

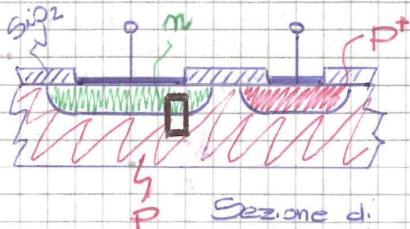
GIUNZIONE P-N / DIODO

Elettronica

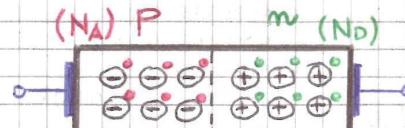
La giunzione PN è, di fatto, il mattone elementare di ogni dispositivo elettronico. L'elemento (bipolo) più semplice che ne origina è il diodo.

- POLMI

STRUTTURA FISICA DELLA GIUNZIONE PN



Sezione di un diodo ZL silicio



NOTA BENE: giunzione non vuol dire "due pezzi messi insieme." Le zone N e P sono diffuse sul medesimo monocristallo.

Schematizzazione delle zone di giunzione:

Semiconduttore P

- LACUNE mobili
- Ioni negativi fissi

Semiconduttore N

- ELETTRONI mobili
- Ioni positivi fissi

Fondamenti di Elettronica

L'assenza di attrito risulta essere passiva il materiale, fornisce protezione agli strati sottostanti

Step ①: Al tempo t_0 , ovvero appena sono stati diffusi i droganti (sia N che P), si trova dal lato N un elevato numero di elettroni mobili e dal lato P un elevato numero di lacune mobili. Data la elevata densità di queste caniche, pari al numero di donori del lato N e accettori dal lato P è possibile immaginareli come una sorta nuvola, con proprietà differenti (in questo caso la canica).

PORTATORI MAGGIORITARI \rightarrow DROGANTI

PORTATORI MINORITARI \rightarrow ESTREMAMENTE RIDOTTI (vedi legge di azione di massa).

ELETTRONI - Fortemente concentrati zona N
- densità bassissima in zona P

LACUNE - Fortemente concentrate zona P
- densità bassissima in zona N

RISULTATO

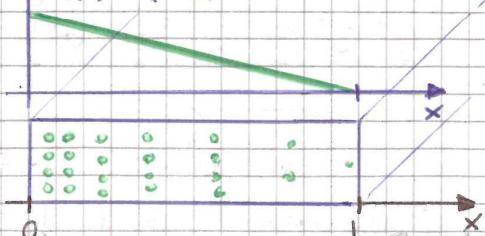
\rightarrow FORTE GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE

GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE è la causa delle modalità di trasporto delle caniche per DIFFUSIONE. Ne consegue che la configurazione del semiconduttore in termini di distribuzione di canica subisce una modifica.

DIFFUSIONE e CORRENTE DI DIFFUSIONE

Ippotizziamo, per semplicità, di avere un materiale con canica distribuite in modo uniforme e che il gradiente di concentrazione sia solo lungo una delle 3 direzioni, che indichiamo con x .

$$n(x) \propto p(x)$$



All'interno del materiale si genera un campo di DENSITÀ DI CORRENTE DI DIFFUSIONE le cui intensità (in questo esempio in direzione x) per i \rightarrow :

$$J_p^{\text{diff}} = +qD_p \left(-\frac{\partial n_p}{\partial x} \right) = -qD_p \frac{\partial n_p}{\partial x} \times \text{LACUNE}$$

$$J_m^{\text{diff}} = -qD_m \left(-\frac{\partial n_m}{\partial x} \right) = +qD_m \frac{\partial n_m}{\partial x} \times \text{ELETTRONI}$$

ATTENZIONE AI SEGNI!!!

Ricorda che la corrente è convenzionalmente il flusso di canica positiva.

Canche positive: J_p deve essere nella direzione di DIMINUZIONE della concentrazione, mentre $\frac{\partial n_p}{\partial x}$ è orientato nella direzione di crescita della concentrazione. Da qui il segno negativo.

Cariche negative: $J_{\text{DIFF}}^{\rightarrow}$ deve essere nella direzione di CRESITA della concentrazione. Gli elettroni si muovono dalle zone ad elevata concentrazione alle zone a più basse concentrazione, ma il verso della corrente (moto di carica positiva) è opposto. Inoltre è necessario ricordare che gli elettroni trasportano carica negativa.

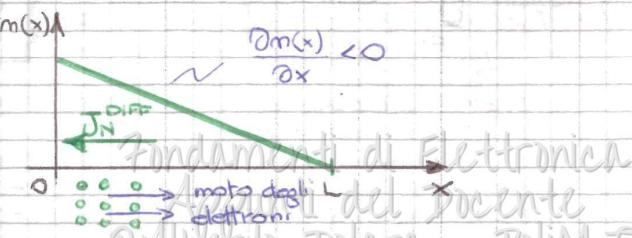
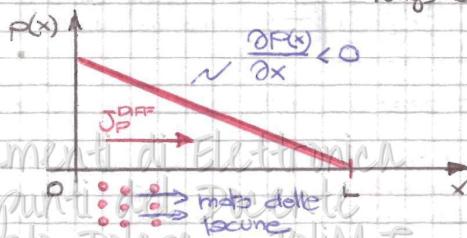
- POLIMI

$$J_{p,x}^{\text{DIFF}} = +qD_p \left(\frac{\partial P(x)}{\partial x} \right)_{\text{verso DOLARA}} \quad J_{m,x}^{\text{DIFF}} = -q \cdot D_m \left(\frac{\partial m(x)}{\partial x} \right)_{\text{verso DOLARA}} = +qD_m \frac{\partial m}{\partial x}$$

carica della lezuna

verso di induzione delle concentrazioni lungo esse x

verso di riduzione delle concentrazioni lungo l'asse x



I coefficienti di diffusività D_m e D_p , sono legati ai coefficienti di mobilità, μ_m e μ_p dalla relazione di EINSTEIN:

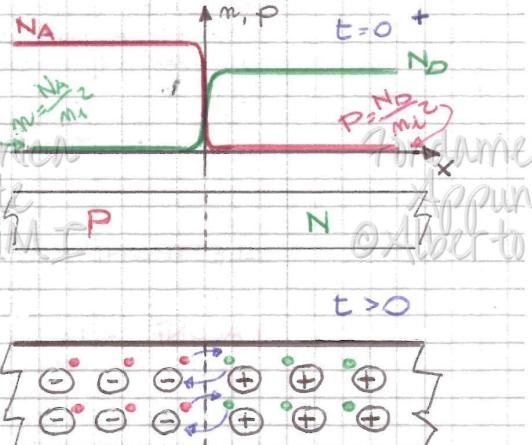
$$D_m = \frac{kT}{\mu_m q} \quad \text{e} \quad D_p = \frac{kT}{\mu_p q}$$

$$\text{Tensione termica } V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV} \quad @ 300K$$

Step 2: A causa dell'ideale gradiente di concentrazione all'interfaccia, i portatori di carica maggioranti penetrano nelle zone a più basse concentrazione.

elettronica
centrale
- POLIMI

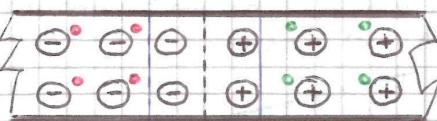
Se non vi fossero altri fenomeni fisici oltre al processo di diffusione come in un gas, a regime si avrebbe ad avere concentrazione di elettroni e concentrazione di lacune costante in tutto il cristallo. Ma elettroni e lacune hanno una carica elettrica, e bisogna considerare anche tutti i fenomeni fisici ad esse associati. Essi portano ad un equilibrio differente.



Nella zona da cui iniziano a diffondere le cariche si crea uno SVUOTAMENTO che espone le cariche fisse nel reticolato (che non sono più controbilanciate dalla contro parte mobile che si è spostata). **RISULTATO:** in prossimità delle giunzione si crea una zona di CARICA SPAZIALE (distribuita nel volume).

FISICAMENTE gli elettroni in prossimità delle giunzione nella zona N si vanno ad installare nei siti accettori della zona P, quindi restano gli atomi pentavalenti con un protone scoperto (lacuna fissa) e si completeranno i 4 legami covalenti con gli atomi trivalenti nella zona P (un elettrone in più rispetto ai protoni in zone fisse).

LACUNE catturate atomi pentavalenti (N_A) ELETTRONI catturati da atomi trivalenti (N_D)



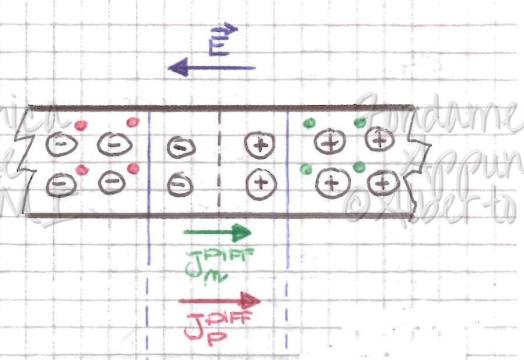
ZONA DI SVUOTAMENTO

Carica spaziale con densità di cariche rispettivamente pari a N_A col N_D

La zona di svuotamento (di cariche libere) è formata da un doppio strato di cariche, una positiva ed una negativa, analogo ad un condensatore carico.

