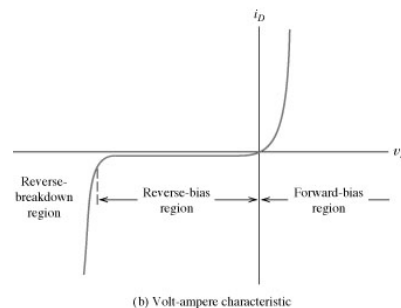
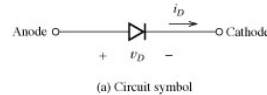


Diodi e circuiti con diodi

- Il **diodo** è uno dei componenti elettronici più importanti (con i transistor MOSFET e bipolari) 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 $v_D > 0$, $i_D > 0$ e siamo in **polarizzazione diretta**



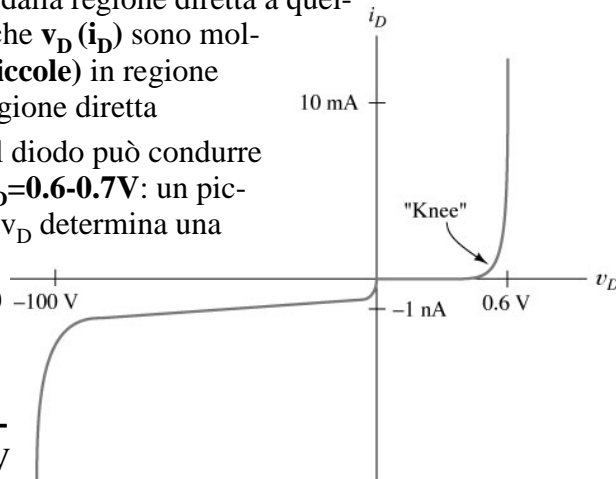
Caratteristiche del diodo

- In polarizzazione diretta, la corrente i_D scorre facilmente nel verso indicato dalla freccia che costituisce il simbolo del diodo
- Se $v_D < 0$, $i_D \sim 0$ 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, e si possono trovare sia in forma **integrata** che in forma **discreta** (es: 1N4148)

Es: caratteristiche del diodo 1N4148

Caratteristiche tipiche di un diodo commerciale 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



Diodi Zener

- 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

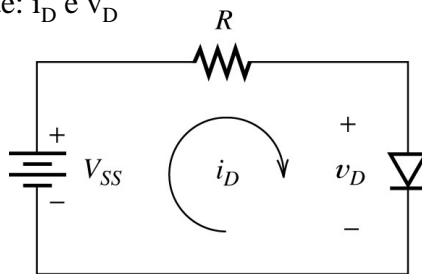


Analisi con retta di carico

- La caratteristica del diodo è **nonlineare** => **le tecniche di analisi di circuiti lineari non possono essere utilizzate**
- Lo studio dell'elettronica concerne lo studio di tecniche di analisi di circuiti contenenti elementi nonlineari (MOSFET, transistor bipolari, diodi)
- Metodo grafico: consideriamo il circuito in figura: noto V_{SS} e R , l'eq presenta **2** incognite: i_D e v_D

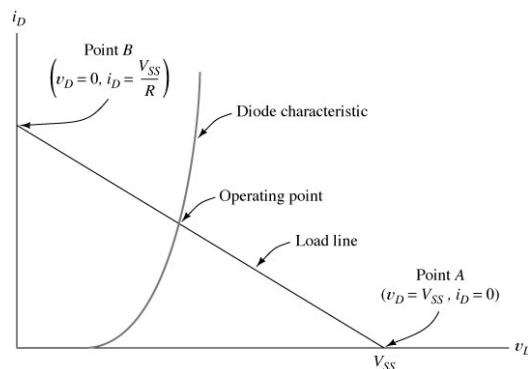
$$V_{SS} = Ri_D + v_D$$

- Serve un'altra equazione che leghi i_D e v_D = curva i_D - v_D del diodo, disponibile soltanto in forma **grafica** (essendo **nonlineare**)



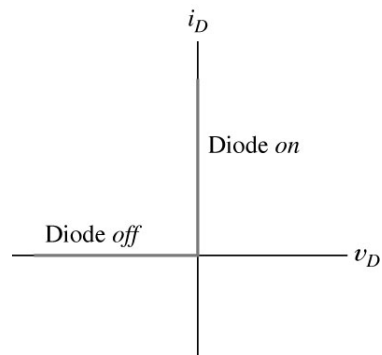
Analisi con retta di carico /2

- 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**



Il modello del diodo ideale

- Il metodo della retta di carico è un modo molto accurato di analisi dei circuiti che contengono diodi
- 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 $v_D < 0$

