

Diodi

Parte 2

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 18-4-2018)

Coefficiente di emissione

- L'equazione di Shockley

$$i = I_S \left(e^{v/V_T} - 1 \right)$$

rappresenta correttamente la caratteristica del diodo solo se i fenomeni di generazione e ricombinazione di coppie elettrone-lacuna nella regione svuotata sono trascurabili

- Inoltre la corrente del diodo si discosta da quella prevista dall'equazione di Shockley in condizioni di *alta iniezione*, cioè se la concentrazione dei portatori minoritari iniettati nelle regioni p e n diventa confrontabile con la concentrazione dei portatori maggioritari
- Per tenere conto di questi fenomeni si introduce nell'equazione un coefficiente η , detto **coefficiente di emissione** (o **di idealità**), il cui valore dipende dal tipo di dispositivo e normalmente è compreso tra 1 e 2

$$i = I_S \left(e^{v/(\eta V_T)} - 1 \right)$$

Resistenza serie

- L'equazione di Shockley non tiene conto della resistenza delle regioni p e n
- Se la corrente attraverso il diodo assume valori elevati la caduta di tensione dovuta a queste resistenze può diventare significativa
- Questo effetto può essere rappresentato introducendo una resistenza R_S in serie al diodo
- ➔ La caduta di tensione riduce la tensione applicata alla giunzione, quindi la corrente aumenta meno rapidamente rispetto a quanto previsto dalla legge esponenziale
- ➔ Tenendo conto della R_S l'equazione del dispositivo diviene

$$i = I_S \left(e^{\frac{v - R_S i}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

3

Dipendenza della caratteristica dalla temperatura

- La caratteristica del diodo dipende dalla temperatura perché sia la tensione termica V_T sia la corrente inversa di saturazione I_S sono funzioni della temperatura
 - ◆ V_T è proporzionale alla temperatura
 - ◆ I_S ha una dipendenza di tipo esponenziale e raddoppia per ogni incremento di circa 10 °C
- ➔ Per un valore fissato della corrente, la tensione del diodo

$$v = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{i}{I_S} + 1 \right)$$

è una funzione approssimativamente lineare della temperatura, e mostra una riduzione di circa 2 mV per ogni incremento di 1 °C

- Questa proprietà può essere sfruttata per utilizzare il diodo come sensore di temperatura

4

Modello per piccoli segnali

- Si considera un diodo a cui è applicata una tensione $v_D = V_D$ costante, la cui corrente è quindi

$$I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

- Si sovrappone alla tensione V_D , una piccola tensione $v_d(t)$

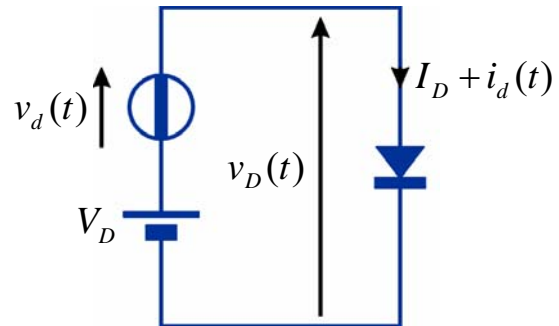
$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

- Se $v_d(t)$ è sufficientemente piccola, la corrente del diodo

$$i_D(t) = I_S \left(e^{(V_D+v_d)/V_T} - 1 \right)$$

può essere espressa mediante uno sviluppo di Taylor troncato del tipo

$$i_D(t) = I_D + i_d(t) \approx I_D + \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{v_D=V_D} \cdot v_d(t) = I_D + \frac{I_D + I_S}{V_T} v_d(t)$$



5

Modello per piccoli segnali

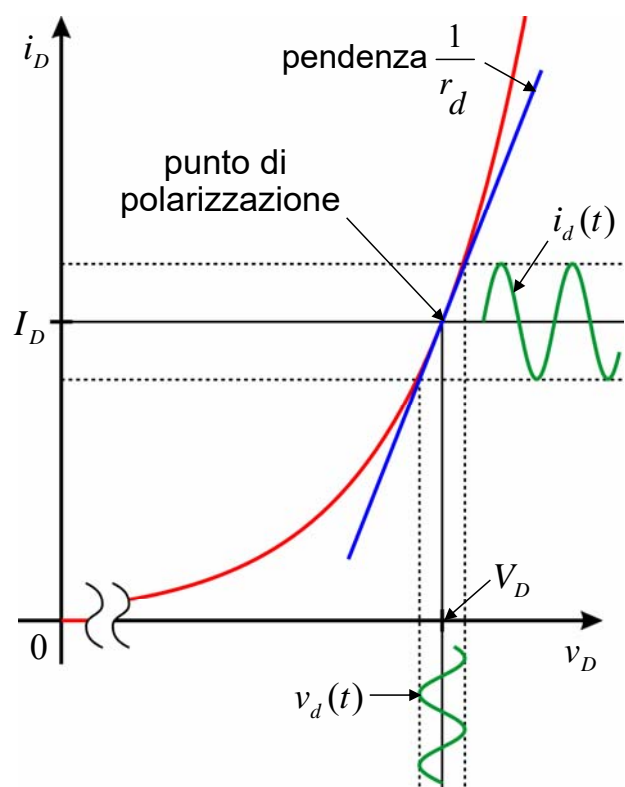
- La relazione tra la variazione di v_D nell'intorno di V_D e la variazione di i_D , nell'intorno di I_D è quindi

