

Dispositivi e Tecnologie Elettroniche

Esercitazione

Giunzione *pn*

Esercizio 1: testo

- *Si consideri una giunzione brusca e simmetrica con drogaggio $N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, sezione trasversale $A = 0.5 \text{ mm}^2$ e lati lunghi rispetto alle lunghezze di diffusione dei portatori minoritari*
- *Le mobilità dei portatori minoritari nei due lati siano $\mu_n = 1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (elettroni nel lato p) e $\mu_p = 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (lacune nel lato n), mentre i tempi di vita siano $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$*
- *Determinare la caratteristica statica della giunzione*

Esercizio 1: soluzione

- Per calcolare la corrente di saturazione inversa occorre determinare la **diffusività** dei portatori minoritari:

$$D_n = V_T \mu_n = 26 \text{ cm}^2/\text{s} \quad D_p = V_T \mu_p = 10.4 \text{ cm}^2/\text{s}$$

- e le **lunghezze di diffusione**:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 50.99 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 32.25 \text{ } \mu\text{m}$$

Esercizio 1: soluzione

■ **La corrente di saturazione inversa** vale

$$(n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})$$

$$I_s = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{L_n} + qA \frac{n_i^2}{N_D} \frac{D_p}{L_p} = 1.4 \times 10^{-14} \text{ A}$$

■ **La caratteristica statica** ha espressione

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{V}{\eta V_T} \right) - 1 \right]$$

dove il **fattore di idealità** η dipende da V ed è compreso tra 1 e 2

Esercizio 2: testo

- *Si consideri una giunzione brusca e simmetrica con drogaggio $N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, sezione trasversale $A = 1.5 \text{ mm}^2$ e lati lunghi rispetto alle lunghezze di diffusione dei portatori minoritari*
- *Le mobilità dei portatori minoritari nei due lati siano $\mu_n = 1050 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (elettroni nel lato p) e $\mu_p = 450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (lacune nel lato n), mentre i tempi di vita siano $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$*
- *Determinare i parametri di piccolo segnale del diodo per la polarizzazione $V_0 = 0.6 \text{ V}$*

Esercizio 2: soluzione

- *La determinazione dei parametri di piccolo segnale richiede la conoscenza del **punto di funzionamento a riposo** della giunzione, e quindi occorre valutarne la caratteristica statica*
- *Per calcolare I_s occorre determinare la **diffusività** dei portatori minoritari:*

$$D_n = V_T \mu_n = 27.3 \text{ cm}^2/\text{s} \quad D_p = V_T \mu_p = 11.7 \text{ cm}^2/\text{s}$$

*e le **lunghezze di diffusione**:*

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 52.25 \text{ } \mu\text{m}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 34.21 \text{ } \mu\text{m}$$

Esercizio 2: soluzione

- **Si ha poi** ($n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)

$$I_s = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{L_n} + qA \frac{n_i^2}{N_D} \frac{D_p}{L_p} = 4.36 \text{ pA}$$

- **Assumendo** $\eta = 1$, **si ha il pdf**

$$I_0 = I_s \left[\exp \left(\frac{V_0}{\eta V_T} \right) - 1 \right] = 45.88 \text{ mA}$$

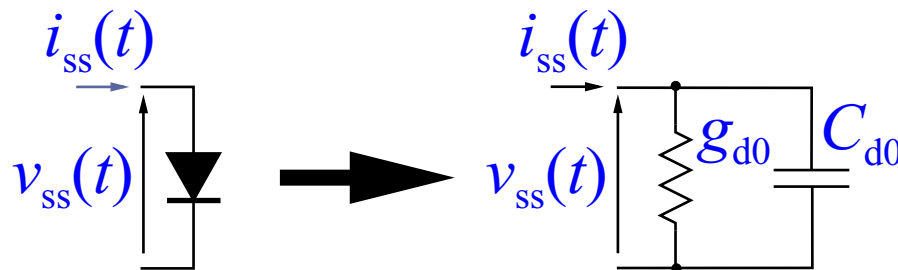
- **Poiché il pdf è in polarizzazione diretta, si può *trascurare* la capacità di svuotamento rispetto a quella di diffusione**