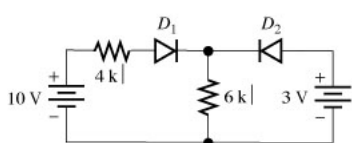


Analisi di circuiti con diodi ideali

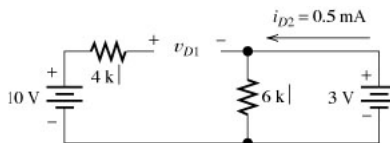
- Se analizziamo un circuito contenente diodi ideali, non conosciamo in anticipo quali diodi sono on e quali off => **dobbiamo fare delle ipotesi**
- Se supponiamo che il diodo sia acceso (spento), dovremo calcolare la corrente che vi scorre (la tensione ai suoi capi)
- Se utilizzando le convenzioni di segni standard, $i_D > 0$ ($v_D < 0$), l'ipotesi fatta è corretta; in caso contrario, occorre invece cambiare l'ipotesi ed effettuare nuovamente l'analisi del circuito
- 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 $v_{D1} = 7V$

Analisi di circuiti con diodi ideali /2

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

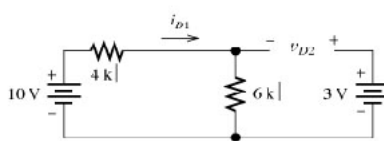


(a) Circuit diagram



(b) Equivalent circuit assuming D_1 off and D_2 on (since $v_{D1} = +7 \text{ V}$, this assumption is not correct)

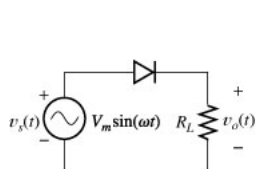
1. Assumiamo **D1 on e D2 off**
2. In queste condizioni (c): $i_{D1} = 1 \text{ mA}$ e $v_{D2} = -3 \text{ V} \Rightarrow$ **ip. corrette**
- **NB** Perché l'analisi del circuito sia tutte le ipotesi di funzionamento devono essere verificate contemporaneamente



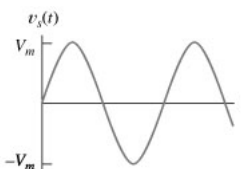
(c) Equivalent circuit assuming D_1 on and D_2 off (this is the correct assumption since i_{D1} turns out to be a positive value and v_{D2} turns out to be a negative value)

Circuiti rettificatori

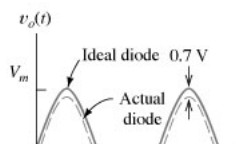
- I circuiti rettificatori convertono **potenza AC in DC** e sono alla base dei generatori di potenza, dei circuiti che caricano batterie e dei convertitori di tensione AC in DC
- Circuito rettificatore **a semionda** con sorgente di segnale sinusoidale e carico resistivo: se il diodo è reale, e $v_S > 0$ 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



(a) Circuit diagram



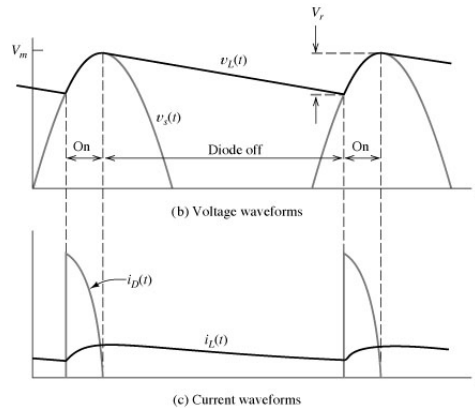
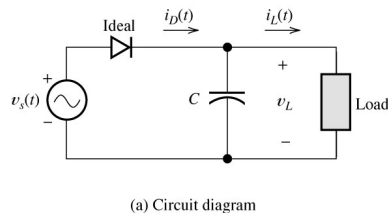
(b) Source voltage versus time



(c) Load voltage versus time

Rettificatori a singola semionda

- 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 un diodo 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: $i_D \sim 0$ e sul carico



Rettificatori a singola semionda /2

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

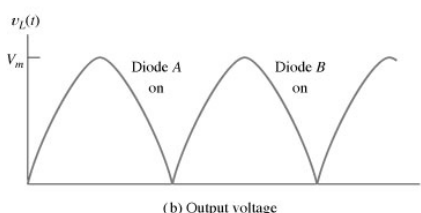
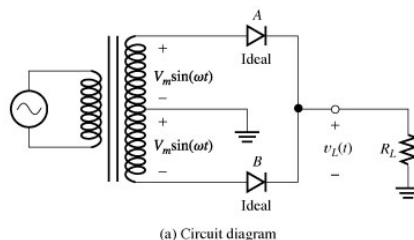
- A causa dei cicli di carica e scarica, v_L contiene una componente AC (**ripple**: V_r =tensione picco-picco di ripple): per minimizzarla, occorre prendere una C elevata
- Assumendo che la scarica di C avvenga su tutto il periodo T, e prendendo I_L come corrente media si ottiene un'espressione approssimata che da C in funzione del ripple V_r

$$Q \cong I_L T \rightarrow C \cong \frac{I_L T}{V_r}$$

$$Q \cong V_r C \rightarrow C \cong \frac{I_L T}{V_r}$$
- 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