Step ③: Analisi dell'equilibrio:

- La diffusione delle cariche genera un campo elettrico, che cresce man mano che le cariche diffondono perché si spostano sempre più elettroni e lacune fisse.
- Il campo elettrico si oppone alla diffusione. La forza è opposta al gradiente diffusivo



La "spinta" diffusiva è bilanciata dal campo elettrico interno, detto campo di BUILT-IN, a cui è associata una TENSIONE di BUILT-IN ($V_{Bi} = 0.6 - 0.7 \text{ V}$).
È un equilibrio DINAMICO: la carica che diffonde nella zona di svuotamento viene rimandata verso le zone di pertinenza del campo elettrico di built-in.

ELETTROMAGNETISMO: legame tra carica e campo elettrico espresso dal teorema di Gauss

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_v \Rightarrow \frac{dE_x}{dx} = \frac{\rho_v}{\epsilon}$$

caso monodimensionale

$$E_x = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\epsilon}(x-x_p) & x_p \leq x \leq 0 \\ +\frac{qN_D}{\epsilon}(x-x_N) & 0 \leq x \leq x_N \end{cases}$$

Il potenziale è - il gradiente del campo

$$E = -\text{grad}(V) \Rightarrow V(x) = V(-\infty) + \int_{-\infty}^x E \cdot dx$$

caso monodimensionale

legame con T e conc. droghanti

$$V_{Bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n^2}$$

NOTA ①: per continuità del campo elettrico sulle giunzione (l'assenza di carica di superficie), deve valere

$$qN_A x_p = qN_D x_N$$

Tale relazione è ovvia in quanto rappresenta la neutralità della carica dai due lati delle giunzione, infatti la zona di carica speciale si forma per interazione tra 1 elettrone ed una lacuna (sempre 2 coppie).

Maggiore è la concentrazione di drogante e minore è lo spessore della relativa zona di svuotamento

NOTA ②: Risolvendo l'equazione dei potenziali è possibile determinare lo spessore degli strati svuotati. Si ottiene

$$x_{do} = (x_m + x_p) = \sqrt{\frac{2E}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} V_{Bi}$$

eventualmente presi in modulo

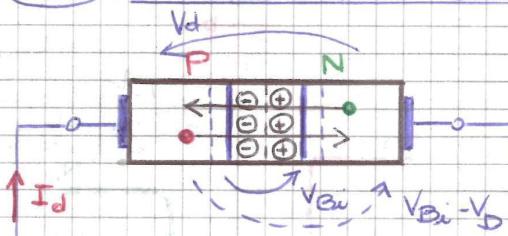
Step ④: sbilanciamento della giunzione per applicazione di una tensione esterna.

ettronica
Docente
- PolIMI

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
© Alberto Dolata - PolIMI

La giunzione è un sistema dissimmetrico (il campo elettrico interno ha una direzione ben definita), di conseguenza l'applicazione di una tensione esterna produce effetti diversi a seconda della sua polarità.

4.A POLARIZZAZIONE DIRETTA



La tensione V_D è positiva, quindi la tensione di P è maggiore rispetto alla tensione N.

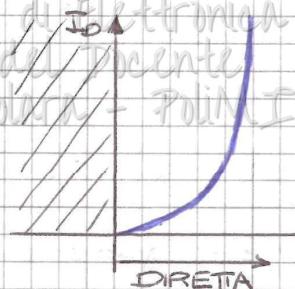
V_D e V_{Bi} sono opposte. La composizione delle due tensioni è $V_D - V_{Bi}$

L'applicazione di V_D va a ridurre la zona di svuotamento, che riduce la propria dimensione.

Siccome $V_{Bi} - V_D < V_{Bi}$ significa che c'è meno carica affacciata sulla giunzione, e quindi la zona di svuotamento è più stretta (la concentraz. di cariche è N_A e N_D)

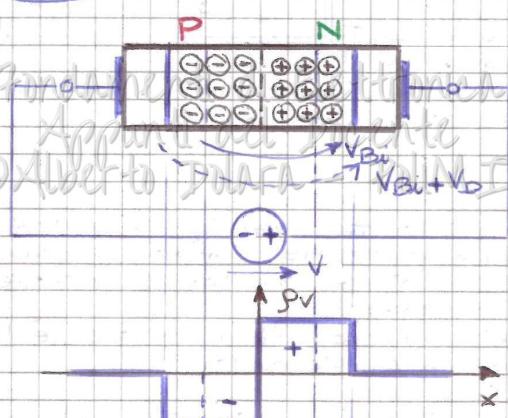
Meno è il potenziale interno e maggiore è la capacità di diffusione delle cariche mobili (si riduce l'"ostacolo" costituito dalla barriera di potenziale).

Quando la tensione applicata è pari a V_0 , il campo interno si annulla e con esso viene a mancare il flusso di deriva che si oppone al flusso di diffusione.



L'andamento è di tipo esponenziale, che diventa quasi verticale quando $V_D = V_{Bi}$.

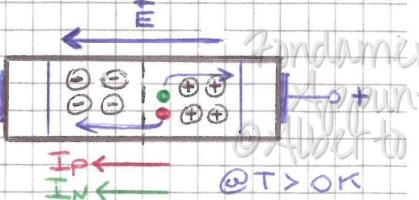
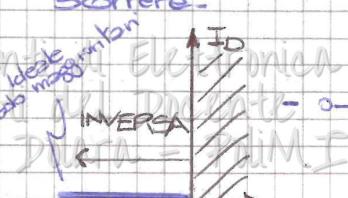
4.B POLARIZZAZIONE INVERSA



La tensione V_D è negativa, ovvero è applicata con polarità opposta: la tensione di N è maggiore della tensione di P.

L'applicazione di V_D va ad espandere la zona di svuotamento, che è la causa che blocca il fenomeno diffusivo.

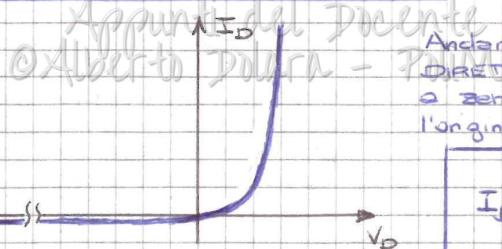
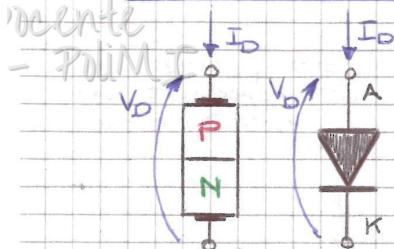
In prima approssimazione $I = 0$ perché sto considerando solo i portatori maggioranti. In realtà, se considerassi anche le coppie elettrone - buona generata termicamente all'interno della giunzione, scopri che una piccolissima corrente inversa può scorrere.



ettronica
Docente
- PolIMI

CARATTERISTICA VOLTAMPEROMETRICA DEL DIODO

CURVA I-V : EQUAZIONE DI SHOCKLEY



Andamento fortemente divergente in DIRETTA; andamento piatto o pressoché nero in INVERSA. Passo per l'origine.

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_{Th}}} - 1 \right) \quad V_{Th} = \frac{kT}{q}$$

Se $\frac{V_D}{V_{Th}} > 4 \text{ o } 5$, predomina l'esponenziale $I_D \approx I_s e^{\frac{V_D}{V_{Th}}}$

Se $\frac{V_D}{V_{Th}} < -5 \text{ o } -4$, l'esponenziale diventa trascurabile $I_D \approx I_s$

I_s , che è il valore di corrente che si instaura in polarizzazione inversa, è chiamata CORRENTE DI SATURAZIONE INVERSA, che è fortemente dipendente dalla temperatura.

La polarizzazione inversa non perdura per ogni valore di tensione. Al di sopra di una certa tensione, in modulo, si ha il fenomeno del BREAKDOWN:

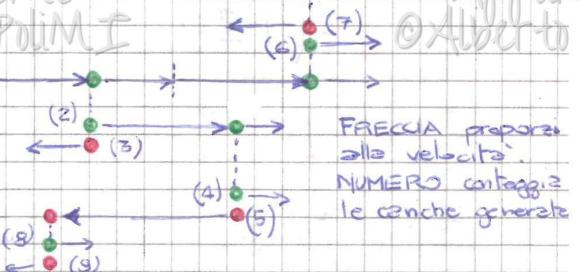
1. Legato a fenomeni fisici differenti dal funzionamento in diretto e inverso.
2. Non modellato dall'equazione di Shockley.

► FENOMENO ①: EFFETTO DI MOLTIPLICAZIONE A VALANGA (avalanche breakdown)

Maggiore è la tensione applicata e maggiore è il campo elettrico interno. Con riferimento al modello "cinetico" o "meccanico" per cui le coppie elettrone/lacuna sono accelerati da velocità 0 fino a che non urtano sul reticolo cristallino, è possibile affermare che la velocità media cresce con l'intensità del campo (maggiora forza equivalente di accelerazione).

Quando l'energia cinetica dei portatori raggiunge l'energia del bandgap, gli urti possono generare una coppia elettrone/lacuna.

Si viene quindi a creare una MOLTIPLICAZIONE A VALANGA DEI PORTATORI che dà luogo a un fenomeno di ionizzazione per impatto. L'elevatissimo numero di portatori genera una corrente molto forte che è "sostenuta" dalla tensione necessaria per sostenere il fenomeno di moltiplicazione a valanga.