Esercizio 2: soluzione

■ *Nel pdf, i parametri differenziali valgono*

$$g_{d0} = \frac{I_0 + I_s}{\eta V_T} = 1.76 \text{ S}$$

$$C_{d0} = qA \frac{n_i^2}{V_T} \left[\frac{L_n}{N_A} + \frac{L_p}{N_D} \right] \exp \left(\frac{V_0}{V_T} \right) = 1.77 \mu\text{F}$$



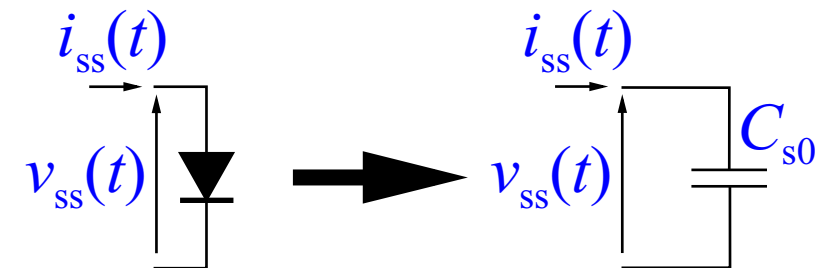
Esercizio 3: testo

- **Si consideri una giunzione brusca con drogaggi**
 $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $A = 0.2 \text{ mm}^2$ e
lati lunghi
- **Le mobilità dei portatori minoritari nei due lati**
siano $\mu_n = 1050 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e $\mu_p = 400$
 $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, **mentre i tempi di vita siano**
 $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ }\mu\text{s}$
- **Determinare l'intervallo di tensioni di**
polarizzazione necessario a realizzare una
capacità accordabile con valori compresi tra 5
pF e 10 pF

Esercizio 3: soluzione

- *La realizzazione di una capacità accordabile richiede di poter trascurare la conduttanza differenziale della giunzione, e quindi occorre lavorare in **polarizzazione inversa***
- *In polarizzazione inversa, la capacità di diffusione è trascurabile*

