

Il Diodo

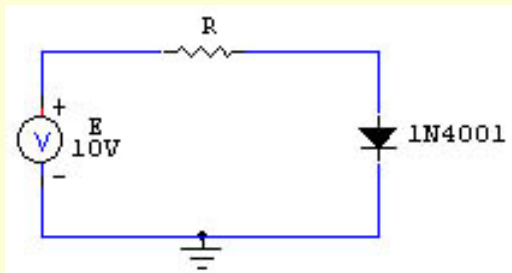
Funzionamento, tipologie,
applicazioni

Di cosa parleremo ...

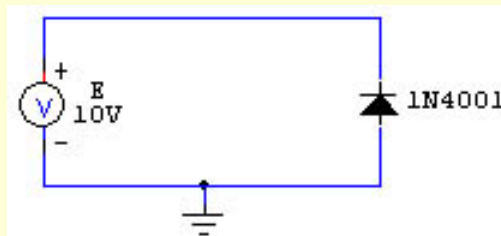
- La caratteristica
- Rilevare la caratteristica del diodo
- Il diodo in formule
- La retta di carico
- Modelli approssimati
- Un metodo di analisi
- Applicazioni
 - Raddrizzatore a singola semionda
 - Raddrizzatore a doppia semionda
 - Filtro capacitivo
- Diodo Zener
- Diodo LED

La caratteristica (1)

- Il diodo è derivato come diretta applicazione di una giunzione PN
- Esso è un componente non lineare, infatti ha un diverso comportamento a seconda della polarizzazione

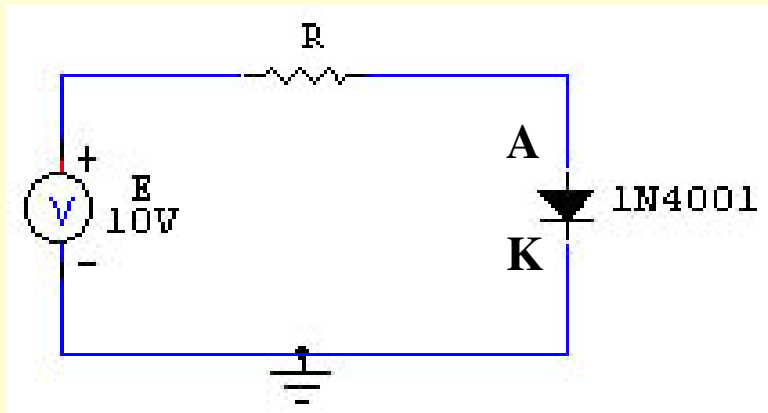


Polarizzazione diretta ($V_{AK} > 0$)



Polarizzazione inversa ($V_{AK} < 0$)

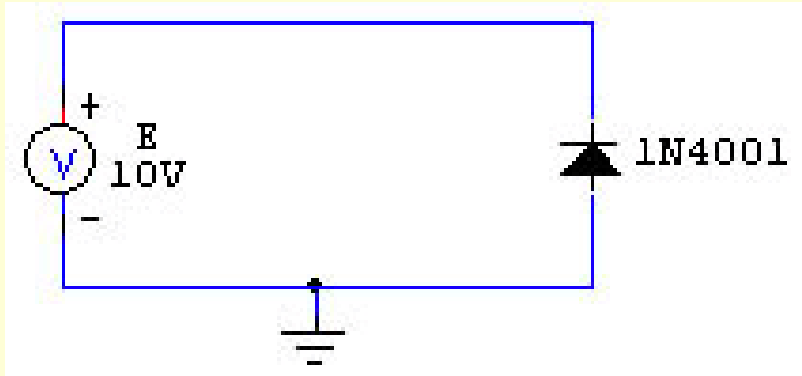
La caratteristica (2)



Per **polarizzarlo direttamente** si deve applicare una tensione tale che **l'anodo sia positivo rispetto al catodo**. Inoltre tale tensione deve essere superiore alla **tensione di soglia** del diodo.

- se $V_{AK} > V_{\gamma}$ allora il **diodo conduce** e nel circuito fluirà una corrente significativa dall'anodo al catodo
- allo scopo di limitare tale corrente viene inserito un resistore (**R**) di opportuno valore
- V_{γ} è la tensione di soglia e, per un **diodo al silicio**, vale circa **0,65V** a temperatura ambiente (25°C)

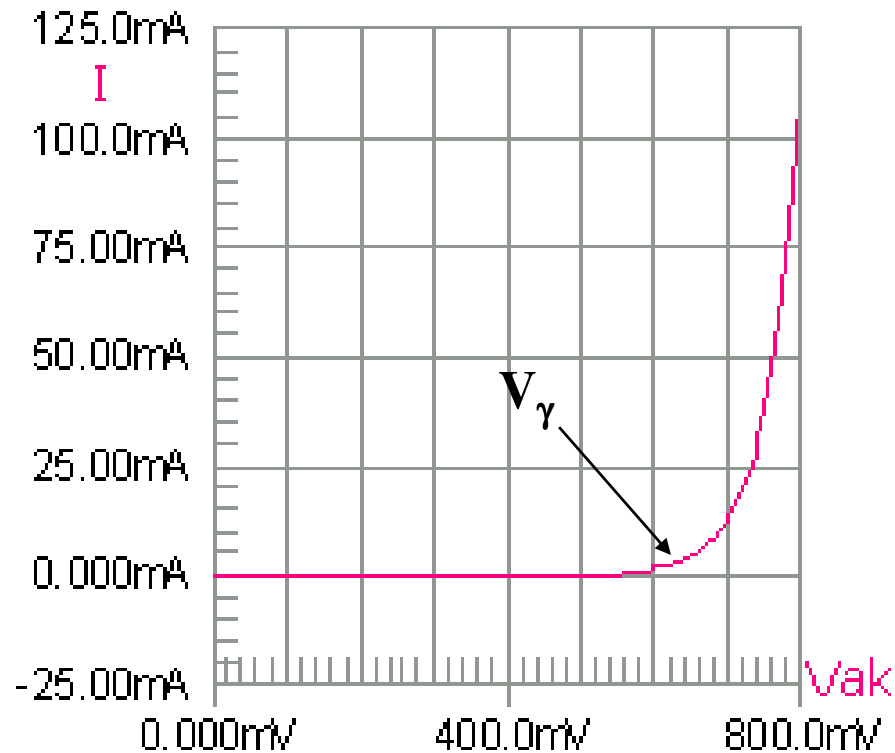
La caratteristica (3)



Per **polarizzarlo inversamente** si deve applicare una tensione tale che **l'anodo sia negativo rispetto al catodo**. Ovvero una tensione inferiore alla **tensione di soglia** del diodo.

- se $V_{AK} < V_{\gamma}$ allora si ha un **incremento della barriera di potenziale** alla giunzione ed è possibile la conduzione per soli **portatori minoritari**. Si dice che il **diodo non conduce**.
- in realtà scorre una **piccola corrente** (qualche μA) detta di **saturazione inversa I_0** . Tale corrente cresce con la temperatura.
- aumentando sempre più la tensione applicata si può giungere ad un valore detto di **break – down (BV)** alla quale la giunzione si perfora.

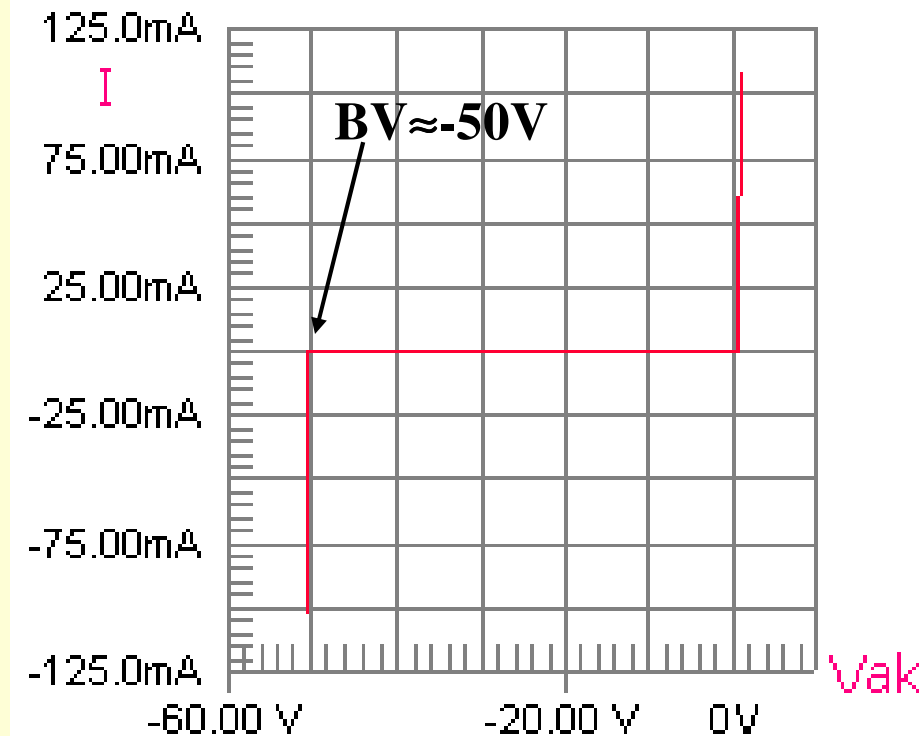
La caratteristica (4)



Ecco come appare la caratteristica del diodo in **polarizzazione diretta**:

- *prima della tensione di soglia praticamente non conduce*
- *superata la soglia si ha un rapido aumento della corrente limitato dalla sola resistenza posta in serie al diodo*
- *appare evidente il comportamento non lineare*