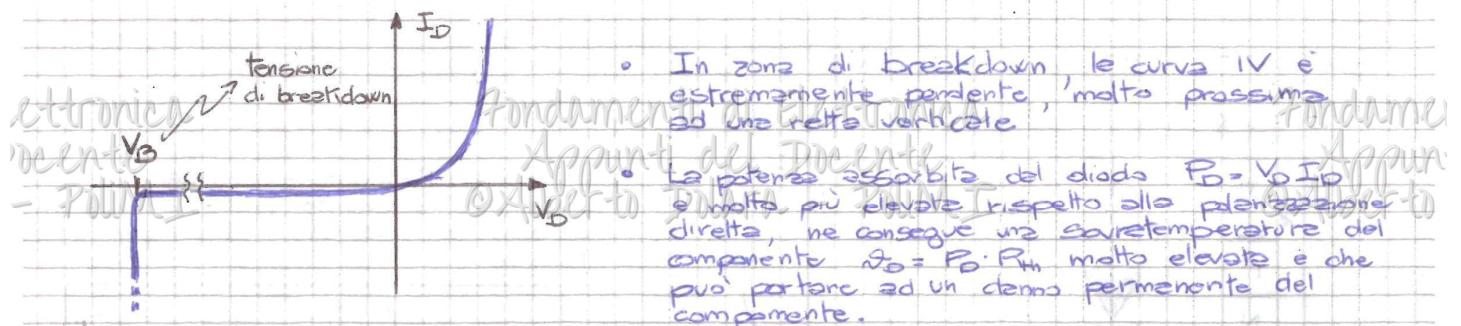
Questo fenomeno è tipico dei diodi con tensione di breakdown superiore a 5,6 V.

► FENOMENO ②: EFFETTO TUNNEL (effetto ZENER) (effetto ZENER) DOLARA - POLIMI

Fenomeno previsto dalla meccanica quantistica per cui una particella ha probabilità diversa da zero di attraversare una barriera di potenziale arbitrariamente elevato.

Questo tipo di fenomeno fisico è insopportabile in diodi con giunzioni PIN molto drogate (intuitivo → le particelle che superano la barriera di potenziale sono poche - probabilità - rispetto al totale disponibile), ovvero caratterizzato da una zona di svuotamento molto sottile. In questi diodi, la tensione inversa favorisce il passaggio di portatori delle bande di valenza alle bande di conduzione per effetto Tunnel.

Questo tipo di rottura è detta anche "effetto Zener" ed è caratteristico dei diodi con tensione di rottura inferiore a 5,6 V.



SOLUZIONE DI CIRCUITI CON DIODI

① Metodo ANALITICO

Fondamenti di Elettronica
 Appunti del Docente
 - Polimi

$$R \quad I$$

Legge Kirchhoff tensioni:
 $E = V_R + V_D$
 Equazioni costitutive:
 $V_R = RI$
 $I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1)$
 $E = RI + V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right)$

Fondamenti di Elettronica
 Appunti del Docente
 - Polimi

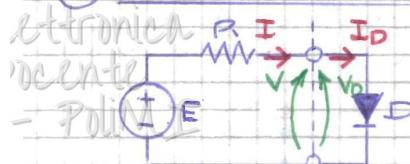
$$V_D = V_{th} \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right)$$

Schottky inverso.

L'equazione risolvente è un'equazione TRASCENDENTE in cui l'incognita compare sia in modo esplicito che come argomento di logaritmo. Essa NON AMMETTE soluzione in forma chiusa, e le sue soluzioni richiede tecniche numeriche, tipicamente metodi iterativi.

② Metodo GRAFICO

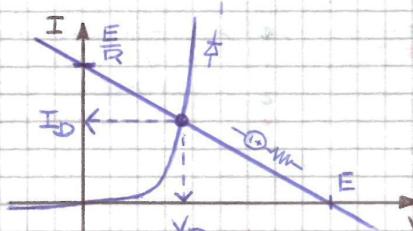
(RETTA DI CARICO)



Fondamenti di Elettronica
 Appunti del Docente
 - Polimi

$$V = E - RI$$

Equazione costitutiva del generatore reale
 $I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1) \rightarrow I = I_S (e^{\frac{V}{V_{th}}} - 1)$
 effetto del collegamento



Eq. cost. di generatore $I = \frac{E}{R} - \frac{V}{R}$ per il segno

Le coordinate del punto di lavoro costituiscono la tensione e la corrente ai capi del diodo, ovvero le soluzioni cercate.

Fondamenti di Elettronica
 Appunti del Docente
 - Polimi

La precisione della soluzione è strettamente correlata alle precisioni con cui sono disegnate le curve e letti i valori sugli assi.

NOTA BENE: I due metodi precedenti possono essere generalizzati a qualsiasi rete elettrica lineare e tempo invariante che contiene UN SOLO DIODO, avendo cura di sostituire al bipolo complesso connesso ai capi del diodo il suo equivalente Thévenin (come in Agura) o Norton.

- Il metodo ANALITICO si presta anche alla soluzione di reti con numero di diodi maggiore di uno. In questo caso non è più possibile utilizzare il teorema di Thévenin per determinare tensione e corrente sul singolo diodo in quanto il bipolo ai capi del diodo è non lineare proprio per la presenza degli altri diodi. È sempre possibile scrivere il sistema di equazioni insolveni di una rete elettrica non lineare, ma:
 - la quantità di equazioni cresce con il numero di nodi e/o anelli della rete;
 - la complessità della soluzione analitica, quando esiste, cresce con il numero di elementi non lineari;
 - è necessario trovare le soluzioni "vere" e/o classificare i punti di funzionamento STABILI ed INSTABILI.

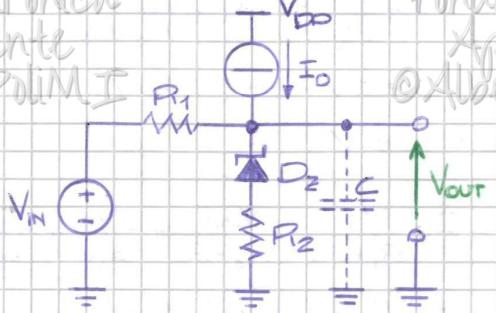
ESEMPIO DIODO + CIRCUITO DINAMICO

Tratto da un tema d'esame...

Elettronica

docente

- Polimi I



Fondamenti di Elettronica

Appunti del Docente

Oxfordto - Polimi I

$$V_{DD} = 20V \quad I_D = 1,3mA$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

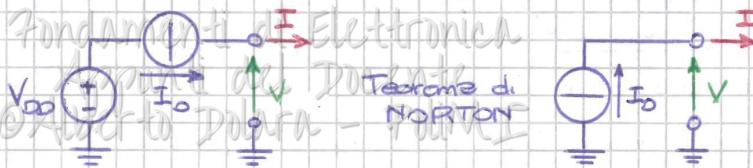
$$R_2 = 3k\Omega$$

$$\text{Diodo: } V_D = 0,7V \quad V_{DD} = -9,3V$$

Determinare:

- Le caratteristiche statiche
- La risposta ad un gradino di V_{IN} da 0V a 10V considerando il condensatore C.

Punto 0: pre-processing del circuito.



Fondamenti di Elettronica

Appunti del Docente

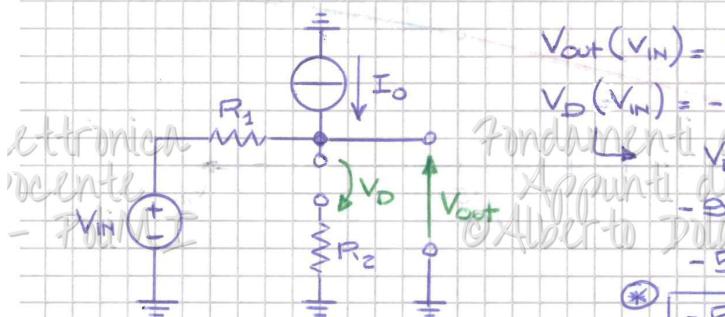
Oxfordto - Polimi I

V_{DD} non ha alcun effetto su V_{OUT}

È possibile studiare il circuito considerando solo V_{IN} ed I_O (in questo caso è un equivalente)

Punto 1: caratteristica statica

DIODO OFF $V_{DD} \leq V_D \leq V_X ; I_D = 0$



$$V_{OUT}(V_{IN}) = V_{IN} + R_1 I_O$$

$$V_D(V_{IN}) = -V_{OUT} = -V_{IN} - R_1 I_O$$

$$V_D \leq -V_{IN} - R_1 I_O \leq V_X$$

$$-9,3V \leq -V_{IN} - 4,3V \leq 0,7V \quad (+4,3V)$$

$$-5V \leq -V_{IN} \leq 5V \quad (-1)$$

$$* -5V \leq V_{IN} \leq 5V$$

* Note: se fosse statico
 $-3V \leq -V_{IN} \leq 4V$
 $3V \geq V_{IN} \geq -4V$
 $-4V \leq V_{IN} \leq 3V$
 Attenzione alle disp. -

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
Oxfordto - Polimi I

Risultato parziale (valido solo per diodo off)

$$V_{OUT} = V_{IN} + 4,3V \quad \text{per} \quad -5V \leq V_{IN} \leq 5V$$

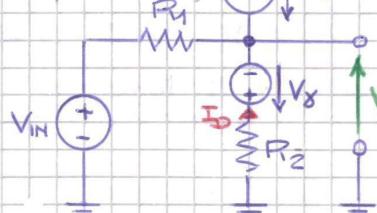
$$V_{OUT}(5V) = 9,3V \quad V_{OUT}(-5V) = -0,7V$$