$$C_{s0} = A \sqrt{\frac{q \epsilon N_{eq}}{2[V_{bi} - V_0]}}$$



Esercizio 3: soluzione

- *Invertendo la relazione che definisce la capacità di svuotamento*

$$V_0 = V_{bi} - A^2 \frac{q N_{eq} \epsilon_s}{2 C_{s0}^2}$$

dove

$$V_{bi} = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.7 \text{ V}$$

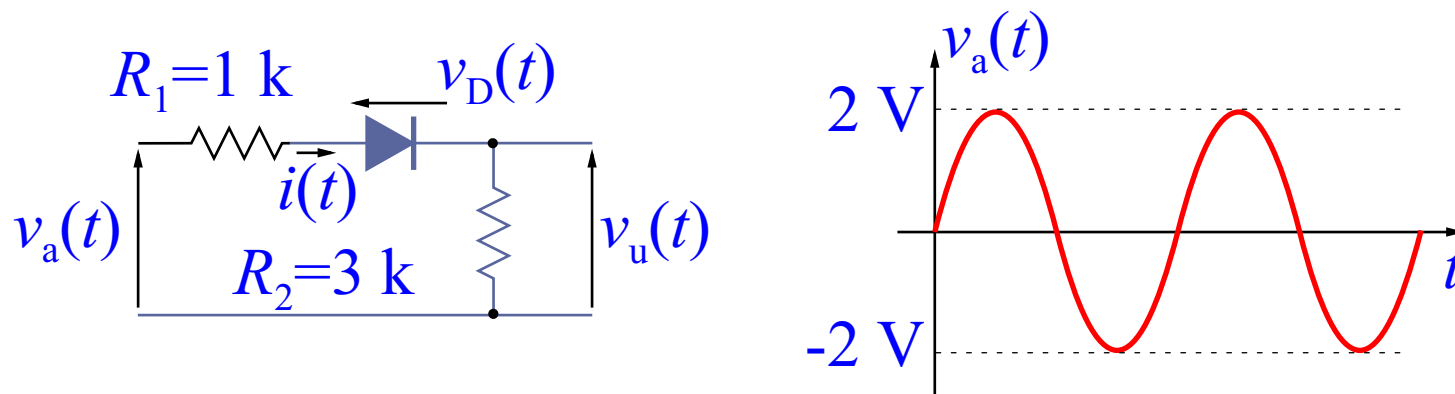
- *Sostituendo:*

$$V_0(C_{s0} = 10 \text{ pF}) = -2.58 \text{ V}$$

$$V_0(C_{s0} = 5 \text{ pF}) = -12.43 \text{ V}$$

Esercizio 4: testo

- Assumendo che $v_a(t)$ sia una forma d'onda sinusoidale di valore massimo pari a 2 V, per il circuito di figura determinare graficamente $v_u(t)$ utilizzando il modello statico semplificato del diodo
- Si assuma inizialmente $V_\gamma = 0$ V, e poi si ripeta l'analisi per $V_\gamma = 0.5$ V



Esercizio 4: soluzione

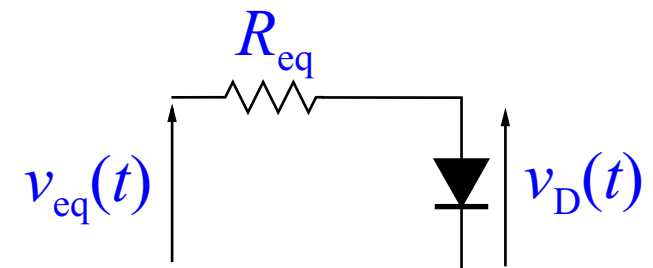
■ *Secondo il modello statico semplificato, quando:*

◆ $v_D(t) \leq V_\gamma$ il diodo è un circuito aperto (**interdetto**)

◆ $i(t) > 0$ il diodo è un generatore ideale di tensione (**in conduzione**)

■ *Occorre quindi determinare gli istanti di **commutazione** da uno stato all'altro*

■ *È spesso conveniente utilizzare **il circuito equivalente di Thevenin** ai capi del diodo:*



$$v_{eq}(t) = v_a(t) \quad R_{eq} = R_1 + R_2 = 4 \text{ k}\Omega$$

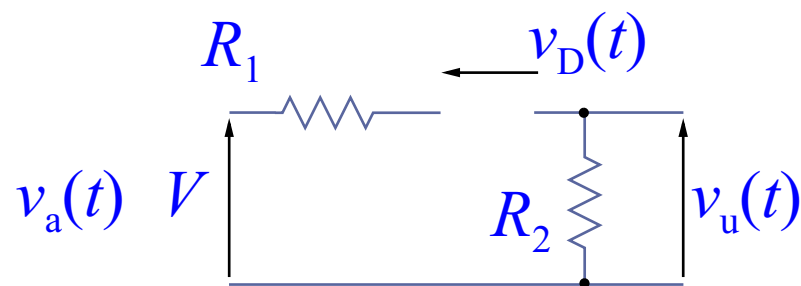
Esercizio 4: soluzione

- Poiché quando il diodo è interdetto la corrente è nulla, la commutazione si ha negli istanti in cui:

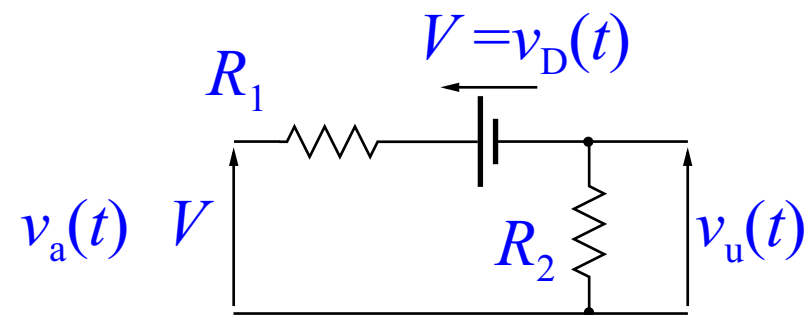
$$v_D(t) = V_\gamma \implies v_{\text{eq}}(t) = v_a(t) = V_\gamma$$

- In particolare, il diodo è interdetto per

$$v_D(t) \leq V_\gamma \implies v_{\text{eq}}(t) = v_a(t) \leq V_\gamma$$



Diodo interdetto



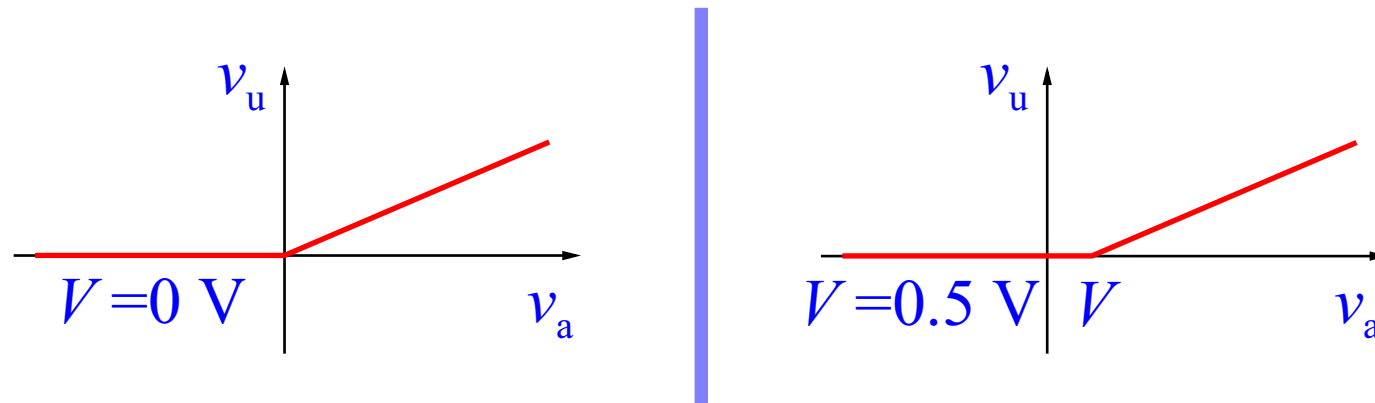
Diodo in conduzione

Esercizio 4: soluzione

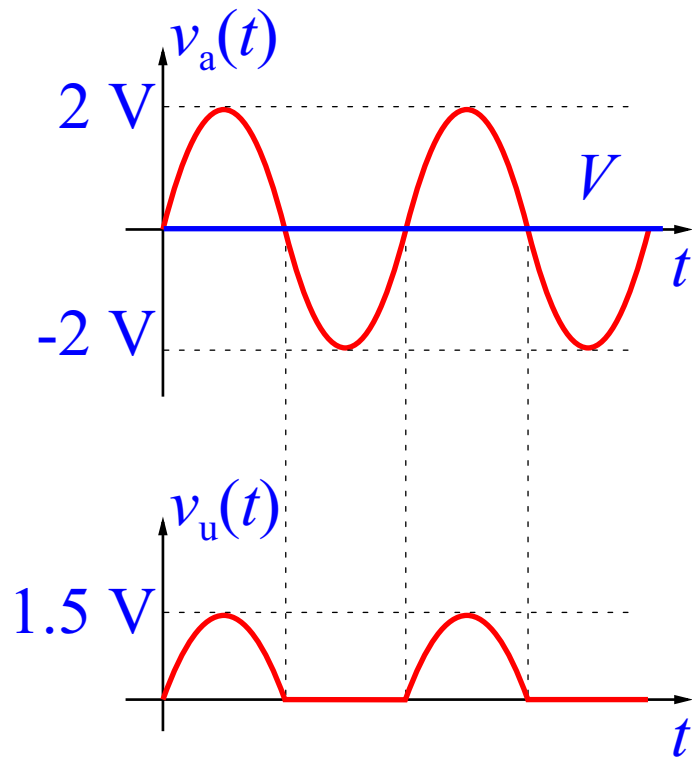
■ Si ha quindi (dove $R_2/(R_1 + R_2) = 0.75$):

