti integrati, costituiti da miliardi di transistor e altri componenti integrati su un unico chip di silicio.

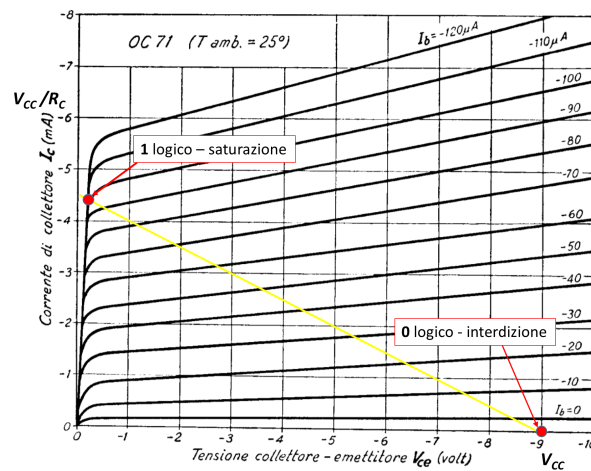


Figura 3.25: Transistor usato secondo la logica binaria