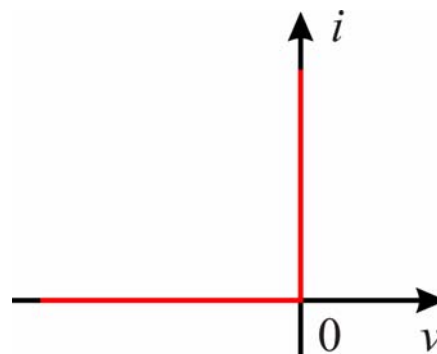
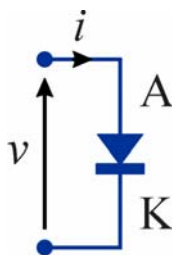


# Diodi

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 14-5-2012)

## Diodo ideale

- Il **diodo ideale** è un componente la cui caratteristica è definita a tratti nel modo seguente
  - $i = 0$  per  $v < 0$  (**polarizzazione inversa**)
  - $v = 0$  per  $i > 0$  (**polarizzazione diretta**)
- ➔ Il diodo ideale si comporta
  - ◆ come un circuito aperto nella regione inversa (o di **interdizione**)
  - ◆ come un cortocircuito nella regione diretta (o di **conduzione**)
- Il terminale positivo è detto **anodo**, il terminale negativo è detto **catodo**



## Diodo ideale

- Dato che la caratteristica è suddivisa in due regioni di funzionamento, l'analisi di un circuito con diodi ideali richiede
  - ◆ formulazione di ipotesi sulle condizioni di funzionamento
  - ◆ verifica delle condizioni di validità
- In ciascuna regione il comportamento è lineare, ma la caratteristica complessiva è non lineare
  - ◆ Se il segnale applicato al diodo è tale da mantenere il punto di funzionamento sempre all'interno di una sola regione il comportamento è lineare
  - ◆ Se il punto di funzionamento si sposta da una regione all'altra il comportamento è non lineare

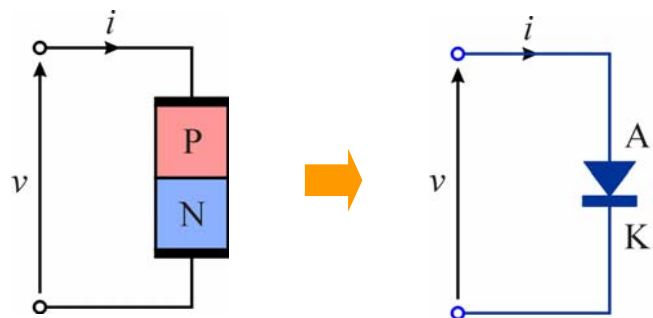
3

## Diodo a giunzione

- I dispositivi reali aventi un comportamento che approssima quello del diodo ideale sono chiamati genericamente **diodi**
- Attualmente il modo più comune per realizzare un diodo consiste nell'impiego di una giunzione pn
- Per un diodo a giunzione le relazioni che legano la tensione e le correnti ai terminali sono

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

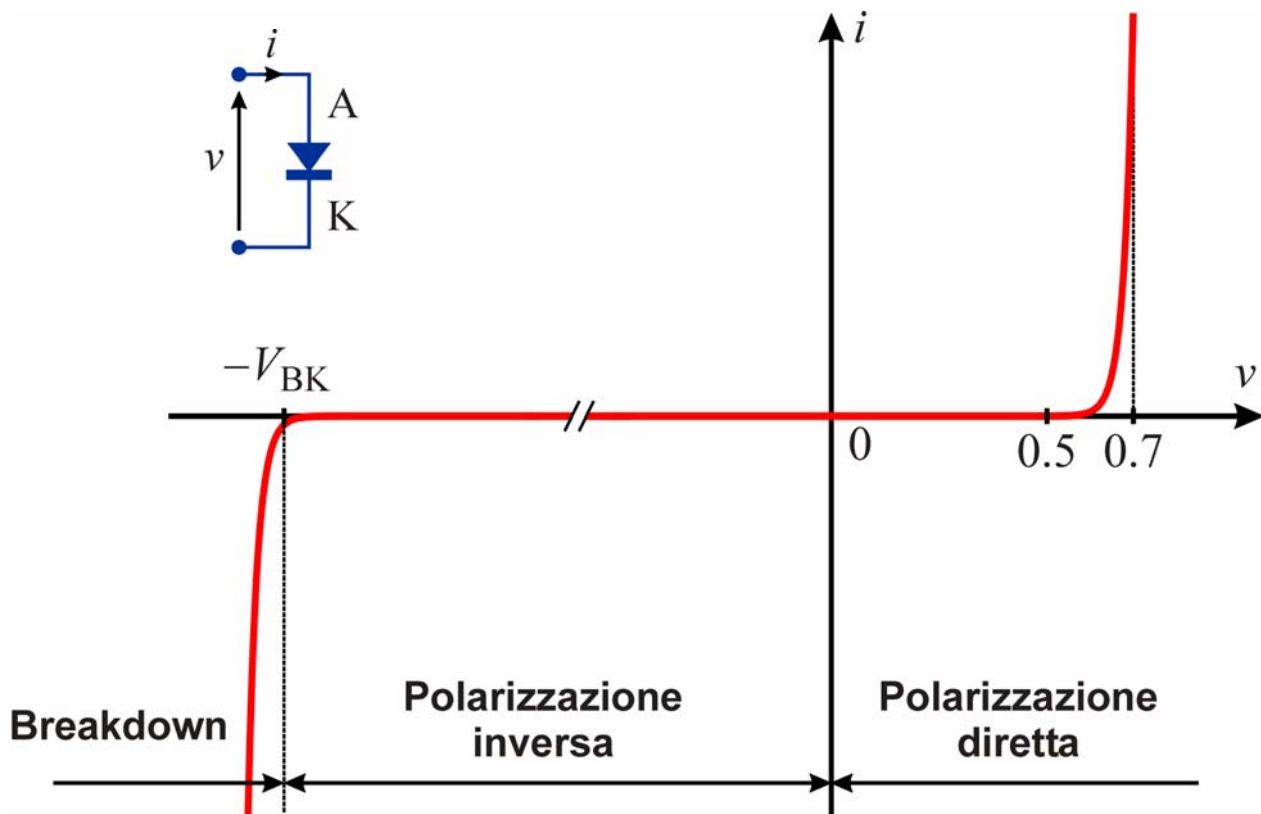
$$v = V_T \ln \left( 1 + \frac{i}{I_S} \right)$$



(Queste equazioni valgono al di fuori della regione di breakdown)

4

## Curva caratteristica del diodo a giunzione



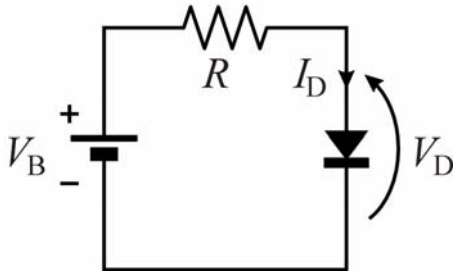
5

## Analisi di circuiti con diodi a giunzione

- L'analisi di circuiti con diodi a giunzione richiede la risoluzione di equazioni non lineari
  - ◆ Normalmente non è possibile risolvere le equazioni in forma chiusa
  - ◆ La soluzione può essere determinata per via numerica o, nei casi più semplici, per via grafica
- Nel caso di circuiti complessi, è possibile ottenere soluzioni accurate solo impiegando programmi di simulazione circuitale
- Spesso è sufficiente una valutazione approssimata della soluzione
  - ◆ In questo caso si può ricorrere a modelli semplificati del diodo (per esempio lineari a tratti)

6

## Esempio



$$\begin{aligned}V_B &= 10 \text{ V} \\ R &= 1 \text{ k}\Omega \\ I_S &= 10 \text{ fA} \\ V_T &= 26 \text{ mV}\end{aligned}$$