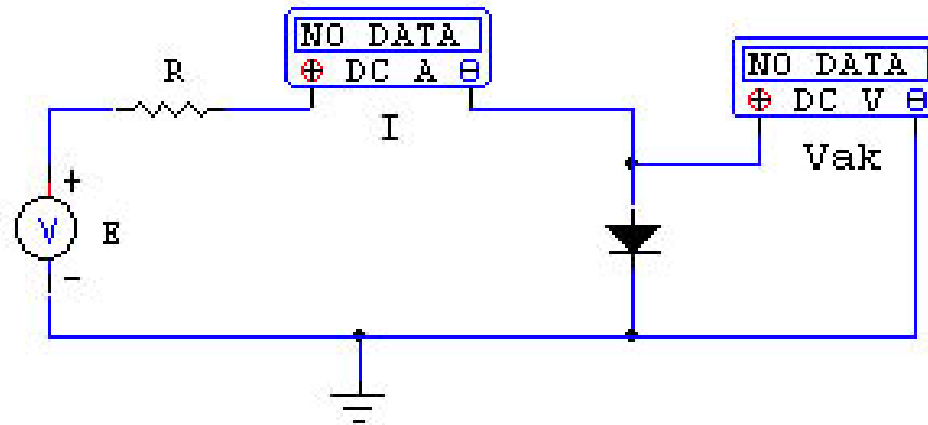
La caratteristica (5)



Ecco come appare la **caratteristica completa del diodo**:

- *si osservi il caso della polarizzazione inversa dove in pratica non c'è conduzione*
- *si osservi anche il fatto che al superamento della tensione di break – down il diodo va in forte conduzione inversa rischiando la rottura della giunzione*

Rilevare la caratteristica del diodo (1)



- La **caratteristica** I/V_{ak} del diodo si può ricavare per punti.
- Attribuendo un valore ad E , la corrente I che attraversa il diodo e la tensione V_{ak} che si stabilisce ai suoi capi individuano il primo punto della caratteristica nel piano I/V_{ak} .
- Gli altri punti della caratteristica vengono ricavati facendo variare E .

Il diodo in formule (1)

Si può dimostrare che l'equazione della caratteristica del diodo è:

$$I_D(V_D) = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

dove:

- I_0 è la corrente di saturazione inversa,
- V_D è la tensione anodo – catodo del diodo,
- V_T è l'equivalente in tensione della temperatura.

Il diodo in formule (2)

Il parametro V_T (equivalente in tensione della temperatura) può essere calcolato con la seguente espressione:

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

dove:

- **K è la costante di Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ j/K),**
- **T è la temperatura espressa in Kelvin,**
- **q è la carica dell'elettrone ($1,6 * 10^{-19}$ C).**

A temperatura ambiente si ha $V_T \approx 26\text{mV}$

Il diodo in formule (3)

Alcuni parametri del diodo variano con la temperatura. Ad esempio V_γ vale 0,65V a 25°C, ma *diminuisce di 25mV ogni 10°C di aumento*. Ovvero:

$$V_\gamma(T) = V_\gamma(25^\circ\text{C}) - 2.5 \cdot 10^{-3} (T - 25)$$

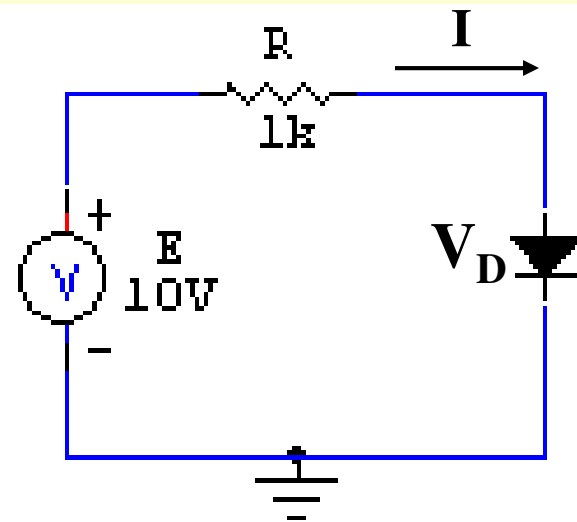
Invece la corrente di saturazione inversa I_0 raddoppia ogni 10°C di aumento della temperatura:

$$I_0(T_f) = I_0(T_i) \cdot 2^{\frac{T_f - T_i}{10}}$$

La retta di carico (1)

Il diodo è un componente **non lineare** e per esso **non vale la legge di Ohm**. Quindi per risolvere un circuito con un diodo è necessario ricorrere ad un **metodo grafico** con l'uso delle sue **caratteristiche** e della **retta di carico**.

Consideriamo il circuito indicato e supponiamo di conoscere la caratteristica grafica del diodo in esame ...



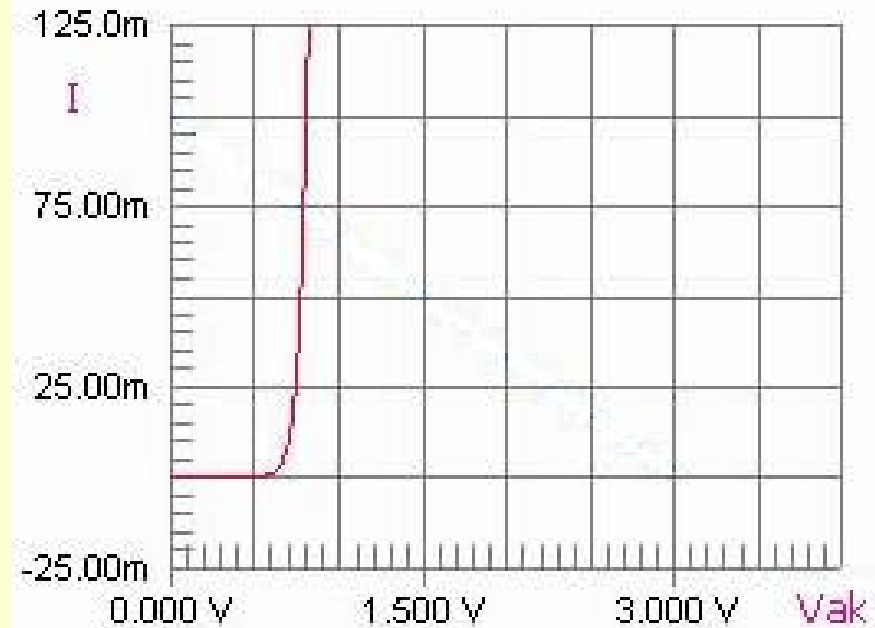
La retta di carico (2)

... dal circuito possiamo scrivere l'equazione alla maglia:

$$E - V_D = R \cdot I$$

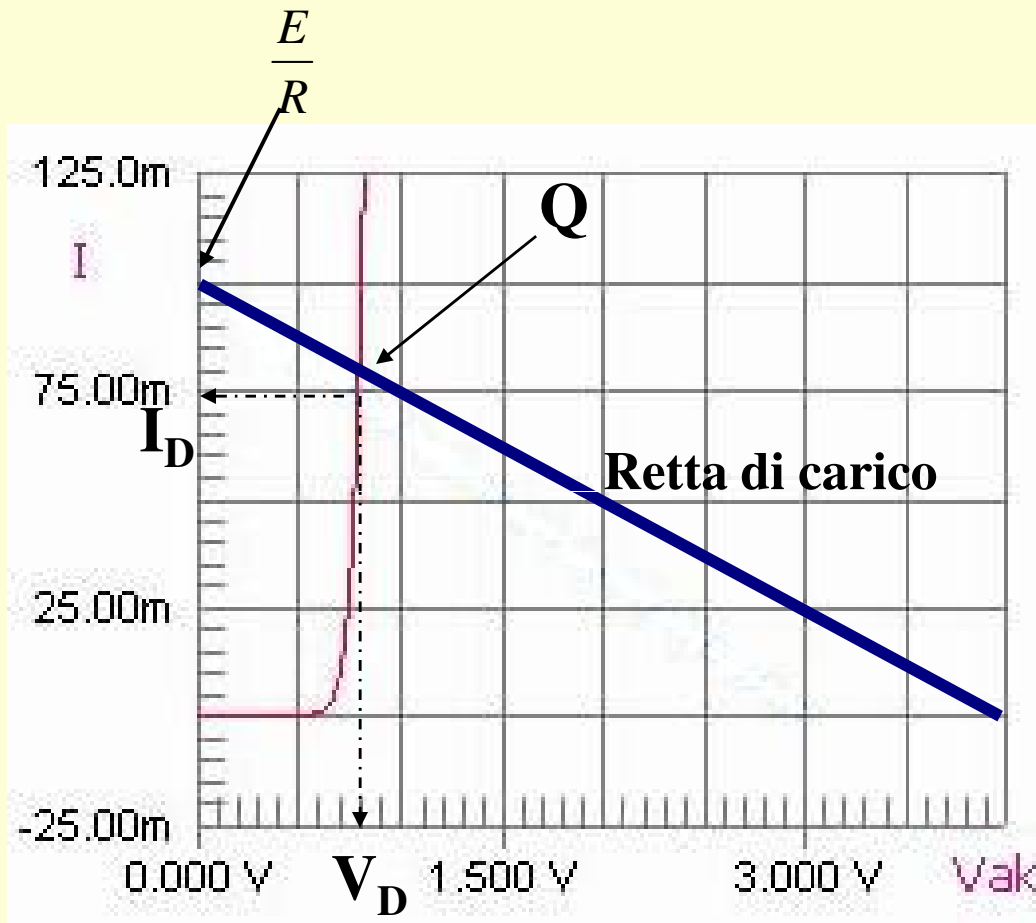
Questa è l'equazione della retta di carico, ovvero una retta nel piano I/V. Tracciando questa retta la andremo ad intersecare con la caratteristica. Ecco i punti di intersezione:

$$(V_D = 0; I = \frac{E}{R}) \quad \text{e} \quad (V_D = E; I = 0)$$



La caratteristica

La retta di carico (3)



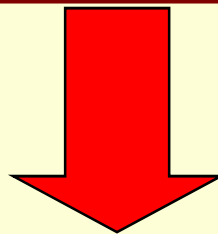
Si tracciano le intersezioni sugli assi e si congiungono. La retta di carico così disegnata interseca la caratteristica nel punto di lavoro Q del diodo.

