

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

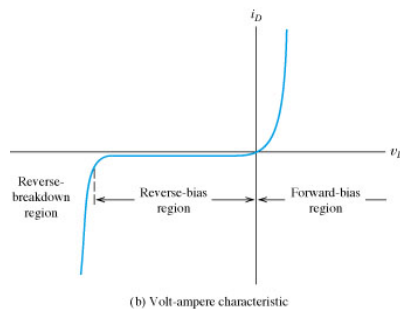
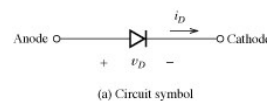
CAP. 3

DIODI E CIRCUITI CON DIODI

- Caratteristica del diodo
- Analisi con retta di carico
- Il modello del diodo ideale
- Circuiti rettificatori, wave-shaping, di clamp e regolatori di tensione
- Modello equivalente ai piccoli segnali
- Concetti base dei semiconduttori
- Semiconduttori n e p
- La giunzione p-n

CARATTERISTICA DEL DIODO

- Il **diodo** è uno dei componenti elettronici più importanti (con i transistor MOSFET e BJT) per le sue numerose applicazioni circuitali
- Il diodo ha due terminali: l'**anodo** e il **catodo**
- La tensione v_D è considerata positiva all'anodo e negativa al catodo
- La corrente i_D è positiva quando scorre dall'anodo al catodo
- Se $v_D > 0$, $i_D \gg 0$ e siamo in **polarizzazione diretta**



ELETTRONICA

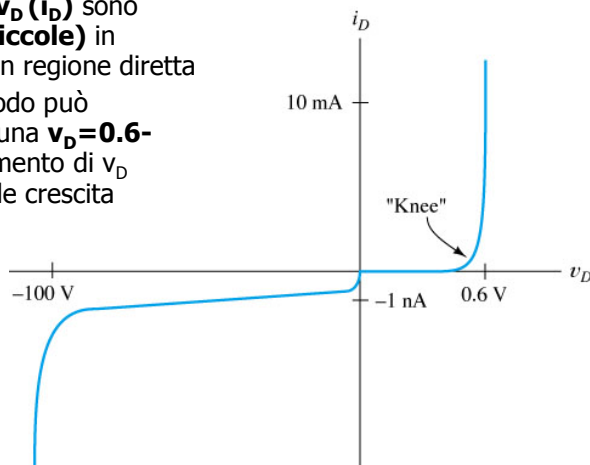
CAPITOLO 3

CARATTERISTICHE DEL DIODO /2

- In polarizzazione diretta, la corrente i_D scorre nel verso indicato dalla freccia che costituisce il simbolo del diodo: $i_D > 0$
- Se $v_D < 0$, $i_D \approx 0$ e siamo in condizioni di **polarizzazione inversa**
- Se $v_D < 0$, e in modulo è abbastanza elevato, il diodo opera in regione **inversa di breakdown (rottura)**: se la temperatura a cui opera il dispositivo non è troppo elevata, questa condizione non è distruttiva per il dispositivo; molti dispositivi operano infatti in questa condizione
- I diodi possono essere fabbricati in materiali diversi : i più diffusi (per medie e basse potenze) sono fabbricati in **silicio** si possono trovare sia in forma **integrata** che in forma **discreta** (es: 1N4148)

CARATTERISTICHE DEL DIODO /3

- Caratteristiche tipiche di un diodo commerciale 1N4148 a 300K: nota il cambio di scala dalla regione diretta a quella inversa, dato che v_D (i_D) sono molto più **grandi (piccole)** in regione inversa che in regione diretta
- In reg. **diretta**, il diodo può condurre **1 mA** con una $v_D = 0.6-0.7V$: un piccolo aumento di v_D determina una grande crescita di i_D (**ginocchio**)
- In reg. **inversa**, $i_D \sim 1nA$ ($i_D \propto T$)
- **Tensione di breakdown** = -100V



ELETTRONICA

CAPITOLO 3

DIODI ZENER

- I diodi progettati per operare nella regione di breakdown (rottura) sono chiamati **diodi Zener**
- I diodi Zener sono usati in applicazioni che necessitano di **tensioni costanti nella regione di rottura**: ciò corrisponde ad avere la curva i_D-v_D il più ripida possibile
- La rottura (breakdown) del dispositivo può essere causata da due diversi meccanismi fisici:
 - se la tensione di breakdown $> 6V$, il meccanismo fisico sfrutta i campi elevati ed è noto come moltiplicazione a valanga (**avalanche**)
 - se la tensione di breakdown $< 6V$, il meccanismo fisico è un fenomeno **quanto-meccanico** noto come effetto Zener

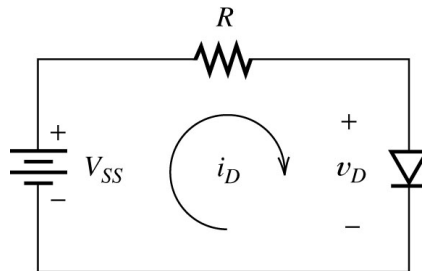


ANALISI CON RETTA DI CARICO

- La caratteristica del diodo è **nonlineare**: di conseguenza, **le tecniche di analisi di circuiti lineari** (studiate nel corso di elettrotecnica) **non possono essere utilizzate**
- In elettronica sono stati sviluppati metodi di analisi di circuiti contenenti elementi nonlineari (diodi e transistor): uno di questi è l'analisi con retta di carico (metodo grafico)
- Consideriamo il circuito in figura: noto V_{SS} e R , l'equazione di Kirchhoff presenta **2** incognite: i_D e v_D

$$V_{SS} = Ri_D + v_D$$

- Serve un'altra equazione che legghi i_D e v_D : questa è data dalla curva i_D-v_D del diodo, disponibile **soltanto** in forma **grafica** (essendo **nonlineare**)

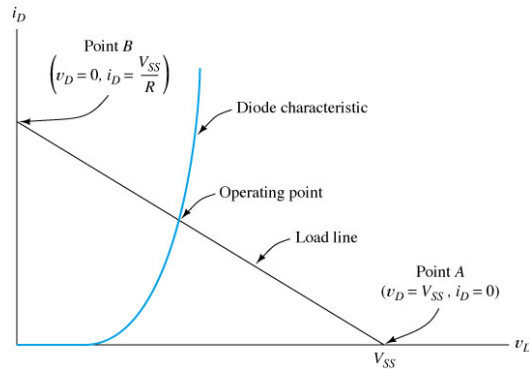


ELETTRONICA

CAPITOLO 3

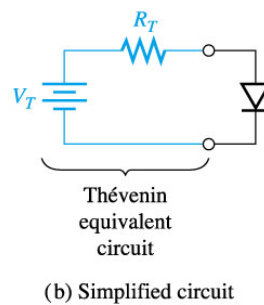
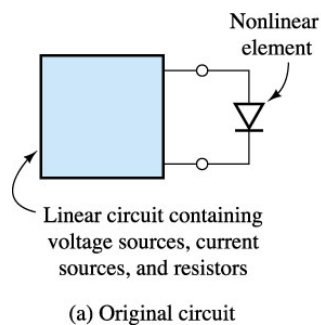
ANALISI CON RETTA DI CARICO /2