$$v_u(t) = \begin{cases} 0 & v_a(t) \leq V_\gamma \\ [v_a(t) - V_\gamma] \frac{R_2}{R_1 + R_2} & v_a(t) > V_\gamma \end{cases}$$

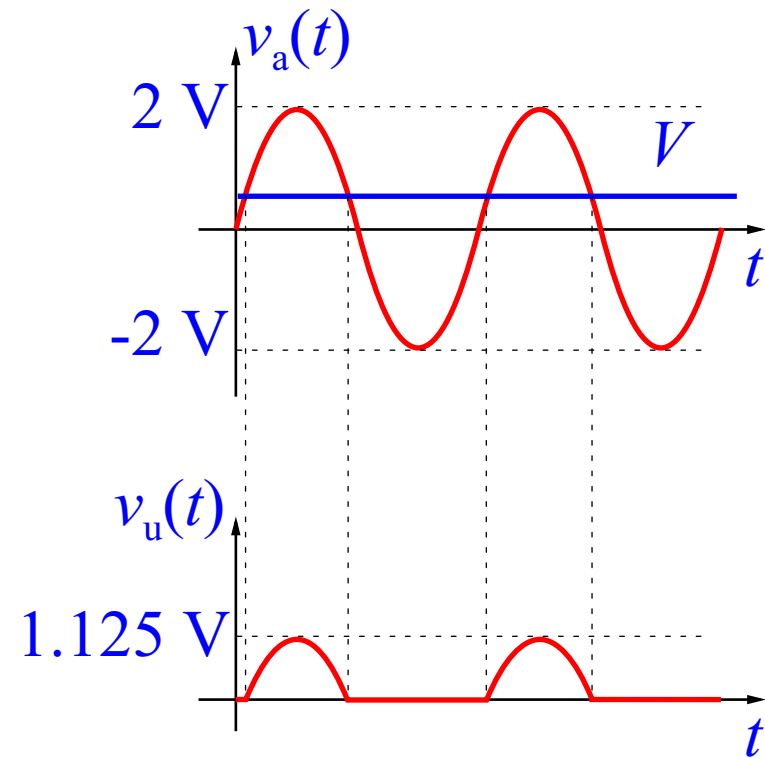
■ La curva $v_u(v_a)$ viene detta **caratteristica di trasferimento** (di tensione) del circuito



Esercizio 4: soluzione



$V=0\text{ V}$

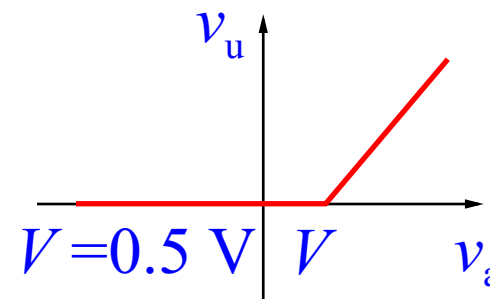
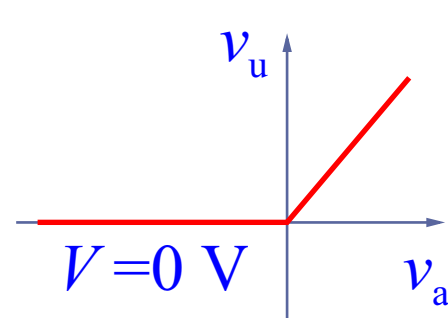
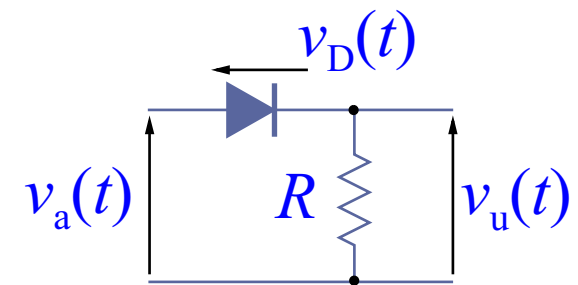


