

# DIODI

## Generantà

Il diodo è un elemento costituito da due elettrodi, che presenta una resistenza diversa al passaggio della corrente a seconda della polarità della tensione ad essi applicata.

Il diodo viene indicato simbolicamente come in fig. 1



**FIG. 1. - Rappresentazione simbolica di un diodo.**

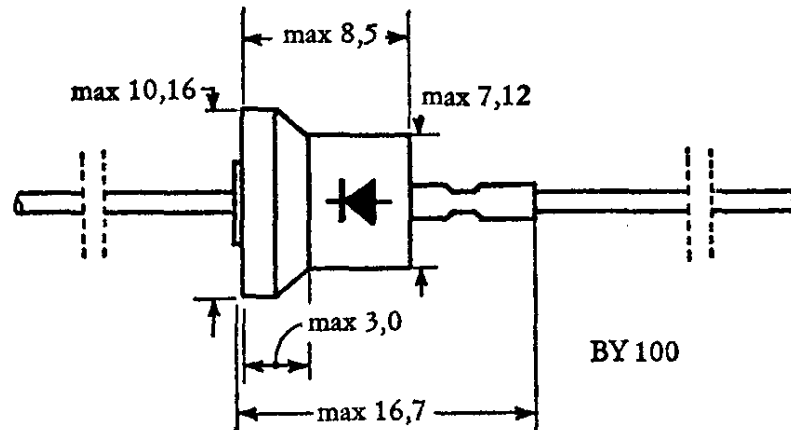
I due elettrodi sono chiamati rispettivamente *anodo* (*A*) e *catodo* (*K*) e sono individuati in base al loro comportamento elettrico: se applicando una differenza di potenziale tra di essi, il diodo presenta una bassa resistenza, l'elettrodo a potenziale maggiore viene chiamato *anodo*; se invece presenta una resistenza molto elevata, l'elettrodo a potenziale maggiore è il *catodo*.

Un diodo ideale è quello che presenta resistenza nulla quando l'anodo è a potenziale maggiore del catodo e infinita nel caso contrario.

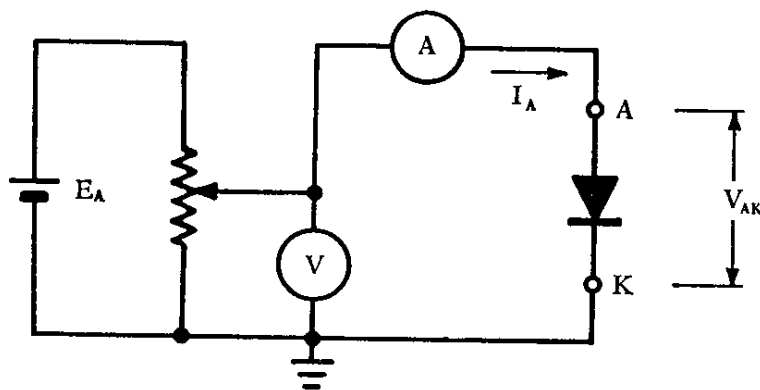
I diodi oggi più diffusi sono quelli a giunzione, che per le loro caratteristiche si avvicinano ai diodi ideali, mentre in passato lo erano quelli a vuoto e, per potenze più elevate quelli a semiconduttore al selenio.

## Diodo a giunzione.

Il diodo a giunzione è costituito da una giunzione  $PN$  di germanio o di silicio. Il cristallo è posto in un involucro di vetro o ceramico o di metallo, a seconda del tipo, da cui escono due reofori collegati internamente alle due parti  $P$  e  $N$  della giunzione rispettivamente.



**FIG. 2. - Diodo a giunzione**



**FIG. 3. - Circuito per il rilievo della caratteristica di un diodo.**

Il diodo a giunzione si presenta normalmente come in fig. 2; l'elettrodo collegato alla parte  $P$  della giunzione costituisce l'anodo e quello collegato alla parte  $N$  il catodo.