$$i_d(t) \approx \frac{I_D + I_S}{V_T} v_d(t) = \frac{v_d(t)}{r_d}$$

dove

$$r_d = \frac{1}{\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{v_D=V_D}} = \frac{V_T}{I_D + I_S}$$

è la **resistenza differenziale** o **resistenza per piccoli segnali** del diodo



6

Modello per piccoli segnali

- In condizioni di polarizzazione diretta, I_S è trascurabile rispetto a I_D , quindi si può ritenere

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$$

- Per $V_D = 0$ si ha

$$r_d = \frac{V_T}{I_S}$$

- Per $V_D < 0$, $I_D \approx -I_S$, quindi

$$r_d \rightarrow \infty$$

7

Effetti reattivi nei diodi

- In un diodo a giunzione si hanno due meccanismi che determinano accumulo di carica
 - ◆ carica accumulata nella regione svuotata
 - ◆ eccesso di portatori minoritari nelle regioni p e n dovuto alla corrente che attraversa al giunzione
- Il primo effetto si può osservare quando la giunzione è polarizzata inversamente, il secondo quando è polarizzata direttamente
- In condizioni di regime, la carica accumulata è determinata dal valore della tensione ai terminali del diodo

$$Q = Q(v)$$

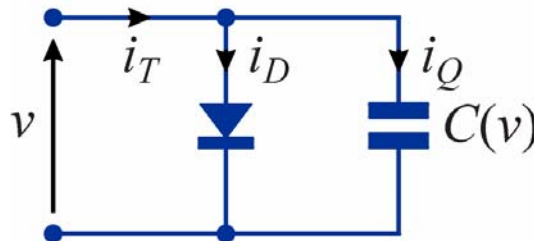
8

Effetti reattivi nei diodi

- In condizioni dinamiche la carica accumulata varia nel tempo
- ➔ Per il principio di conservazione della carica, alla corrente del diodo si aggiunge un contributo dovuto alla variazione della carica
- La corrente totale del diodo può essere espressa come

$$i_T = i_D + i_Q = i_D + \frac{dQ}{dt} = i_D + \frac{dQ}{dv} \frac{dv}{dt} = i_D + C(v) \frac{dv}{dt}$$

- ◆ i_D rappresenta la corrente che si avrebbe in condizioni statiche
- ◆ il contributo dovuto alla derivata della carica può essere rappresentato mediante un condensatore non lineare collegato in parallelo al diodo



9

Carica nella regione svuotata

- Nella regione svuotata, ai due lati della giunzione sono presenti due distribuzioni di cariche dovute agli atomi ionizzati dei donatori e degli accettori
- Le cariche immagazzinate ai due lati della giunzione possono essere espresse come

$$Q^+ = qN_D A l_n$$

$$Q^- = -qN_A A l_p$$

dove A è l'area della giunzione e l_p e l_n sono le lunghezze della regione svuotata nella regione p e nella regione n

- Affinché il cristallo complessivamente risulti neutro, le cariche immagazzinate ai lati della giunzione devono essere uguali e opposte

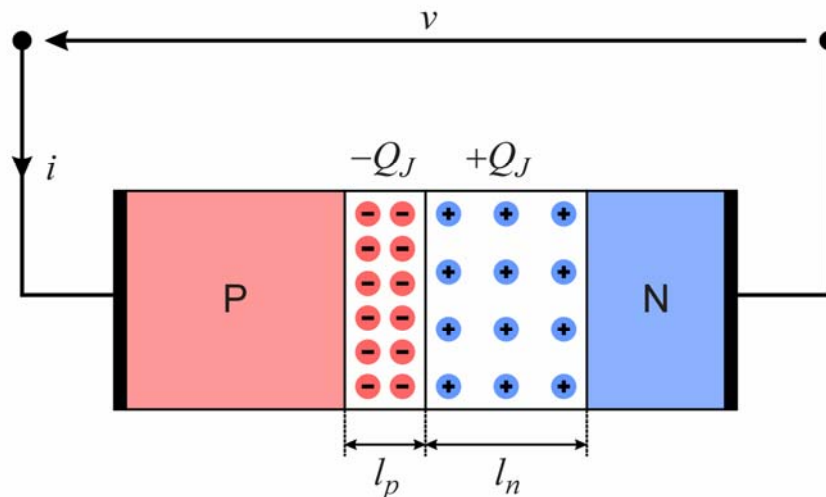
$$Q_J = Q^+ = -Q^-$$

10

Carica nella regione svuotata

- Questo comporta che, se le concentrazioni dei donatori e degli accettori sono diverse, la regione svuotata ha estensione maggiore dal lato in cui la concentrazione dei droganti è minore