DIODO ON $I_D \geq 0 ; V_D = V_X$

Fondamenti di Elettronica

Appunti del Docente

Oxfordto - Polimi I



$$V_{OUT}(V_{IN}) = V_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + I_O \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = V_X \frac{R_2}{R_1 + R_2} =$$

$$= 0,75V_{IN} + 3,225V - 0,175V = 0,75V_{IN} + 3,05V$$

$$I_O(V_{IN}) = -\frac{V_{IN}}{R_1 + R_2} - I_O \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_X}{R_1 + R_2} = -\frac{V_{IN}}{4k\Omega} - 1,25mA$$

$$\hookrightarrow I_O(V_{IN}) \geq 0 \quad -\frac{V_{IN}}{4k\Omega} - 1,25mA \geq 0$$

$$-V_{IN} - 5V \geq 0$$

Fondamenti di Elettronica

Appunti del Docente

Oxfordto - Polimi I

Risultato parziale (valido solo per diodo on)

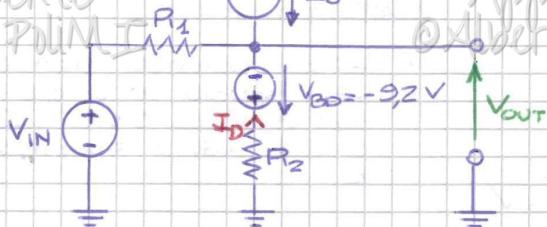
$$V_{OUT} = 0,75V_{IN} + 3,05V \quad \text{per} \quad V_{IN} \leq -5V$$

$$V_{OUT}(-5V) = -0,7V$$

DIODO BREAKDOWN $I_D \leq 0, V_D \leq V_{BD}$

Elettronica
Docente

- POLIMI



$$V_{OUT}(V_{IN}) = V_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + I_D \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - V_{BD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,75 V_{IN} + 3,225 V - (-2,235 V) = 0,75 V_{IN} + 5,55 V$$

$$I_D(V_{IN}) = -\frac{V_{IN}}{R_1 + R_2} - I_O \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_{BD}}{R_1 + R_2} = -\frac{V_{IN}}{4k\Omega} + 1,25 \text{ mA}$$

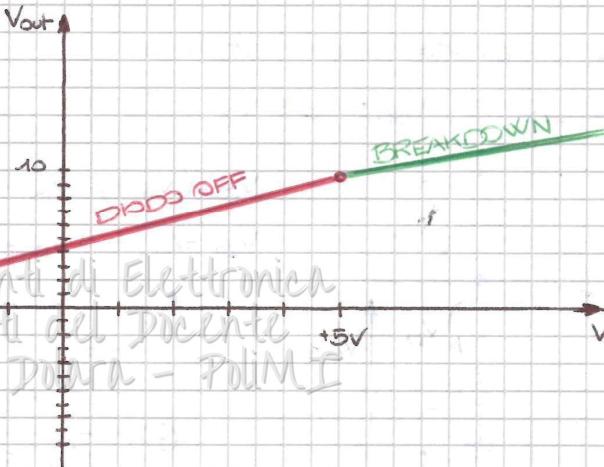
$$\hookrightarrow I_O(V_{IN}) \leq 0 \quad -\frac{V_{IN}}{4k\Omega} + 1,25 \text{ mA} \leq 0$$

$$-V_{IN} + 5V \leq 0$$

Fondamenti di Elettronica

Risultato perziale (valido solo per diodo in breakdown)

$$V_{OUT} = 0,75 V_{IN} + 5,55 V, \text{ per } V_{IN} \geq 5V \quad V_{OUT}(5V) = 9,3V$$



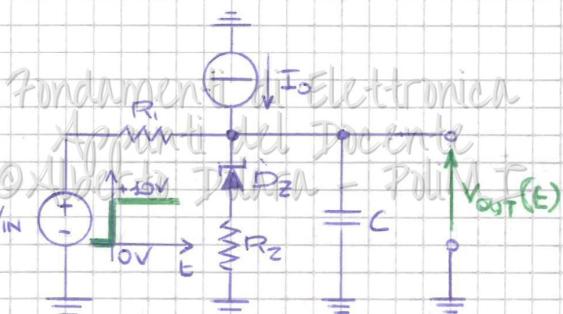
Elettronica
Docente

- POLIMI

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
© Alberto DOLINA - POLIMI

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
© Alberto DOLINA - POLIMI

ANALISI DINAMICA



Istante $t = 0^-$

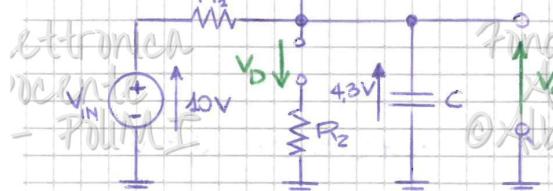
Il circuito è in regime, possiamo utilizzare i risultati ottenuti sulla caratteristica statica:

- $V_{OUT}(0^-) = V_C(0^-) = V_{IN} + 4,3V = 4,3V$
- Il diodo è in OFF, e la tensione sul diodo è pari a $V_D = -V_{OUT} = -4,3V$

Istante $t = 0^+$

(1) Continuità della tensione sul condensatore

$t = 0^+$



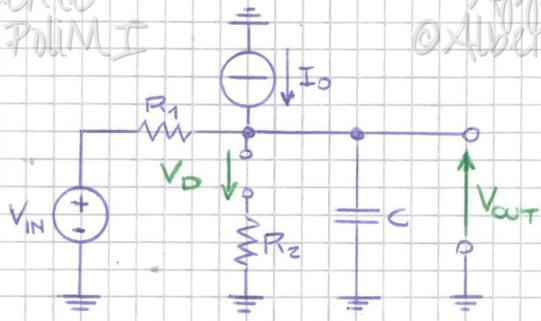
Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
© Alberto DOLINA - POLIMI

Elaborato utilizzando la versione gratuita di Visual Watermark. La versione a pagamento non aggiunge questo segno.

Istante: $t = +\infty$ "virtuale"

Risolo il transitorio come se il diodo fosse sempre nello stato individuato per l'istante $t = 0^+$. Verifico a posteriori la validità dell'operazione.

- Polimi I



$$V_{out}(+\infty) = V_{IN} + R_1 I_0 = +14,3 \text{ V}$$

$$V_D(+\infty) = -V_{out}(+\infty) = -14,3 \text{ V}$$

$$\boxed{V_D(+\infty) < V_{BD}} \quad \text{NO !!!}$$

Il diodo non è aperto. (ipotesi non verificata)

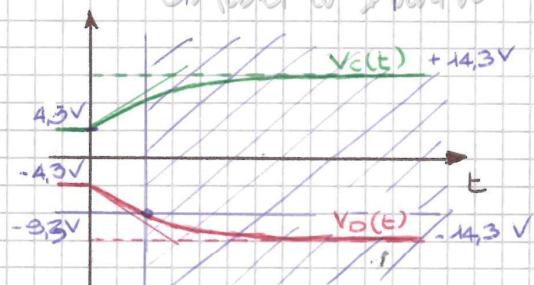
Ci si potranno arrivare anche guardando le caratteristiche stesse. Per $V_{IN} = 10 \text{ V}$ al regime il diodo lavora in breakdown e la tensione di Jscita vale $V_{out} = 0,75 \cdot 10 \text{ V} + 5,55 \text{ V} = 13,05 \text{ V}$

Ci sarà un istante di tempo in cui il diodo passa da polarizzazione inversa a breakdown.

$$V_C(t) = 4,3 \text{ V} + 10 \text{ V} (1 - e^{-t/\tau_{OFF}})$$

$$V_D(t) = -4,3 \text{ V} - 10 \text{ V} (1 - e^{-t/\tau_{OFF}})$$

$$\tau_{OFF} = R_1 \cdot C = 1 \text{ ms}$$



All'istante t^* la tensione sul diodo raggiunge il valore di breakdown.

- Polimi I

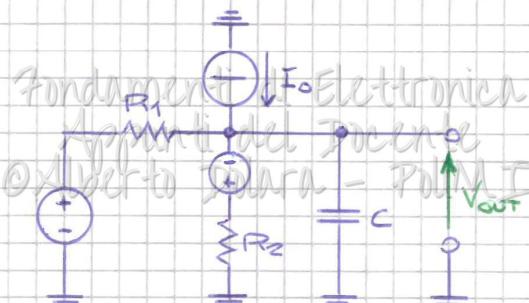
$$V_{BD} = -4,3 - 10 (1 - e^{-t^*/\tau_{OFF}})$$

$$-3,3 = -4,3 - 10 + 10 e^{-t^*/\tau_{OFF}}$$

$$5 = 10 e^{-t^*/\tau_{OFF}} \quad 2 e^{-t^*/\tau_{OFF}} = 1$$

$$t^* = \tau_{OFF} \ln \frac{1}{2} = 683 \mu\text{s}$$

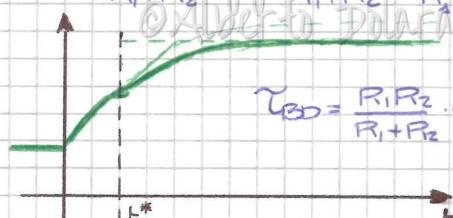
Istante $t = +\infty$ VERO, ovvero da t^* a $+\infty$ il diodo è in breakdown.



$$V_{out}(+\infty) = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} + I_0 \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} - V_{BD} \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2} = 13,05 \text{ V}$$

$$I_0(+\infty) = -\frac{V_{IN}}{R_1+R_2} - I_0 \cdot \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{V_{BD}}{R_1+R_2} = -1,25 \text{ mA}$$

$$\tau_{BD} = \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} \cdot C = 750 \mu\text{s}$$



Nota: i valori iniziali di questo transitorio sono:

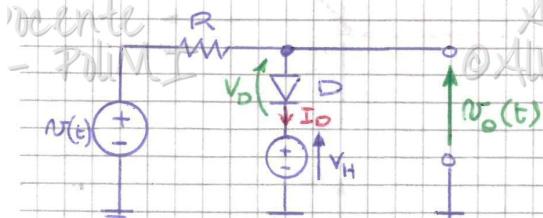
$$V_C(t^*) = 9,3 \text{ V}$$

Istante $I_D(t^*) = 0 \text{ mA}$, non per continuità ma per LKV.