- Plottiamo sul grafico che rappresenta la caratteristica del diodo, **la retta di carico** $i_D = (V_{SS} - v_D)/R$, che è **lineare**
- Per tracciare la retta di carico, basta congiungere i punti in cui questa retta interseca gli assi: ($i_D = 0$, $v_D = V_{SS}$) e ($i_D = V_{SS}/R$, $v_D = 0$)
- L'intersezione della retta di carico con la caratteristica del diodo, fornisce il **punto di lavoro** (i_{DQ} , v_{DQ}) del circuito



ANALISI CON RETTA DI CARICO /3

- **Qualsiasi** circuito contenente un elemento **nonlineare** può essere analizzato tramite il metodo della retta di carico: **1)** si calcola l'equivalente di Thevenin della parte lineare del circuito; **2)** si applica il metodo della retta di carico per trovare **il punto di lavoro dell'elemento nonlineare**; **3)** si calcolano tensioni e correnti nel circuito rimanente.

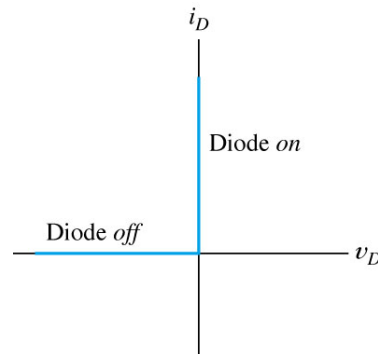


ELETTRONICA

CAPITOLO 3

IL MODELLO DEL DIODO IDEALE

- Il metodo della retta di carico è molto accurato, anche se risulta difficoltoso applicarlo in circuiti che contengono più di un diodo
- Un metodo **più semplice e rapido** consiste nell'utilizzare il **modello del diodo ideale** che assume che il diodo sia un **cortocircuito** in regione **diretta** e un circuito **aperto** in regione **inversa**
- Il modello del diodo ideale va usato **quando la tensione che cade sul diodo in diretta (0.7V) e la corrente in inversa possono essere trascurate**
- Stato **ON**: $i_D > 0$ e $v_D = 0$
- Stato **OFF**: $i_D = 0$ e $v_D < 0$



ANALISI CIRCUITI CON DIODI IDEALI

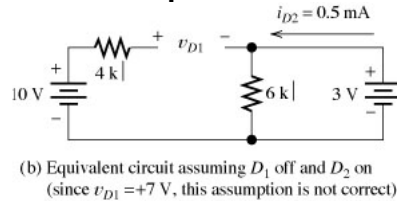
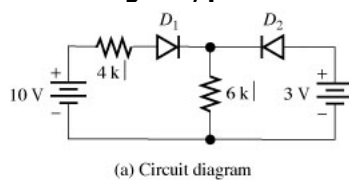
- Se analizziamo un circuito contenente diodi ideali, non conosciamo in anticipo quali diodi sono on e quali off => **dobbiamo fare delle ipotesi**
- Se abbiamo supposto che il diodo sia **acceso (spento)**, dovremo calcolare la **corrente** che vi scorre (la **tensione** ai suoi capi) per verificare che l'ipotesi fatta sia corretta
- Se, utilizzando le convenzioni di segni standard, l'ipotesi fatta non è corretta ($i_D < 0$ ($v_D < 0$)) se abbiamo supposto il diodo acceso (spento), occorre cambiare le ipotesi ed effettuare nuovamente l'analisi del circuito, finché tutte le ipotesi non sono verificate contemporaneamente
- Esempio di analisi circuito in figura (a):
 1. Assumiamo che **D1** sia spento (**off**) e **D2** acceso (**on**)
 2. Risolvendo il circuito in queste condizioni (b): $i_{D2} = 0.5 \text{ mA}$ e $v_{D1} = 7V$

ELETTRONICA

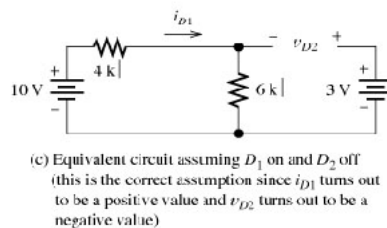
CAPITOLO 3

ANALISI CIRCUITI CON DIODI IDEALI /2

3. Dato che $i_{D2}(=0.5 \text{ mA}) > 0 \Rightarrow$ l'ipotesi che D2 sia acceso è **corretta**
4. Visto che $v_{D1}(=7 \text{ V}) > 0 \Rightarrow$ ipotesi che D1 sia spento è **sbagliata, per cui dobbiamo tornare al punto 1**

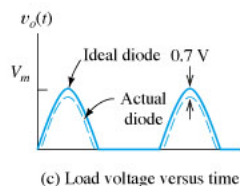
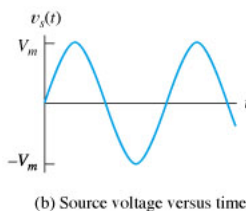
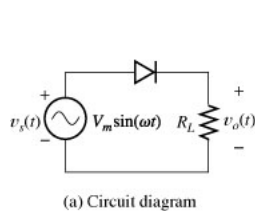


1. Assumiamo **D1 on e D2 off**
2. In queste condizioni (c): $i_{D1}=1 \text{ mA}$ e $v_{D2}=-3 \text{ V} \Rightarrow$ **ip. corrette**
- **NB Perché l'analisi del circuito sia OK tutte le ipotesi di funzionamento devono essere verificate contemporaneamente**



CIRCUITI RETTIFICATORI

- I circuiti rettificatori convertono **potenza AC in DC** e sono alla base dei generatori di potenza, dei circuiti che caricano batterie e dei convertitori di tensione AC in DC
- Circuito rettificatore **a singola semionda** con sorgente di segnale sinusoidale e carico resistivo: se il diodo è reale, e $v_s > 0$ la tensione sul carico è ridotta di $v_D \sim 0.7 \text{ V}$
- Se $v_s < 0$, $i_D \sim 0 \Rightarrow v_o = 0$: la tensione v_s appare sul carico soltanto nel **semi-periodo di onda positiva**

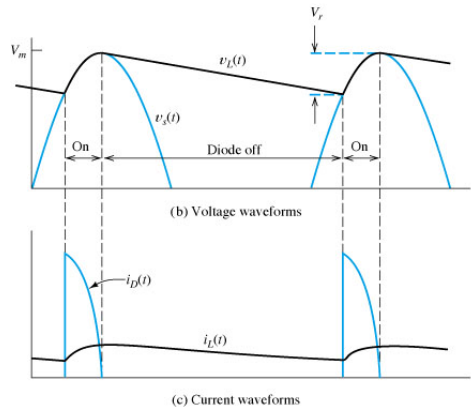
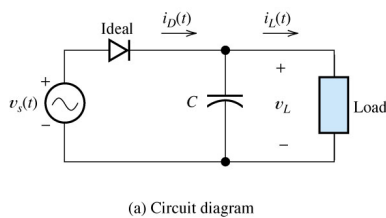