$$\frac{l_n}{l_p} = \frac{N_A}{N_D}$$



11

Carica nella regione svuotata

- Si può dimostrare che la dipendenza dalla tensione della carica immagazzinata nella regione svuotata è

$$Q_J = Q_{J0} \sqrt{1 - \frac{v}{V_0}}$$

dove Q_{J0} rappresenta il valore di Q_J per $v = 0$ (cioè se giunzione non è polarizzata) e V_0 è la differenza di potenziale ai capi della regione svuotata per $v = 0$

- Se la tensione varia, a causa della variazione della carica accumulata, si ha una corrente data da

$$i_J = - \frac{dQ_J}{dv} \frac{dv}{dt} = C_J \frac{dv}{dt}$$

dove il segno $-$ è dovuto al fatto che la carica, dal lato corrispondente all'anodo, è negativa

12

Capacità di giunzione

- Nell'equazione precedente C_J rappresenta la **capacità di giunzione** (o **di transizione**) del diodo

$$C_J = \frac{Q_{J0}}{2V_0 \sqrt{1 - \frac{v}{V_0}}} = \frac{C_{J0}}{\sqrt{1 - \frac{v}{V_0}}}$$

- C_{J0} è il valore di C_J per $v = 0$ ed è proporzionale all'area della giunzione
- I valori tipici di C_{J0} variano tra qualche pF e qualche centinaio di pF
- C_J diminuisce all'aumentare della tensione inversa ($-v$)
- L'espressione di C_J vale in condizioni di polarizzazione inversa o debole polarizzazione diretta
- All'aumentare della tensione di polarizzazione la carica contenuta nella regione svuotata tende ad annullarsi e la capacità di giunzione diviene trascurabile rispetto alla capacità dovuta all'eccesso di portatori minoritari (capacità di diffusione)

13

Capacità di giunzione

- La trattazione precedente vale se la concentrazione dei droganti in corrispondenza della giunzione ha una variazione a gradino
- Si realizzano anche dispositivi in cui la concentrazione dei droganti varia in modo graduale
- In questo caso l'espressione della capacità di giunzione diviene

$$C_J = C_{J0} \left(1 - \frac{v}{V_0} \right)^{-m}$$

dove il coefficiente m (**coefficiente di grading**) vale $1/2$ per giunzioni a gradino e $1/3$ per variazione lineare delle concentrazioni dei droganti

14

Eccesso di cariche minoritarie

- Le cariche che attraversano la giunzione per diffusione diventano, nella regione in cui giungono, cariche minoritarie
- Quando la giunzione è polarizzata in diretta questo dà origine ad un eccesso di portatori minoritari rispetto alla situazione che si ha quando la giunzione non è polarizzata
- Le cariche minoritarie iniettate nelle due regioni tendono a ricombinarsi con le cariche maggioritarie, quindi la loro concentrazione diminuisce all'aumentare della distanza dalla giunzione
- Si indica con $p_n(x)$ la concentrazione di lacune nella regione n e con $n_p(x)$ la concentrazione di elettroni nella zona p
- Agli estremi della regione svuotata le concentrazioni sono

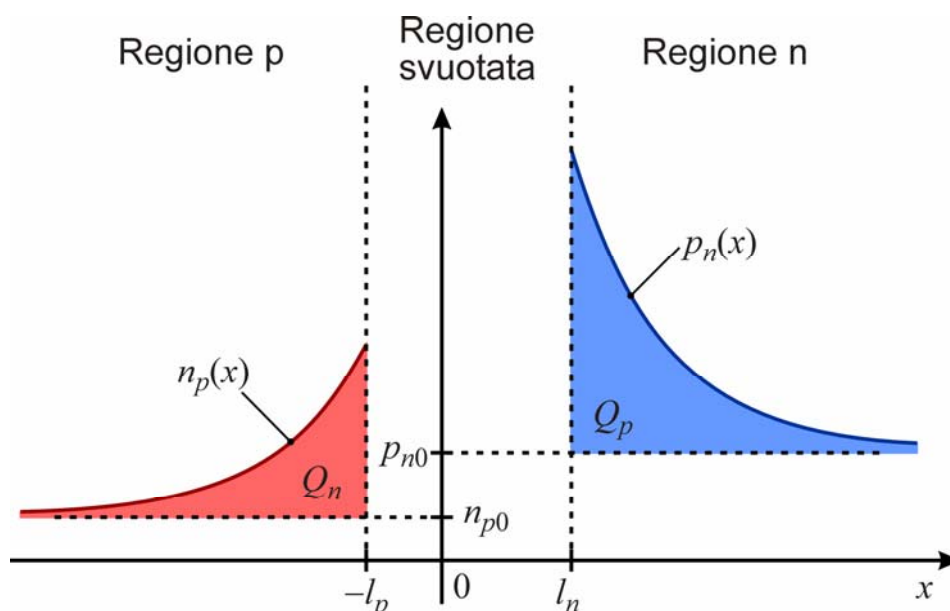
$$p_n(l_n) = p_{n0} e^{v/V_T} \quad n_p(-l_p) = n_{p0} e^{v/V_T}$$