- Determinare la tensione e la corrente del diodo

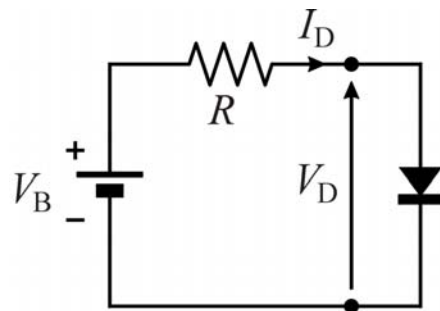
7

## Risoluzione per via grafica

- Devono essere soddisfatte le equazioni

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

$$I_D = \frac{V_B - V_D}{R}$$



- ➔ Il punto  $(V_D, I_D)$ , cioè il **punto di lavoro del diodo**, deve appartenere sia alla curva caratteristica del diodo, sia alla caratteristica del bipolo formato dal generatore e dal resistore
- Quest'ultima è rappresentata dalla retta di equazione

$$i = \frac{V_B - v}{R}$$

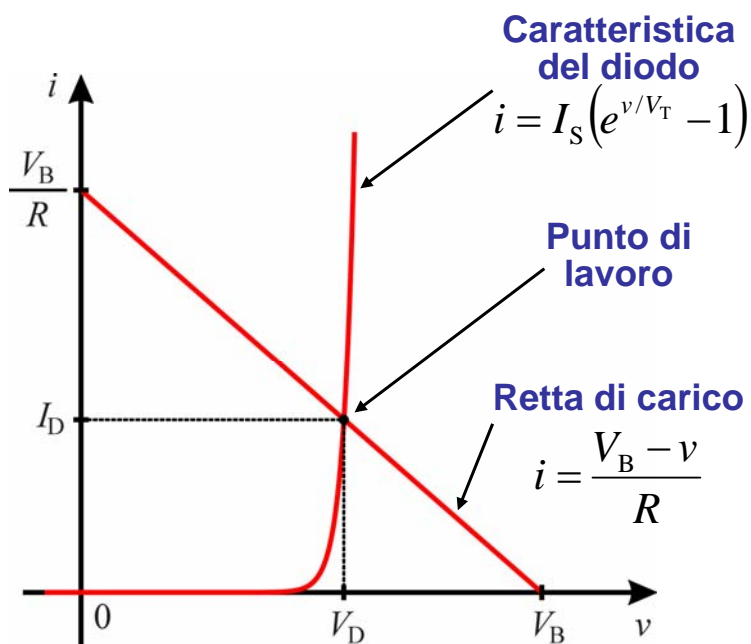
che è chiamata **retta di carico**

- ◆ La retta di carico interseca gli assi nei punti  $(0, V_B/R)$  e  $(V_B, 0)$

8

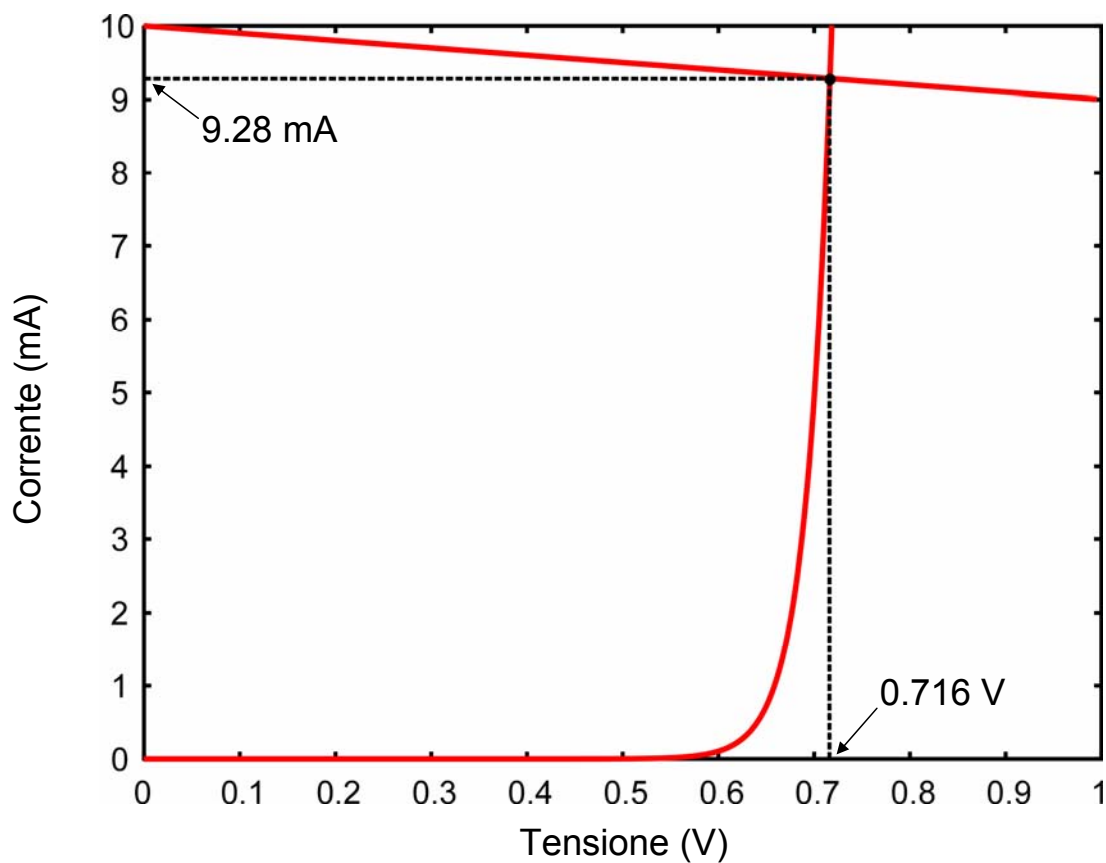
## Risoluzione per via grafica

- E' possibile determinare per via grafica il punto di lavoro cercando l'intersezione della curva caratteristica del diodo con la retta di carico



9

## Risoluzione per via grafica



10

## Risoluzione per approssimazioni successive

- Si scrive l'equazione del diodo esplicitando  $v$  in funzione di  $i$
- Si sostituisce ai  $i$  l'espressione in funzione di  $v$  fornita dall'equazione della retta di carico

$$\left. \begin{aligned} v &= V_T \ln\left(\frac{i}{I_S} + 1\right) \\ i &= \frac{V_B - v}{R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v = V_T \ln\left(\frac{V_B - v}{RI_S} + 1\right)$$

- Data una stima iniziale della soluzione  $v^{(0)}$ , si può utilizzare l'equazione così ottenuta per valutare approssimazioni successive della soluzione mediante la formula iterativa

$$v^{(n+1)} = V_T \ln\left(\frac{V_B - v^{(n)}}{RI_S} + 1\right)$$

- Il procedimento viene arrestato quando le variazioni di  $v$  e  $i$  scendono sotto di una soglia prefissata

11

## Risoluzione per approssimazioni successive

- Per esempio, scegliendo come stima iniziale il valore  $v = 0.6$  V, nel caso in esame si ottiene

$$v^{(0)} = 0.6 \text{ V}$$

$$v^{(1)} = 0.716798 \text{ V}$$

$$v^{(2)} = 0.716473 \text{ V}$$

$$v^{(3)} = 0.716474 \text{ V}$$

$$v^{(4)} = 0.716474 \text{ V}$$

$$i_D^{(1)} = 9.40000 \text{ mA}$$

$$i_D^{(2)} = 9.28320 \text{ mA}$$

$$i_D^{(3)} = 9.28353 \text{ mA}$$

$$i_D^{(4)} = 9.28353 \text{ mA}$$

$$i_R^{(1)} = 9.28320 \text{ mA}$$

$$i_R^{(2)} = 9.28353 \text{ mA}$$

$$i_R^{(3)} = 9.28353 \text{ mA}$$

$$i_R^{(4)} = 9.28353 \text{ mA}$$

(Con  $i_D$  e  $i_R$  si indicano i valori della corrente calcolati, a partire dal corrispondente valore di  $v$ , mediante l'equazione del diodo e l'equazione della retta di carico)

- ◆ Spesso bastano poche iterazioni per ottenere soluzioni sufficientemente accurate
- ◆ La convergenza non è sempre assicurata (per es. il metodo fallisce se  $V_B < 0.5-0.6$  V)

12

## Modello esponenziale a spegnimento completo

- La corrente  $I_S$  è di regola molto piccola, quindi spesso si può ritenere che la corrente di un diodo polarizzato nella regione inversa sia praticamente zero
- In questo caso è possibile approssimare la caratteristica nel modo seguente

$$\begin{cases} i = I_S e^{v/V_T} & \text{per } v > 0 \\ 0 & \text{per } v \leq 0 \end{cases}$$

- Questo modello è ancora non lineare, quindi, in generale, non consente di ottenere soluzioni in forma chiusa