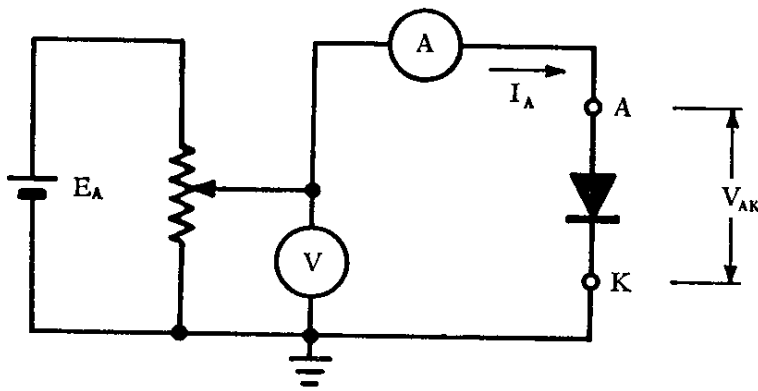
Schematicamente esso viene rappresentato con il simbolo di fig. 3.

Facendo riferimento agli argomenti già trattati, la giunzione viene polarizzata in senso diretto, cioè con l'anodo portato a potenziale positivo rispetto al catodo, si ha passaggio di corrente attraverso il diodo, per effetto delle cariche mobili o *portatori maggioritari*. Quando la giunzione viene invece polarizzata inversamente (anodo a potenziale negativo rispetto al catodo), nel diodo circola una corrente debolissima (pochi  $\mu A$ ), dovuta ai *portatori di minoranza*.

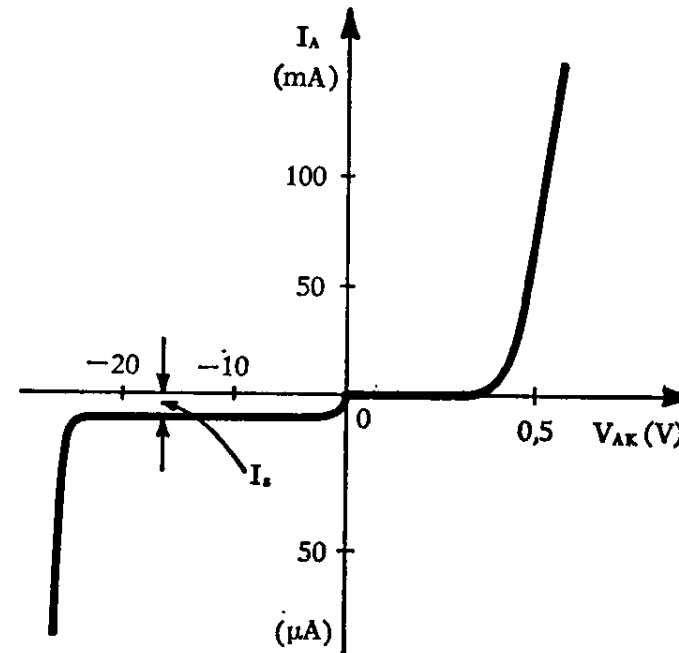
### Caratteristica di un diodo a giunzione.

Se ad un diodo a giunzione viene applicata una differenza di potenziale  $V_{AK}$  fra anodo e catodo, in modo che l'anodo si trovi a potenziale positivo rispetto al catodo, si ha un passaggio di corrente attraverso il diodo, dipendente dalla differenza di potenziale applicata. Uno schema di circuito che permette di variare la tensione  $V_{AK}$  è indicato in fig. 3.

Variando  $V_{AK}$  da zero al valore  $E_A$ , si ottiene una corrente  $I_A$ , legata a  $V_{AK}$  da una relazione, espressa graficamente dalla fig. 4. Tale curva rappresenta la *caratteristica del diodo*.