Proiettando Q sugli assi si ha la tensione V_D e la corrente I_D a cui sta lavorando il diodo.

Modelli approssimati (1)

Come si è potuto osservare:

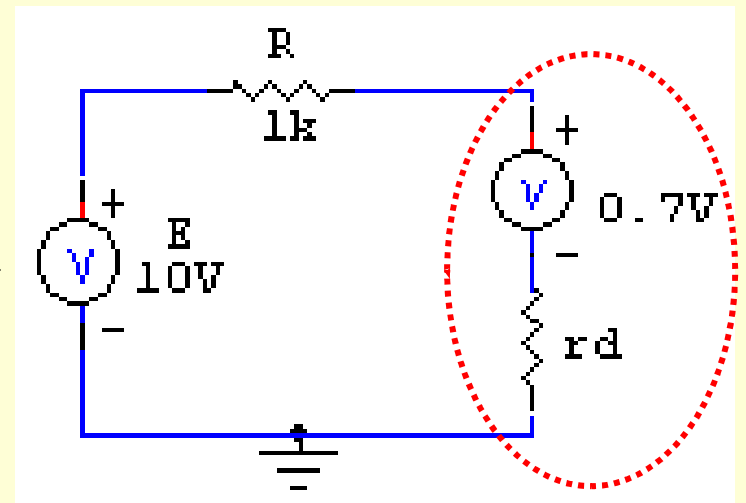
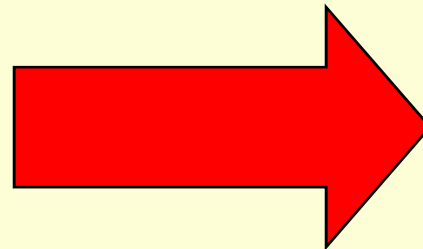
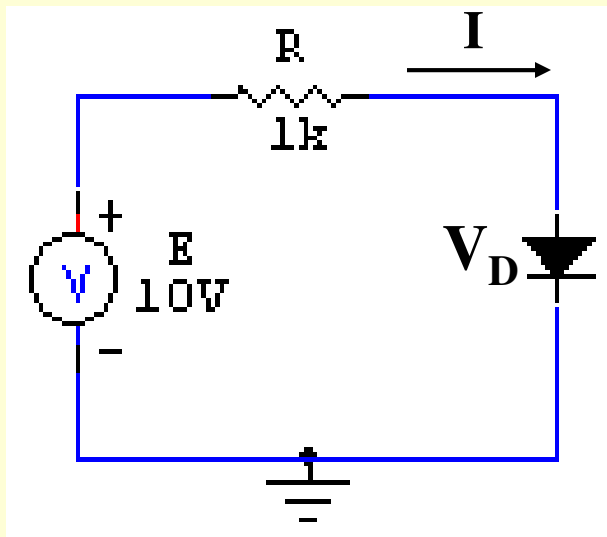
- il diodo **non** è un componente lineare
- la sua caratteristica è essenzialmente una curva **esponenziale molto ripida**, *in zona di conduzione*, mentre è un **circuito aperto**, rimanendo al di sotto di BV , *in polarizzazione inversa*
- **non è possibile applicare la legge di Ohm**



Allora, ... se non vogliamo usare il metodo grafico è bene considerare dei **circuiti equivalenti (*lineari*)** del diodo ...

Modelli approssimati (2)

Primo modello: *approssimo il diodo in conduzione come una batteria V_γ con in serie una resistenza r_D ...*

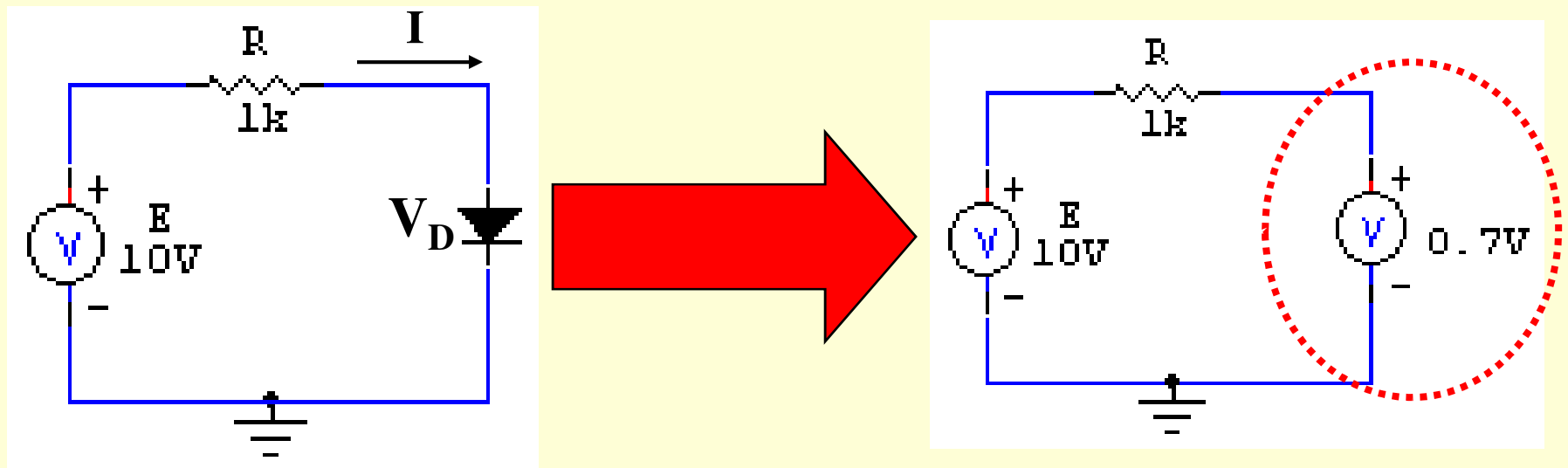


Ora posso scrivere:

$$E - V_\gamma = (R + r_D) \cdot I$$

Modelli approssimati (3)

Secondo modello: *trascuro la resistenza interna del diodo, in pratico ipotizzo che V_γ non vari con la corrente ...*

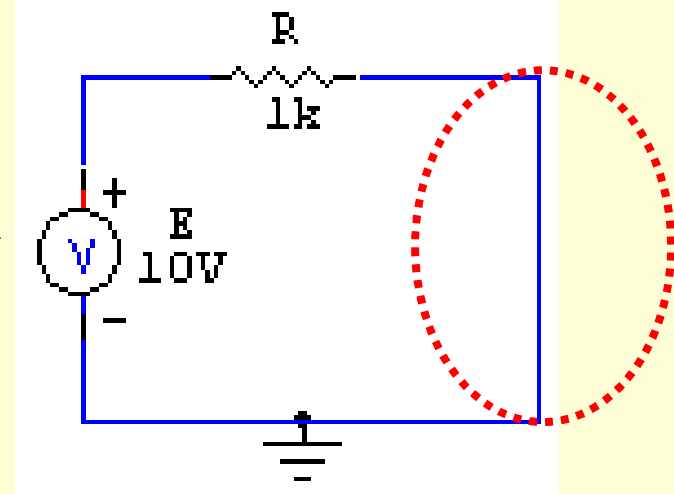
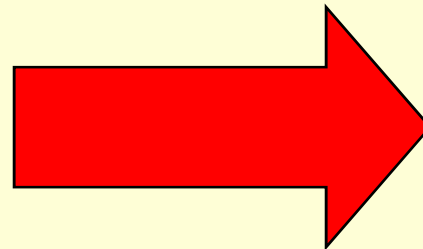
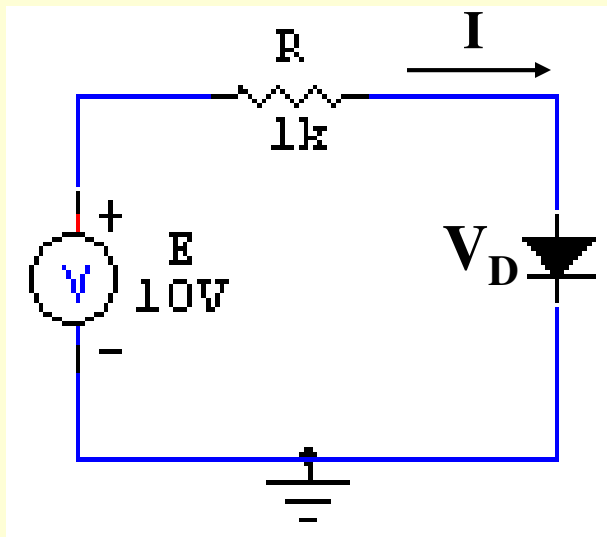


Ora posso scrivere:

$$E - V_\gamma = R \cdot I$$

Modelli approssimati (4)

Terzo modello: *se E è sufficientemente grande posso addirittura trascurare la tensione di soglia ...*



