

Componentistica elettronica: cenni

Componenti e caratterizzazione del loro comportamento

La tecnologia dei componenti a vuoto

La tecnologia dei componenti a semiconduttori



Luca Mari, Strumentazione Elettronica di Misura

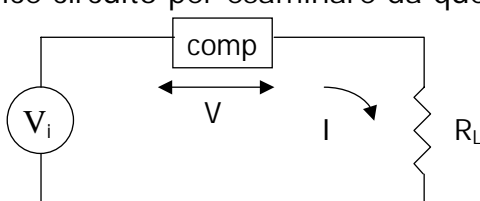
Il comportamento dei componenti

Sappiamo dall'elettrotecnica che il *comportamento elettrico* di un componente può essere descritto dalla relazione funzionale (V,I) ai suoi morsetti

spesso scritto nella forma $I=f(V)$, come nel caso della legge di Ohm, $I = \frac{1}{R} V$

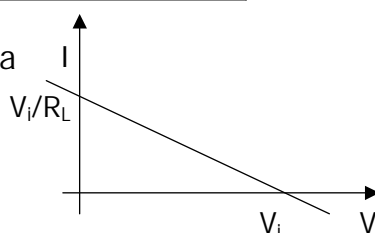
e rappresentato graficamente su un piano (V,I)

Un semplice circuito per esaminare da questo punto di vista un generico componente è:



$$V_i = V + R_L I, \text{ cioè } I = \frac{V_i}{R_L} - \frac{1}{R_L} V$$

L'equazione determina la "retta di carico":

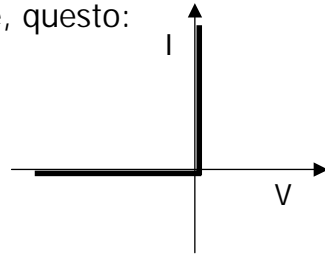


su cui giace il "punto di lavoro" del componente, individuato dall'intersezione con la caratteristica del componente

Oltre l'elettrotecnica tradizionale ...

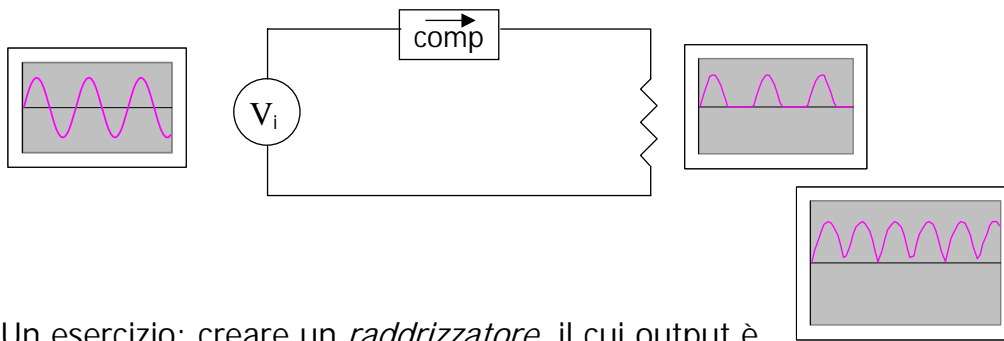
Supponiamo di voler ottenere da un componente un comportamento *fortemente* non lineare come, idealmente, questo:

un cancello di sola andata



Con i tradizionali componenti dell'elettrotecnica non è facile ...

Se disponessimo di un componente con questo comportamento potremmo ...

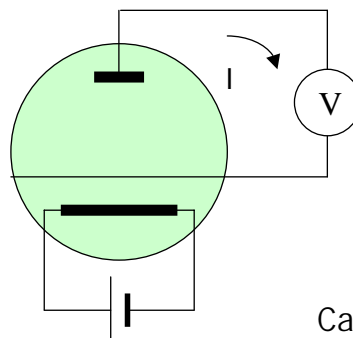


Un esercizio: creare un *raddrizzatore*, il cui output è

Componenti a vuoto

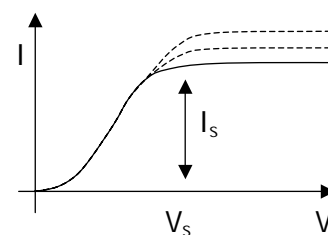
Effetto termoelettronico: un metallo portato all'incandescenza nel vuoto emette elettroni (il riscaldamento fornisce un'energia cinetica sufficiente a superare la barriera di potenziale)