$V=0.5\text{ V}$

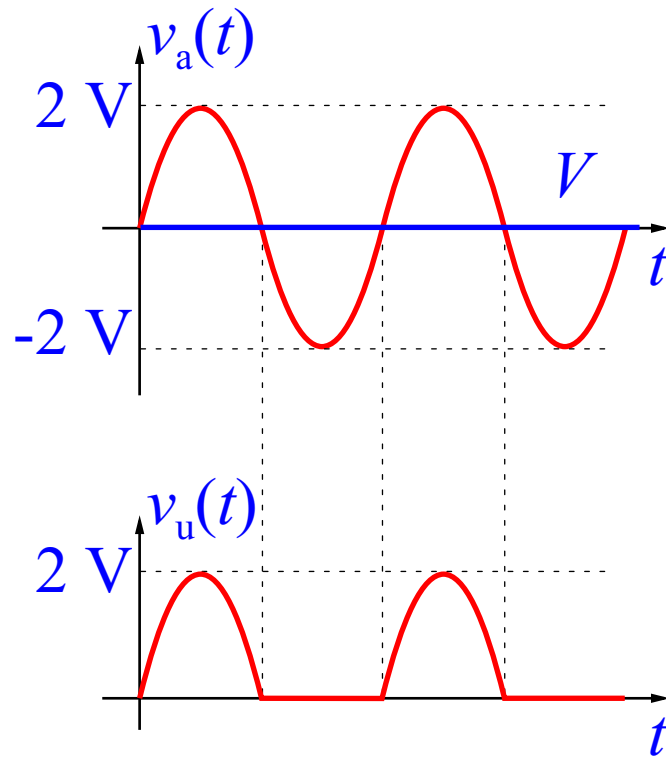
Esercizio 4: soluzione

- *Un circuito con questa caratteristica di trasferimento viene detto **raddrizzatore ad una semionda***
- *Un caso ideale è quello in cui $R_1 = 0$, per il quale*

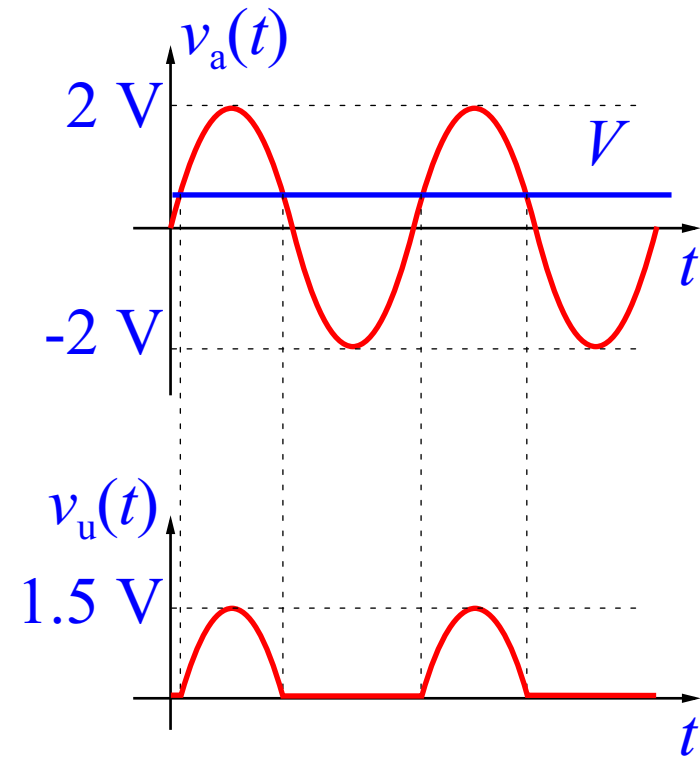
$$v_u(t) = \begin{cases} 0 & v_a(t) \leq V_\gamma \\ v_a(t) - V_\gamma & v_a(t) > V_\gamma \end{cases}$$