Ora posso scrivere:

$$E = R \cdot I$$

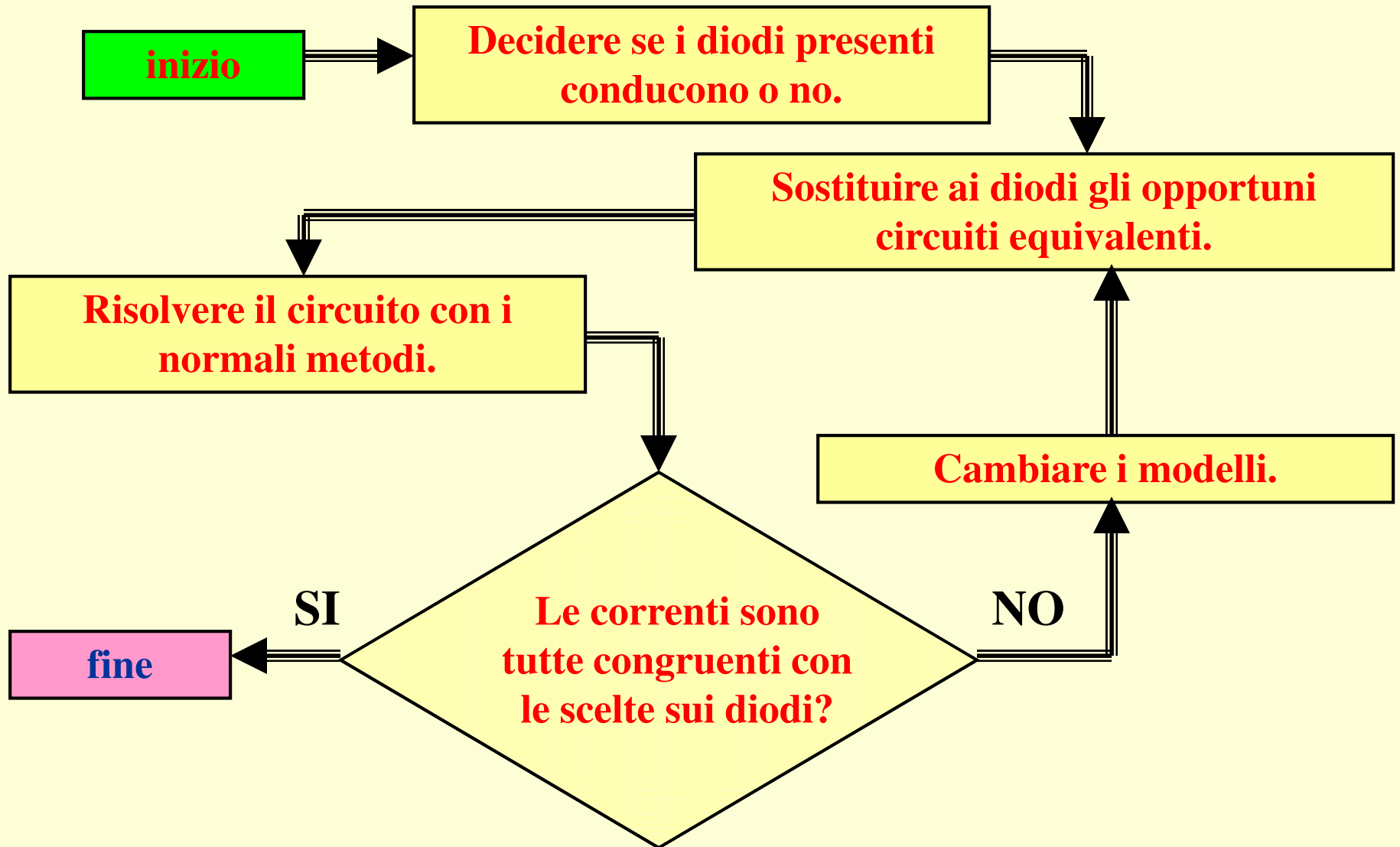


Modelli approssimati (5)

Tutti questi modelli servono ad approssimare il diodo nel caso di conduzione (polarizzazione diretta). Nel caso di **non conduzione, ovvero in **polarizzazione inversa**, *purché non si superi il valore di BV* , il circuito equivalente è un circuito aperto.**

Vediamo quindi come può essere formalizzato un metodo di analisi di circuiti con diodi ...

Un metodo di analisi (1)



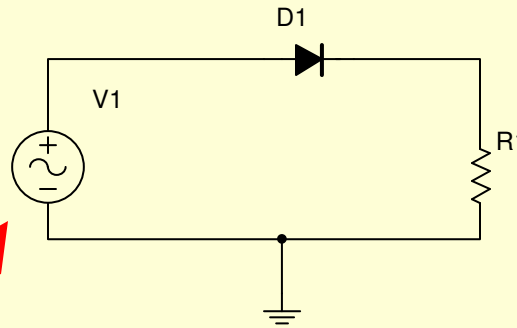
Applicazioni: raddrizzatore a singola semionda (1)

I raddrizzatori sono dei circuiti che **convertono una tensione bipolare in una unipolare**, quindi a **valor medio** sicuramente **diverso da zero**; molto spesso la tensione che viene raddrizzata è quella di rete ($f=50\text{Hz}$). I raddrizzatori si suddividono in raddrizzatori a **singola semionda**, in cui *la corrente scorre solo per mezzo periodo*, e raddrizzatori a **doppia semionda**, in cui *la corrente scorre per tutto il periodo del segnale di ingresso*, ovviamente sempre nello stesso verso.

Il raddrizzatore a singola semionda è costituito semplicemente da un **diodo e da un carico resistivo**; spesso è preceduto da un trasformatore riduttore;

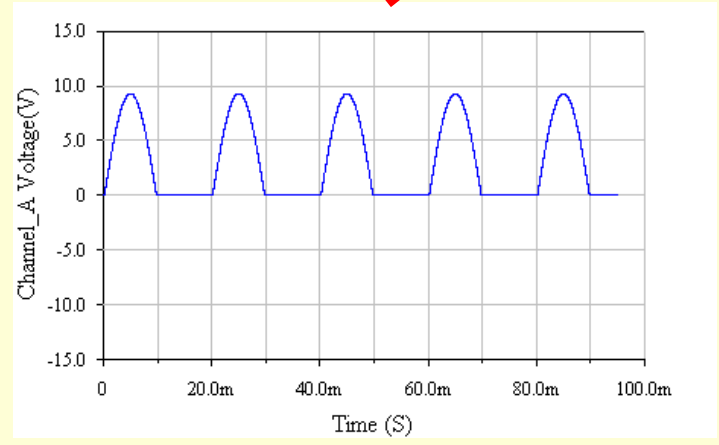
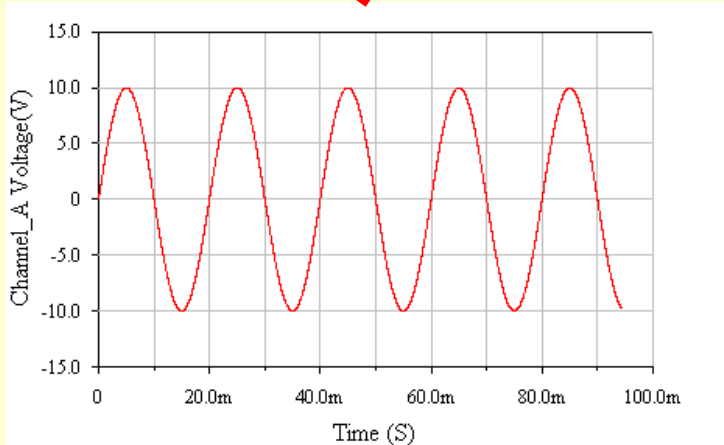
Per l'analisi circuitale del raddrizzatore utilizzeremo il modello del diodo ideale con la sola tensione di soglia.

Applicazioni: raddrizzatore a singola semionda (2)

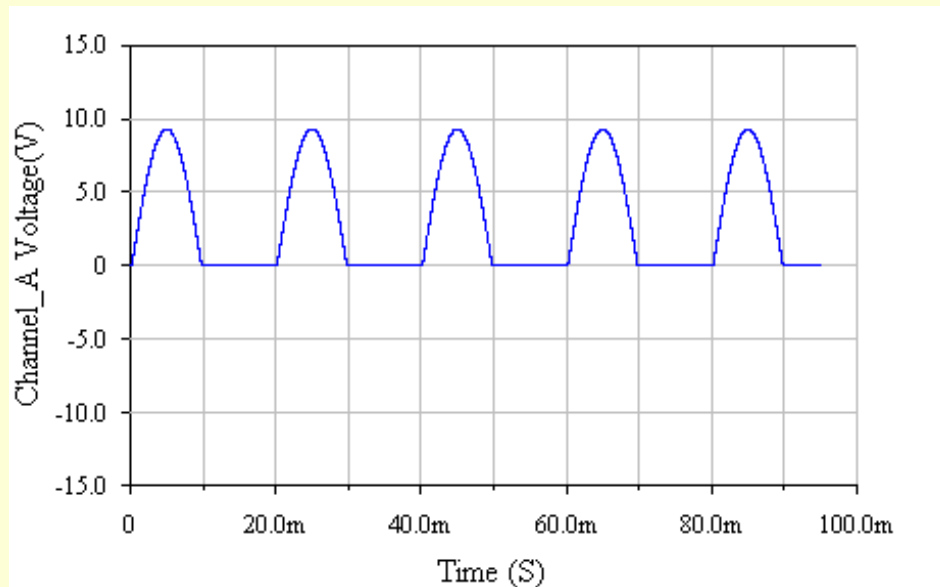


Ecco la tensione entrante di ampiezza V_M a 50Hz

Ecco la tensione sul carico. Sono le sole semionde positive e di ampiezza $V_M - V_\gamma$.



Applicazioni: raddrizzatore a singola semionda (3)



È evidente che la tensione in uscita è unipolare (sono presenti le sole semionde positive) e il diodo conduce per mezzo periodo.