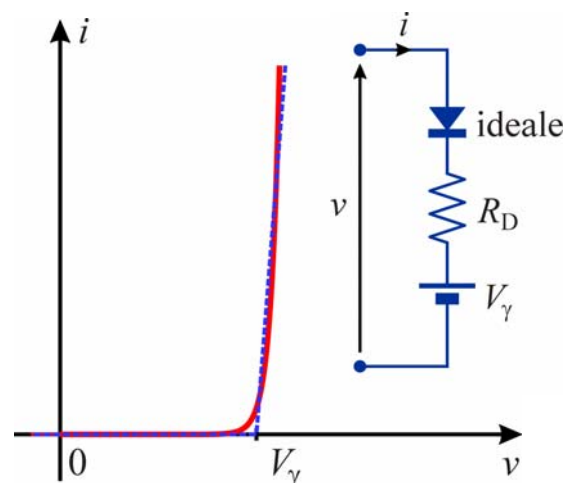
13

## Modello a soglia con resistenza serie

- L'analisi di circuiti a diodi può essere notevolmente semplificata utilizzando modelli lineari a tratti
- Per esempio si può approssimare la caratteristica del diodo con due semirette (una delle quali è orizzontale) nel modo seguente

$$i = \begin{cases} 0 & \text{per } v \leq V_\gamma \\ \frac{v - V_\gamma}{R_D} & \text{per } v > V_\gamma \end{cases}$$

- Queste equazioni possono essere interpretate mediante un circuito equivalente formato da un diodo ideale, un resistore  $R_D$  e un generatore  $V_\gamma$  collegati in serie



- I valori di  $V_\gamma$  e  $R_D$  dipendono dall'intervallo di valori della corrente  $i$  che interessa considerare (valori tipici:  $V_\gamma = 0.6-0.7$  V,  $R_D = 1-100$   $\Omega$ )

14

## Modello a soglia e modello a diodo ideale

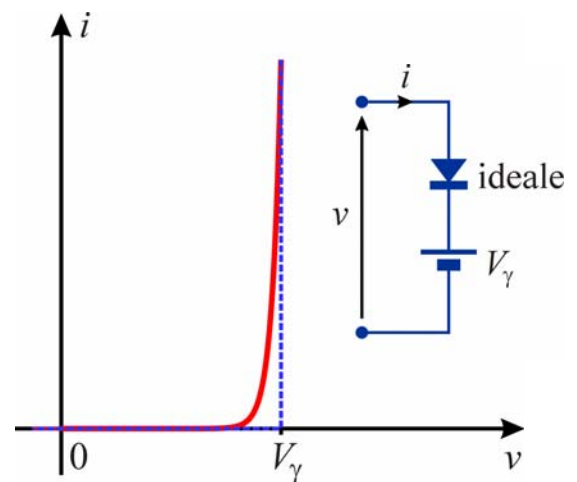
- Se si può ritenere che, quando il diodo è in conduzione, la sua tensione sia praticamente costante è possibile omettere la resistenza  $R_D$

- In queste condizioni le equazioni si riducono a

$$i = 0 \quad \text{per } v \leq V_\gamma$$

$$v = V_\gamma \quad \text{per } i > 0$$

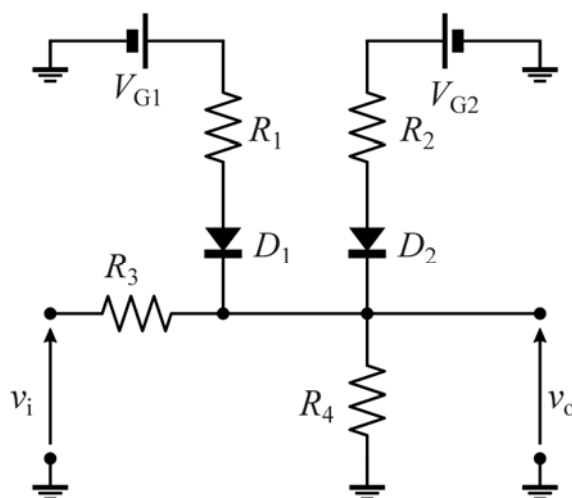
- Il modello così ottenuto è detto **a soglia**
- Anche in questo caso i valori tipici di  $V_\gamma$  sono di 0.6-0.7 V



- In alcune applicazioni i valori delle tensioni in gioco possono essere tali per cui  $V_\gamma$  è trascurabile
- In questo caso è possibile eliminare il generatore e rappresentare il diodo come ideale

15

## Esempio



$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$V_{G1} = 6 \text{ V}$$

$$V_{G2} = 12 \text{ V}$$

- Utilizzando il modello a soglia con  $V_\gamma = 0.7 \text{ V}$ , determinare la tensione di uscita  $v_o$  per  $v_i = 9 \text{ V}$

16



## Esempio

- Ipotesi 1:**  $D_1$  e  $D_2$  in conduzione ( $\Rightarrow i_{D1} > 0, i_{D2} > 0$ )

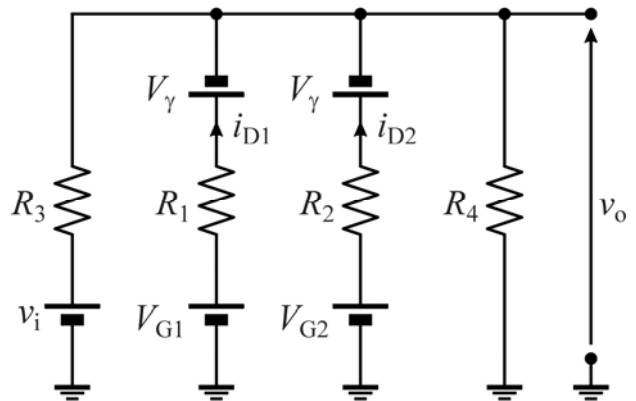
$$v_o = \frac{\frac{V_{G1} - V_\gamma}{R_1} + \frac{V_{G2} - V_\gamma}{R_2} + \frac{v_i}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 6.78 \text{ V}$$



$$i_{D1} = \frac{V_{G1} - V_\gamma - v_o}{R_1} = -1.48 \text{ mA}$$

- Non compatibile con le ipotesi
- La soluzione non è accettabile

$$i_{D2} = \frac{V_{G2} - V_\gamma - v_o}{R_2} = 1.51 \text{ mA}$$



17

## Esempio

- Ipotesi 2:**  $D_1$  interdetto,  $D_2$  in conduzione ( $\Rightarrow v_{D1} < V_\gamma, i_{D2} > 0$ )

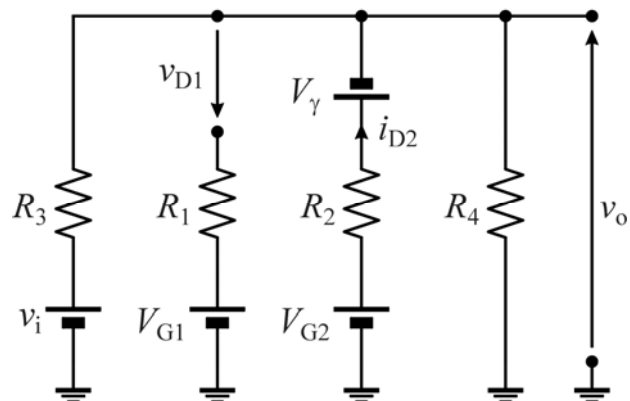
$$v_o = \frac{\frac{V_{G2} - V_\gamma}{R_2} + \frac{v_i}{R_3}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 8.27 \text{ V}$$



$$v_{D1} = V_{G1} - v_o = -0.78 \text{ V}$$

- Soluzione accettabile

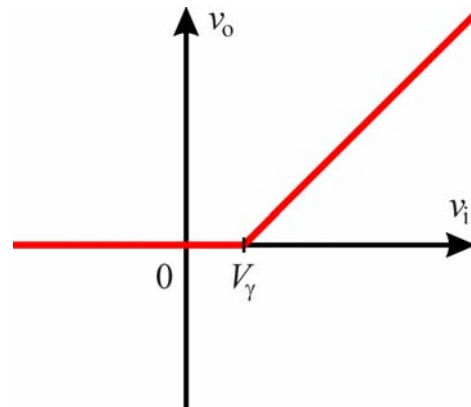
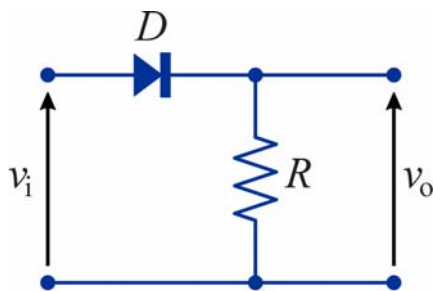
$$i_{D2} = \frac{V_{G2} - V_\gamma - v_o}{R_2} = 1.01 \text{ mA}$$