ELETTRONICA

CAPITOLO 3

CIRCUITI RETTIFICATORI /2

- Per convertire una tensione AC in una DC, si può porre in uscita a un rettificatore **a singola semionda** un condensatore di valore elevato: assumendo che il diodo sia ideale, quando v_s raggiunge il massimo (V_m), C si carica alla tensione V_m ; come v_s inizia a diminuire, il diodo si polarizza in inversa: $i_D \approx 0$ e sul carico



CIRCUITI RETTIFICATORI /3

scorre solo la corrente fornita dal condensatore C, che, di conseguenza, si scarica lentamente fino alla semionda positiva successiva; la corrente del diodo serve a ricaricare C

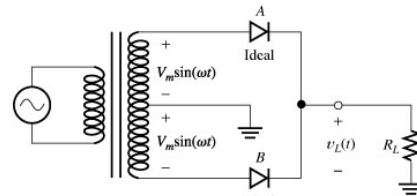
- A causa dei cicli di carica e scarica, v_L contiene una componente AC (**ripple**: V_r =tensione picco-picco di ripple): per minimizzarla, occorre prendere una C elevata
- Assumendo che la scarica di C avvenga su tutto il periodo T , e prendendo I_L come corrente media $Q \cong I_L T$ si ottiene un'espressione approssimata $Q \cong V_r C$ che da **C in funzione** del ripple V_r $C \cong \frac{I_L T}{V_r}$
- Tensione media applicata al carico $V_L = V_m - V_r/2$
- NB: la tensione inversa massima che può essere applicata sul diodo ($=2V_m$) deve essere **minore** della tensione di (rottura) **breakdown del diodo**

ELETTRONICA

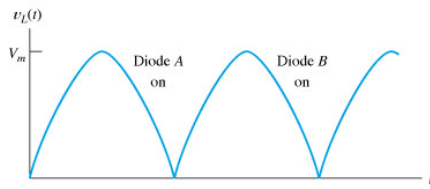
CAPITOLO 3

CIRCUITI RETTIFICATORI /4

- Esistono numerosi circuiti rettificatori a doppia semionda: uno dei più comuni (in figura) è composto da due rettificatori a singola semionda
- Ognuno dei diodi conduce in un singolo semiperiodo
- L'uso del trasformatore è vantaggioso, in quanto permette di cambiare V_m modificando il rapporto del trasformatore, e quindi la tensione DC di uscita
- Inserendo un condensatore in parallelo a R_L , il ripple è dimezzato



(a) Circuit diagram

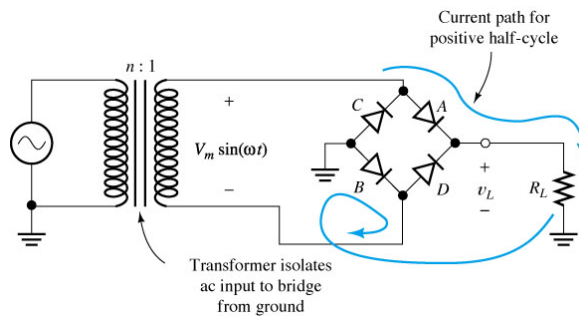


(b) Output voltage

$$C \cong \frac{I_L T}{2V_r}$$

CIRCUITI RETTIFICATORI /5

- Il rettificatore a doppia semionda si può realizzare tramite un **ponte a diodi**: se la tensione sul secondario (trasformatore) è positiva, la corrente fluisce su R_L tramite il diodo A ritornando indietro tramite il diodo B; per la polarità opposta la corrente fluisce sui diodi C e D
- In entrambi i casi la corrente fluisce su R_L nello stesso verso
- Il trasformatore è necessario se gli ingressi sono connessi a massa come il carico
- Di nuovo, mettendo C in parallelo a R_L



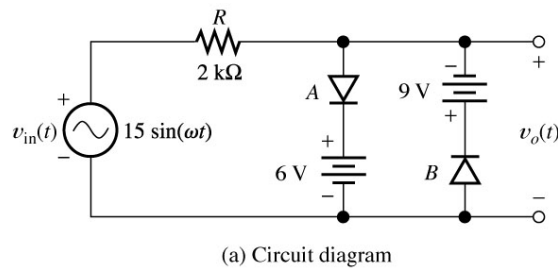
$$C \cong \frac{I_L T}{2V_r}$$

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

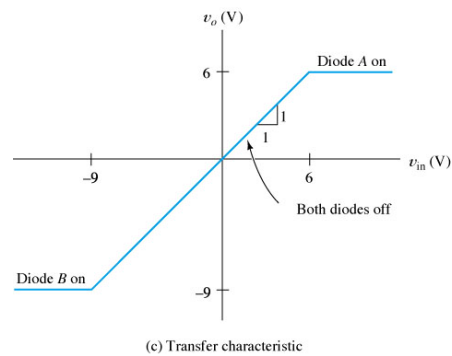
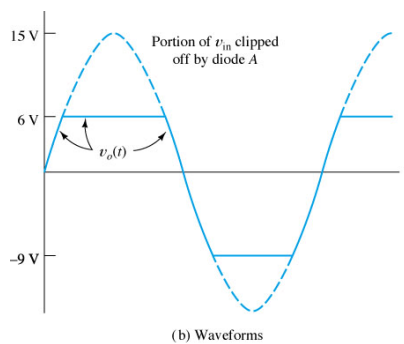
CIRCUITI DI WAVE-SHAPING

- I circuiti che modificano le forme d'onda dei segnali sono molto usati nei generatori di funzione. Tipicamente: un oscillatore genera un'onda quadra, che viene trasformata in un'onda triangolare dopo essere passata per un integratore: attraverso circuiti appositi, da questa si può ricavare un'onda sinusoidale
- I diodi possono essere usati per costruire circuiti che tagliano una parte della forma d'onda del segnale in ingresso: ad esempio, assumendo diodi ideali, il circuito taglia il segnale $> 6V$ e $< -9V$



CIRCUITI DI WAVE-SHAPING / 2

- Se $-9V < v_{in} < 6V$, i due diodi sono spenti: non scorre corrente sulla resistenza e $v_o = v_{in}$
- Se $v_{in} > 6V$ ($< -9V$), il diodo A (B) è acceso $\Rightarrow v_o = 6V$ ($= -9V$)
- R deve essere grande abbastanza da limitare la corrente in diretta sui diodi e piccola per limitare la caduta di tensione dovuta alla corrente in inversa