Rettificatori a doppia semionda

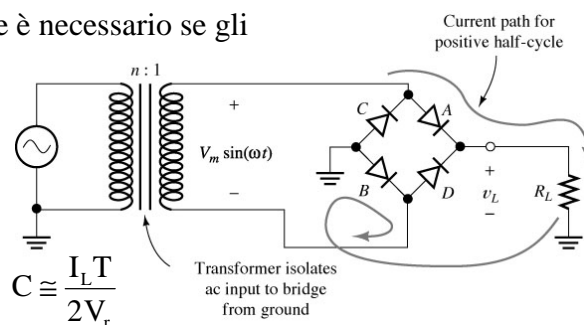
- I circuiti rettificatori a doppia semionda sono numerosi
- Uno dei più comuni (in figura) è composto da due rettificatori a singola semionda
- Ognuno dei diodi conduce in un singolo semiperiodo
- Si può cambiare V_m modificando il rapporto del trasformatore
- A parità di condensatore, il ripple è dimezzato rispetto al rettificatore a singola semionda



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

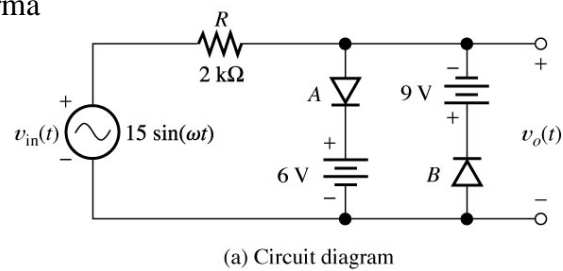
Rettificatori a doppia semionda /2

- 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
- Mettendo C in parallelo a R_L



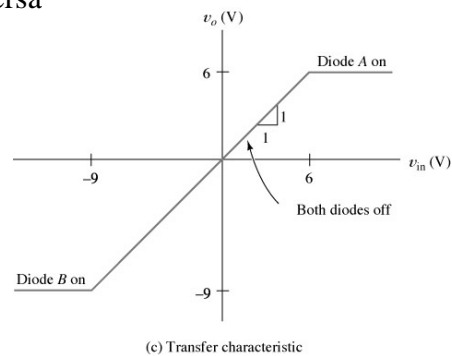
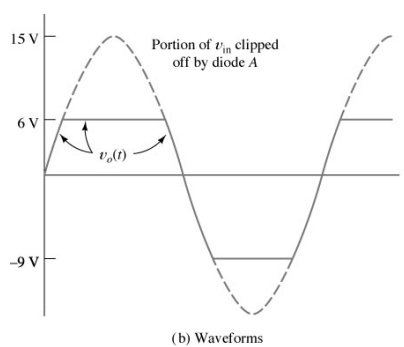
Circuiti che cambiano la forma d'onda

- 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: assumendo diodi ideali, il circuito taglia il segnale $> 6V$ e $< -9V$



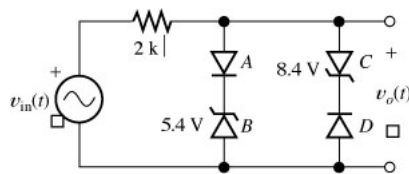
Circuiti che cambiano la forma d'onda /2

- 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

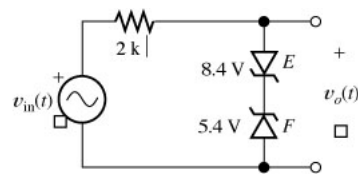


Circuiti che cambiano la forma d'onda /3

- 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
- Le batterie devono essere cambiate periodicamente \Rightarrow si sostituiscono con diodi Zener, la cui tensione inversa di breakdown è approssimativamente costante
- Nel circuito (b), la corrente scorre se un diodo è in breakdown

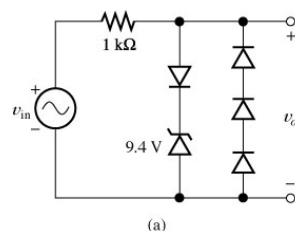


(a) Circuit of Figure 3.15 with batteries replaced by Zener diodes and allowance made for a 0.6 V forward diode drop