18

## Raddrizzatore a singola semionda

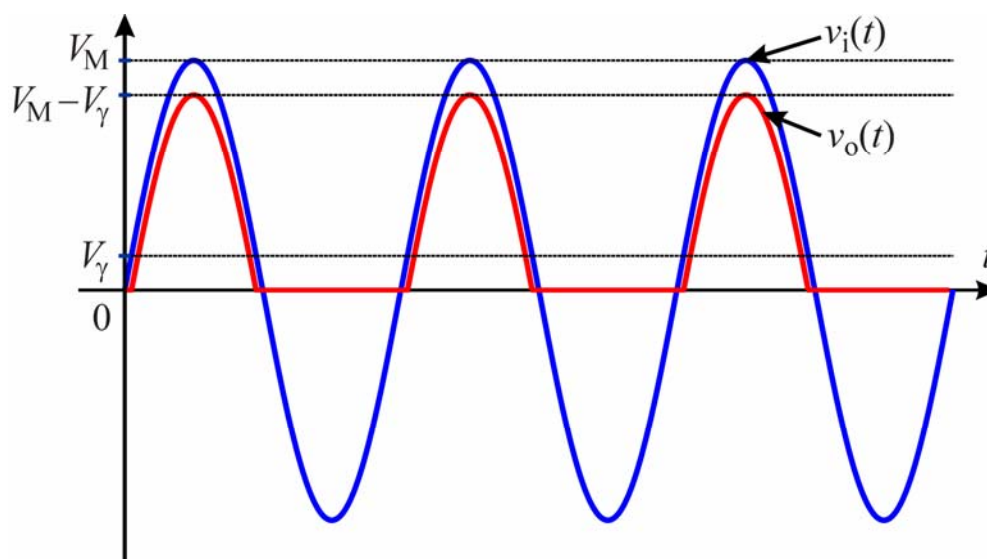
- Una delle applicazioni fondamentali del diodo è il circuito **raddrizzatore**, che permette di ottenere una tensione unidirezionale a partire da una tensione alternata
- Utilizzando il modello a soglia si ottiene che
  - ♦ per  $v_i \leq V_\gamma$  il diodo è interdetto, quindi  $v_o = 0$
  - ♦ per  $v_i > V_\gamma$  il diodo è in conduzione, quindi  $v_o = v_i - V_\gamma$



19

## Raddrizzatore a singola semionda

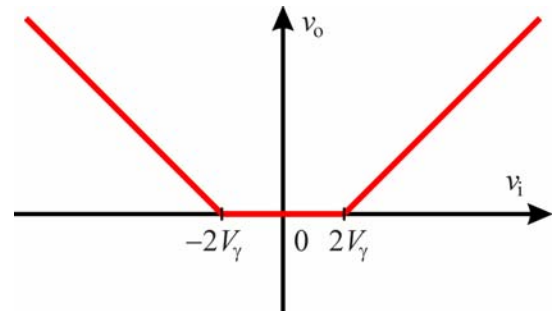
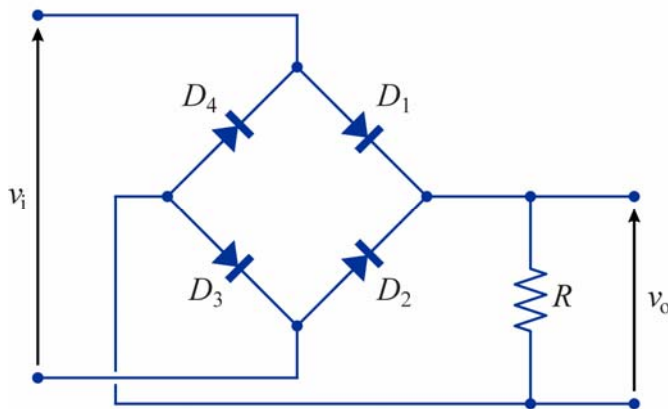
- Se l'ingresso è sinusoidale il diodo conduce durante le semionde positive e rimane interdetto durante le semionde negative



20

## Raddrizzatore a doppia semionda

- I **raddrizzatori a doppia semionda** (o ad onda intera) consentono di utilizzare entrambe le semionde della tensione alterata in ingresso
- Il circuito utilizzato più comunemente per realizzare un raddrizzatore a doppia semionda è il seguente (detto anche **ponte di Graetz**)



- Durante ciascuna semionda, per  $|v_i| > 2V_\gamma$ , una delle coppie di diodi  $D_1-D_3$  o  $D_2-D_4$  è in conduzione mentre l'altra è interdetta

21

## Raddrizzatore a doppia semionda

- Per  $v_i > 2V_\gamma$  i diodi  $D_1$  e  $D_3$  sono in conduzione mentre  $D_2$  e  $D_4$  sono interdetti

- ♦ Infatti si ha:

$$i_{D1} = i_{D3} = i_R = \frac{v_i - 2V_\gamma}{R}$$

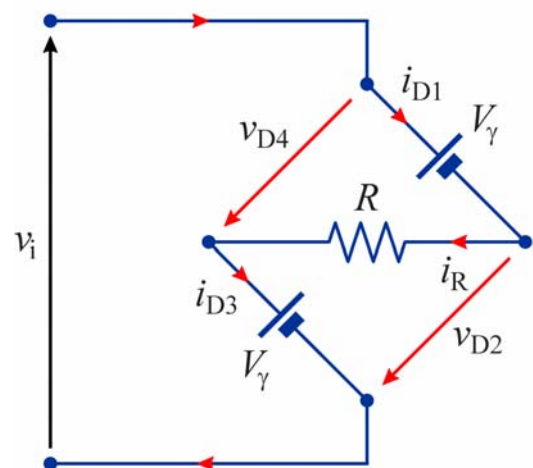
$$i_{D1} = i_{D3} > 0 \Rightarrow v_i > 2V_\gamma$$

- ♦ Inoltre in queste condizioni risulta

$$v_{D2} = v_{D4} = v_\gamma - v_i < 0$$

- ➔ Quindi la tensione di uscita è

$$v_o = v_i - 2V_\gamma$$



22

## Raddrizzatore a doppia semionda

- In modo analogo si può verificare che  $v_i < 2V_\gamma$  i diodi  $D_2$  e  $D_4$  sono in conduzione mentre  $D_1$  e  $D_3$  sono interdetti

◆ Infatti in queste condizioni si ha:

$$i_{D2} = i_{D4} = i_R = \frac{-v_i - 2V_\gamma}{R}$$

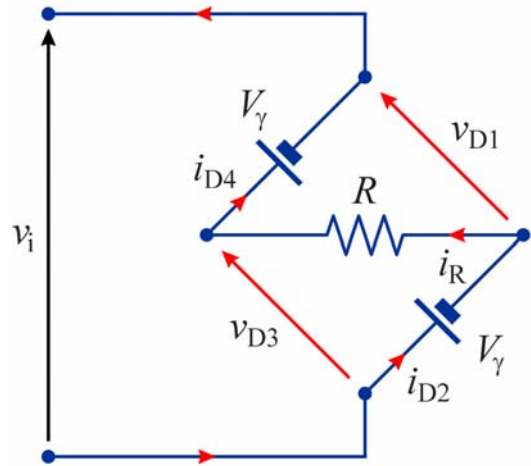
$$i_{D2} = i_{D4} > 0 \Rightarrow v_i < -2V_\gamma$$

$$v_{D1} = v_{D3} = v_\gamma + v_i < 0$$

➔ Quindi la tensione di uscita è

$$v_o = -v_i - 2V_\gamma$$

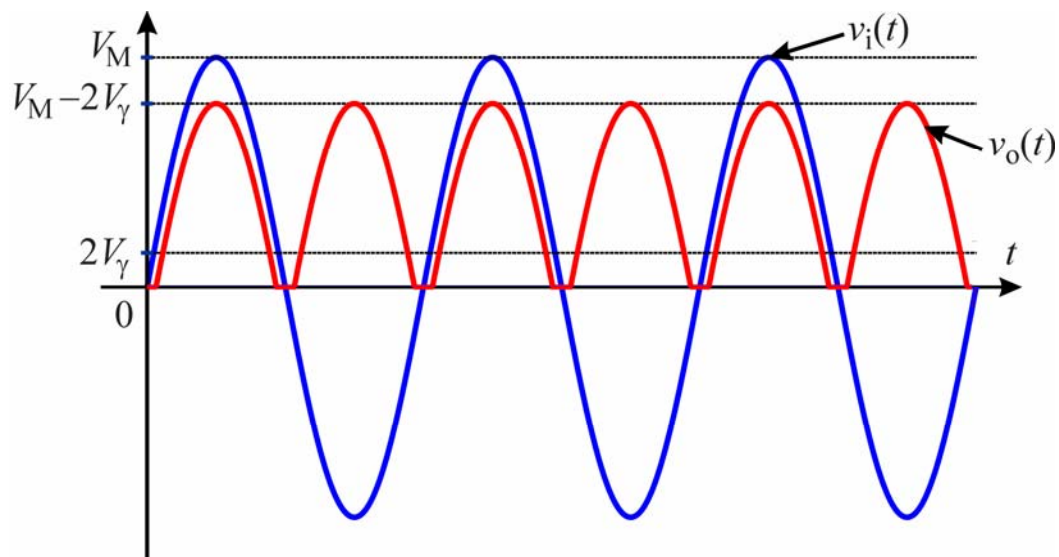
- Per  $|v_i| < 2V_\gamma$  i diodi sono tutti interdetti e quindi la tensione  $v_o$  è nulla