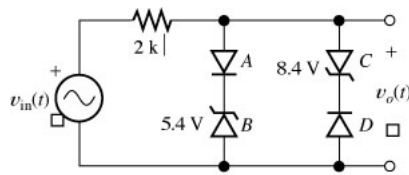


ELETTRONICA

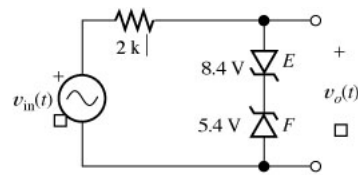
CAPITOLO 3

CIRCUITI DI WAVE-SHAPING /3

- Se usiamo diodi reali (su di essi cade $v_D \sim 0.6V$ in diretta), dovremmo scegliere batterie con tensioni inferiori di v_D per avere la stessa tensione di taglio del circuito precedente
- Dato che le batterie devono essere cambiate periodicamente, si preferisce sostituirle con diodi Zener, la cui tensione inversa di breakdown è approssimativamente costante
- In (b), la corrente scorre se uno dei due diodi è in breakdown

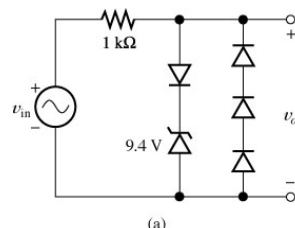


(a) Circuit of Figure 3.15 with batteries replaced by Zener diodes and allowance made for a 0.6 V forward diode drop

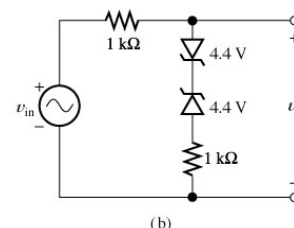


(b) Simpler circuit

CIRCUITI DI WAVE-SHAPING: ESEMPI



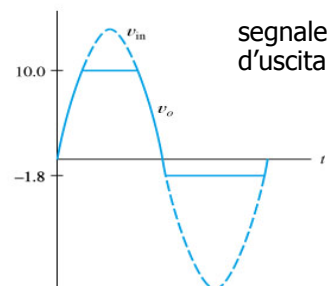
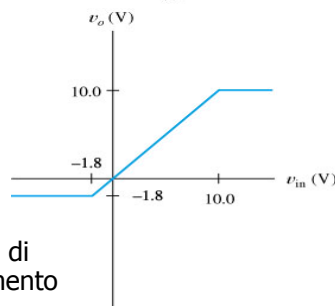
(a)



(b)

(a)

funzione di trasferimento



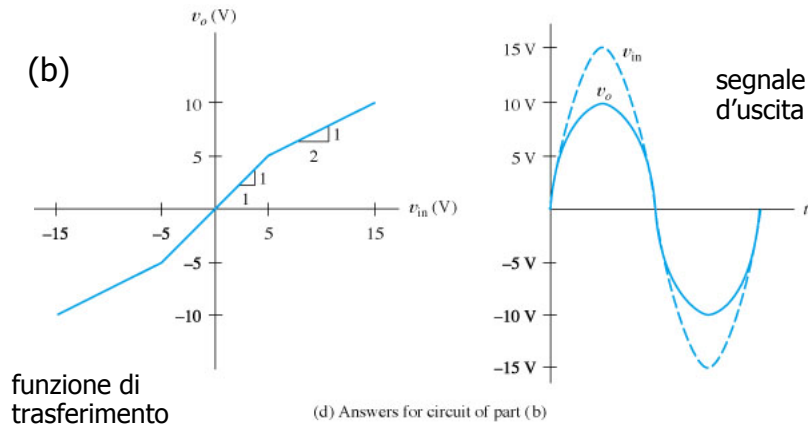
(c) Answers for circuit of part (a)

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

CIRCUITI DI WAVE-SHAPING: ESEMPI / 2

- Quando uno dei 2 diodi è acceso ($v_{in} > 5V$ o $v_{in} < -5V$), il segnale di uscita è esattamente metà del segnale di ingresso (partitore resistivo di due resistenze uguali $= 1k\Omega$)

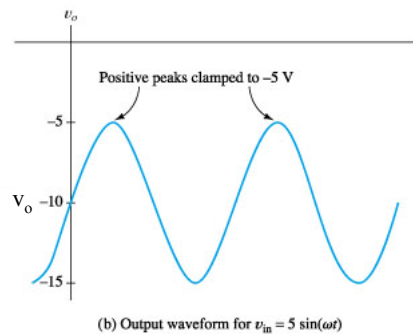
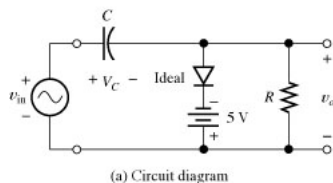


CIRCUITI DI CLAMP

- I circuiti di **clamp** sono circuiti che servono ad aggiungere una componente **DC** ad una forma d'onda di input **AC**: in tal modo, i picchi positivi o negativi del segnale di ingresso possono essere **fissati** ad un valore di **tensione desiderato**
- C è elevato** \Rightarrow ha impedenza **piccola**; siccome si scarica lentamente, la **tensione ai suoi capi** si può considerare **costante**

$$v_o(t) = v_{in}(t) - V_C$$

- Se il segnale di input prova a forzare v_o ad un valore maggiore di $-5V$, il diodo ...



ELETTRONICA

CAPITOLO 3

CIRCUITI DI CLAMP /2

... entra in conduzione: v_o si fissa a -5V e il condensatore si carica portandosi al valore costante di 10 V: in questo modo, il valore di picco della tensione di uscita si fissa a -5V

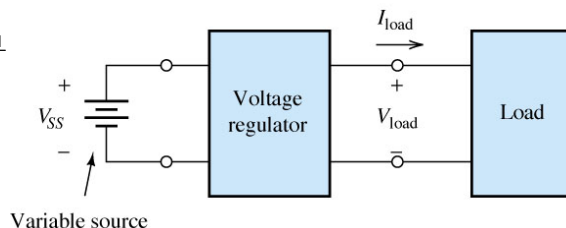
- La resistenza **R** deve essere **elevata** per fare in modo che C si **scarichi lentamente**; **C** deve essere **elevata**, perchè la sua **impedenza** sia la più **piccola** possibile; se però **RC** è troppo alto, il circuito impiega troppo tempo per adattarsi ai cambiamenti della tensione di ingresso
- In pratica: $R=10\ 100\ k\Omega$; C tale che $RC \gg T$
- **Invertendo** il diodo si fissa il picco di **tensione negativo** (anzichè quello positivo)
- Se la tensione di clamp desiderata necessita che il diodo sia polarizzato in inversa, dobbiamo aggiungere in serie a R una tensione DC che assicuri che il diodo sia polarizzato in inversa