- Polimi I Infatti in $t = t^*$ $V_C = +9,3 \text{ V}$ e deve valere $V_C(t^*) + V_{BD} + R_2 I_D(t^*) = 0$. Da cui si deduce $I_D(t^*) = 0 \text{ mA}$.

DIODI - APPLICAZIONI

① CIRCUITI DI TAGLIO : Utilizzati per proteggere l'elettronica a valle da sovratensioni oltre i limiti di funzionamento



Diodo OFF $\rightarrow I_D = 0$, devo verificare $V_d \leq V_X$

$$V_o(t) = V(t)$$

$$V_D(t) = V(t) - V_H \rightarrow V(t) - V_H \leq V_X$$

Condizione diodo OFF

$$V(t) \leq V_H + V_X$$



Diodo ON $\rightarrow V_D = V_X$, devo verificare $I_D \geq 0$

$$V_o(t) = V_X$$

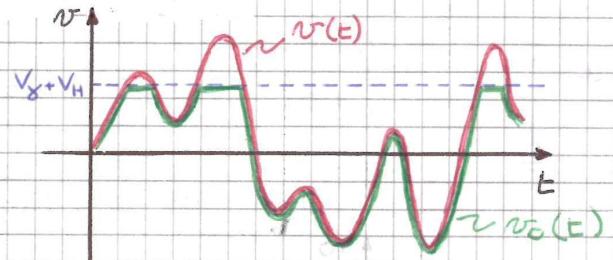
$$I_D(t) = V(t) - V_X - V_H \rightarrow V(t) - V_X - V_H \geq 0$$

Condizione diodo ON

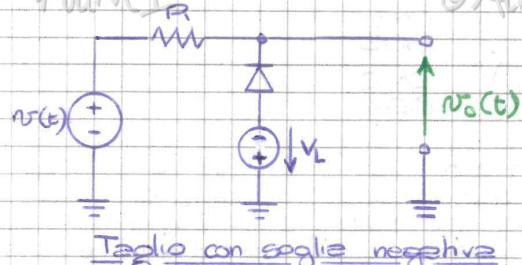
$$V(t) \geq V_H + V_X$$

NOTA: il resistore R ha la funzione di limitare la corrente durante la Fase di "taglio" del segnale (on).

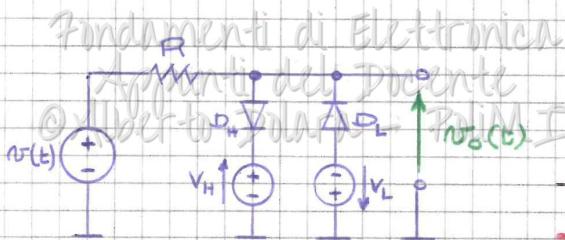
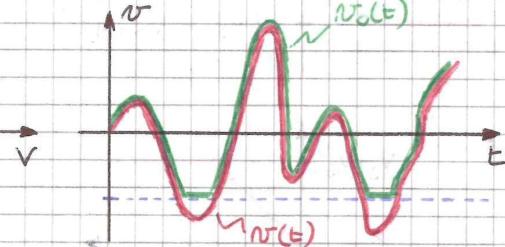
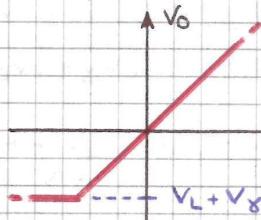
E' necessario avere un elemento tra $V(t)$ e il ramo "diodo" per "assorbire" il ΔV tra tensione di ingresso e tensione fissa del diodo in ON. Del punto di vista circuitale, se non ci fosse, avrei un parallelo di generatori ideali di tensione (connessione impossibile)



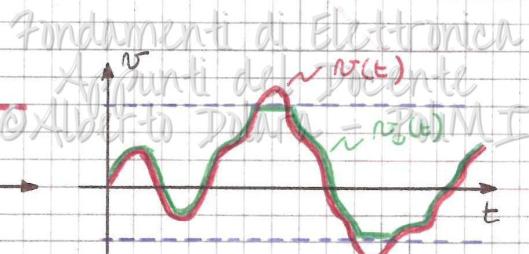
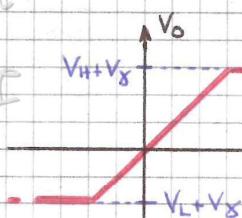
Circuiti di taglio : VARIANTI



Taglio con soglia negativa



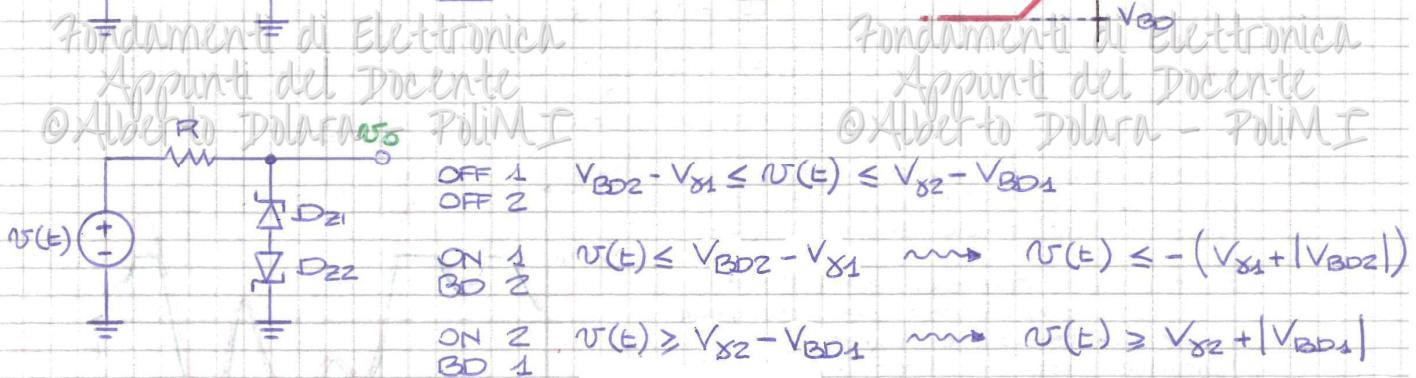
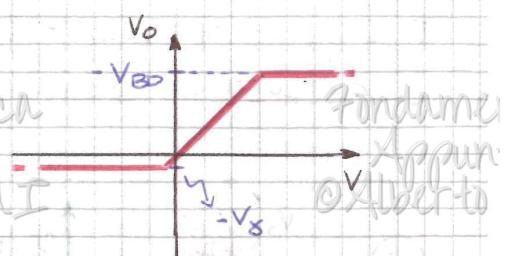
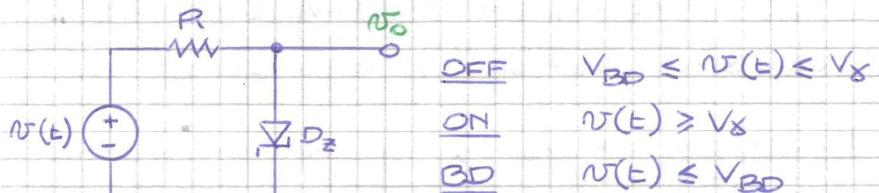
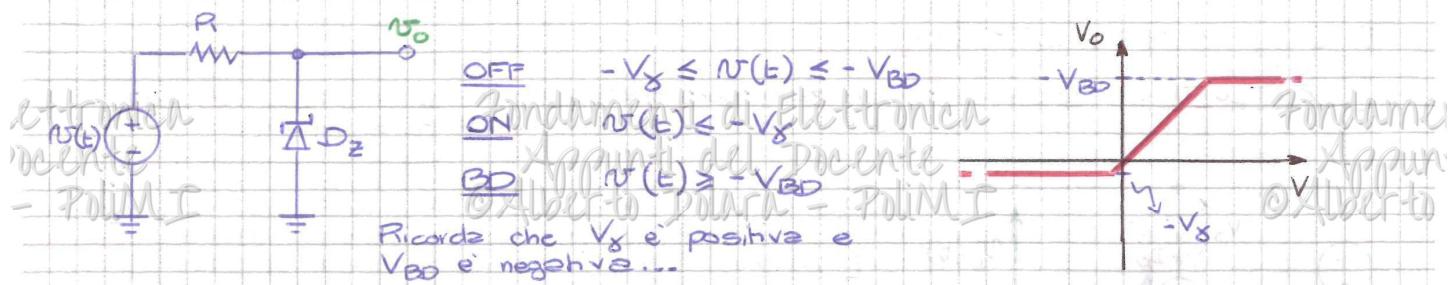
Taglio con soglia positiva e soglia negativa



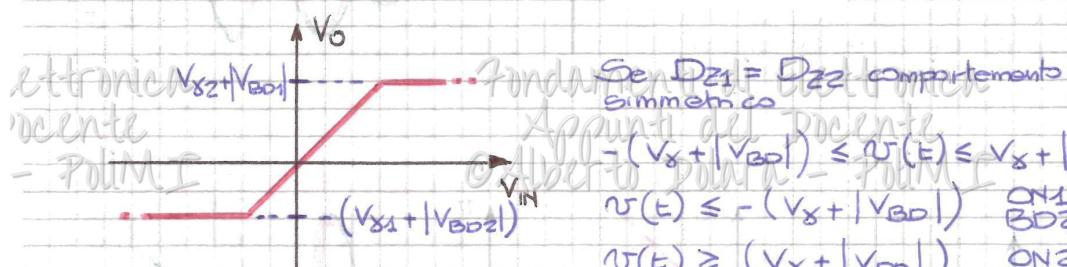
Note: i generatori di tensione che fissano la V_H e la V_L devono essere realizzati con componenti aggiuntive rispetto al diodo.