dove p_{n0} e n_{p0} indicano le concentrazioni in assenza di polarizzazione

15

Eccesso di cariche minoritarie

- Allontanandosi dai bordi della regione svuotata le concentrazioni diminuiscono con legge esponenziale
- Le aree evidenziate sono proporzionali alle cariche in eccesso, Q_n e Q_p , nelle due regioni



16

Eccesso di cariche minoritarie

- Si indicano con τ_p e τ_n i **tempi di vita medi** delle cariche minoritarie (cioè il tempi medi che trascorrono prima le cariche si ricombinino)
- Per effetto delle ricombinazioni, gli eccessi di carica si ridurrebbero, nell'unità di tempo, delle quantità Q_p/τ_p e Q_n/τ_n
- In condizioni stazionarie, le cariche rimangono costanti, quindi la carica persa per effetto delle ricombinazioni viene bilanciata dalla carica iniettata dalla corrente che attraversa la giunzione
- I contributi delle lacune e degli elettroni alla corrente del diodo sono legati alle cariche dalle relazioni

$$i_p = \frac{Q_p}{\tau_p} \quad i_n = \frac{Q_n}{\tau_n}$$

- Complessivamente l'eccesso di carica nelle due regioni è

$$Q_D = Q_p + Q_n = \tau_p i_p + \tau_n i_n$$

17

Capacità di diffusione

- L'eccesso di carica può essere messo in relazione con la corrente del diodo $i_D = i_p + i_n$ introducendo il tempo di vita medio delle cariche minoritarie τ_T , detto anche **tempo di transito medio** della giunzione

$$Q_D = \tau_T i_D$$

- In regime dinamico la carica accumulata varia nel tempo
- ➔ Di conseguenza alla corrente i_D si deve aggiungere un contributo dovuto alla variazione di Q_D
- Questo porta all'introduzione della **capacità di diffusione** definita dalla relazione

$$C_D = \frac{dQ_D}{dv} = \tau_T \frac{di_D}{dv} = \frac{\tau_T i_D}{V_T} = \frac{\tau_T}{r_d}$$

dove r_d è la resistenza differenziale del diodo

18

Capacità di diffusione

- I valori del tempo di transito τ_T possono variare da qualche ns a qualche centinaio di μs
- La capacità di diffusione, essendo proporzionale alla corrente del diodo, può assumere valori elevati (anche dell'ordine delle decine di μF)
- Questa capacità è in parallelo con la resistenza differenziale del diodo, che ha normalmente valori molto piccoli
- ➔ Quindi la costante di tempo del diodo coincide con il tempo di transito medio

$$\tau_T = r_d C_D$$

19

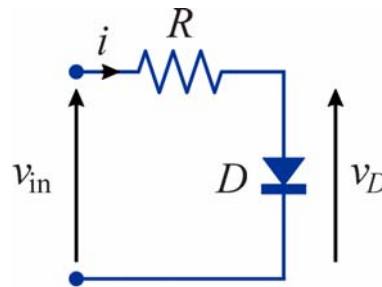
Tempi di recupero

- A causa dell'accumulo di cariche un diodo non può commutare istantaneamente tra le condizioni di funzionamento in diretta e in inversa
- Il transitorio di accensione è relativamente breve e in genere può essere trascurato
- Il tempo corrispondente (definito come tempo necessario perché la corrente passi da 0 al 90% del suo valore a regime) è detto **tempo di recupero diretto** (**tfr**, *forward recovery time*)
- Il transitorio di spegnimento è molto più lungo del transitorio di accensione, dato che richiede lo smaltimento degli eccessi di cariche minoritarie accumulate nelle regioni p e n
- Il tempo corrispondente è detto **tempo di recupero inverso** (**trr**, *reverse recovery time*)

20

Tempo di recupero inverso

- Si considera il circuito rappresentato nella figura e si assume che la tensione v_{in} passi istantaneamente da un valore positivo V_F a un valore negativo $-V_R$
- Poiché l'eccesso di cariche non si può annullare istantaneamente, anche la tensione v_D non può variare istantaneamente
- Se V_R è grande rispetto a v_D la corrente i ha valore $-V_R/R$
- Dato che i è negativa si ha una progressiva riduzione delle cariche in eccesso e della tensione v_D
- In questa fase la corrente i rimane praticamente costante finché l'eccesso di carica non si annulla
- Il tempo necessario a smaltire la carica in eccesso è detto **tempo di accumulo** (*storage time, t_s*)