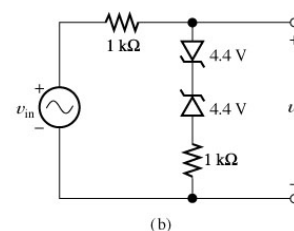


(b) Simpler circuit

Es: circuiti che cambiano la forma d'onda

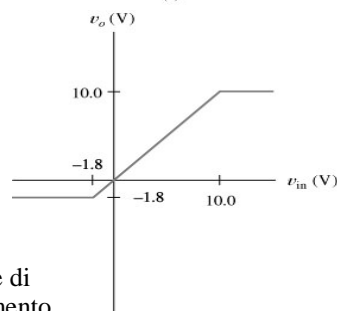


(a)

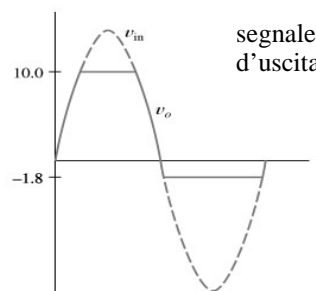


(b)

(a)



funzione di trasferimento

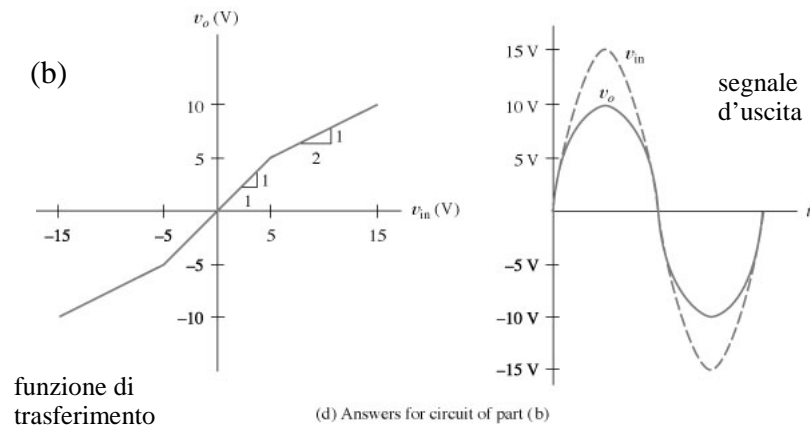


segnale d'uscita

(c) Answers for circuit of part (a)

Es: circuiti che cambiano la forma d'onda

- 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 resistenze uguali $1k\Omega$)

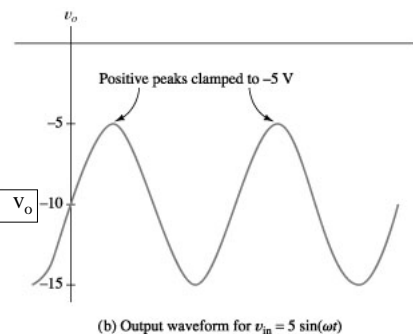
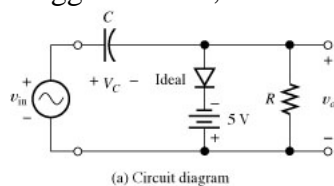


Circuiti di *clamp*

- 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



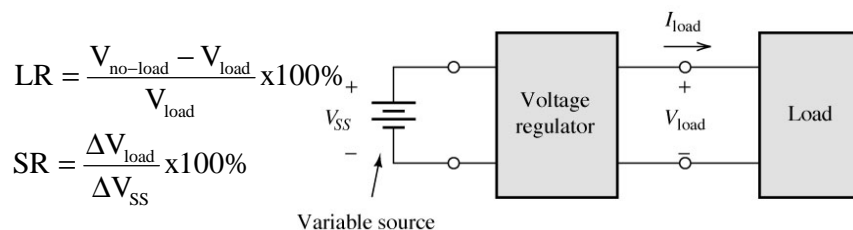
Circuiti di *clamp* /2

entra in conduzione: v_o è fissata a $-5V$ e il condensatore si carica portando V_C al valore (più o meno) costante di $10 V$: in questo modo, il valore di picco della tensione di uscita è fissato a $-5V$

- È necessaria una resistenza **R 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 a riduzioni della tensione di ingresso
- In pratica: $R=10-100\text{ k}\Omega$; 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 conduca