Una soluzione razionale può essere quella di utilizzare diodi ZENER, che tagliano la tensione di ingresso quando entrano in breakdown.

Elaborato utilizzando la versione gratuita di Visual Watermark. La versione a pagamento non aggiunge questo segno.



$$\begin{aligned}
 \text{OFF 1} \quad & V_{BD2} - V_{x1} \leq U(t) \leq V_{x2} - V_{BD1} \\
 \text{OFF 2} \quad & \\
 \text{ON 1} \quad & U(t) \leq V_{BD2} - V_{x1} \rightsquigarrow U(t) \leq -(V_{x1} + |V_{BD2}|) \\
 \text{ON 2} \quad & U(t) \geq V_{x2} - V_{BD1} \rightsquigarrow U(t) \geq V_{x2} + |V_{BD1}|
 \end{aligned}$$



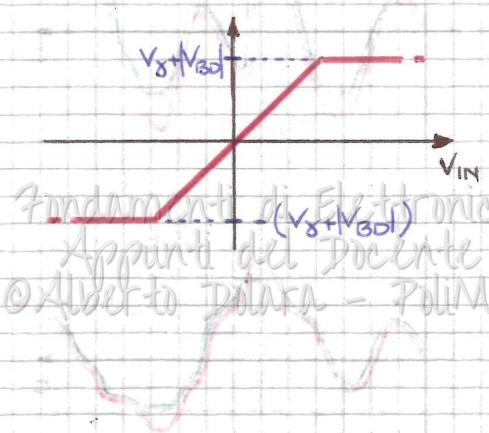
Se $D_{z1} = D_{z2}$ comportamento simmetrico

$$\begin{aligned}
 & -(V_x + |V_{BD}|) \leq U(t) \leq V_x + |V_{BD}| \\
 & U(t) \leq -(V_x + |V_{BD}|) \quad \text{ON 1} \\
 & U(t) \geq (V_x + |V_{BD}|) \quad \text{ON 2}
 \end{aligned}$$

OFF 1
OFF 2

NOTA 1 In tutti questi circuiti U_{out} è:
 - $U(t)$ quando diodo (o diodi) OFF
 - tensione sul diodo (o sul ramo a diodi) quando diodo (o i diodi) è acceso (sia in ON che in breakdown)

NOTA 2 In questa configurazione, il diodo in breakdown si comporta come il generatore di tensione V_H o V_L dei circuiti di segnale con diodi "tradizionale"



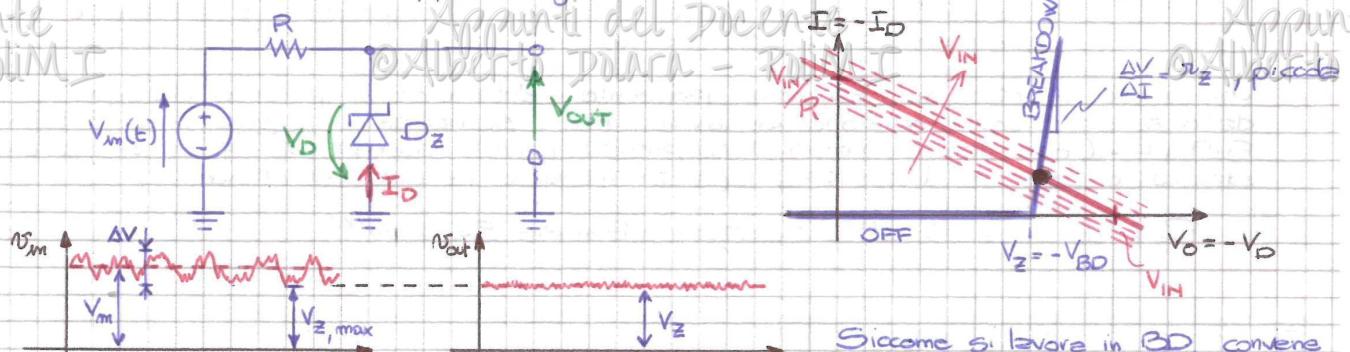
Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
©Alberto Dolara - Polimi

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
©Alberto Dolara - Polimi

Fondamenti di Elettronica
Appunti del Docente
©Alberto Dolara

② STABILIZZATORE DI TENSIONE con diodo zener

Obiettivo: generare una tensione stabile a partire da una tensione "rumorosa" o con un ripple significativo.



Siccome si lavora in BD, conviene invertire V_D ed I_D per avere valori positivi (più comodi).

Al variare di V_{IN} , cambia la retta di carica, e di conseguenza si sposta il punto di lavoro. Se la caratteristica in breakdown fosse ideale ($r_Z = 0$, curva verticale), al variare della tensione di ingresso varerebbe solo la corrente I_D , mentre V_{OUT} resterebbe fissa al valore V_Z .

Siccome questa applicazione può aver a che fare con applicazioni di "potenza", leggasi alimentatori, può essere opportuno rappresentare la pendenza elevata, ma finita, della curva IV del diodo in breakdown.

Si analizzi il circuito applicando il PSCE, sotto l'ipotesi $V_{IN}(t) > V_Z$ così che lo stato del diodo sia sempre quello di BREAKDOWN.



$$\bullet V_{OUT}^1 = V_M \frac{R_Z}{R+R_Z} + V_Z \frac{R}{R+R_Z}, \text{ ma con } R_Z \ll R \quad V_{OUT} = V_M \cdot 0^+ + V_Z \cdot 1^- \approx V_Z$$

$$\bullet V_{OUT}^{II} = \Delta V \cdot \frac{R_Z}{R+R_Z} = \Delta V \cdot 0^+ \quad \text{numero piccolo.}$$

Cio' che avanza, e che e evidentemente correlato unicamente al ΔV

Esempio numero: ottenere una tensione stabilizzata di 3,3 V a partire da una tensione pari a 5V medi con rumore (ripple) pari a 1 V picco-picco. $R = 100 \Omega$, $R_Z = 1 \Omega$

$$\text{POLARIZZAZIONE: } V_{OUT} = 5V \cdot \frac{1\Omega}{101\Omega} + 3,3V \cdot \frac{100\Omega}{101\Omega} = 3,3168V$$

$$\text{RUMORE (ampiezza)} \quad V_{OUT}^1 = 1V_{PP} \cdot \frac{1\Omega}{101\Omega} = 9,9mV_{PP}$$

* Perdite e ruolo di R nella limitazione della corrente

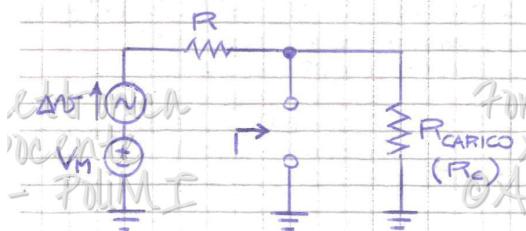
CONSIDERAZIONE FINALE:

Tutta l'analisi e stata fatta A VUOTO, ma se ci fosse stato un carico? Del resto, questo circuito e un alimentatore...

BASTA APPLICARE IL TEOREMA DI THEVENIN ai capi del diodo per ottenere un circuito identico a quello analizzato, operativamente basta aggiungere il pedice "eq" o "th" ai parametri del generatore reale.

$$V_{IN,eq} = V_M \frac{R_C}{R+R_C} + \Delta V \frac{R_C}{R+R_C}$$

$$R_{eq} = \frac{R \cdot R_C}{R+R_C}$$



In elaborazione reale, per ragioni di costi di produzione questo $R_C \gg R$.

ATTENZIONE: lo stabilizzatore di tensione basato su diodo zener è anche dal punto di vista delle perdite, e quindi dell'efficienza in quanto nel diodo zener, in breakdown, scorre una corrente significativa, e che è tanto maggiore quanto più elevata è la differenza fra V_{IN} e V_Z .

- POLIMI

Utilizzando i dati dell'esempio precedente determino la potenza dissipata dello zener in una condizione di lavoro molto semplice: **A vuoto e SENZA RIPPLE** (riprendiamo meglio l'argomento perdite quando parleremo di potenza statica e potenza dinamica, perdita media e perdite istantanee...)

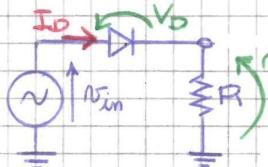
$$P_D = V_D \cdot I_D = V_Z \frac{V_m - V_Z}{R} = 3,3V \cdot 17mA = 56,1mW$$

(3) CIRCUITI RADDRIZZATORI

OBIETTIVO: convertire una tensione alternata in una tensione continua.

Alimentatore: Formato dal collegamento in cascata di un trasformatore, che abbassa la tensione di rete (230V), che ha andamento sinusoidale, e converte l'alternata a bassa tensione in una "continua".