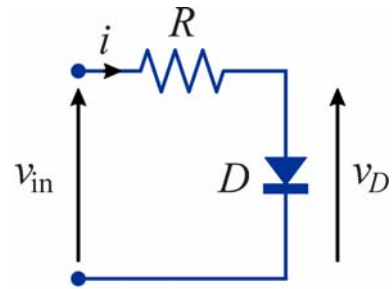
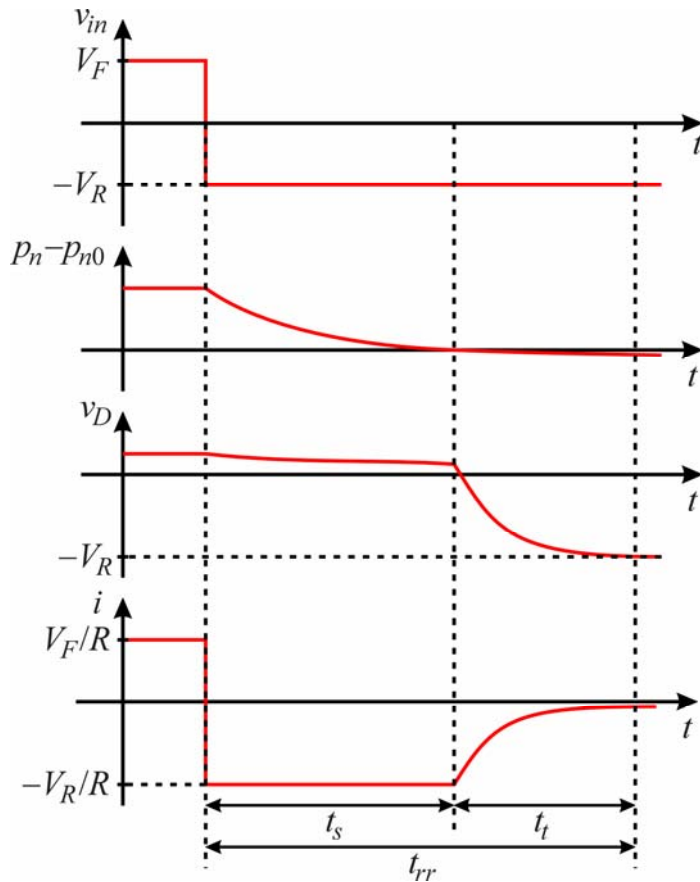
21

Tempo di recupero inverso

- Quando l'estrazione delle cariche è terminata la tensione v_D e la corrente i tendono rispettivamente a $-V_R$ e a $-I_S$ con una costante di tempo determinata essenzialmente dalla resistenza R e dalla capacità di giunzione C_J
- Il tempo necessario affinché la corrente i raggiunga un valore che differisce del 10% dal valore asintotico è detto **tempo di trasmissione** (*transmission time, t_t*)
- Il **tempo di recupero inverso** è definito come somma del tempo di accumulo e del tempo di trasmissione

22

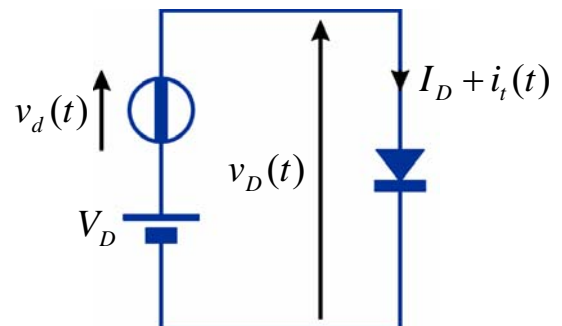
Tempo di recupero inverso



t_s = tempo di accumulo
 (storage time)
 t_t = tempo di trasmissione
 (transmission time)
 $t_{rr} = t_s + t_t$

Modello per piccoli segnali con effetti reattivi

- Il comportamento per piccoli segnali di un diodo può essere rappresentato mediante la sola resistenza differenziale se le variazioni nell'intorno del punto di polarizzazione sono sufficientemente lenti da rendere trascurabili gli effetti reattivi
- Se questa ipotesi non è verificata si deve tenere conto anche delle variazioni della carica accumulata
- In questo caso la variazione totale i_t della corrente nell'intorno di I_D è