Se V_M è il picco in ingresso il valore medio in uscita sarà:

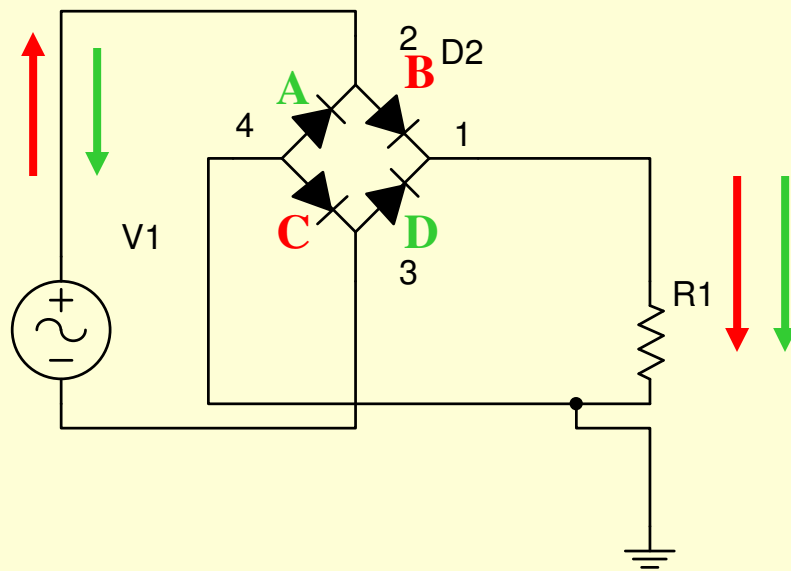
Si osservi anche che durante la **non conduzione del diodo** (semionda negativa) dovrà essere rispettata la condizione $BV > V_M$.

$$V_m = \frac{V_M}{\pi}$$

Applicazioni: raddrizzatore a doppia semionda (1)

Il raddrizzatore a doppia semionda utilizza una particolare configurazione di **quattro diodi** detta **ponte di Graetz**.

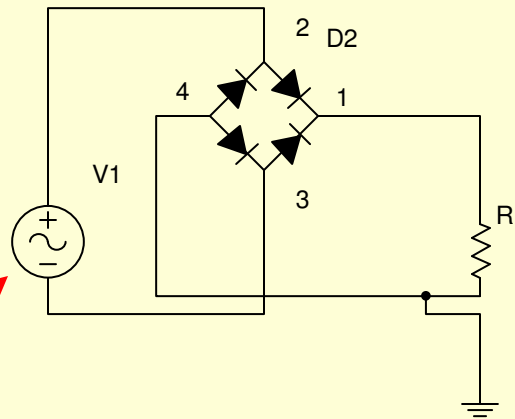
Per l'analisi circuitale del raddrizzatore utilizzeremo il modello del diodo ideale con la sola tensione di soglia.



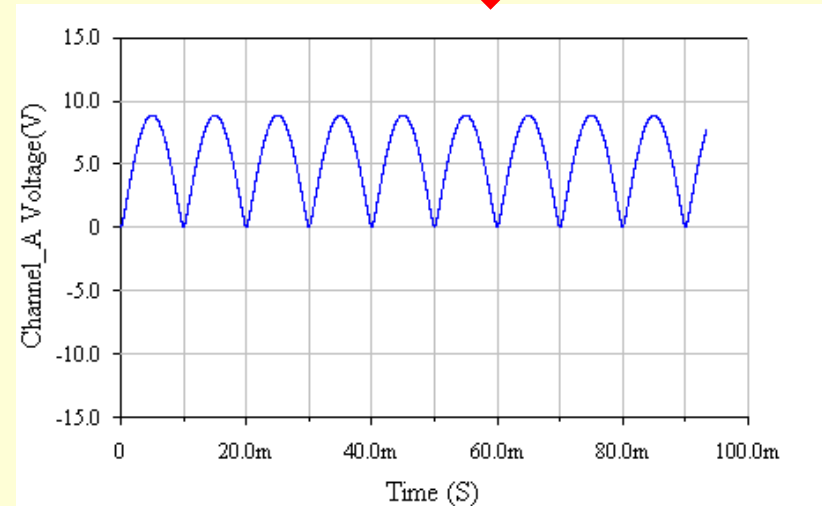
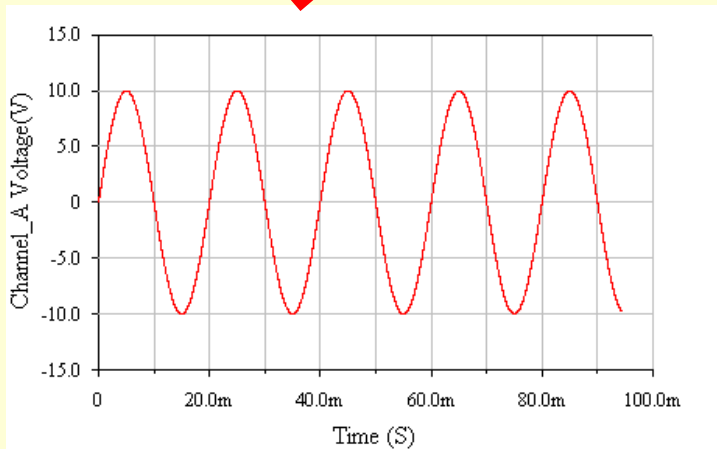
In tale configurazione i diodi **B** e **C** conducono durante la **semionda positiva** (**freccia rossa**), i diodi **A** e **D** durante quella **negativa** (**freccia verde**). **Ma la corrente nel carico passerà sempre con lo stesso verso; *sul carico si hanno entrambe le semionde positive.***

Applicazioni: raddrizzatore a doppia semionda (2)

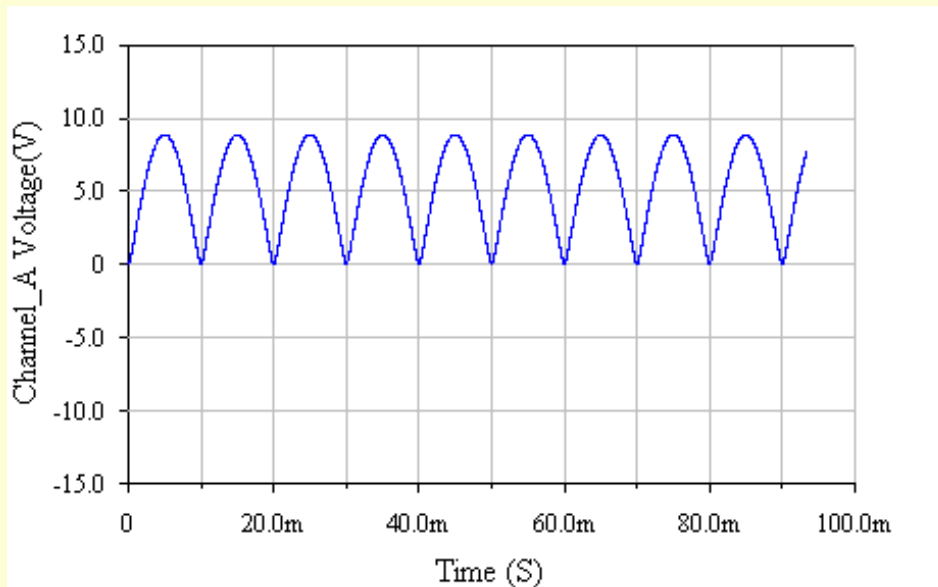
Ecco la tensione entrante di ampiezza V_M a 50Hz



Ecco la tensione sul carico. Sono entrambe le semionde e di ampiezza $V_M - V_\gamma$. Ora la frequenza è 100Hz.



Applicazioni: raddrizzatore a doppia semionda (3)



È evidente che la tensione in uscita è unipolare con entrambe le semionde. Ora i diodi conducono alternativamente a coppie.

Se V_M è il picco in ingresso il valore medio in uscita sarà:

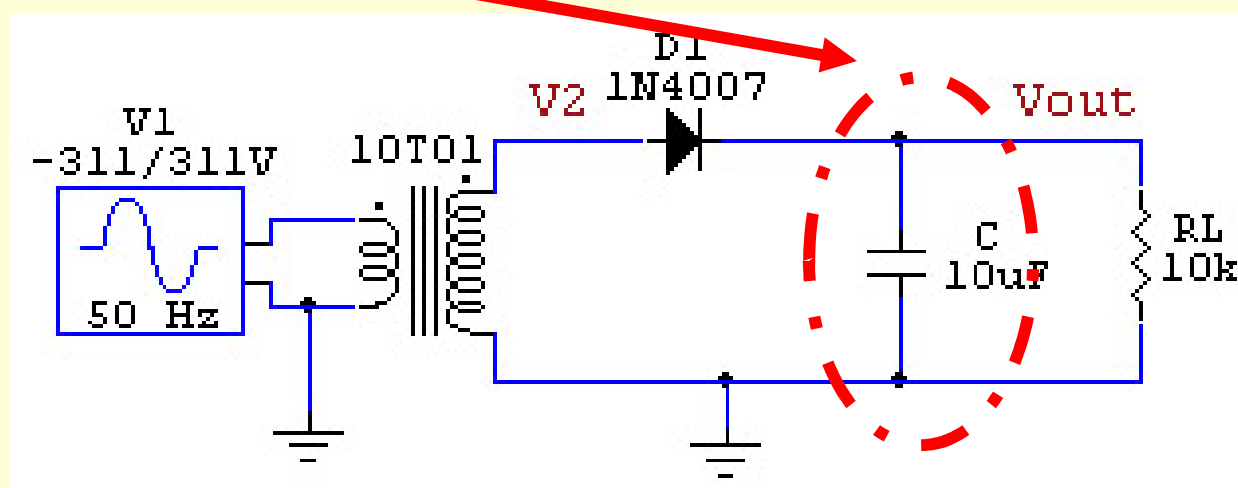
Si osservi anche che durante la non conduzione di una coppia di diodi dovrà essere rispettata la condizione $BV > V_M/2$ (conducono coppie di diodi).

$$V_m = 2 \frac{V_M}{\pi}$$

Applicazioni: il filtro capacitivo (1)

La tensione uscente dai raddrizzatori è, sì, unipolare **ma non è continua**; per livellarla ulteriormente occorre mettere in parallelo al carico un **condensatore** che, come sappiamo, tende a mantenere costante la tensione ai suoi capi.