A) SEMPLICE SEMIONDA SU CARICO RESISTIVO

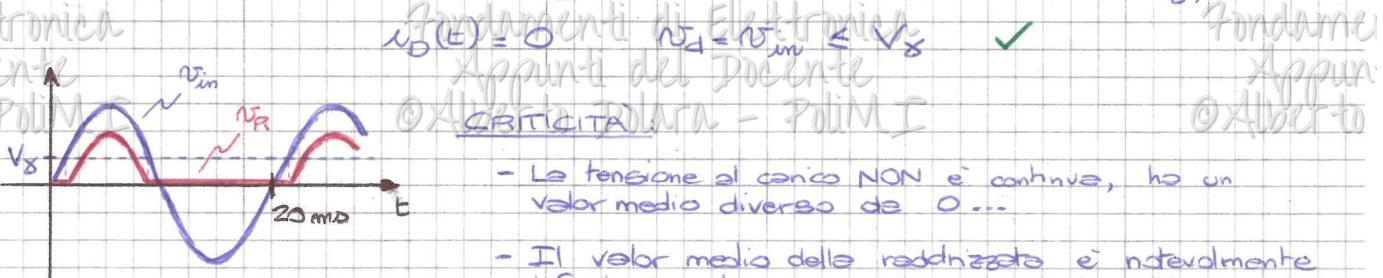


- Semionda \oplus è superiore a V_Z : Diodo ON

$$U_{in}(t) \geq V_Z \quad I_D = \frac{U_{in} - V_Z}{R} \geq 0 \quad \checkmark \quad V_R = U_{in} - V_Z$$

- Semionda \ominus è tratta semionda \oplus inferiore a V_Z , Diodo OFF

$$U_D(t) = 0 \quad I_D = 0 \leq V_Z \quad \checkmark$$

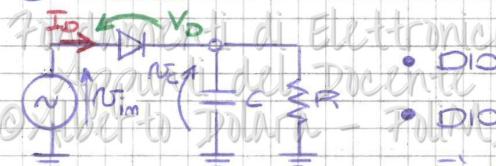


- La tensione al carico NON è continua, ha un valore medio diverso da 0...

- Il valore medio della raddrizzata è notevolmente inferiore al picco.

$$\text{Caso semplificato } (V_Z = 0) \Rightarrow V_{R,\text{avg}} = \frac{U_{in}}{2\pi f}$$

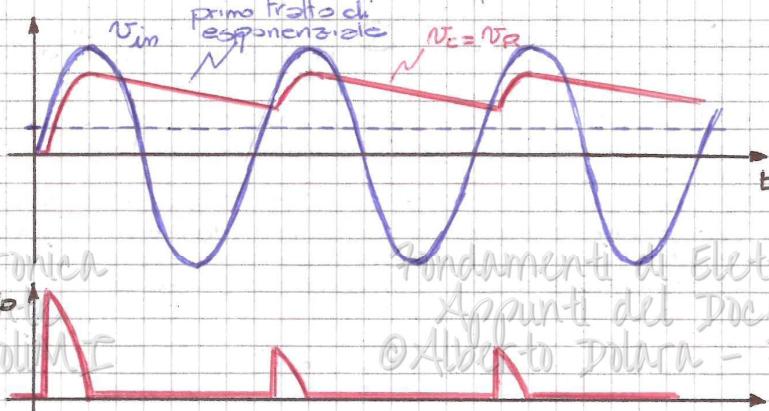
B) SEMPLICE SEMIONDA SU CARICO RC



- Diodo OFF quando $U_{in} - V_Z \leq U_C$ $|U_{in} \leq U_C + V_Z|$

- Diodo ON altrimenti

E' quindi necessario determinare $U_C(t)$



Per analizzare il circuito e determinare gli istanti di transizione del diodo.

- OFF \rightarrow ON $U_{in}(t^*) = U_C(t^*) + V_Z$ e, naturalmente, per t^{**} lo stato è OFF

- ON \rightarrow OFF $I_D(t^{**}) = 0$ naturalmente, per t^{***} lo stato è ON

- La transizione ON \rightarrow OFF avviene poco dopo il picco positivo delle tensione.

In stato di ON la corrente nel diodo vale:

$$i_D(t) = i_C(t) + i_R(t) \approx V_{IN} (\omega C \cos(\omega t + \varphi) + \frac{1}{R} \sin(\omega t + \varphi))$$

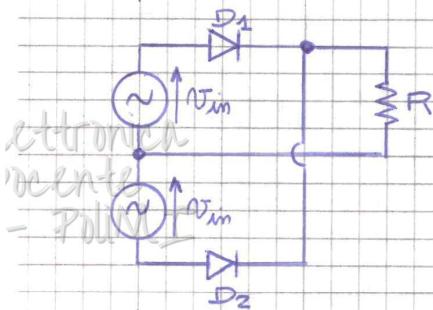
Ma vale $i_C(t) \gg i_R$. (il condensatore deve essere "grosso" per tenere la tensione durante le fasi di OFF). Con riferimento alla figura, in cui $\varphi = 0$, si ricava che la corrente nel condensatore si annulla per un angolo $\omega t = 90^\circ$, che coincide con il picco della tensione in ingresso.

Se considerassimo anche il contributo di $i_R(t)$ (soluzione esatta del circuito) avremmo che, per angoli successivi a 90° , $i_R(t)$ diminuisce ed è positiva mentre $i_C(t)$ cresce in modulo ma è negativa. Stante le differenti ampiezze, bastano pochi gradi per avere $i_C(t) = -i_R(t) \Rightarrow i_D(t) = 0$

- Durante il periodo di OFF sorgente e carico sono scollegati, il condensatore si scarica sulla resistenza di carico seguendo il tipico andamento del frenetismo RC. Per "tenere la tensione" sarà necessario che $T_{OFF} < T$.
- La transizione OFF \rightarrow ON avviene quando la tensione di rete supera la tensione sul condensatore + la tensione di soglia del diodo

C) DOPPIA SEMIONDA SU CARICO RESISTIVO (PRESA CENTRALE)

Necessita di un trasformatore con due secondari identici che rendono quindi disponibile la stessa forma d'onda alle due coppie di margini

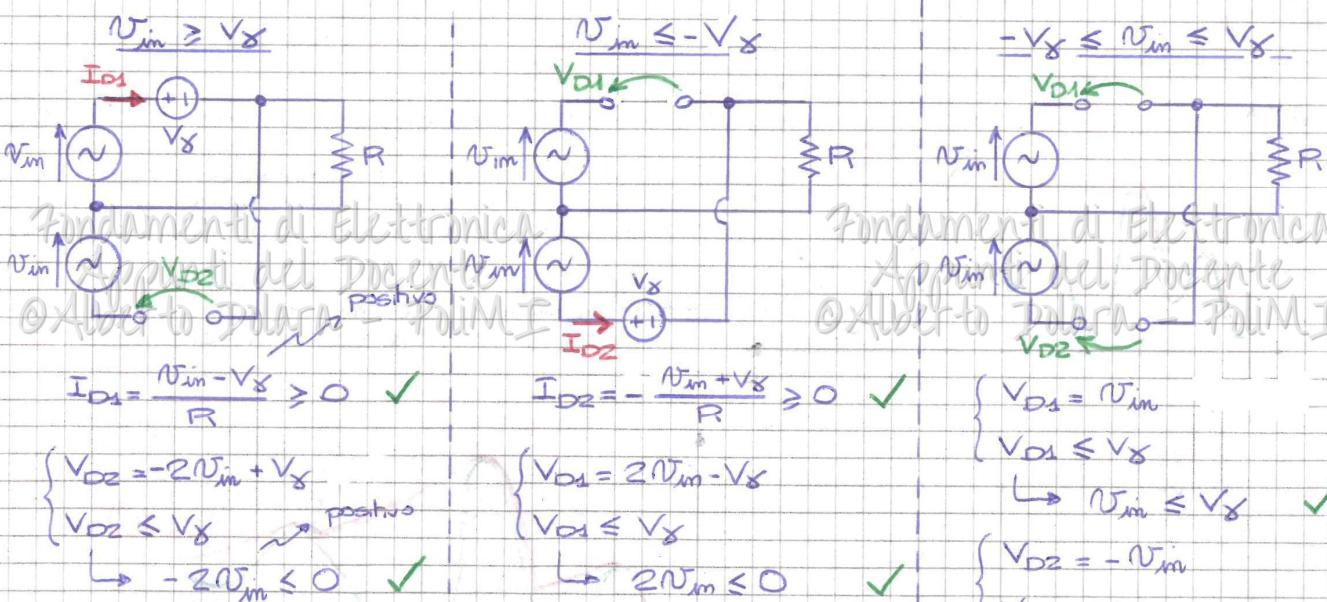


Tre possibili stati di funzionamento:

$$\bullet V_{in} \geq V_x \quad D1 \text{ on}, \quad D2 \text{ off}$$

$$\bullet V_{in} \leq -V_x \quad D2 \text{ on}, \quad D1 \text{ off}$$

$$\bullet -V_x \leq V_{in} \leq V_x \quad D1 \text{ off}, \quad D2 \text{ off}$$



Se avessi analizzato in modo parametrico (V_{in} è il parametro)