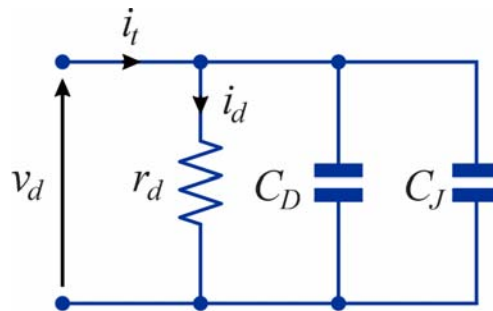


$$i_t = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{v_D=V_D} \cdot v_d + \left. \frac{dQ}{dv_D} \right|_{v_D=V_D} \cdot \frac{dv_d}{dt} = \frac{v_d}{r_d} + C(V_D) \frac{dv_d}{dt}$$

dove $C(V_D)$ rappresenta la somma delle capacità di giunzione e di diffusione

Modello per piccoli segnali con effetti reattivi

➔ Il circuito equivalente per piccoli segnali è quindi



- I valori di r_d , C_D e C_J sono determinati dalla tensione di polarizzazione V_D
- In condizioni di polarizzazione inversa o di debole polarizzazione diretta
 - ◆ r_d è molto grande e, in pratica, può essere considerata un circuito aperto
 - ◆ C_D è trascurabile rispetto a C_J
- In condizioni di forte polarizzazione diretta C_J è trascurabile rispetto a C_D

25

Diodi varactor



- In un diodo polarizzato in inversa si ha un accumulo di carica nella regione svuotata che può essere descritto mediante la capacità di giunzione C_J che è una funzione della tensione di polarizzazione
- ➔ E' possibile utilizzare un diodo polarizzato in inversa per realizzare un dispositivo che, per piccoli segnali, si comporta come un condensatore variabile la cui capacità è determinata dalla tensione di polarizzazione
- I dispositivi progettati per questo tipo di applicazione sono detti **diodi varactor** (o **varicap**)

26

Diodi Schottky



- Il **diodo Schottky** (SBD, *Schottky-barrier diode*) è ottenuto mettendo a contatto un metallo con un semiconduttore di tipo n debolmente drogato (se il semiconduttore fosse fortemente drogato si otterrebbe un contatto ohmico)
- Il dispositivo ha caratteristiche simili a un diodo a giunzione pn, ma con due importanti differenze
 - ◆ in un diodo Schottky la corrente è dovuta solo a cariche maggioritarie (cioè elettroni) quindi non si ha il fenomeno dell'accumulo di cariche minoritarie
 - ➔ il dispositivo può commutare più velocemente (tempo di recupero minore di almeno un ordine di grandezza)
 - ◆ in conduzione la caduta di tensione è minore (0,3-0.5V invece di 0.6-0.8V)