Esercizio 4: soluzione



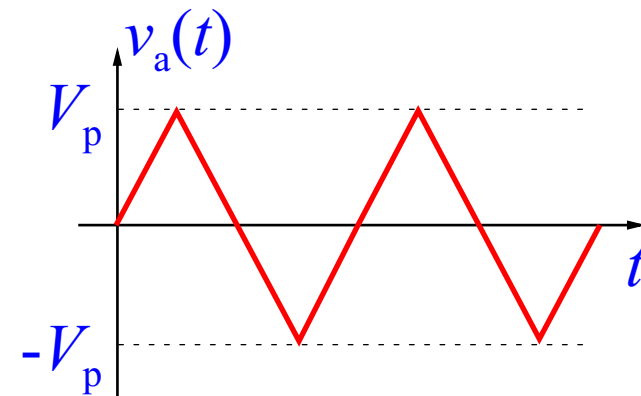
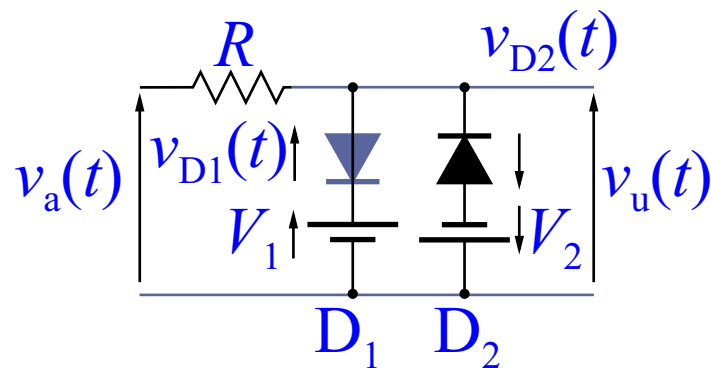
$V = 0 \text{ V}$



$V = 0.5 \text{ V}$

Esercizio 5: testo

- *Si consideri il circuito di figura, alimentato con una forma d'onda triangolare con $V_p > V_1, V_2$*
- *Nell'ipotesi di utilizzare il modello statico semplificato del diodo, si determinino:*
 - ◆ la caratteristica di trasferimento di tensione $v_u(v_a)$
 - ◆ la forma d'onda d'uscita $v_u(t)$



Esercizio 5: soluzione

- *La presenza di due diodi complica lo studio del circuito*
- *È conveniente ricavare inizialmente la **caratteristica di trasferimento***
 - ◆ Si assume $v_a \rightarrow -\infty$, e si desume lo stato dei due diodi in questa condizione per ispezione del circuito
 - ◆ Si incrementa v_a identificando i valori per cui si ha la commutazione dei diodi sulla base della condizione:
 - **annullamento della corrente che attraversa il diodo in conduzione**
 - **tensione ai capi del diodo interdetto pari a V_γ**