Circuiti 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 $LR=0$

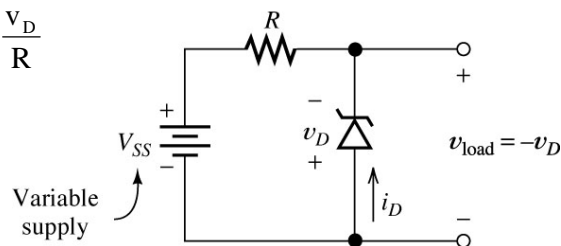


Circuiti regolatori con diodi Zener

- Il circuito regolatore in figura produce in uscita una tensione praticamente costante: $v_{\text{load}} =$ tensione di **breakdown** del diodo Zener
- **R limita la corrente** nel diodo (per evitare il surriscaldamento del dispositivo e, di conseguenza, la sua rottura)
- Analisi con retta di carico: $V_{SS} + R i_D + v_D = 0$
- Assumiamo $R=1 \text{ k}\Omega$ e consideriamo $V_{SS}=15 / 20 \text{ V}$
- Retta di carico:

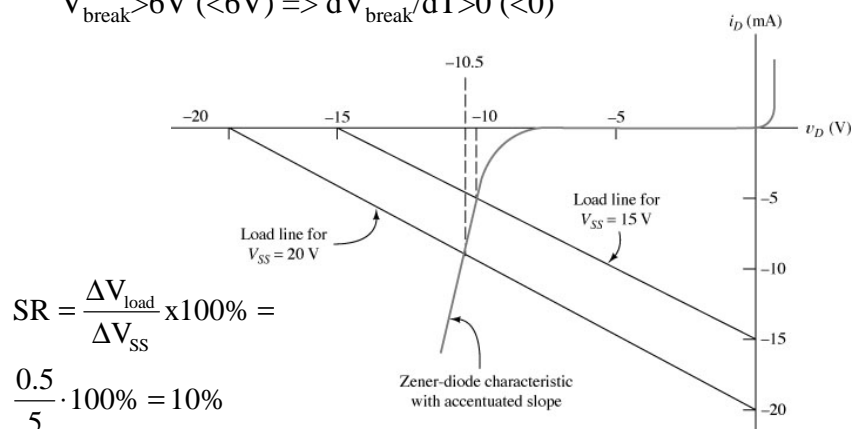
$$i_D = -\frac{V_{SS}}{R} - \frac{v_D}{R}$$

- $V_o = 10 / 10.5 \text{ V}$
- Calcoliamo la regolazione di generatore (SR):



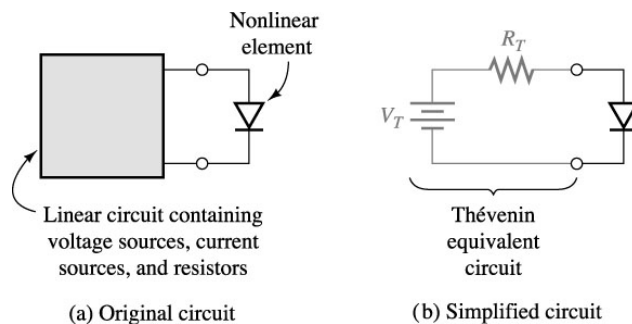
Circuiti regolatori con diodi Zener /2

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



Analisi con retta di carico di circuiti

- **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.



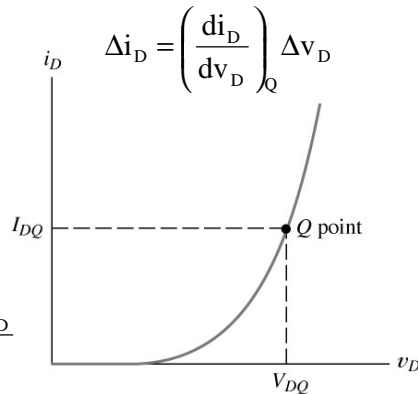
Circuito equivalente ai piccoli segnali

- In molti circuiti elettronici (amplificatori), una **tensione DC** è utilizzata per **polarizzare un dispositivo nonlineare** su uno specifico punto di lavoro, e un **piccolo segnale AC** (che contiene l'informazione) viene iniettato quindi nel circuito
- Questo circuito si analizza in due passi:
 1. si trova il **punto di lavoro**, il che comporta la trattazione degli aspetti nonlineari del dispositivo;
 2. si considera soltanto il **piccolo segnale AC**: dato che la caratteristica del dispositivo si può assumere lineare se si considerano regioni sufficientemente piccole del 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 a piccolo segnale del diodo

- Il circuito a piccolo segnale del diodo è dato da una resistenza: un piccolo segnale AC applicato al diodo polarizzato DC fa **oscillare** il punto di lavoro attorno al punto Q
- Se il segnale AC è sufficientemente piccolo, 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
- $di_D/dv_D =$ pendenza curva i_D-v_D nel punto di lavoro: il suo **inverso è la resistenza dinamica del diodo**

$$r_d = \left[\left(\frac{di_D}{dv_D} \right)_Q \right]^{-1} \rightarrow \Delta i_D = \frac{\Delta v_D}{r_d}$$