27

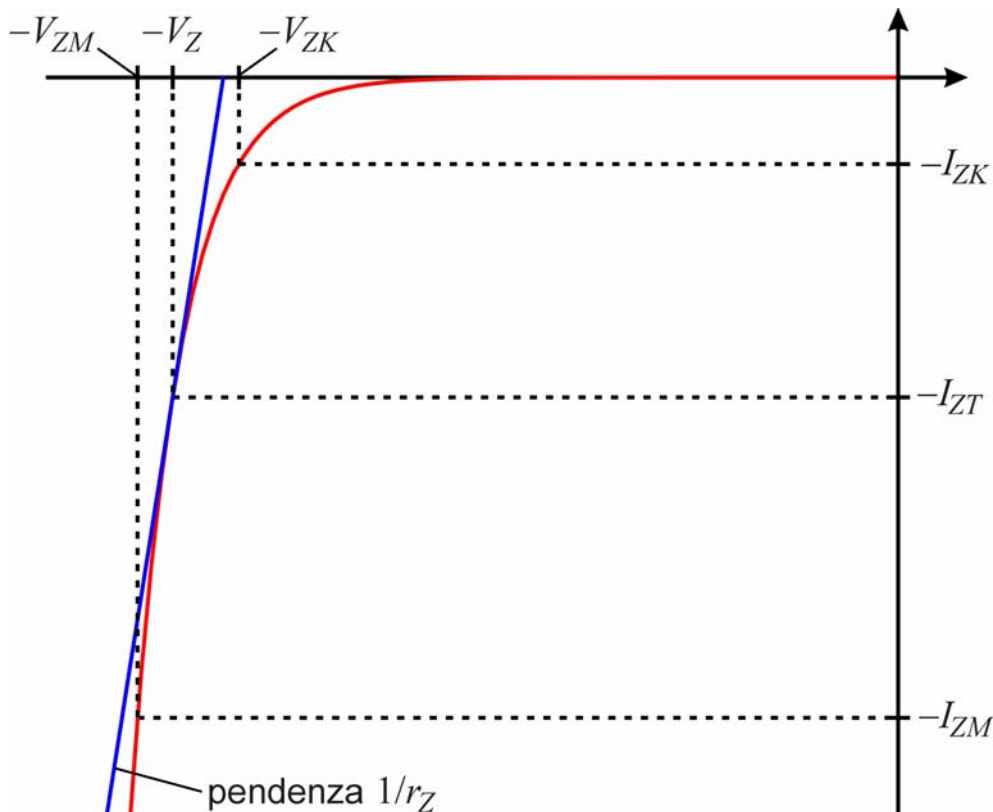
Diodi Zener



- I **diodi Zener** sono diodi progettati in modo da ottenere un valore predeterminato della tensione di breakdown e una pendenza elevata della caratteristica (cioè una piccola resistenza differenziale) nella regione di breakdown
- Per questi dispositivi, in genere il costruttore fornisce il valore della tensione inversa di breakdown V_Z in corrispondenza di un valore I_{ZT} della corrente inversa (corrente di test)
- Altri parametri che caratterizzano il dispositivo sono:
 - ◆ la resistenza differenziale r_Z per $I = -I_{ZT}$
 - ◆ la massima potenza dissipabile dal dispositivo, a cui corrispondono i valori massimi V_{ZM} e I_{ZM} della tensione e della corrente inverse
 - ◆ il valore I_{ZK} della corrente che delimita inferiormente l'intervallo in cui la caratteristica si può considerare praticamente rettilinea

28

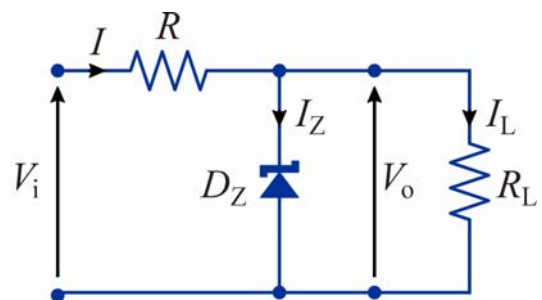
Diodi Zener



29

Regolatore di tensione

- Un **regolatore di tensione** è un circuito in grado di fornire una tensione continua di valore praticamente costante al variare della tensione di alimentazione e del carico collegato
- È possibile utilizzare un diodo Zener per realizzare un regolatore di tensione come indicato nello schema
- La tensione di uscita V_o mantiene un valore praticamente coincidente con V_Z se, al variare di V_i e I_L ,
 - ◆ Il valore minimo di I_Z non scende al di sotto di I_{ZK}
 - ◆ Il valore massimo di I_Z non sale al di sopra di I_{ZM}
- Per realizzare queste condizioni occorre un valore adeguato della resistenza R



30

Regolatore di tensione

- La corrente del diodo Zener è

$$I_Z = \frac{V_i - V_Z}{R} - I_L$$

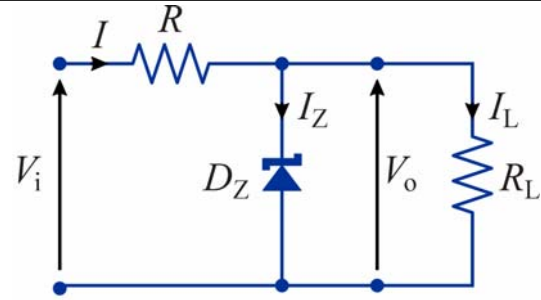
- Al variare di V_i e I_L

- I_Z è minima quando la tensione di ingresso è minima e la corrente del carico è massima
 - I_Z è massima quando la tensione di ingresso è massima e la corrente del carico è minima

- La resistenza R deve essere compresa tra i valori

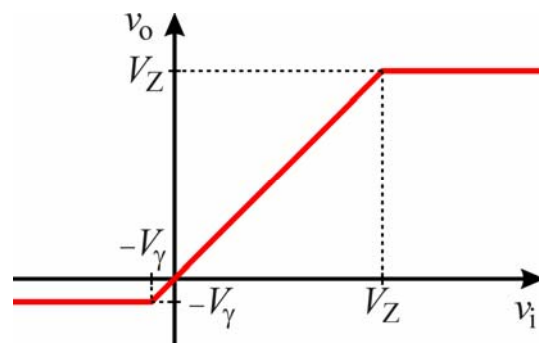
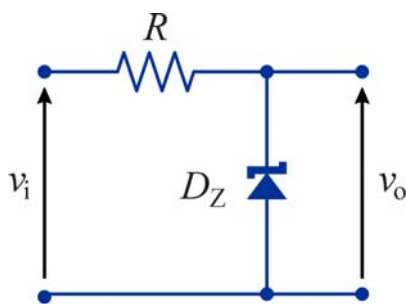
$$R_{\min} = \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}}$$

$$R_{\max} = \frac{V_{i\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$



31

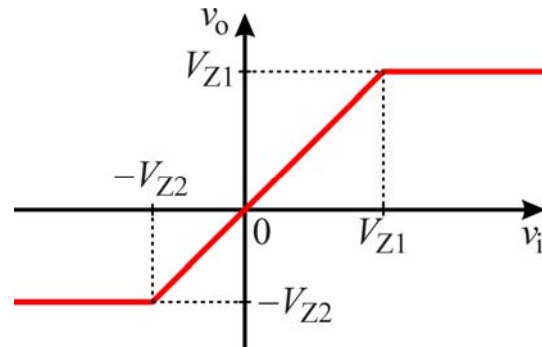
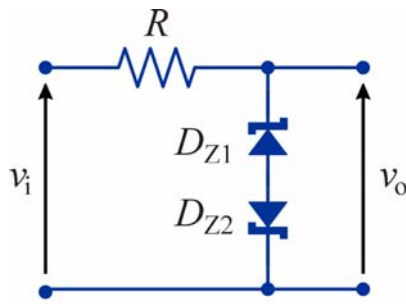
Limitatore con un diodo Zener