Applicazione: il diodo a vuoto

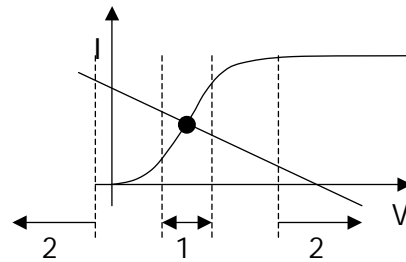
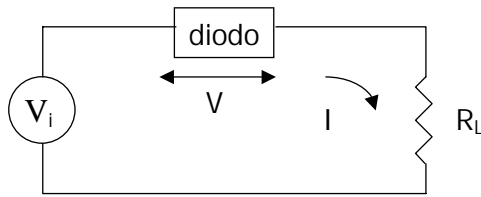


Caratteristica del diodo *reale*

- Peculiarità:
- corrente anodica (solo da placca a filamento)
- effetto di saturazione (tutti gli elettroni emessi vengono raccolti)
- dipendenza dalla temperatura del filamento solo per la corrente di saturazione



Regime di funzionamento del diodo

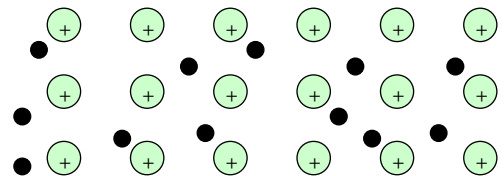


In funzione dei valori V_i e R_L si sceglie il punto di lavoro del diodo:

- in zona 1: lineare
- in zona 2: saturazione ("passa" – "non passa")

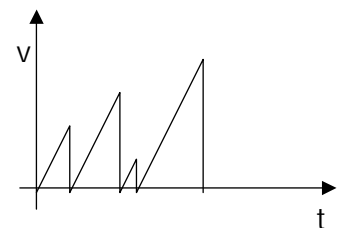
Un richiamo: la conduzione nei conduttori

Nei conduttori gli elettroni di valenza (la cui presenza mantiene il cristallo elettricamente neutro) sono liberi di spostarsi nel reticolo cristallino



L'energia cinetica fornita dall'ambiente mantiene tali elettroni in un movimento casuale ("rumore elettronico")

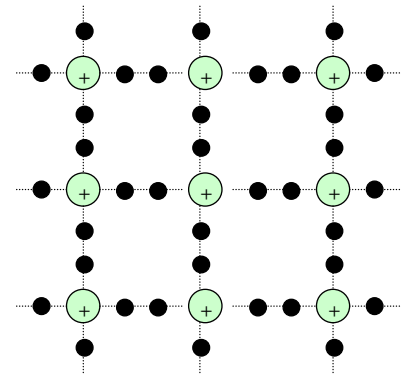
Con l'applicazione di una differenza di potenziale la velocità di ogni elettrone cresce costantemente ... fino a che l'elettrone non collide con uno ione del cristallo



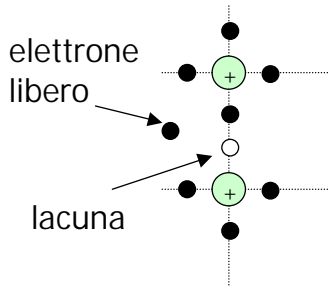
Si stabilisce così una *velocità media di deriva* degli elettroni, il cui effetto è una corrente elettrica

La struttura elettrica dei semiconduttori

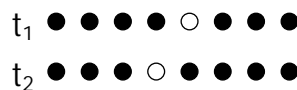
Il silicio ha una struttura cristallina tetraedrica (qui in 2D), con quattro legami covalenti: gli elettroni di valenza contribuiscono a mantenere la struttura: → il silicio puro a 0 °C è un isolante



A temperatura ambiente i deboli legami covalenti possono rompersi, contemporaneamente *liberando un elettrone* disponibile alla conduzione e *generando una lacuna*



Statisticamente ogni elettrone libero si ricombina con una lacuna. Applicando una differenza di potenziale, le ricombinazioni si realizzano secondo una direzione coerente al campo applicato:



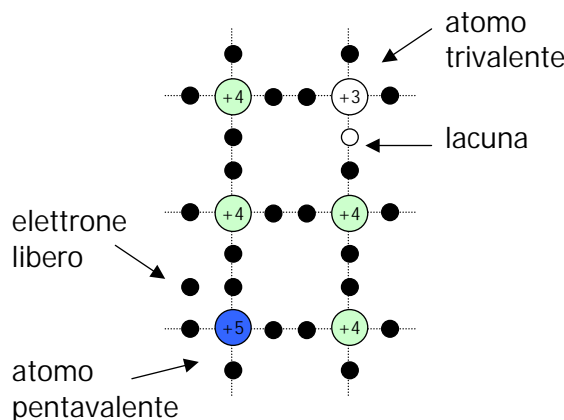
con l'effetto di una *corrente bipolare*, di elettroni e di lacune

Il drogaggio

E' possibile introdurre nel cristallo delle impurità, nella forma di atomi con diversa valenza rispetto all'elemento di base:

pentavalenti ("donori", "droganti di tipo n"): 1 elettrone non coinvolto nei legami covalenti, e quindi libero per la conduzione (p.es. antimonio, fosforo, arsenico)

Conduzione "di tipo n" prevalente



trivalenti ("accettori", "droganti di tipo p"): 1 elettrone mancante nei legami covalenti, e quindi una lacuna libera per la conduzione (p.es. boro, gallio, indio)

Conduzione "di tipo p" prevalente

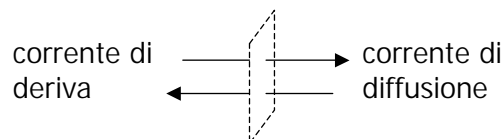
Anche un limitato drogaggio modifica in modo rilevante la conduttività del semiconduttore (con impurità per 1 parte su 10^8 la conduttività del Si a 30 °C aumenta di un fattore 20000)

Diffusione e campi elettrici

Un cristallo di materiale semiconduttore viene drogato, per esempio, con donori, in modo non uniforme:



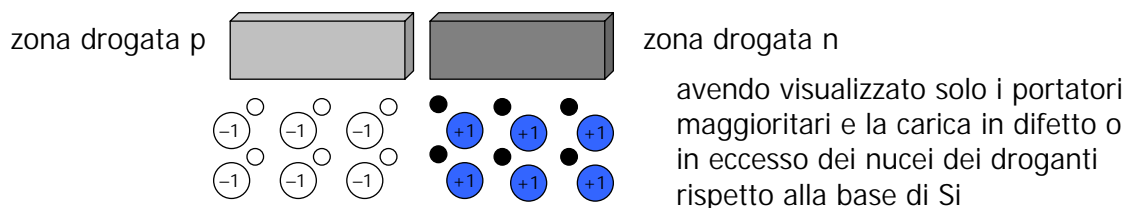
Essendo il cristallo elettricamente isolato, non può generarsi alcuna corrente stabile: l'effetto statistico di diffusione viene compensato da una corrente (inversa) di deriva, causata dal campo elettrico che si stabilisce nel cristallo proprio a causa del drogaggio non uniforme



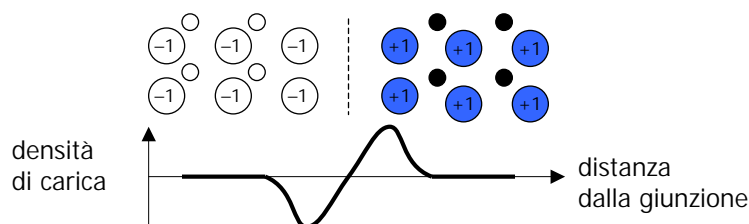
(con continue creazioni di coppie di cariche, per effetto dell'energia termica, e successive ricombinazioni)

Gli effetti più interessanti si ottengono drogando una parte del cristallo con donori e una parte con accettori ...