$$\bullet V_{in} - V_x \geq 0$$

$$\bullet -2V_{in} \leq 0$$

$$\Leftrightarrow V_{in} \geq V_x$$

$$\bullet - (V_{in} + V_x) \geq 0$$

$$\bullet 2V_{in} \leq 0$$

$$\Leftrightarrow V_{in} \leq -V_x$$

$$\bullet V_{D1} = V_{in}$$

$$\bullet V_{D1} \leq V_x$$

$$\Leftrightarrow V_{in} \leq V_x$$

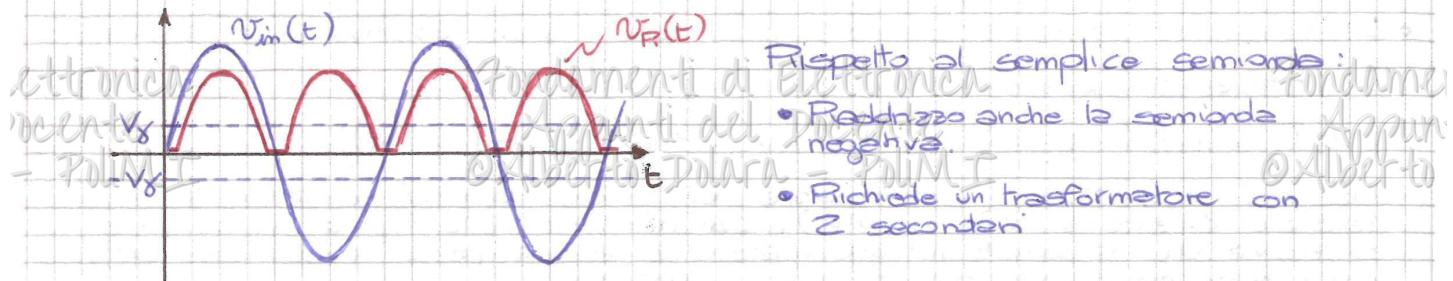
✓

$$\bullet V_{D2} = -V_{in}$$

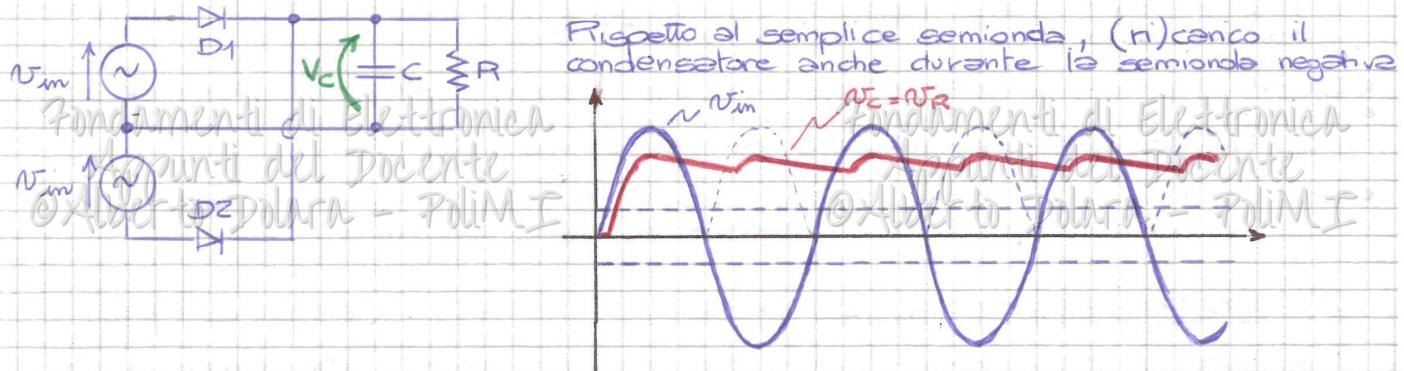
$$\bullet V_{D2} \leq V_x$$

$$\Leftrightarrow V_{in} \geq -V_x$$

✓



D) DOPPIA SEMIONDA SU CARICO RC

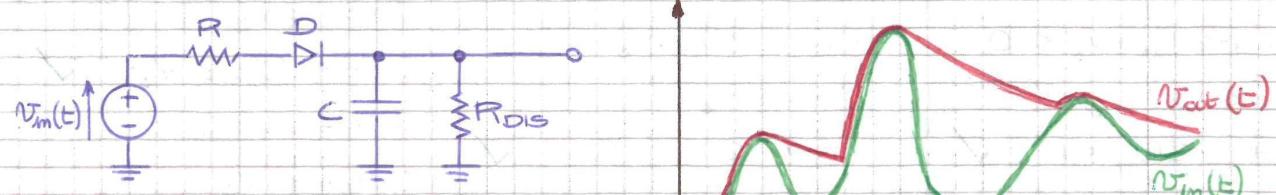
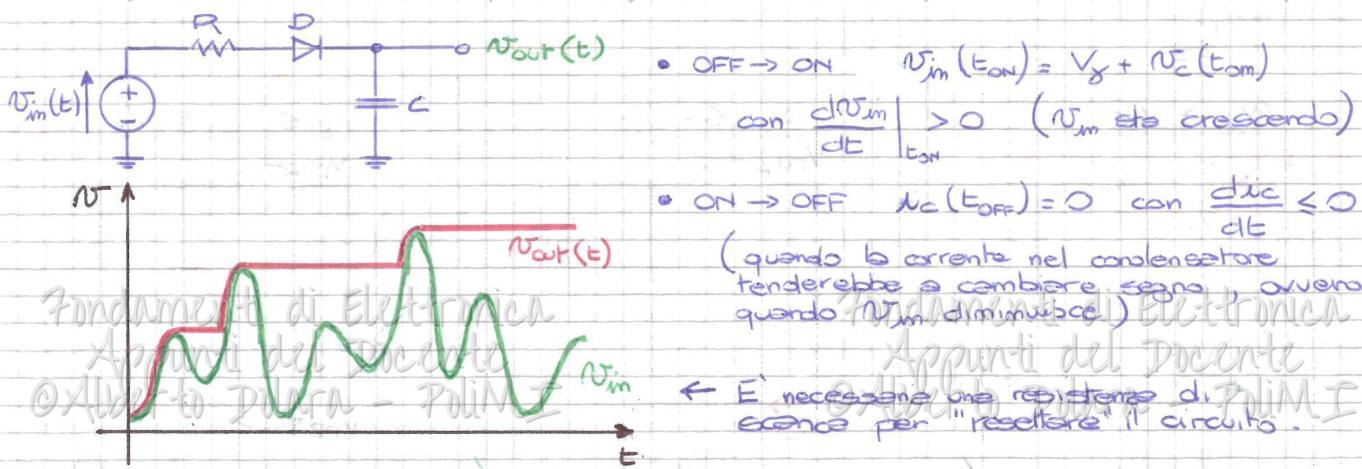


④ ALLUNGATORE DI PICCO (peak stretcher) E DECODIFICA DI UN SEGNALE AM

A.1) PEAK DETECTOR: è un circuito che "memorizza" idealmente il valore massimo di un segnale.

Idealmente =

- al momento della tensione di soglia del diodo
- almeno dello stesso inverso nel diodo



Allungatore di picco: il segnale di uscita "segue" l'inviluppo dei massimi del segnale di ingresso.

DECODIFICA DI UN SEGNALE MODULATO IN AMPIEZZA

Segnale in alta frequenza (sinusoida AF) la cui ampiezza è regolata, modulata, da un segnale molto più lento.

- ESEMPIO: portante AF radio modulata da un segnale audio

$$\text{Portante } x_p(t) = A_p \sin(2\pi f_{AF} t)$$

$$\text{Modulante } x_m(t) \leftarrow \text{tipicamente aperiodica}$$

$$\text{Segnale AM } x_{AM}(t) = x_m(t) \cdot x_p(t) = A_p x_m(t) \cdot \sin(2\pi f_{AF} t)$$

In un segnale AM, il contenuto informativo è nell'ampiezza "istantanea" del segnale stesso.

Fondamenti di Elettronica

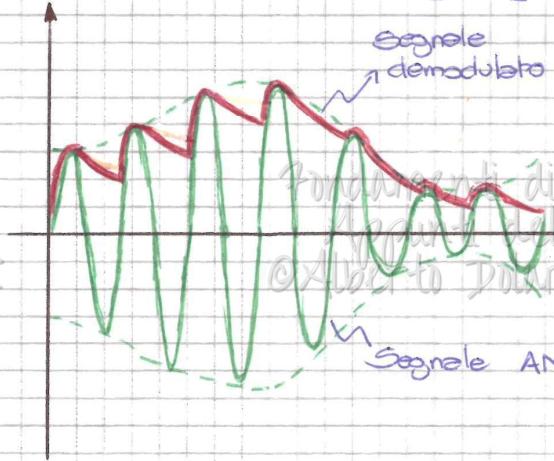


Può essere rappresentato con una resistenza equivalente

Il condensatore dovrà essere dimensionato al fine di:

- NON perdere dei picchi (non troppo grossi)
- NON scanciarsi troppo tra due picchi consecutivi (ripple alta frequenza = ronzio)

ESEMPIO DI CALCOLO DI C



f portante $f_p = 88 \text{ MHz}$

fonda... fonda... fonda...

bande segnale $f_{max} = 10 \text{ kHz}$

ampiezza segn. $V_{in,max} = 1V$

- (1) Determino la massima variazione del segnale

$$T_p = \frac{1}{f_p} = 11,4 \text{ ms} \rightarrow \Delta V_{PP} = \max \left[\frac{dV}{dt} \right] \cdot T_p = 0,7 \text{ mV}$$

TRA DUE PICCHI CONSECUTIVI

- (2) Determino le massime differenze di ampiezza tra 2 picchi del segnale modulato
- (3) Determino la costante di tempo del circuito RC. Il condensatore si deve scaricare con una rapidità non inferiore rispetto alla massima variazione del segnale che deve demodulare. Necessario per "non saltare" il picco successivo