23

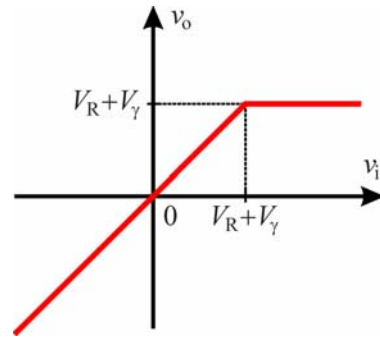
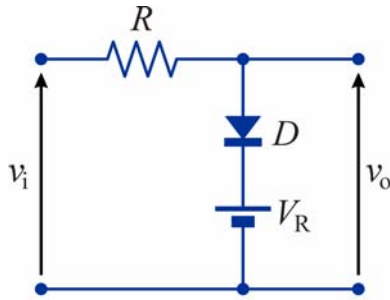
## Raddrizzatore a doppia semionda

- Se la tensione in ingresso è sinusoidale, l'andamento della tensione di uscita è il seguente



24

## Limitatori

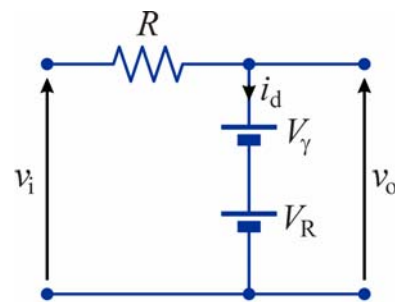


- Se  $v_i$  supera il valore  $V_R + V_\gamma$  il diodo entra in conduzione, impedendo a  $v_o$  di superare il valore  $V_R + V_\gamma$

$$i_d = \frac{v_i - V_\gamma - V_R}{R}$$

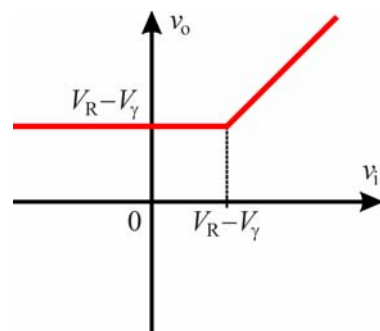
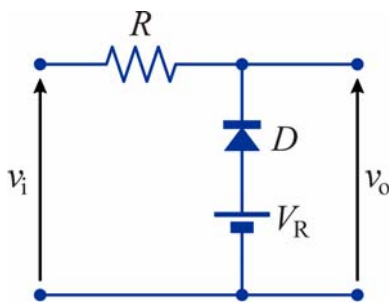
$$i_d > 0 \Rightarrow v_i > V_R + V_\gamma$$

$$v_o = \begin{cases} v_i & \text{per } v_i < V_R + V_\gamma \\ V_R + V & \text{per } v_i \geq V_R + V_\gamma \end{cases}$$



25

## Limitatori

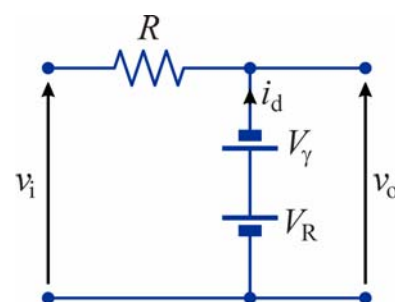


- Se si invertono i terminali del diodo, questo entra in conduzione quando la tensione di ingresso scende al di sotto di  $V_R - V_\gamma$ , quindi la tensione di uscita viene limitata inferiormente

$$i_d = \frac{V_R - V_\gamma - v_i}{R}$$

$$i_d > 0 \Rightarrow v_i < V_R - V_\gamma$$

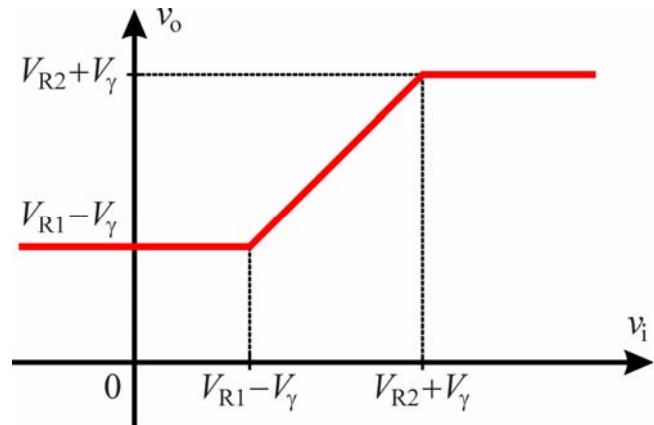
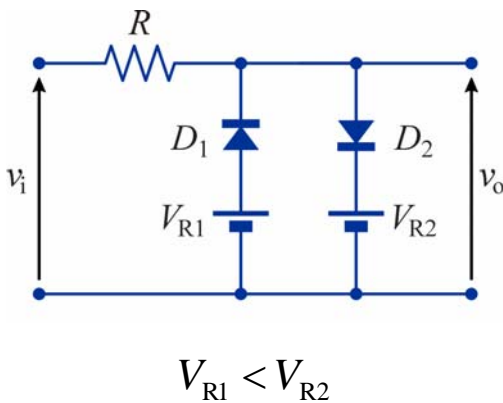
$$v_o = \begin{cases} V_R - V & \text{per } v_i \leq V_R - V_\gamma \\ v_i & \text{per } v_i > V_R - V_\gamma \end{cases}$$



26

## Limitatori

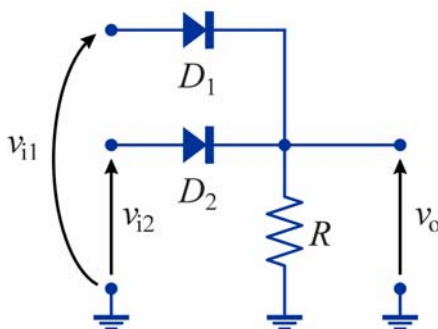
- Combinando i circuiti precedenti è possibile limitare l'escursione della tensione in uscita sia inferiormente sia superiormente



27

## Porta OR

- Si rappresenta il livello logico 0 con una tensione di 0 V e il livello 1 con una tensione positiva  $V_R$
- Se entrambi gli ingressi sono a livello 0 i diodi sono interdetti e quindi l'uscita è a 0
- Se uno degli ingressi è a livello 1, il diodo corrispondente va in conduzione portando l'uscita a 1
- ➔ Il circuito realizza la funzione OR

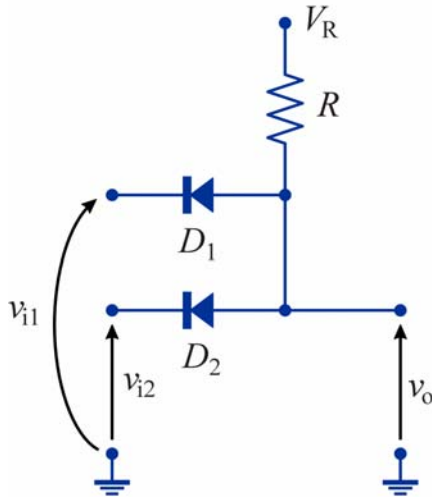


$v_{i1}$	$v_{i2}$	$v_o$
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

28

## Porta AND

- Se entrambi gli ingressi sono a livello 1 i diodi sono interdetti, quindi l'uscita è a livello 1
- Se uno degli ingressi è a livello 0, il diodo corrispondente va in conduzione portando l'uscita a livello 0
- ➔ Il circuito realizza la funzione AND