La giunzione p-n



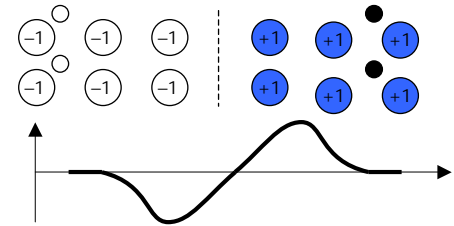
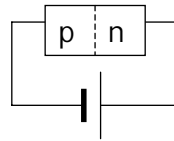
Non appena si crea la giunzione, a partire da gradienti di concentrazione molto elevati ...
 ... per diffusione i portatori dalla regione in cui sono maggioritari si portano nella regione in cui sono minoritari, lasciando "scoperti" i nuclei a cui appartengono ...



... generando così nella zona della giunzione un campo elettrico che compensa la tendenza alla diffusione dei portatori liberi con una tendenza di deriva: all'equilibrio, si stabilisce una "zona di svuotamento" (0,5 μm), in cui sono assenti portatori liberi

La giunzione p-n: polarizzazione inversa

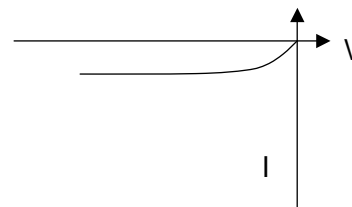
In polarizzazione inversa:



i portatori sono attratti lontano dalla giunzione e la zona di svuotamento si allarga:

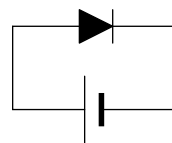
poiché la zona n non può fornire lacune e la zona p non può fornire elettroni, nominalmente non si stabilisce alcuna corrente

In effetti, a causa della creazione di cariche per effetto dell'energia termica si osserva una piccola corrente "di saturazione inversa", la cui intensità dipende quindi dalla temperatura



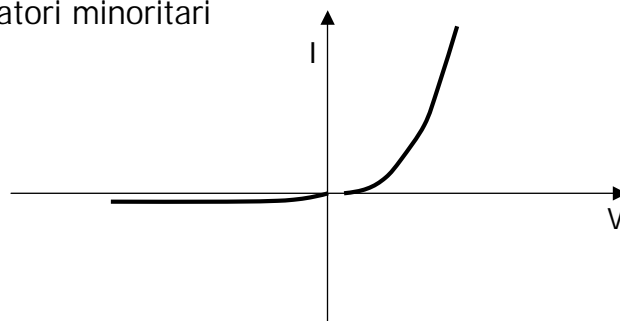
La giunzione p-n: polarizzazione diretta

In polarizzazione diretta:



avendo introdotto il simbolo del diodo ...

la differenza di potenziale esterna riduce l'effetto del campo elettrico interno che compensava le correnti di diffusione (lacune in zona n e elettroni in zona p), che si possono stabilire e si mantengono, generando una corrente stabile (due correnti i cui effetti si sommano) di portatori minoritari

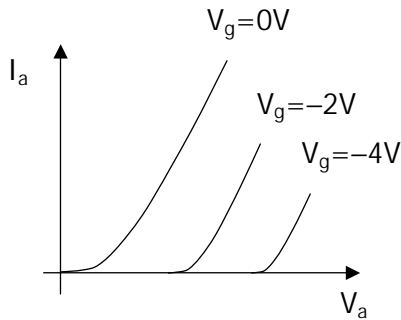
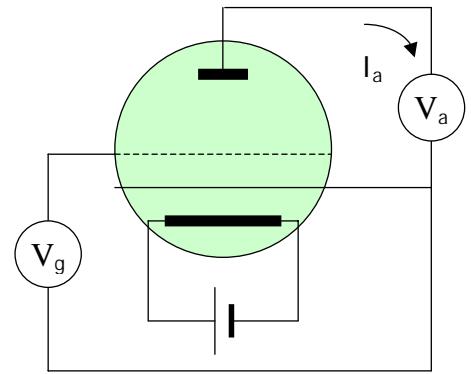


Proprio come il diodo a vuoto, la giunzione p-n si comporta da raddrizzatore ...