Il circuito così ottenuto prende il nome di raddrizzatore con filtro capacitivo.

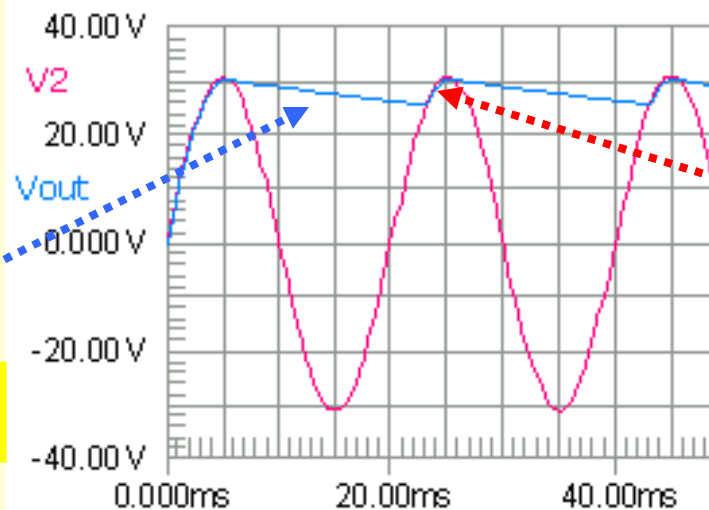


Applicazioni: il filtro capacitivo (2)

Dalle forme d'onda, **nel primo quarto di periodo C si carica velocemente al picco di V_2** (*tensione sul secondario*); subito dopo il diodo si interdice perché il potenziale all'anodo scende al di sotto di quello al catodo; nel periodo successivo, in prossimità del picco positivo, il potenziale all'anodo supera di nuovo quello al catodo, **il diodo rientra in conduzione per un breve intervallo di tempo e ricarica il condensatore**.

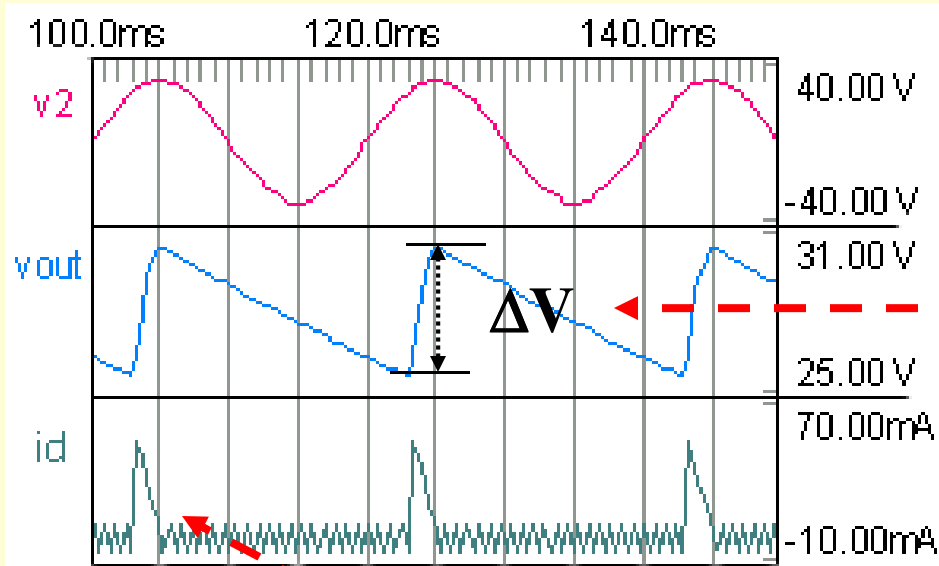
Il diodo è, perciò, interessato da una corrente caratterizzata da **impulsi stretti di corrente**, in prossimità dei picchi positivi di V_2 .

Diodo OFF



Diodo ON

Applicazioni: il filtro capacitivo (3)



La tensione sul carico è certamente più livellata e manifesta una **ondulazione residua** (*carica e scarica di C*), **quasi triangolare**, di ampiezza ΔV intorno ad un valore medio V_m .

NOTA: ora il diodo deve sopportare una $BV > 2V_M$ perché c'è il condensatore carico!

Ecco i picchi di corrente che passano nel diodo durante la breve fase di ricarica del condensatore. **Se il condensatore è troppo grande questi picchi possono distruggere il diodo!**

Applicazioni: il filtro capacitivo (4)

La quantità di carica Q_P persa deve essere pari a quella Q_A acquistata. Sapendo che:

$$Q_P = I \cdot T$$

essendo I la *corrente nel carico* e T la *durata della scarica* che coincide in pratica con il *periodo della sinusoide*. Mentre per la carica:

$$Q_A = C \cdot \Delta V$$

Pertanto, eguagliando le due, si giunge alle seguenti espressioni per il condensatore:

$$C = \frac{I \cdot T}{\Delta V} = \frac{I}{f \cdot \Delta V} = \frac{V_m}{f \cdot R \cdot \Delta V}$$

Applicazioni: il filtro capacitivo (5)

Spesso l'ondulazione residua viene espressa mediante un particolare parametro detto **fattore di ripple**:

$$r = \frac{\Delta V_{eff}}{V_m} = \frac{\Delta V}{2\sqrt{3}V_m}$$

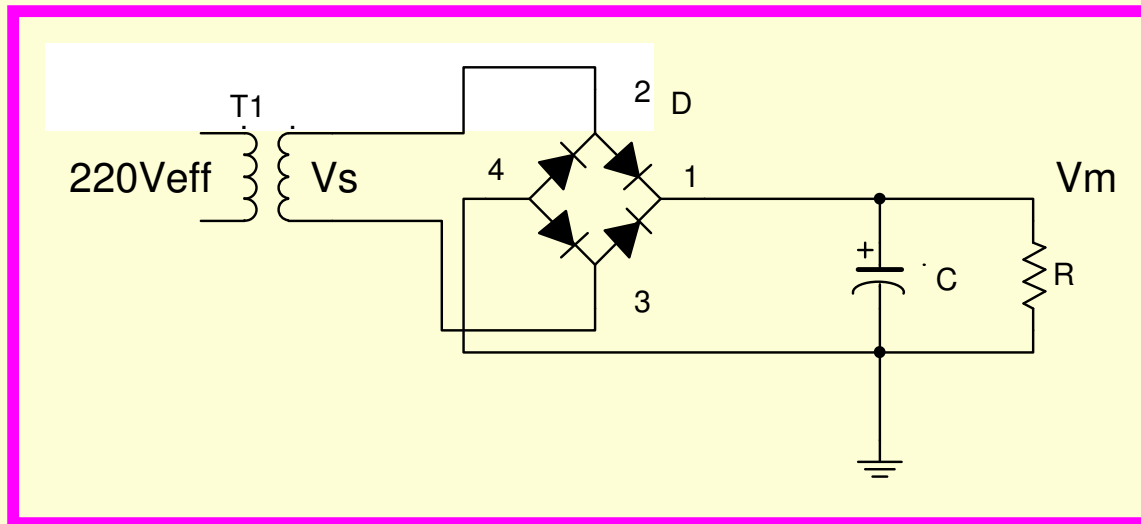
(talvolta espresso anche in percentuale – typ: <10%). Si osservi che per il calcolo del valore efficace della ondulazione si deve tenere presente che essa è quasi triangolare.

Sostituendo tale espressione nella formula del condensatore si ha:

$$C = \frac{V_m}{f \cdot R \cdot 2\sqrt{3}rV_m} = \frac{1}{2\sqrt{3}rfR}$$

NOTA: se si usa la doppia semionda nelle formule di C sostituire **f** con **2f**; si potrà usare un condensatore di metà valore a parità di ripple.

Applicazioni: il filtro capacitivo (6)



Progettiamo un alimentatore per $V_m=12V$ e $I_L=1A$.
Supponiamo accettabile un **ripple** $r=10\%$

In base ai dati forniti:

$$R = \frac{V_m}{I_L} = \frac{12}{1} = 12\Omega \text{ e quindi } C = \frac{1}{4\sqrt{3}frR} = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 12} \cong 2400\mu F$$

Per la tensione massima sul condensatore:

$$\Delta V = 2\sqrt{3}rV_m = 2\sqrt{3} \cdot 0,1 \cdot 12 \cong 4,16V \text{ e quindi } V_M = V_m + \frac{\Delta V}{2} \cong 14,08V$$

Applicazioni: il filtro capacitivo (7)

Per V_s , considerando che conducono due diodi alla volta e considerando una perdita del trasformatore intorno al 10%, si ha:

$$V_s = \frac{V_M + 2V_\gamma}{0,9} = \frac{14,08 + 2 \cdot 0,65}{0,9} \cong 17V \text{ e poi } V_{seff} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} \cong 12V_{eff}$$

Per la corrente sul secondario si può usare la formula empirica:

$$I_{seff} \cong 1,8 \cdot I_L = 1,8A$$

ed avere $P_T = V_{seff} I_{seff} = 12 \cdot 1,8 = 21,6VA$

Si osservi anche che per i diodi è necessario che sia $BV > V_M = 14,08V$ (ne conducono due alla volta).