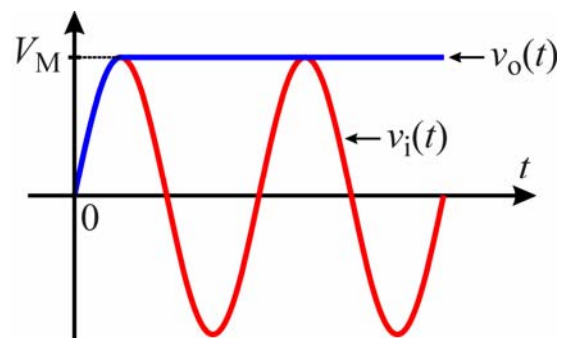
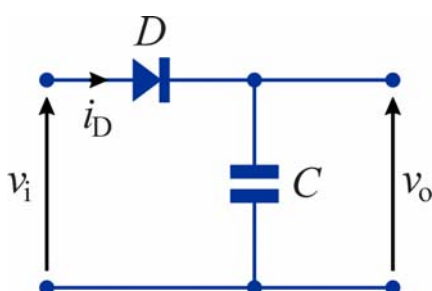


$v_{i1}$	$v_{i2}$	$v_o$
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

29

## Rivelatore di picco

- Si applica all'ingresso del circuito una tensione sinusoidale
- Si assume che il condensatore inizialmente sia scarico
- Inoltre, per semplicità, si assume che il diodo sia ideale
- Inizialmente il diodo è in conduzione e  $v_o = v_i$ , quindi il condensatore si carica fino a quando  $v_i$  raggiunge il valore di picco  $V_M$
- Successivamente il condensatore non può scaricarsi, perché questo richiederebbe che la corrente  $i_D$  divenisse negativa
- Negli istanti successivi la tensione di uscita rimane costante al valore  $V_M$  e quindi il diodo rimane interdetto



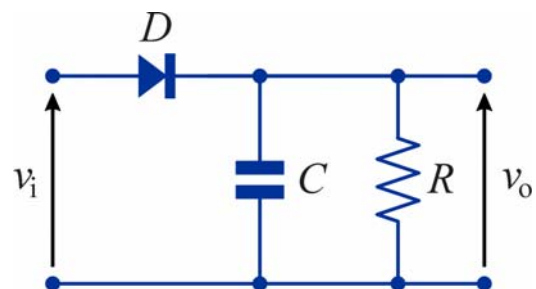
30

## Raddrizzatore con capacità di filtro

- In presenza di una resistenza di carico  $R$ , quando il diodo va in interdizione il condensatore si scarica attraverso  $R$
- Il diodo può entrare in conduzione quando la tensione di ingresso supera la tensione di uscita
- Quando il diodo è in conduzione  $v_o = v_i$  e il condensatore si carica
- Quando  $v_o$  raggiunge il valore  $V_M$  il diodo passa in interdizione e il condensatore si scarica
- Quindi l'andamento di  $v_o$  a partire dal valore massimo è dato da

$$v_o(t) = V_M e^{-t/RC}$$

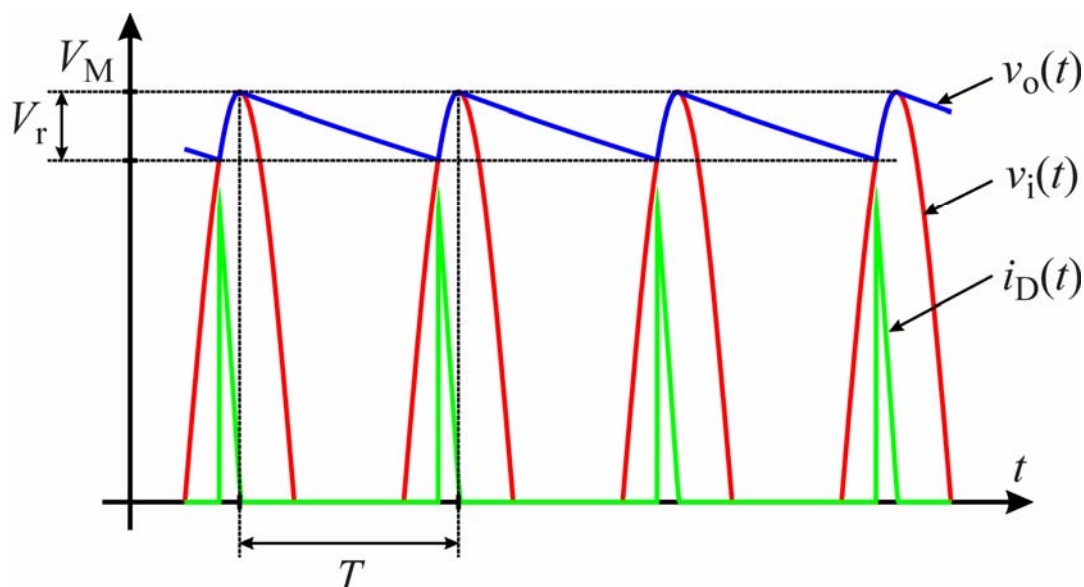
- Si assume che i valori di  $R$  e  $C$  siano dimensionati in modo che la costante di tempo sia molto grande rispetto al periodo  $T$  della tensione di ingresso



31

## Raddrizzatore con capacità di filtro

- Quindi si può assumere che
  - ◆ La variazione della tensione di uscita sia molto piccola nell'intervallo in cui il diodo è interdetto
  - ◆ Il diodo conduca per intervalli di tempo molto brevi rispetto a  $T$



32



## Raddrizzatore con capacità di filtro

- In queste condizioni
  - ◆ La durata dell'intervallo in cui il condensatore si scarica si può considerare circa uguale a  $T$
  - ◆ L'andamento di  $v_o(t)$  in questo intervallo può essere rappresentato mediante la relazione approssimata

$$v_o(t) = V_M e^{-t/RC} \approx V_M \left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

- Quindi l'ampiezza  $V_r$  dell'oscillazione di  $v_o$  (detta anche **ripple**) vale

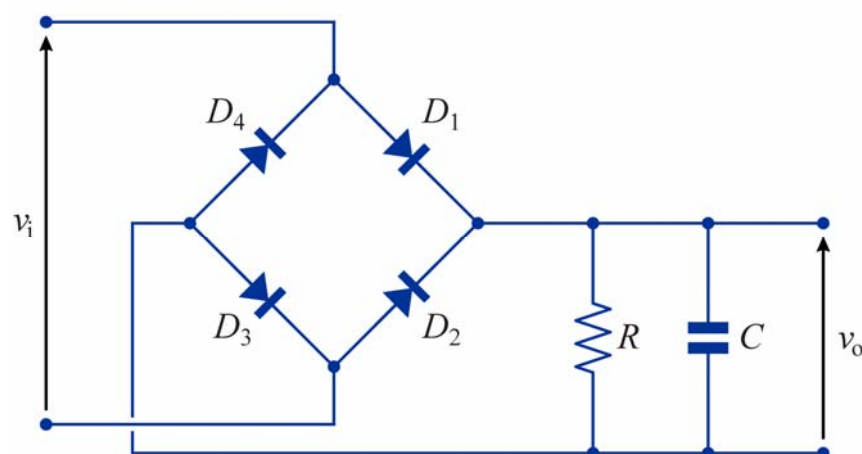
$$V_r = V_M - V_M \left(1 - \frac{T}{RC}\right) = \frac{V_M T}{RC}$$

33

## Raddrizzatore con capacità di filtro

- In modo analogo è possibile trattare il caso di un raddrizzatore a doppia semionda con condensatore di filtro
- In questo caso l'intervallo di tempo tra due istanti in cui  $v_o(t) = V_M$  è pari a  $T/2$  quindi, a parità di condizioni, il ripple è pari alla metà di quello del raddrizzatore a singola semionda

$$V_r = \frac{V_M T}{2RC}$$

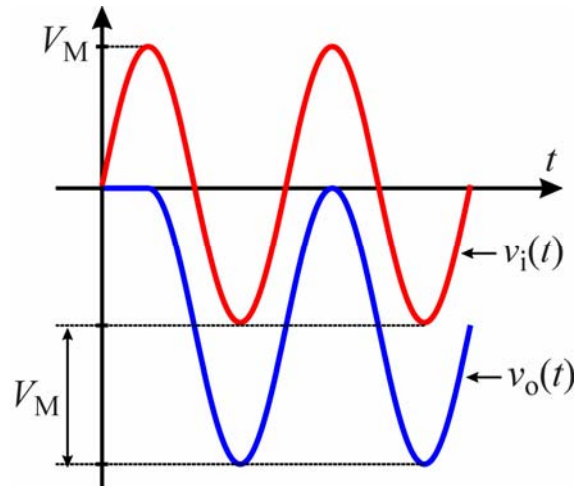
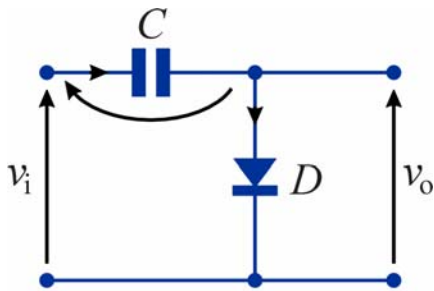