- $v_i > V_Z \rightarrow$ il diodo è in conduzione inversa $\rightarrow v_o = V_Z$
- $-V_\gamma < v_i < V_Z \rightarrow$ il diodo è interdetto $\rightarrow v_o = v_i$
- $v_i < -V_\gamma \rightarrow$ il diodo è in conduzione diretta $\rightarrow v_o = -V_\gamma$

32

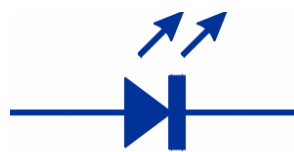
Limitatore con due diodi Zener



- $v_i < -V_{Z2} - V_{\gamma1} \rightarrow D_{Z1}$ conduce indiretta e D_{Z2} in inversa $\rightarrow v_o = -V_{Z2} - V_{\gamma1}$
- $-V_{Z2} - V_{\gamma1} < v_i < V_Z \rightarrow$ entrambi i diodi sono interdetti $\rightarrow v_o = v_i$
- $v_i > V_{Z1} + V_{\gamma1} \rightarrow D_{Z2}$ conduce indiretta e D_{Z1} in inversa $\rightarrow v_o = V_{Z1} + V_{\gamma1}$

33

Diodi LED



- In un diodo polarizzato in diretta si ha una forte iniezione di portatori minoritari nelle regioni p e n che progressivamente si ricombinano con i portatori maggioritari
- Nel processo di ricombinazione viene liberata energia che, in alcuni materiali è convertita in calore, mentre in altri dà luogo all'emissione di un fotone con lunghezza d'onda dipendente dal gap di energia del semiconduttore
- Utilizzando materiali di questo tipo si possono realizzare diodi che emettono luce detti **LED** (*Light-emitting diode*)

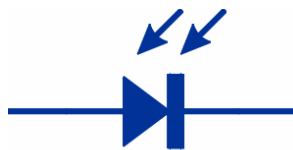
34

Diodi LED

- I diodi LED sono realizzati utilizzando semiconduttori composti (GaAs, AlGaAs, AlGAP, GaN, ecc.); dal tipo di materiale dipende il colore della luce emessa
- Rispetto ai diodi al silicio hanno un valore della tensione di soglia più elevata, dipendente dal tipo di semiconduttore, che può variare da 1.3 V (per i LED infrarossi) fino a 4-4.5 V (per i LED ultravioletti)
- I LED, inoltre, hanno generalmente valori piccoli (tipicamente intorno a 5 V) della tensione di breakdown
- La luce bianca può essere ottenuta utilizzando tre LED i cui colori corrispondono ai colori primari (rosso, verde, blu)
- Più spesso (in particolare nel caso dei LED utilizzati per l'illuminazione) la luce bianca è ottenuta convertendo, per mezzo di sostanze dette *fosfori*, la luce emessa da un LED blu o ultravioletto

35

Fotodiodi



- Se una giunzione pn è esposta alla luce, i fotoni incidenti possono generare coppie elettroni lacune e quindi dare origine a una corrente (detta **fotocorrente**) la cui intensità aumenta con l'intensità della radiazione
- Questo fenomeno è utilizzato per realizzare i fotodiodi, utilizzati per rivelare segnali luminosi
- I fotodiodi normalmente sono utilizzati in polarizzazione inversa
- In questi condizioni la corrente è data dalla somma della fotocorrente e della corrente inversa di saturazione (in questo caso, detta anche *corrente oscura*) che determina il limite di sensibilità del dispositivo

36

Fotodiodi e celle solari

- La caratteristica del dispositivo è del tipo

$$i = I_s \left(e^{v/(\eta V_T)} - 1 \right) + i_{ph}$$

dove i_{ph} rappresenta la fotocorrente ed è proporzionale all'intensità del flusso luminoso Φ che investe la giunzione

- La caratteristica passa attraverso il 4° quadrante, dove la potenza erogata dal dispositivo diviene positiva, e quindi si ha conversione di energia luminosa in energia elettrica (**effetto fotovoltaico**)
- Su questo principio si basano le **celle solari** che sono dei particolari fotodiodi ottimizzati per essere utilizzati come generatori