Diodo Zener (1)

Osservando attentamente la caratteristica di un diodo è evidente che se esso potesse lavorare, *senza distruggersi*, nella regione di break – down presenterebbe la rilevante **capacità di mantenere pressoché stabile la tensione ai suoi capi per notevoli escursioni della corrente circolante.**

Si otterrebbe uno stabilizzatore di tensione!

Un tale componente esiste ed è il **diodo Zener**.

Il diodo Zener si comporta come un normale diodo in polarizzazione diretta, **ma in polarizzazione inversa può sostenere, entro certi limiti, la circolazione di corrente**; esso è prodotto per diversi valori di **BV** che ora assume il nome di **tensione di Zener V_Z** .

Il fenomeno fisico che sta alla base di tale comportamento è molto complesso. Diciamo che può essere così sintetizzato ...

Diodo Zener (2)

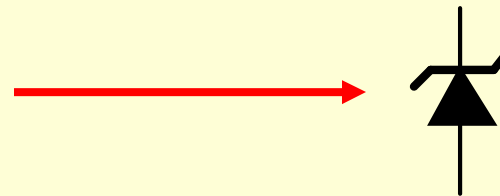
... lo Zener è un diodo realizzato con un **alta percentuale** di materiale drogante sia nella zona P che nella zona N (10^{18} atomi/cm³).

Ora per $V_Z < 6V$ si verifica un particolare fenomeno di “**tunneling**” detto **effetto Zener**; tale fenomeno porta il diodo a condurre in polarizzazione inversa senza effetti distruttivi.

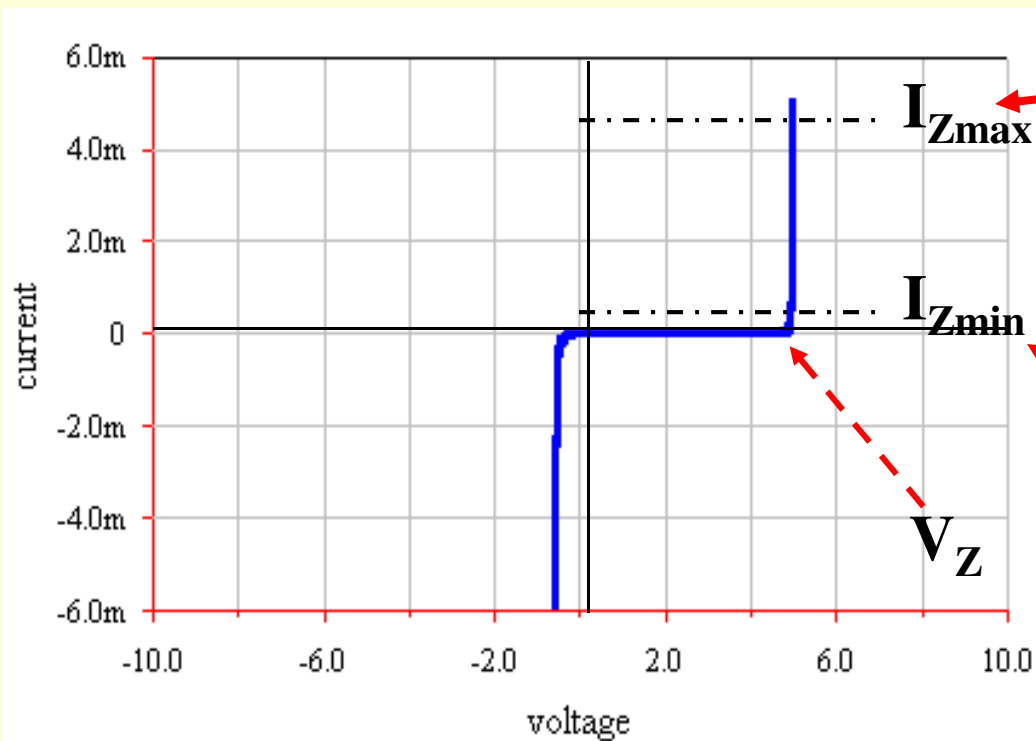
Per Zener realizzati per $V_Z > 6V$ il fenomeno predominante è quello dell’effetto “**valanga**”, comunque l’effetto stabilizzatore della tensione è lo stesso.

In tutti i casi si parla di diodo Zener e lo stesso viene caratterizzato da un preciso valore di V_Z .

Il simbolo del diodo Zener



Diodo Zener (3)



Massima corrente
inversa sostenibile

Minima corrente per
entrare in conduzione
inversa

La caratteristica (inversa)

Lo Zener è quindi
caratterizzato da una V_Z e
da una potenza massima

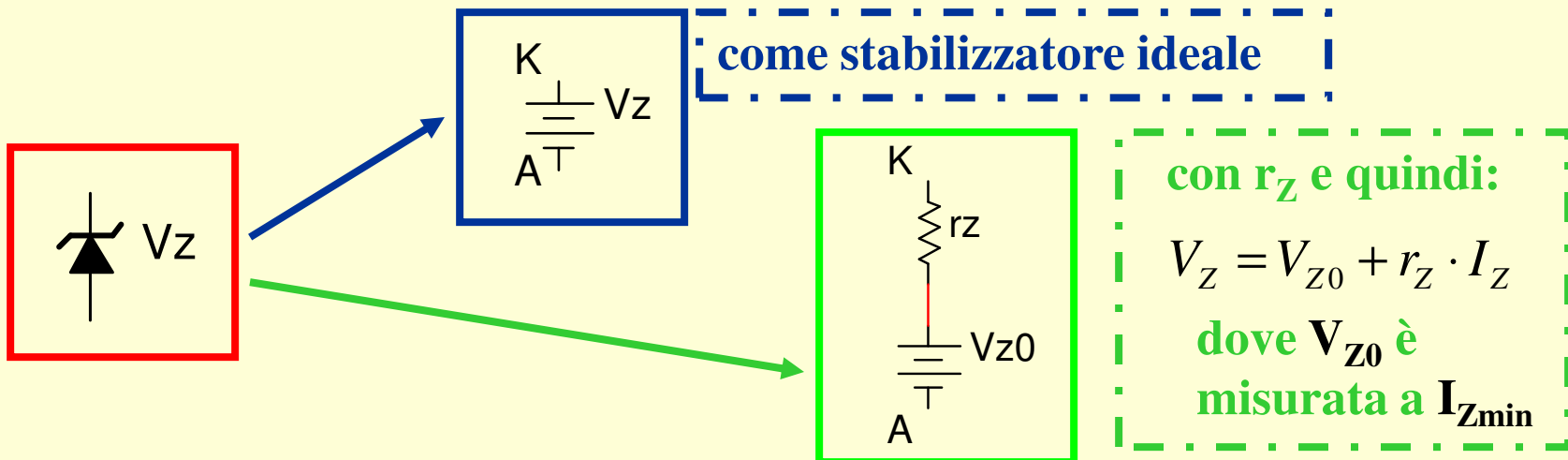
$$P_Z = V_Z \cdot I_{Zmax}$$

Diodo Zener (4)

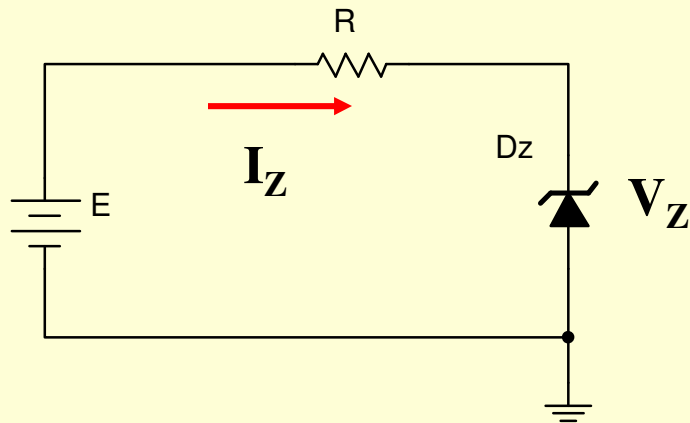
È evidente che per un sicuro funzionamento da stabilizzatore è bene polarizzare lo Zener in corrispondenza della zona centrale della sua caratteristica inversa, cioè per

$$I_{Zq} = \frac{I_{Z\max} - I_{Z\min}}{2} \cong \frac{I_{Z\max}}{2}$$

Per l'analisi circuitale è possibile ricorrere ad uno dei seguenti circuiti equivalenti



Diodo Zener (5)



Si polarizzi uno **Zener** da **5V** con **$P_Z=500\text{mW}$** . È bene che la batteria **E** rispetti la condizione **$E \geq 2V_Z$** .