REGOLATORI DI TENSIONE

- Se dobbiamo fornire ad un carico una tensione costante (i circuiti rettificatori visti danno in uscita una tensione con una leggera oscillazione, **ripple**), dobbiamo mettere fra la sorgente di potenza ed il carico **un regolatore di tensione**
- La **regolazione di generatore (SR)** è la misura di quanto **la tensione sul carico cambia per effetto di V_{SS}**
- La **regolazione di carico (LR)** è la misura di quanto la **tensione sul carico** cambia per effetto **della corrente sul carico**
- In condizioni ideali: $SR=0$ e $LR=0$

$$LR = \frac{V_{no-load} - V_{load}}{V_{load}}$$

$$SR = \frac{\Delta V_{load}}{\Delta V_{SS}}$$



ELETTRONICA

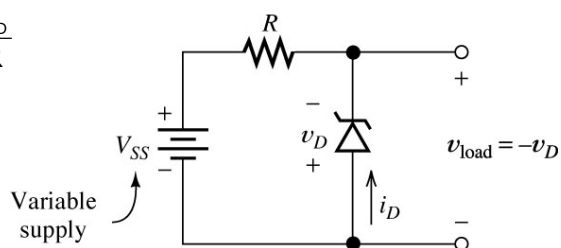
CAPITOLO 3

REGOLATORI DI TENSIONE /2

- Il circuito regolatore in figura utilizza un diodo Zener e produce in uscita una tensione praticamente costante: $v_{load} = \text{tensione di breakdown del diodo Zener}$
- R limita la corrente** nel diodo (per evitare il surriscaldamento del dispositivo e, di conseguenza, la sua rottura)
- Calcoliamo la regolazione di generatore analizzando il circuito con il metodo della retta di carico ($V_{SS} + R i_D + V_D$), assumendo $R = 1 \text{ k}\Omega$ e $V_{SS} = 15 / 20 \text{ V}$

$$i_D = -\frac{V_{SS}}{R} - \frac{v_D}{R}$$

- La tensione sul carico nei due casi (V_{SS}) vale $v_{load} = 10 / 10.5 \text{ V}$



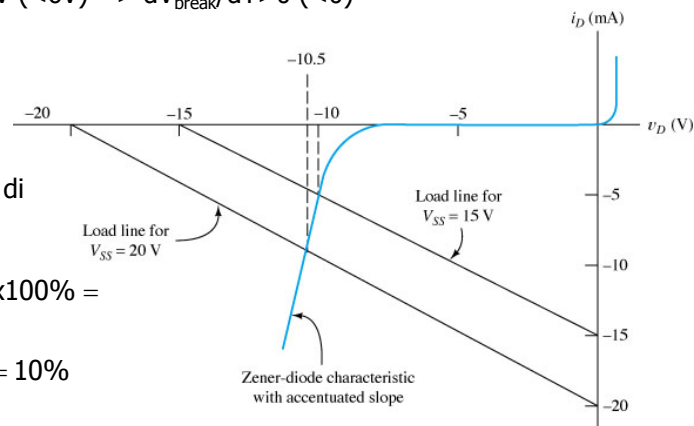
REGOLATORI DI TENSIONE /3

- I circuiti che utilizzano diodi Zener hanno caratteristiche I-V **molto ripide** in regione di breakdown
- Le tensioni di breakdown dipendono dalla temperatura: se $V_{break} > 6V$ ($< 6V$) $\Rightarrow dV_{break}/dT > 0$ (< 0)

Regolazione di generatore:

$$SR = \frac{\Delta V_{load}}{\Delta V_{SS}} \times 100\% =$$

$$\frac{0.5}{5} \cdot 100\% = 10\%$$



ELETTRONICA

CAPITOLO 3

MODELLO EQUIVALENTE AI PICCOLI SEGNALI

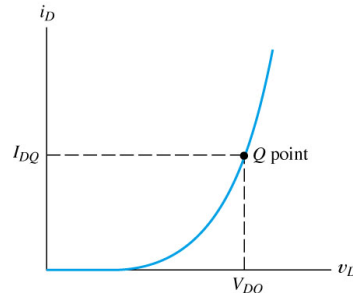
- In molti circuiti elettronici (amplificatori), una **tensione DC** è utilizzata per **polarizzare un dispositivo nonlineare** a uno specifico punto di lavoro, mentre un **piccolo segnale AC** viene iniettato nel circuito (ad es., per essere amplificato)
- Questi tipi di circuiti si analizzano in due passi:
 1. si trova il **punto di lavoro** (ciò comporta la trattazione degli aspetti nonlineari del dispositivo);
 2. si analizza il circuito considerando il solo segnale **AC**: dato che la caratteristica del dispositivo si può assumere lineare limitatamente a regioni **sufficientemente piccole** di segnale, si ricava il **circuito lineare del dispositivo ai piccoli segnali da usare nell'analisi AC** (Taylor)
- Il circuito lineare ai piccoli segnali di dispositivi nonlineari è un approccio che è comunemente usato nell'analisi di **circuiti con diodi e circuiti amplificatori con transistor**

MODELLO EQUI. AI PICCOLI SEGNALI / 2

- Un piccolo segnale AC applicato al diodo polarizzato in diretta fa **oscillare** il punto di lavoro attorno al punto Q. Se il segnale AC è sufficientemente piccolo, si può assumere che il punto Q si muove su una linea retta: Δi_D e Δv_D sono le variazioni rispetto a I_{DQ} e V_{DQ} indotte dal segnale AC

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad \Delta i_D = \left(\frac{di_D}{dv_D} \right)_Q \Delta v_D = \frac{\Delta v_D}{r_d} \quad r_D = \frac{nV_T}{I_{DQ}}$$

- Eqz. di Shockley del diodo: I_S è la corrente di saturazione ($\sim 10^{-14}$ A); n è il coefficiente di emissione ($\sim 1-2$); $V_T = 26$ mV (a 300K) è l'equi-valente termico in tensione;
- di_D/dv_D = pendenza curva i_D - v_D nel punto di lavoro: il suo inverso è la resistenza dinamica del diodo, r_d

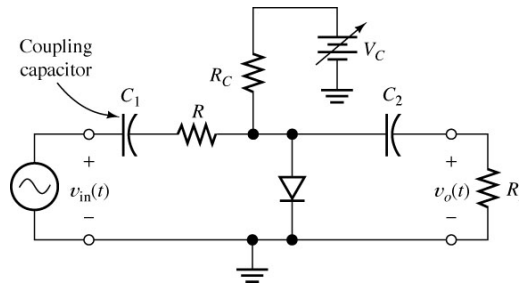


ELETTRONICA

CAPITOLO 3

ES: ATTENUATORE CONTROLLATO IN TENSIONE

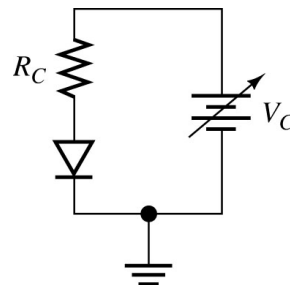
- **Notazioni:**
 - i_D e v_D = correnti e tensioni istantanee (dipendono dal tempo, $i_D(t)$ e $v_D(t)$)
 - I_{DQ} e V_{DQ} = correnti e tensioni DC nel punto di lavoro (costanti)
 - i_d e v_d = piccoli segnali AC di corrente e tensione (dipendono dal tempo, $i_d(t)$ e $v_d(t)$)
- L'input dell'attenuatore di tensione è il piccolo segnale AC v_{in} mentre l'uscita è il segnale d'input attenuato
- L'attenuazione **dipende da V_C**
- Ingresso e uscita sono collegati al circuito tramite 2 **condensatori di accoppiamento C1 e C2**