34

# Clamper

- Si assume che il condensatore inizialmente sia scarico che il diodo possa essere considerato ideale
- Inizialmente il diodo va in conduzione e il condensatore si carica finché la sua tensione raggiunge il valore  $V_M$
- In seguito il condensatore rimane carico con tensione  $V_M$  e il diodo è interdetto
- Quindi si ha

$$v_o(t) = v_i(t) - V_M$$

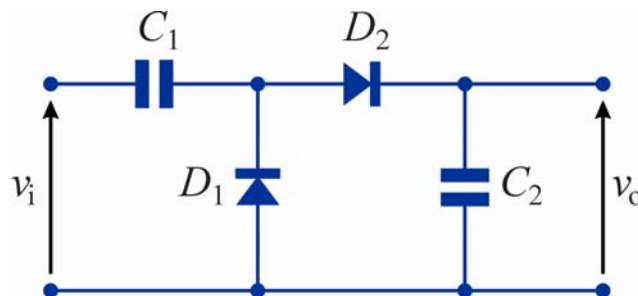


35

# Duplicatore di tensione

- Se nel circuito precedente si inverte il diodo la tensione di uscita del clamper diviene
- $$v'_o(t) = v_i(t) + V_M$$
- Il valore massimo di questa tensione è  $2V_M$
  - Se si collega un rivelatore di picco in cascata al clamper si ottiene un duplicatore di tensione, che fornisce in uscita una tensione costante pari al doppio dell'ampiezza della tensione di ingresso

$$v_o(t) = 2V_M$$



36

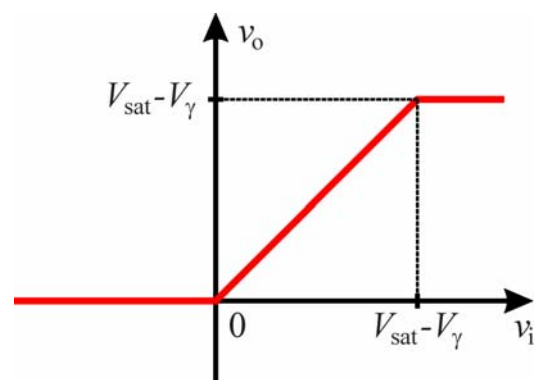
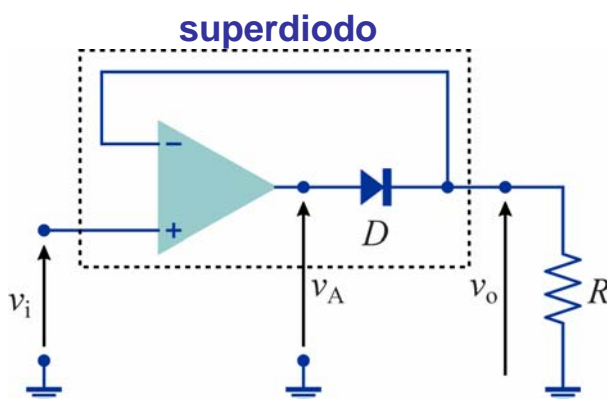
## Raddrizzatori di precisione

- Nei circuiti raddrizzatori considerati finora l'ampiezza della tensione di uscita è ridotta rispetto a quella di ingresso a causa delle cadute di tensione dei diodi
- Queste cadute di tensione possono essere trascurabili se le ampiezze delle tensioni sono elevate (in questo caso i diodi possono essere trattati come ideali)
- Per valori piccoli delle tensioni i circuiti precedenti non sono utilizzabili (se la tensione di ingresso non è in grado di portare i diodi in conduzione) o comunque hanno un comportamento insoddisfacente
- In questo caso si possono utilizzare **raddrizzatori di precisione** realizzati mediante amplificatori operazionali nei cui circuiti di retroazione vengono inseriti dei diodi

37

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

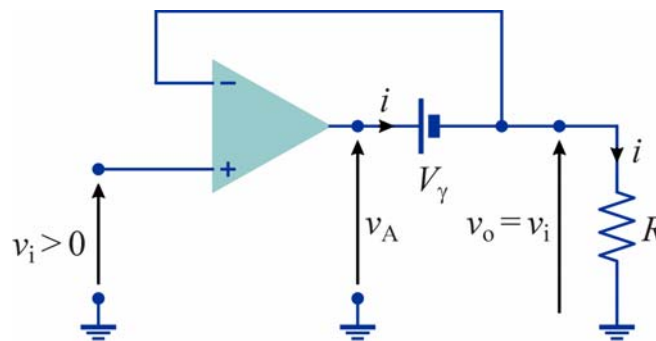
- Il circuito più semplice con cui si può realizzare un raddrizzatore di precisione è formato da un amplificatore operazionale e un diodo
- Il circuito così ottenuto è detto anche **superdiodo**



38

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

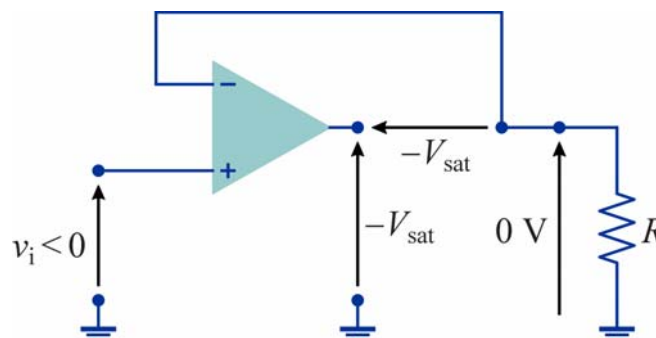
- Per  $v_i > 0$  la tensione di uscita dell'amplificatore operazionale  $V_A$  è positiva, quindi il diodo è in conduzione  
(in pratica occorre che sia  $V_A > V_\gamma$  e quindi  $v_i > V_\gamma/A \ll V_\gamma$ , dove  $A$  è il guadagno ad anello aperto dell'amplificatore operazionale)
- In questo modo si forma un anello di retroazione, quindi tra gli ingressi si ha un cortocircuito virtuale
- Finché l'amplificatore operazionale non entra in saturazione (cioè per  $v_i < V_{\text{sat}} - V_\gamma$ ) si ha  $v_i = v_o$



39

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

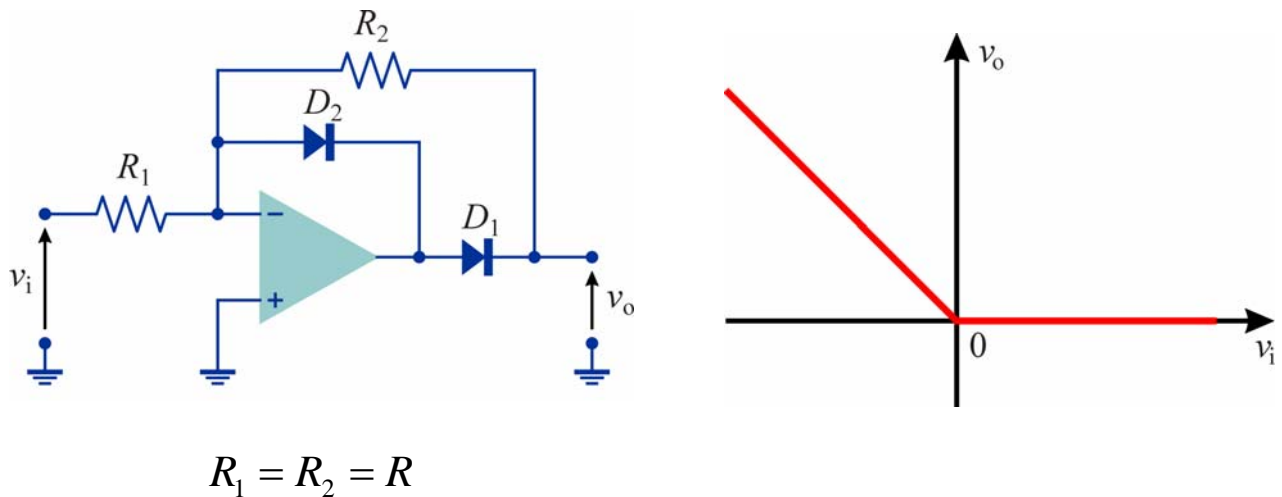
- Per  $v_i < 0$  la tensione di uscita dell'amplificatore operazionale è negativa, quindi il diodo è interdetto
- In queste condizioni la corrente nella resistenza di carico  $R$  e quindi la tensione di uscita sono nulle
- Dato che l'anello di retroazione è aperto, l'amplificatore operazionale va in saturazione negativa
- Se il segnale di ingresso varia molto rapidamente, questo potrebbe rappresentare un problema perché è necessario un certo tempo per portare l'operazionale dalla saturazione alla regione di funzionamento normale, quindi si ha un ritardo nella risposta