L'equazione di Shockley del diodo

- Assumendo alcune ipotesi semplificative, la relazione corrente-tensione in un diodo a giunzione *pn* è data da

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

- I_s è la **corrente di saturazione** ($\sim 10^{-14}$ A)
- n è noto come **coefficiente di emissione** ($\sim 1-2$)
- $V_T = 26\text{mV}$ (a 300K) è l'**equivalente termico in tensione**
- Calcolo resistenza dinamica del diodo:

$$\frac{di_D}{dv_D} \bigg|_Q = I_s \frac{1}{nV_T} \exp \left(\frac{V_{DQ}}{nV_T} \right) \rightarrow \frac{di_D}{dv_D} \bigg|_Q = \frac{I_{DQ}}{nV_T}$$

$$V_{DQ} \gg V_T \rightarrow I_{DQ} \approx I_s \exp \left(\frac{V_{DQ}}{nV_T} \right)$$

$$r_d = \left(\frac{I_{DQ}}{nV_T} \right)^{-1}$$

Attenuatore controllato in tensione

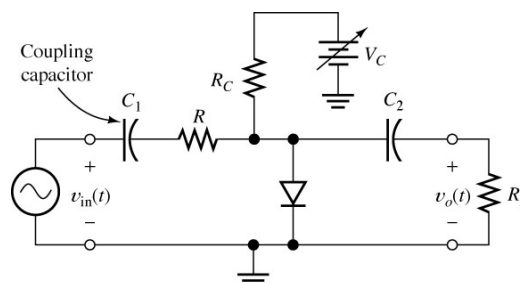
- **Notazioni:**

- 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} è l'uscita è il segnale d'input attenuato

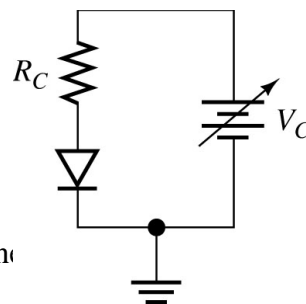
- L'attenuazione dipende da V_C

- Ingresso e uscita sono collegati al circuito tramite 2 condensatori di accoppiamento C1 e C2



Attenuatore controllato in tensione

- 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 inoltre correnti DC nel circuito
- Calcolo del punto di lavoro (I_{DQ} , V_{DQ}) tramite uno qualsiasi dei metodi visti
- Noto I_{DQ} , calcoliamo la resistenza equivalente $r_d = nV_T / I_{DQ}$
- Analisi circuito ai piccoli segnali: parte del segnale AC va sulla tensione DC V_C , che rimane **costante**

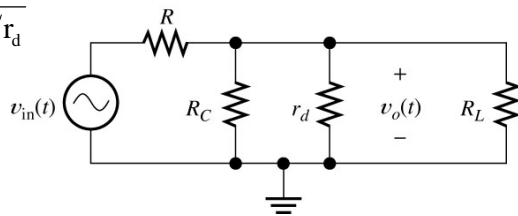


Attenuatore controllato in tensione /2

- Dato che il generatore di tensione DC ha una componente AC di corrente ma non 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 (r_d), i due condensatori e il generatore V_C con cortocircuiti, si ottiene il modello ai piccoli segnali:

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

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

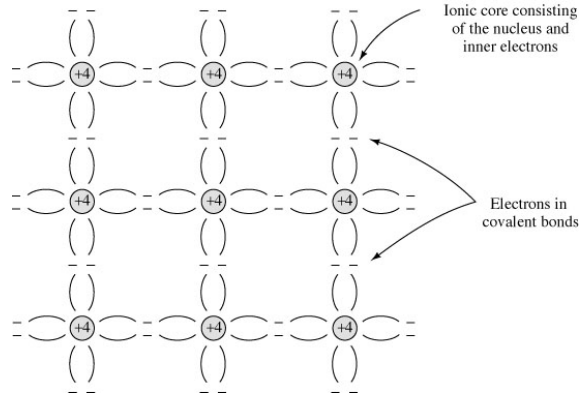


Concetti base dei semiconduttori

- Discussione qualitativa dei concetti basilari della fisica dei semiconduttori e dei meccanismi 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 atomi che legano.