Esercizio 5: soluzione

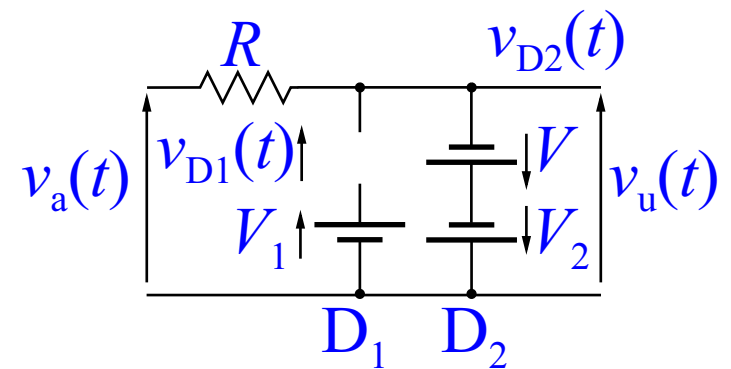
■ *Nel caso del circuito in esame, per $v_a \rightarrow -\infty$:*

◆ D1 è **interdetto**

◆ D2 è **in conduzione**

■ *In queste condizioni:*

$$v_u = -V_2 - V_\gamma$$



■ *La commutazione di D2 avviene per:*

$$I = -(v_a - v_u)/R = -(v_a + V_2 + V_\gamma)/R = 0$$

ovvero $v_a = -V_2 - V_\gamma$

Esercizio 5: soluzione

- *La commutazione di D1, invece, ha luogo per (trascurando la caduta di potenziale su R):*

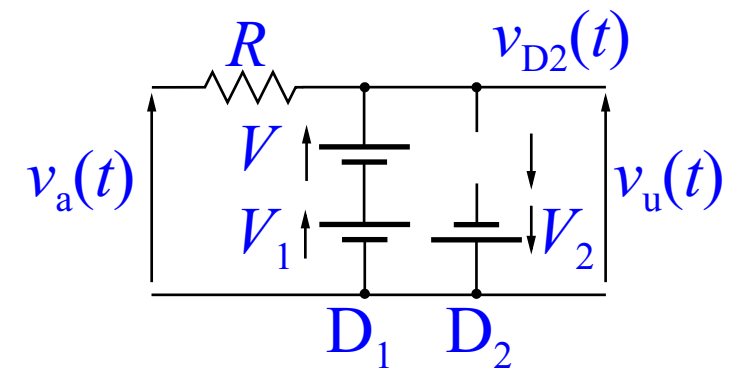
$$v_{D1} = v_a - V_1 = V_\gamma$$

ovvero $v_a = V_1 + V_\gamma$

- *Pertanto, nell'intervallo $-V_2 - V_\gamma < v_a < V_1 + V_\gamma$ entrambi i diodi sono interdetti e $v_u = v_a$*

- *Per $v_a \geq V_1 + V_\gamma$ D1 conduce e*

$$v_u = V_1 + V_\gamma$$

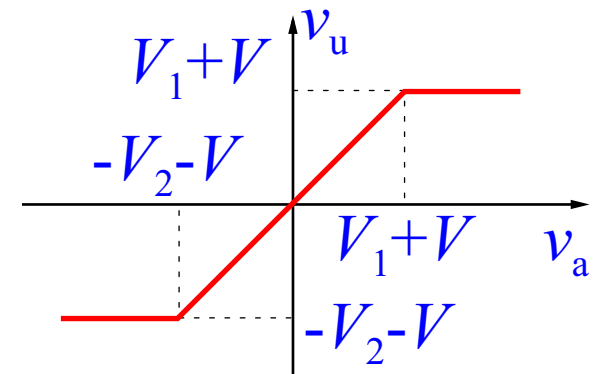


Esercizio 5: soluzione

- *Riassumendo, la caratteristica di trasferimento risulta essere:*

$$v_u = \begin{cases} -V_2 - V_\gamma & \text{se } v_a \leq -V_2 - V_\gamma \\ v_a & \text{se } -V_2 - V_\gamma < v_a < V_1 + V_\gamma \\ V_1 + V_\gamma & \text{se } v_a \geq V_1 + V_\gamma \end{cases}$$

- *I circuiti di questo tipo vengono detti **limitatori***



Esercizio 5: soluzione

- **Confrontando la caratteristica di trasferimento con la tensione di ingresso $v_u(t)$ si ha il grafico di figura**