ES: ATTENUATORE /2

- I valori di C1 e C2 (condensatori di accoppiamenti) sono scelti in modo che risultino dei **cortocircuiti per i segnali ac di interesse**
- C1 e C2 sono **circuiti aperti** per il segnale **DC** => il punto di lavoro **non è influenzato nè dal generatore di segnale nè dal carico**; in questo modo si evitano correnti DC nel circuito
- Si calcola il punto di lavoro (I_{DQ}, V_{DQ}) risolvendo il circuito di polarizzazione in figura utilizzando i metodi visti
- Noto I_{DQ} , calcoliamo la resistenza dinamica equivalente in modo da poter analizzare il circuito ai piccoli segnali

$$r_D = \frac{nV_T}{I_{DQ}}$$



ELETTRONICA

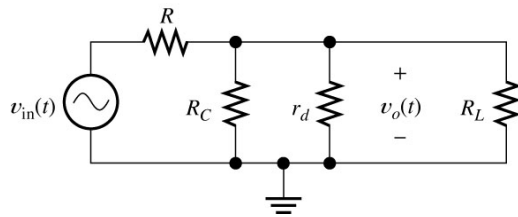
CAPITOLO 3

ES: ATTENUATORE /3

- Dato che sul generatore di tensione DC scorre una componente AC di corrente ma non cade una componente AC di tensione, V_C **agisce come un cortocircuito per il segnale AC** (questo è un **concetto molto importante** nel disegnare un circuito equivalente ai piccoli segnali)
- Sostituendo il diodo con il suo modello ai piccoli segnali (dato da r_d), i due condensatori e il generatore V_C con cortocircuiti, si ottiene il modello ai piccoli segnali in figura, da cui si ottiene:

$$R_p = \frac{1}{1/R_C + 1/R_L + 1/r_d}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{R_p}{R_p + R}$$



CONCETTI BASE DEI SEMICONDUTTORI

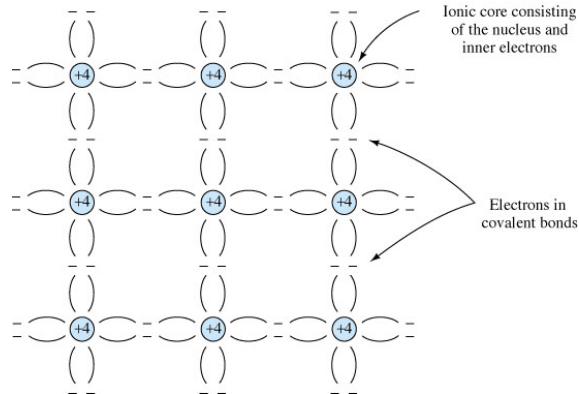
- Discussione qualitativa dei concetti basilari della fisica dei semiconduttori e dei meccanismi fisici interni del diodo
- Il materiale largamente più usato per fabbricare dispositivi allo stato solido è il **silicio** (sono usati anche GaAs e Ge)
- Assumendo il modello di Bohr, un atomo di Si ha un nucleo composto da 14 protoni, circondato da altrettanti elettroni raggruppati in "gusci": il **guscio** più interno conta 2 elettroni = 2 orbite; quello dopo 8, e quello più esterno 4.
- Il guscio più esterno, detto di **valenza**, fornisce i portatori di carica.
- Il silicio puro (**intrinseco**) prende la forma cristallografica in cui un atomo di Si (al centro di un tetraedro) è circondato da 4 atomi di Si, con i quali è legato da un legame **covalente**, formato da **2 elettroni di valenza** che ruotano attorno ai 2 nuclei di Si che legano.

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

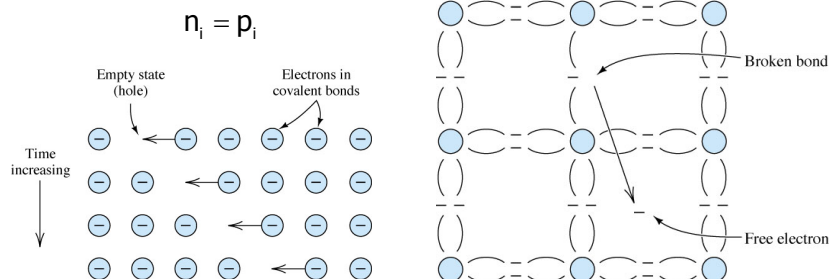
CONCETTI BASE ... /2

- Allo zero assoluto, gli elettroni occupano lo stato energetico più basso: formano i legami covalenti e non sono liberi di muoversi
=> a **0 K, il silicio è un isolante**
- A 300 K, una piccola parte di elettroni può guadagnare sufficiente energia termica per rompere i legami covalenti, generando **elettroni e lacune liberi** di muoversi all'interno del cristallo.



CONCETTI BASE ... /3

- Dato che il numero di elettroni liberi a 300 K è molto inferiore a quello di un buon conduttore ($n_i \sim 1.45 \text{ elettroni/cm}^3$), questi materiali sono detti **semiconduttori**
- Un legame covalente rotto lascia un **buco** di un elettrone (**lacuna**), che si può vedere come **una carica positiva** libera di muoversi nel cristallo
- Se si applica un campo, elettroni e lacune, muovendosi, contribuiscono alla corrente



ELETTRONICA

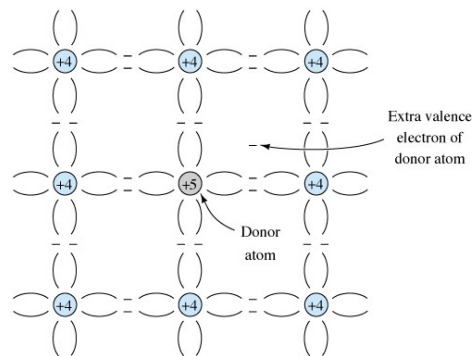
CAPITOLO 3

CONCETTI BASE ... /4

- Elettroni e lacune sono generati dall'energia termica, che causa la rottura del legame covalente: maggiore la temperatura, maggiore il tasso di **generazione**
- D'altro canto, quando un elettrone libero incontra una lacuna, si può **ricombinare** per formare un legame covalente (il tasso di ricombinazione è proporzionale alla concentrazione di elettroni e lacune)
- Ad una data temperatura, esiste quindi un equilibrio dinamico dove il tasso di generazione e di ricombinazione sono uguali
- La **concentrazione di portatori** (elettroni e lacune) è **proporzionale alla temperatura**
- La **conduttività** (= capacità di condurre corrente) è **proporzionale alla concentrazione di portatori**, quindi **cresce con la temperatura in un semiconduttore**