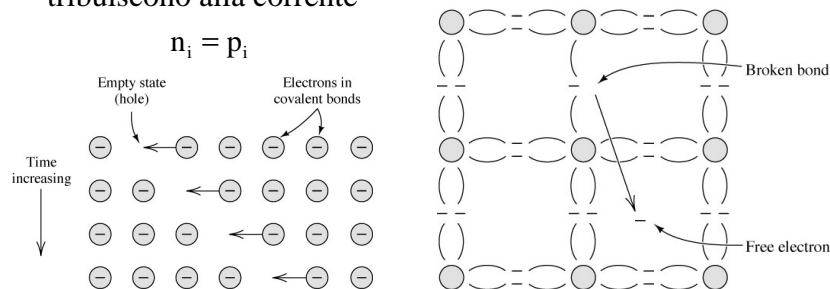
Concetti base dei semiconduttori /2

- 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 dei semiconduttori /3

- Dato che il numero di elettroni liberi a 300 K è molto inferiore a quello di un buon conduttore ($n_i \sim 1.45$ elettroni/cm³), questi materiali sono detti **semiconduttori**
- Un legame covalente rotto lascia un *buco* (**lacuna**) di un elettrone, che si può vedere come **una carica positiva libera** di muoversi nel cristallo
- Se si applica un campo, sia gli elettroni che le lacune contribuiscono alla corrente

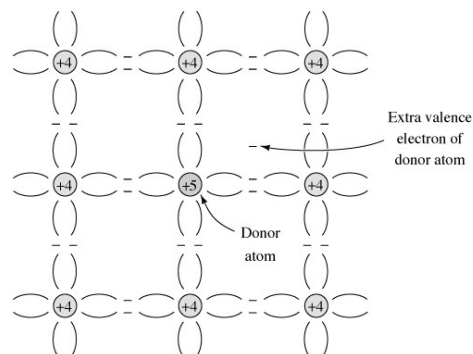


Generazione e ricombinazione

- 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 possono **ricombinare** per formare un legame covalente (il tasso di ricombinazione è proporzionale alla concentrazione di elettroni e lacune)
- Ad una data temperatura, esiste un punto di equilibrio in cui 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**

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, e si ottiene un semiconduttore **estrinseco**
- Se aggiungiamo fosforo (P), che ha 5 elettroni di valenza, l'atomo di fosforo forma 4 legami covalenti con 4 elettroni di valenza di silicio vicini: il 5 elettrone di valenza è debolmente legato, e a temperature normali, è un **elettrone libero**
- **Nessuna lacuna** è stata creata



Semiconduttori di tipo n /2

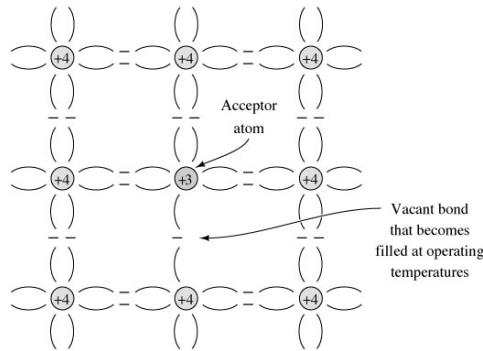
- Aggiungendo atomi di impurezze **pentavalente** (5 elettroni di valenza) si creano **elettroni liberi** => semiconduttori di **tipo n**
- Nei semicond. di tipo n , la conduzione è dovuta essenzialmente ai tanti elettroni liberi, che sono chiamati **portatori maggioritari (lacune = portatori minoritari)**
- A temperature normali, gli atomi di impurezza pentavalente (**donori**, in quanto donano un elettrone di valenza) hanno perso il loro 5^o 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: $pn = p_i n_i = n_i^2$
- **Il tempo di vita di un portatore minoritario** (lacuna, in questo caso) è un parametro importante per il comportamento in frequenza del diodo:
- In un sem. di tipo n , esso è dato dal tempo che passa dalla generazione alla ricombinazione della lacuna da parte di un elettrone libero (τ_p)

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^o elettrone necessario per completare il legame con il 4^o atomo manca, e viene fornito da atomi di Si vicini => si crea un **movimento di elettroni**
- Questi elettroni sono legati all'impurezza => **conduzione è dovuta alle lacune – tipo *p***
- In sem. di tipo *p*: le **lacune** sono **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 nel 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

$$N_A + n = N_D + p$$

Velocità di deriva

- **In assenza di campo elettrico**, i portatori in un cristallo si muovono casualmente per effetto dell'agitazione termica e 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) fra due collisioni successive: dopo una collisione, la velocità dei portatori cambia casualmente, e il risultato netto (di collisioni + accelerazione del campo) determina **una velocità media costante in direzione della forza**
- Il moto dei portatori dovuto ad un campo elettrico applicato è chiamato **deriva**