40

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

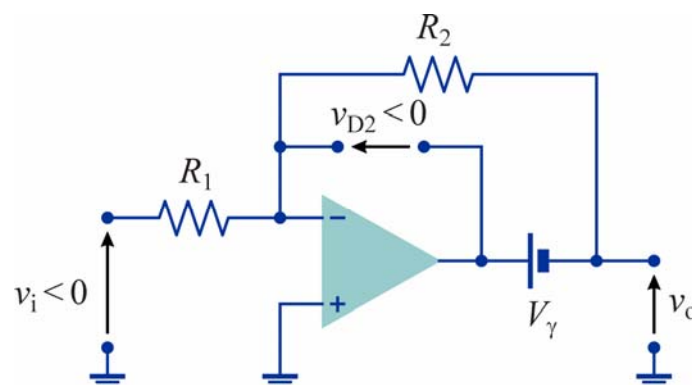
- Una realizzazione alternativa del raddrizzatore a una semionda è costituita dal seguente circuito, nel quale l'amplificatore operazionale non si trova mai in condizioni di saturazione (finché  $v_i > -V_{\text{sat}} + V_\gamma$ )



41

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

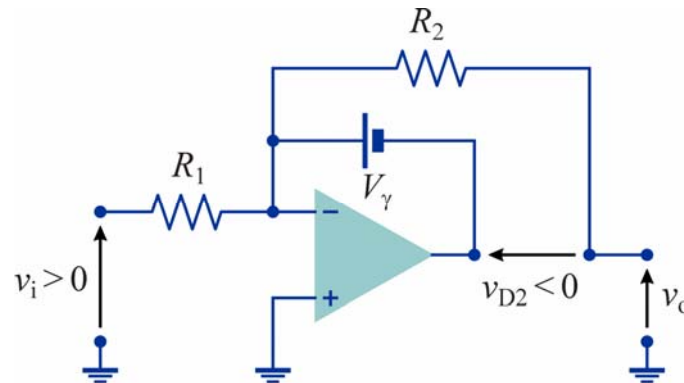
- Per  $v_i < 0$  la tensione di uscita dell'operazionale è positiva, quindi  $D_1$  va in conduzione
- In questo modo si chiude l'anello di retroazione e il circuito si comporta come un amplificatore invertente
- Dato che l'ingresso invertente è virtualmente a massa,  $D_2$  è interdetto
- Se  $R_1 = R_2$  risulta  $v_o = -v_i$



42

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

- Per  $v_i > 0$  la tensione di uscita dell'operazionale diventa negativa
- In queste condizioni va in conduzione  $D_2$ , chiudendo l'anello di retroazione
- Dato che l'ingresso invertente è virtualmente a massa, la tensione di uscita dell'operazionale risulta uguale a  $-V_\gamma$
- Di conseguenza  $D_1$  è interdetto e quindi la tensione di uscita è nulla



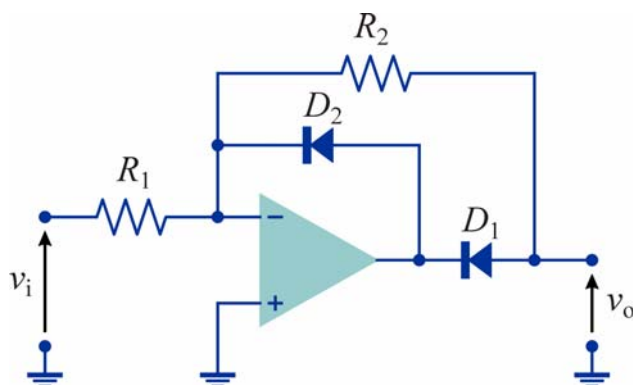
43

## Raddrizzatori di precisione a singola semionda

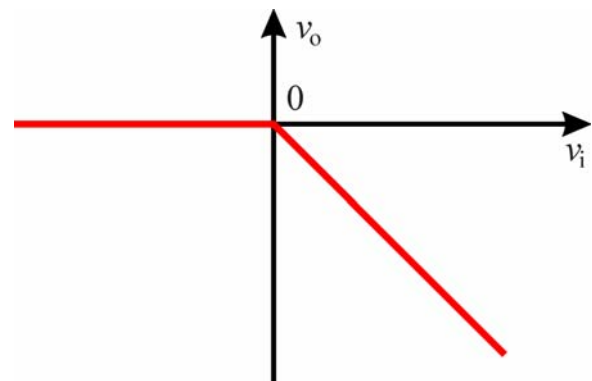
- In modo simile si può verificare che, se i collegamenti dei due diodi vengono invertiti, si ottiene

$$v_o = 0 \text{ per } v_i \leq 0$$

$$v_o = -v_i \text{ per } v_i > 0$$



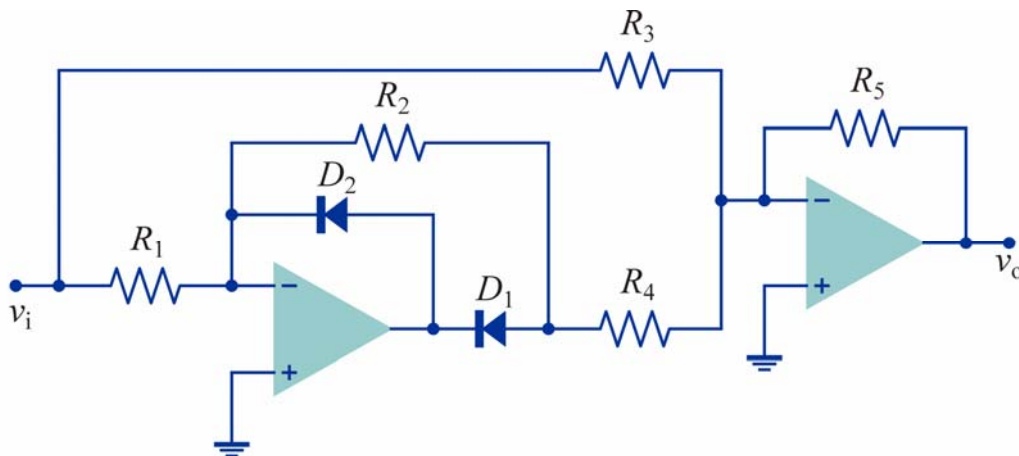
$$R_1 = R_2 = R$$



44

## Raddrizzatore di precisione a doppia semionda

- Una possibile realizzazione di un raddrizzatore di precisione a doppia semionda è rappresentata dal seguente circuito, costituito da un raddrizzatore a semionda collegato a un sommatore invertente



$$R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R$$

$$R_4 = R/2$$

45

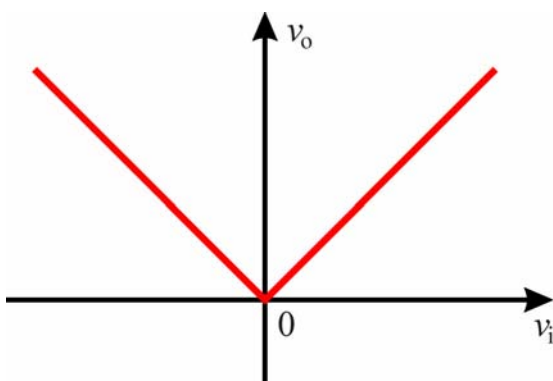
## Raddrizzatore di precisione a doppia semionda

- La tensione all'uscita del primo stadio è

$$v_r(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } v_i(t) \leq 0 \\ -v_i(t) & \text{se } v_i(t) > 0 \end{cases}$$

- Quindi, la tensione all'uscita del sommatore vale

$$v_o(t) = -v_i(t) - 2v_r(t) = \begin{cases} -v_i(t) & \text{se } v_i(t) \leq 0 \\ v_i(t) & \text{se } v_i(t) > 0 \end{cases}$$



46