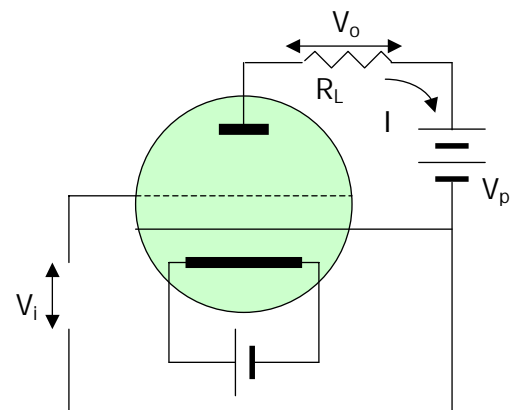
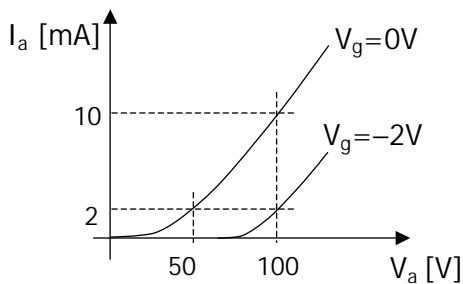
Il triodo

Un diverso componente per un diverso comportamento ...

Aggiungiamo a un diodo a vuoto un terzo elettrodo ("griglia"), che gli elettroni emessi dal catodo possono attraversare e polarizzabile autonomamente rispetto all'anodo



Il triodo come amplificatore



Per ridurre I_a da 10 a 2 mA (=produrre una variazione sull'output) si può:

- * mantenere V_g costante (= 0 V) e modificare V_a (da 100 a 50 V)

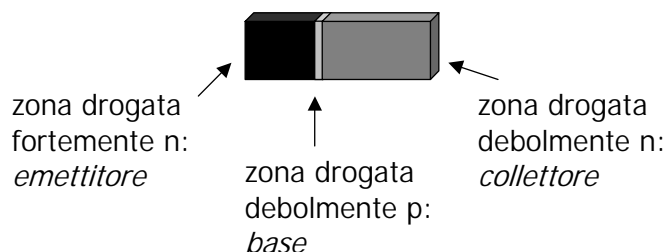
- * mantenere V_a costante (= 100 V) e modificare V_g (da 0 a -2 V)

→ le ΔV_g hanno un effetto molto più marcato delle ΔV_a per controllare le ΔI_a ...

Il transistor

L'effetto di amplificazione si può ottenere con un dispositivo funzionalmente analogo al triodo ma basato sulla tecnologia dei semiconduttori

E' il Bipolar junction transistor (BJT): "bipolare" perché a differenza del triodo, in questo caso la corrente è dovuta sia a cariche maggioritarie sia a cariche minoritarie

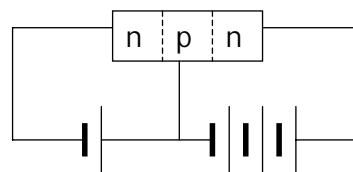


Ricorda: la resistenza di una zona dipende (inversamente) dal suo grado di drogaggio

... come se si trattasse di due diodi *back-to-back* (n-p-n, ma anche p-n-p) con varie modalità di funzionamento, in dipendenza dalle polarizzazioni delle due giunzioni

Il comportamento del transistor

Un esempio di polarizzazione ("a base comune"):



- * A causa del forte drogaggio, l'emettitore è ricco di elettroni di conduzione, che grazie alla polarizzazione diretta entrano nella base
- * Dalla base, molto sottile e poco drogata (quindi con poche lacune con cui gli elettroni potrebbero ricombinarsi), tali elettroni passano al collettore, sotto l'effetto della forte differenza di potenziale applicata tra base e collettore, e quindi nel circuito esterno
- * La corrente di collettore è quindi quasi uguale alla corrente di emettitore
- * Ma mentre la giunzione emettitore-base ha una bassa resistenza, la resistenza della giunzione base-collettore è molto elevata
- * La piccola differenza di potenziale emettitore-base (input) controlla dunque la grande differenza di potenziale base-collettore (output)

Tale effetto è ottenuto mediante un "trasferimento di resistenze" (trans-(res)istor)

Dai componenti ai circuiti

Circuiti a componenti discreti / integrati ibridi / integrati monolitici

L'incremento nella scala di integrazione

Tecnologie a confronto:

componenti a vuoto

Fragilità, limitata affidabilità, potenza necessaria per il riscaldamento del filamento, dimensioni elevate, possibili tensioni di lavoro elevate

componenti a stato solido

Controllo delle proprietà attraverso la cura del processo di fabbricazione, potenze dissipate molto limitate, realizzazione compatta, rapidità di elaborazione per vicinanza fisica tra i componenti, integrabilità