SEMICONDUTTORI DI TIPO n

- Aggiungendo una piccola quantità di impurezze (fosforo, boro, arsenico) al cristallo di silicio si modifica bruscamente la concentrazione di elettroni e lacune, ottenendo un semiconduttore **estrinseco**
- Se aggiungiamo fosforo (P), che ha 5 elettroni di valenza, l'atomo di fosforo forma 4 legami covalenti con 4 atomi di Si vicini utilizzando i 4 elettroni di valenza: il 5 elettrone di valenza è debolmente legato, e alle normali temperature, è un **elettrone libero di muoversi**



ELETTRONICA

CAPITOLO 3

SEMICONDUTTORI DI TIPO n / 2

- Aggiungendo atomi di impurezze **pentavalente** (5 elettroni di valenza) si creano **elettroni liberi** (**nessuna lacuna** è stata creata) => semiconduttori di **tipo n**
- Nei semiconduttori di tipo n, la conduzione è dovuta prevalentemente agli elettroni liberi, che sono chiamati portatori **maggioritari** (le lacune sono dette portatori **minoritari**)
- A temperature normali, gli atomi di impurezza pentavalente (**donori**, in quanto donano un elettrone di valenza) hanno perso il loro 5° elettrone, ossia sono **ionizzati**
- Alle impurezze ionizzate è associata una carica positiva compensata da quella negativa degli elettroni liberi => la concentrazione di elettroni liberi **n** è uguale alla somma di lacune **p** e donori **N_D**

$$n = p + N_D$$

LEGGE DELL'AZIONE DI MASSA

- Aggiungendo atomi donori, non accade soltanto che gli elettroni liberi aumentino, ma anche che la **concentrazione di lacune diminuisca**, dato che la maggior concentrazione di elettroni **aumenta la probabilità di ricombinazione** delle lacune
- Ad una data temperatura, il prodotto delle concentrazioni di elettroni e lacune è costante (**legge dell'azione di massa**) e dato che le concentrazioni di lacune ed elettroni nel silicio intrinseco sono uguali, si ha: $pn = p_i n_i = n_i^2$
- **Il tempo di vita di un portatore minoritario** (lacuna, in un semiconduttore di tipo n) è un parametro importante ed è dato dal tempo che passa dalla generazione alla ricombinazione della lacuna da parte di un elettrone libero (τ_p)

ELETTRONICA

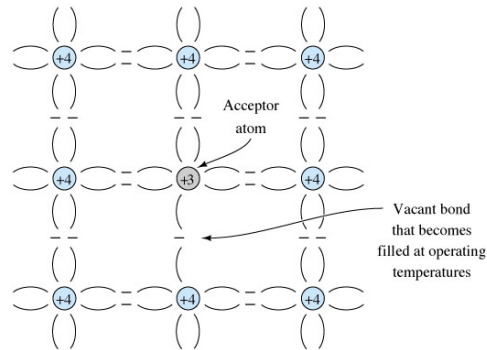
CAPITOLO 3

SEMICONDUTTORI DI TIPO P

- Aggiungendo impurezze **trivalenti (3 elettroni in banda di valenza)**, un atomo di impurezza forma legami covalenti con i tre atomi di Si vicini: il 4° elettrone necessario per completare il legame con il 4° atomo manca, e viene fornito da atomi di Si vicini. Il movimento di elettroni per colmare

l'assenza dell'elettrone di legame può essere vista anche come un movimento di **lacune**

- **La conduzione nei semiconduttori di tipo p è dovuta alle lacune** (portatori **maggioritari**), mentre gli **elettroni** sono portatori **minoritari**



SEMICONDUTTORI DI TIPO P / 2

- Impurezze con 3 elettroni di valenza sono chiamati **accettori** (perchè accettano un elettrone extra)
- A temperature normali, gli accettori sono **ionizzati**: ad essi è associata una carica **negativa**, dato che i suoi 4 elettroni di valenza sono controbilanciati soltanto da 3 cariche positive presenti all'interno del nucleo dell'atomo
- Essendo nulla la carica presente all'interno di un semiconduttore di tipo *p*, $N_A + n = p$, dove N_A = concentrazione accettori
- Se in un semiconduttore sono presenti sia droganti di tipo **n** (fosforo, arsenico) che droganti di tipo **p** (boro), l'equazione di neutralità di carica fornisce

$$N_A + n = N_D + p$$

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

VELOCITÀ DI DERIVA

- **In assenza di campo elettrico**, i portatori in un cristallo si muovono casualmente per effetto dell'agitazione termica: dato che essi sono ridiretti casualmente a causa di collisioni con il reticolo cristallino, **la loro velocità** lungo una particolare direzione **è nulla**
- **Se viene applicato un campo elettrico**, le **lacune (elettroni) libere** sentono una forza che **li accelera** nella stessa direzione del campo (in direzione opposta). I portatori, accelerati dal campo, urtano il reticolo cristallino, che cambia casualmente la loro velocità. Il risultato netto delle continue collisioni e delle successive accelerazioni dei portatori dovute al campo determina **una velocità media costante in direzione della forza applicata**
- Il moto dei portatori dovuto ad un campo elettrico applicato è chiamato **deriva**

CORRENTE DI DIFFUSIONE

- La velocità media di deriva (v_n per elettroni, v_p per le lacune) dei portatori è proporzionale al vettore del campo elettrico applicato E

$$v_n = -\mu_n E \quad v_p = \mu_p E$$

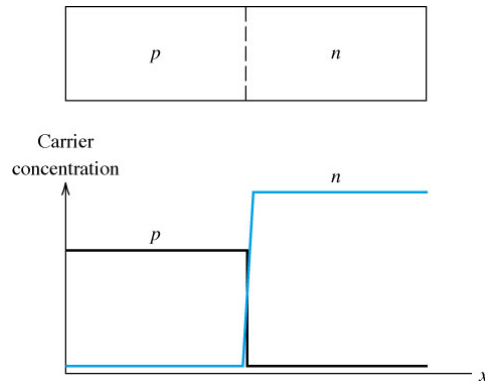
- La costante $\mu_{n(p)}$ è detta **mobilità**, ed è funzione della concentrazione di drogante e della temperatura: a 300K, $\mu_n \approx 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ e $\mu_p \approx 475 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (a pari campo elettrico, gli elettroni si muovono tre volte più velocemente)
- Molti meccanismi fisici possono creare concentrazioni di portatori in regioni particolari del semiconduttore: per effetto della velocità termica e del gradiente di concentrazione, i portatori tendono a distribuirsi uniformemente, determinando **la corrente di diffusione**
- Se il gradiente di concentrazione non viene mantenuto, la corrente di diffusione cessa rapidamente