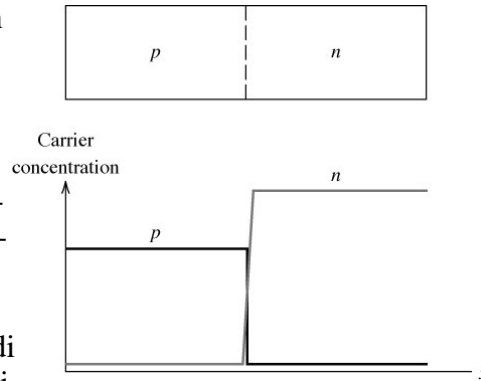
Velocità di deriva - corrente di diffusione

- 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
$$v_n = -\mu_n E \qquad v_p = \mu_p E$$
- La costante $\mu_{n(p)}$ è detta **mobilità**, ed è funzione della concentrazione 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 conc. non viene mantenuto, la corrente di diffusione cessa rapidamente

Fisica del diodo a giunzione

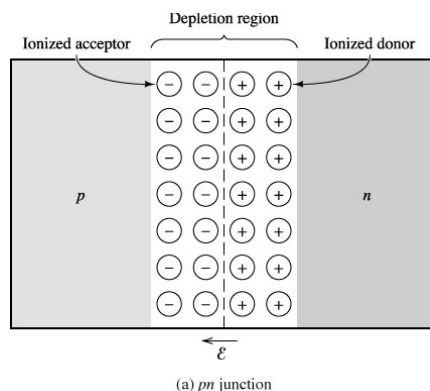
La giunzione pn

- La giunzione pn è costituita da un singolo cristallo di semiconduttore **drogato n** da un lato e tipo **p** dall'altro
- Anche se la giunzione pn 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



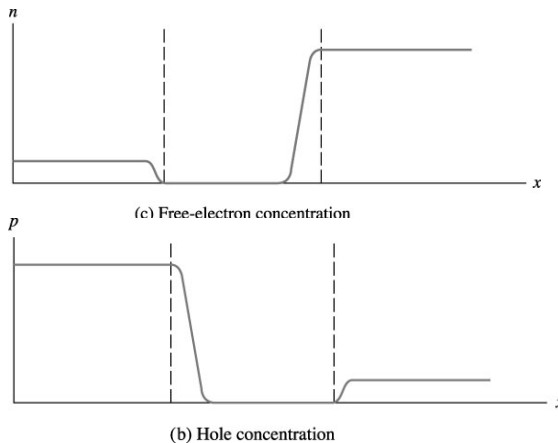
La giunzione pn /2

- Subito dopo che le due metà sono state unite, il brusco gradiente di concentrazione che esiste per entrambi i portatori 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 un'ulteriore diffusione**
- Si forma una **regione di svuotamento**, che si estende da entrambi i lati della giunzione



La giunzione pn /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!

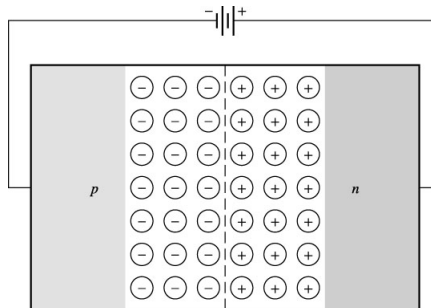


La giunzione pn /4

- 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 alla giunzione, $\Phi_0 \approx 1$ 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

La giunzione pn polarizzata inversamente

- Una giunzione pn 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** \Rightarrow i portatori maggioritari sono ancor più impossibilitati a scalcare la barriera e la **regione di svuotamento si allarga**
- La corrente dovuta ai por. maggioritari è **nulla**
- La piccola corrente dovuta ai minoritari è limitata dalla concentrazione di portatori e risulta quasi **indipendente dalla tensione inversa**



La giunzione pn polarizzata inversamente /2

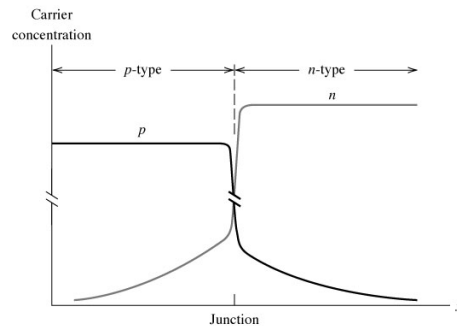
- La corrente che scorre attraverso una giunzione pn è legata alla tensione applicata dall'equazione di Shockley

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

- 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 por. 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

La giunzione pn polarizzata direttamente

- La giunzione pn 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 concent. di lacune nella parte p si riduce ra-



La giunzione pn polarizzata direttamente /2

-pidamente 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
- In zona $n(p)$, lontano dalla giunzione, la corrente di elettroni(lacune) è dominante
- Se $N_A < (>) N_D \Rightarrow i_D$ è dovuta principalmente a elettroni (lacune)