Quindi si ha:

$$I_{Z\max} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0,5\text{W}}{5\text{V}} = 0,1\text{A} \text{ con } I_{Zq} = \frac{I_{Z\max}}{2} = 0,05\text{A}$$

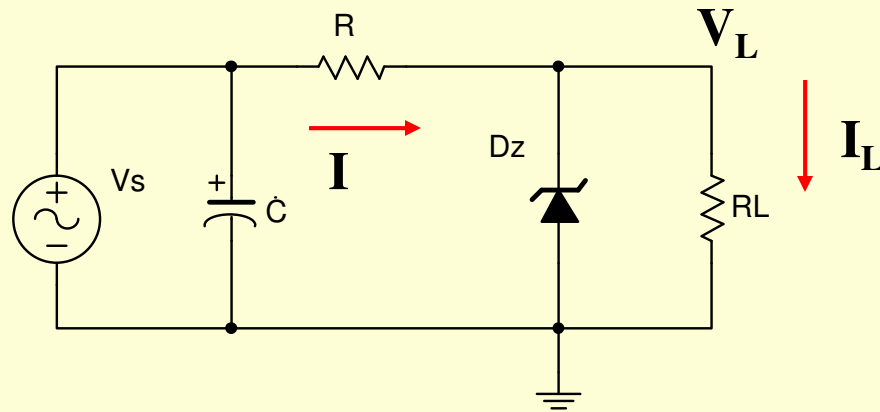
e per la resistenza di polarizzazione:

$$R = \frac{E - V_Z}{I_{Zq}} = \frac{10 - 5}{0,05} = 100\Omega$$

È bene calcolare anche la potenza dissipata da R:

$$P_R = R \cdot I_{Zq}^2 = 100 \cdot (0,05)^2 = 0,25\text{W}$$

Diodo Zener (6)



Proviamo a dimensionare un semplice **alimentatore stabilizzato** per $V_L=12V$ e $I_L=1A$.

Ovviamente $V_Z=V_L=12V$ e $I_{Zq}=0,5I_L=0,5A$. Quindi $P_Z=V_ZI_{Zmax}=V_ZI_L=12W$.

Poi si ha $I=I_L+I_{Zq}=1+0,5=1,5A$ e per R (scegliendo $V_m=2V_Z=24V$):

$$R = \frac{V_m - V_Z}{I} = \frac{24 - 12}{1,5} = 8\Omega \quad \text{e} \quad P_R = R \cdot I^2 = 8 \cdot (1,5)^2 = 18W$$

Scegliendo $r=10\%$ e calcolando $R_{EQ} = \frac{V_m}{I} = \frac{24}{1,5} = 16\Omega$ si ha:

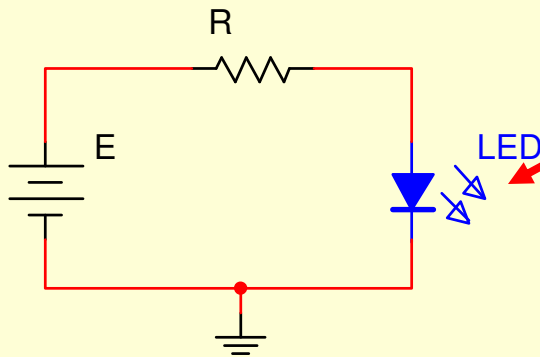
$$\Delta V = 2\sqrt{3}rV_m = 8,31V \quad \text{e} \quad C = \frac{1}{4\sqrt{3}rR_{EQ}f} = 1800\mu F \quad \text{con} \quad V_{Smax} = V_m + \frac{\Delta V}{2} = 28,16V$$

Diodo LED (1)

Come è ormai noto una giunzione PN, se polarizzata direttamente, conduce e alla giunzione si verifica una continua **ricombinazione di lacune ed elettroni**. **Tale ricombinazione produce un rilascio di energia sotto forma di calore.**

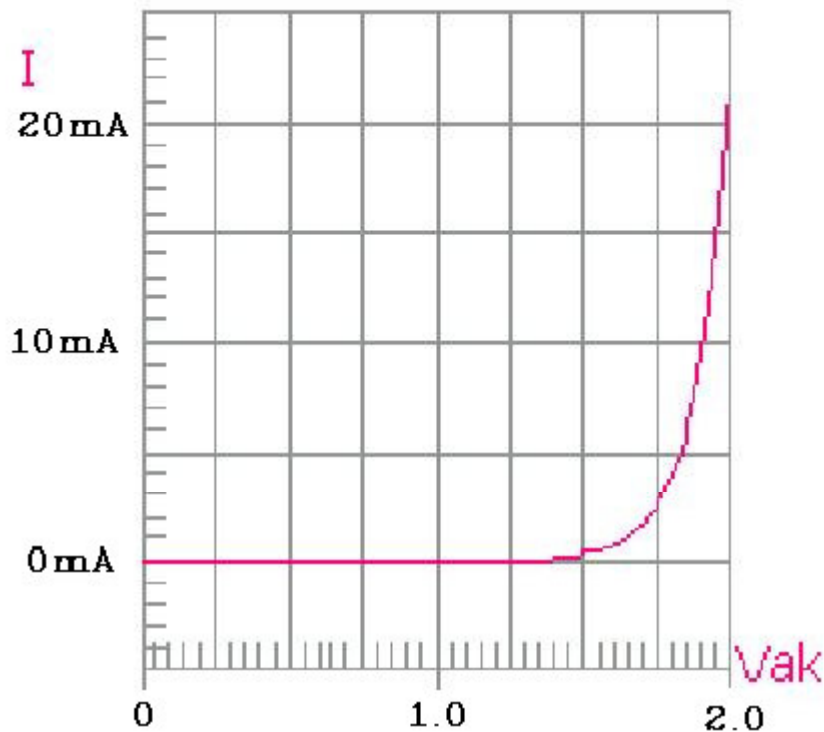
È possibile realizzare delle giunzioni PN con **particolari** tipi di semiconduttori (ad esempio **AsGa – Arseniuro di Gallio**) nei quali **il rilascio energetico avviene nella gamma delle lunghezze d'onda del visibile o dell'infrarosso.**

Si ottiene così il diodo LED (light emitting diode).



Il LED si usa solo in polarizzazione diretta e presenta tensioni di soglia variabili con il colore della radiazione emessa; esso può sostenere solo correnti dirette molto deboli.

Diodo LED (2)

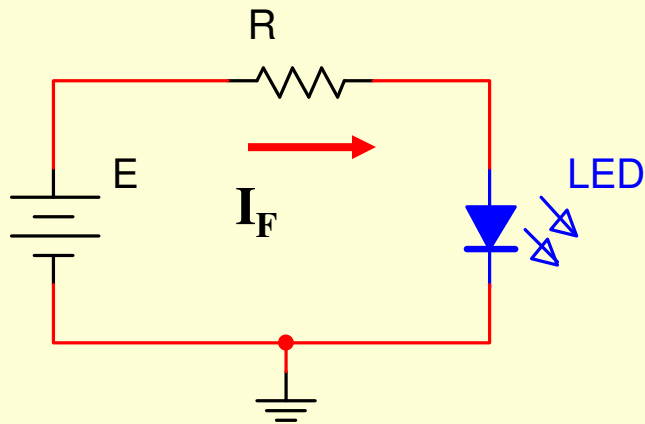


I tipici valori dei più comuni LED. Essi presentano una luminosità di circa $800\mu\text{cd}$ misurata per $I_F=20\text{mA}$.

Ecco la tipica caratteristica di un LED. Esso presenta una V_γ intorno ai 2Volt e le correnti massime che può sostenere sono $<50\text{mA}$, tipicamente lo si fa operare per una corrente diretta $I_F=20\text{mA}$.

LED	V_γ	BV	I_F
Ired	1,1V	3V	20mA
Red	1,6V	3V	20mA
Yellow	2,1V	3V	20mA
Green	2,1V	3V	20mA
Blue	4V	3V	20mA

Diodo LED (3)



Accendiamo un LED!

Vogliamo polarizzare un LED rosso con una batteria da 9V. Quale resistenza di limitazione si deve inserire?

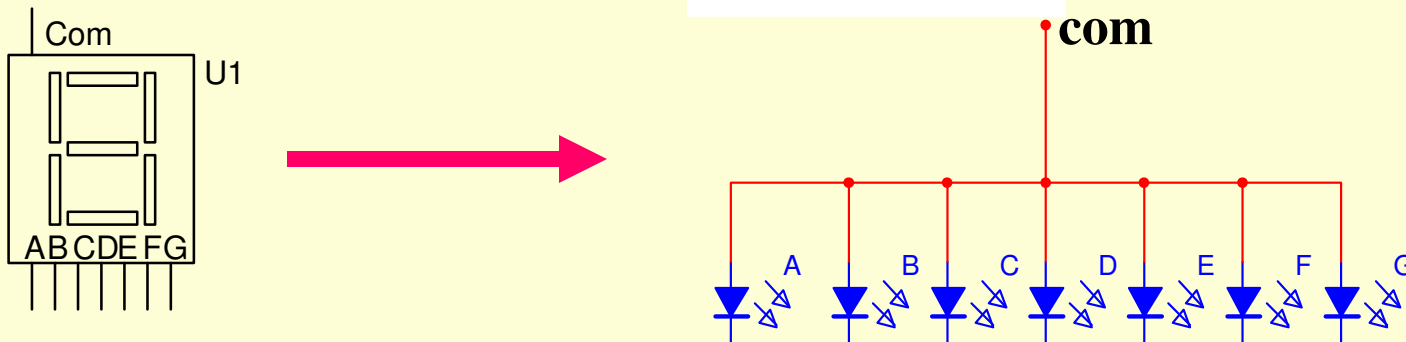
La risposta è semplice. Per il **LED rosso** si ha $V_\gamma=1,6\text{Volt}$ e va polarizzato per $I_F=20\text{mA}$. Quindi ...

$$R = \frac{E - V_\gamma}{I_F} = \frac{9 - 1,6}{20\text{mA}} = 0,37\text{k}\Omega$$

Basterà usare un semplice resistore da 330Ω.

Diodo LED (4)

Una tipica applicazione del diodo LED è il **display a sette segmenti**



NOVITA': oggi sono molto diffusi i **LED Flash**, particolari LED ad elevatissima luminosità. Essi si polarizzano sempre con una $I_F=20\text{mA}$, ma presentano una soglia di circa **3Volt**. La loro caratteristica è di presentare una luminosità **1000** volte maggiore dei normali LED, circa **800mcd**. Sono le lampade del futuro. Sono disponibili nei colori **BLU** e **Bianco**.