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

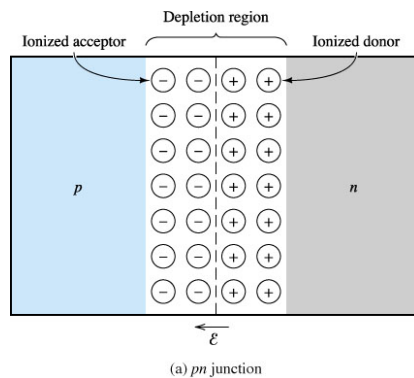
LA GIUNZIONE P-N

- La giunzione **p-n** è costituita da un singolo cristallo di semiconduttore **drogato n** da un lato e tipo **p** dall'altro
- Anche se la giunzione p-n è cresciuta come un singolo cristallo, è istruttivo immaginarla come l'unione di due metà: una tipo n, che contiene un alto numero di elettroni e un basso numero di lacune, e una di tipo p, che contiene un gran numero di lacune e pochi elettroni



LA GIUNZIONE P-N / 2

- Subito dopo che le due metà sono state unite, il brusco gradiente di concentrazione che esiste per i portatori maggioritari da entrambi i lati fa diffondere le lacune nella metà di tipo **n**, e gli elettroni in quella di tipo **p**
- Per effetto di questa **mutua diffusione**, carica negativa (positiva) si accumula nella parte p (n), formando **un campo elettrico che si oppone a ulteriori diffusioni**
- Si forma così una **regione di svuotamento**, che si estende da entrambi i lati della giunzione

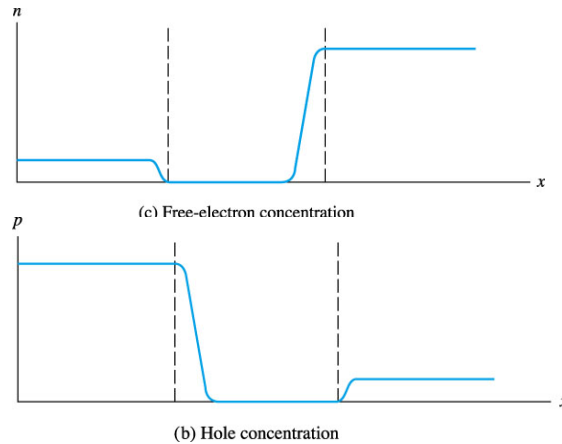


ELETTRONICA

CAPITOLO 3

LA GIUNZIONE P-N /3

- Nella regione di svuotamento **non ci sono portatori liberi**
- Nella parte p(n) della giunzione c'è uno strato di carica negativa (positiva), che è costituito rispettivamente da accettori (donori) **ionizzati**
- La carica netta e il campo elettrico sono confinati nella regione di svuotamento
- Il cristallo è complessivamente neutro: la carica di accettori e donori si bilanciano!



LA GIUNZIONE P-N /4

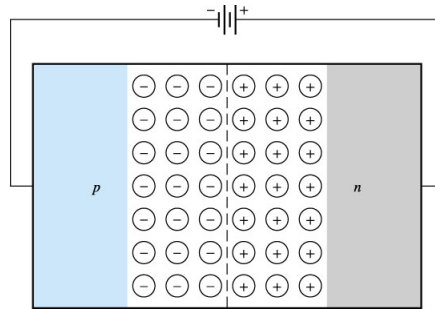
- L'effetto primario del campo elettrico nella regione di svuotamento è quello di **respingere la diffusione di portatori maggioritari attraverso la giunzione**: una lacuna che vuole diffondere dalla zona p a quella n subisce una forza che tende a respingerla nella zona p
- Per i portatori c'è una **barriera di potenziale (built-in barrier)**: un elettrone che attraversa la giunzione dalla zona n a quella p, perde parte della sua energia potenziale uguale alla barriera di energia potenziale della giunzione, $\Phi_0 \approx 1 \text{ eV}$
- Se alla giunzione non è applicata nessuna tensione, due correnti uguali ed opposte, dovute ai portatori minoritari nella regione di tipo p ed n, attraversano la giunzione, fornendo complessivamente corrente nulla
- Un'ulteriore componente di corrente può essere prodotta da portatori maggioritari particolarmente energetici

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

LA GIUNZIONE P-N /5

- Una giunzione **p-n** è **polarizzata inversamente** se si applica una tensione **positiva alla parte n** (rispetto a quella p)
- **La tensione applicata aumenta** il campo elettrico nella regione di svuotamento e **la barriera di potenziale** => i portatori maggioritari sono ancor più impossibilitati a scavalcare la barriera e la **regione di svuotamento si allarga**
- La corrente dovuta ai portatori maggioritari è **nulla**
- La piccola corrente dovuta ai minoritari è limitata dalla concentrazione di portatori e risulta quasi **indipendente dalla tensione inversa**



LA GIUNZIONE P-N /6

- La corrente che scorre attraverso una giunzione p-n è legata alla tensione applicata **dall'equazione di Shockley**

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{nV_T}\right) - 1 \right]$$

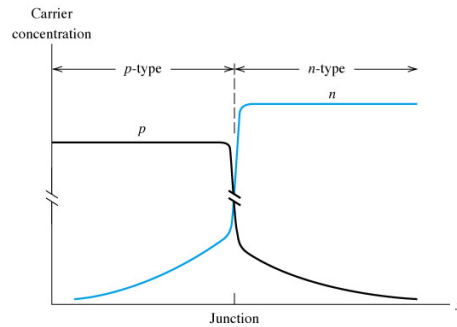
- In **polarizzazione inversa**, $v_D < 0 \Rightarrow i_D \approx -I_S$ (I_S è la corrente di saturazione, che è dovuta a **portatori minoritari**)
- I_S è **inversamente** proporzionale al **livello di drogaggio** delle parti n e p della giunzione (perchè è proporzionale alla massima concentrazione di portatori minoritari)
- I_S è **proporzionale all'area** (diodi che dissipano potenza maggiore devono essere più grandi) e aumenta con la temperatura
- In applicazioni circuitali, I_S si può di solito trascurare

ELETTRONICA

CAPITOLO 3

LA GIUNZIONE P-N /7

- La giunzione p-n è **polarizzata direttamente** se si applica una **tensione positiva alla parte p** (rispetto a quella n)
- La tensione diretta agisce riducendo il campo presente nella regione di svuotamento e la stessa regione di svuotamento: in questo modo, i **portatori maggioritari** vedono una **barriera di potenziale ridotta** e una maggior corrente può attraversare la giunzione
- I portatori maggioritari, dopo aver attraversato la giunzione, diventano minoritari e diffondono finchè non si ricombinano
- L'alta concentrazione di lacune nella parte p si riduce rapidamente ...



LA GIUNZIONE P-N /8

... attraversando la regione di svuotamento: nella parte n, la densità di lacune **decresce** con la distanza (le lacune ricombinano con maggior probabilità mentre diffondono) e il valore lontano dalla giunzione è quello determinato dal livello di donori

- La corrente totale è la **somma** delle componenti dovute a lacune ed elettroni
- Nelle regioni n(p), lontano dalla giunzione, la corrente di elettroni(lacune) è dominante
- Se $N_A < (>) N_D \Rightarrow i_D$ è dovuta principalmente a elettroni (lacune)