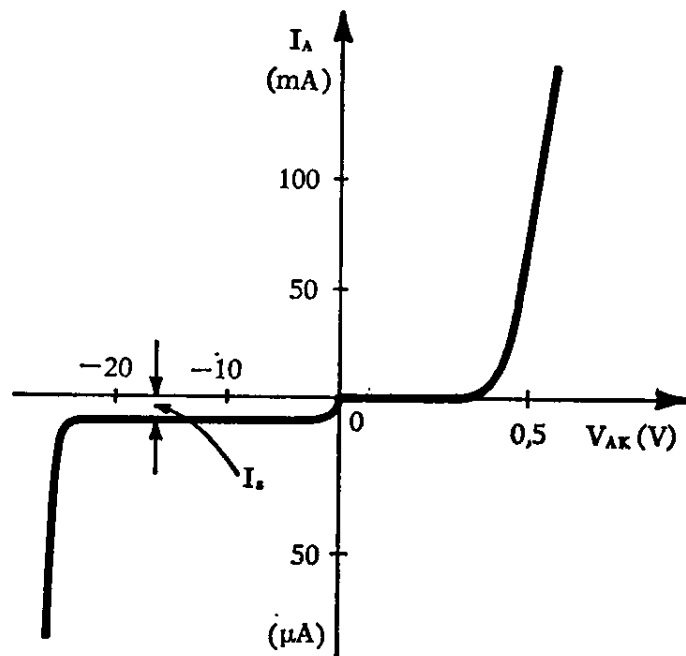
**FIG. 3. - Circuito per il rilievo della caratteristica di un diodo.**



**FIG. 4. - Caratteristica di un diodo a giunzione. Nelle ordinate negative la scale è dilatata per mettere in evidenza la corrente inverse.**

Essa passa esattamente per l'origine degli assi cartesiani e aumenta molto rapidamente all'aumentare della tensione applicata, quando il diodo è polarizzato in senso diretto. In tal caso, la corrente tende a crescere indefinitamente ed è limitata dalla massima potenza che il diodo può dissipare.

La corrente nel diodo polarizzato in senso inverso è, come si è detto, debolissima e tende, all'aumentare della tensione inversa, ad un valore costante  $I_S$ , che dipende dalla temperatura a cui si trova la giunzione e che viene chiamata *corrente inversa di saturazione*. La corrente inversa si mantiene al valore  $I_S$ , all'aumentare della tensione inversa, fino a che non si raggiunge un certo limite  $V_Z$ , detto *punto di Zener*, oltre il quale la corrente inversa comincia ad aumentare molto rapidamente, con possibile distruzione del diodo.



La spiegazione fisica del fenomeno sta nel fatto che al crescere della tensione inversa, gli elettroni liberi costituenti le cariche minoritarie acquistano per effetto dell'aumentato campo elettrico una sufficiente energia e quindi una velocità tale da spezzare, per urto, dei legami covalenti e liberare altre coppie elettroni-lacune; queste a loro volta acquistano, sempre per effetto del campo elettrico, sufficiente energia da spezzare altri legami covalenti e così di seguito. Si ha perciò un fenomeno moltiplicativo a *valanga* con conseguente brusco aumento di cariche e quindi di corrente.

**FIG. 4. - Caratteristica di un diodo a giunzione. Nelle ordinate negative la scala è dilatata per mettere in evidenza la corrente inversa.**

Tale fenomeno non è di per sé distruttivo, in quanto tornando a diminuire la tensione inversa applicata, il fenomeno cessa, però se la sua durata supera un certo limite, il riscaldamento della giunzione, dovuto alla potenza che in essa si dissipa, provoca la sua distruzione.

La caratteristica di un diodo a giunzione può, in via approssimata essere espressa dalla relazione:

$$I_A = I_S \cdot \left( e^{\frac{q_e}{aKT} \cdot V_{AK}} - 1 \right) \quad (1)$$

Dove:

$I_S$  = corrente di saturazione inversa del diodo;

$q_e$  = carica dell'elettrone ( $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb);

$T$  = temperatura assoluta in gradi Kelvin (°K);

$K$  = costante di Boltzman ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Joule/°K);

$a$  = coefficiente che vale circa 1 per i diodi al germanio e circa 2 per quelli al silicio.

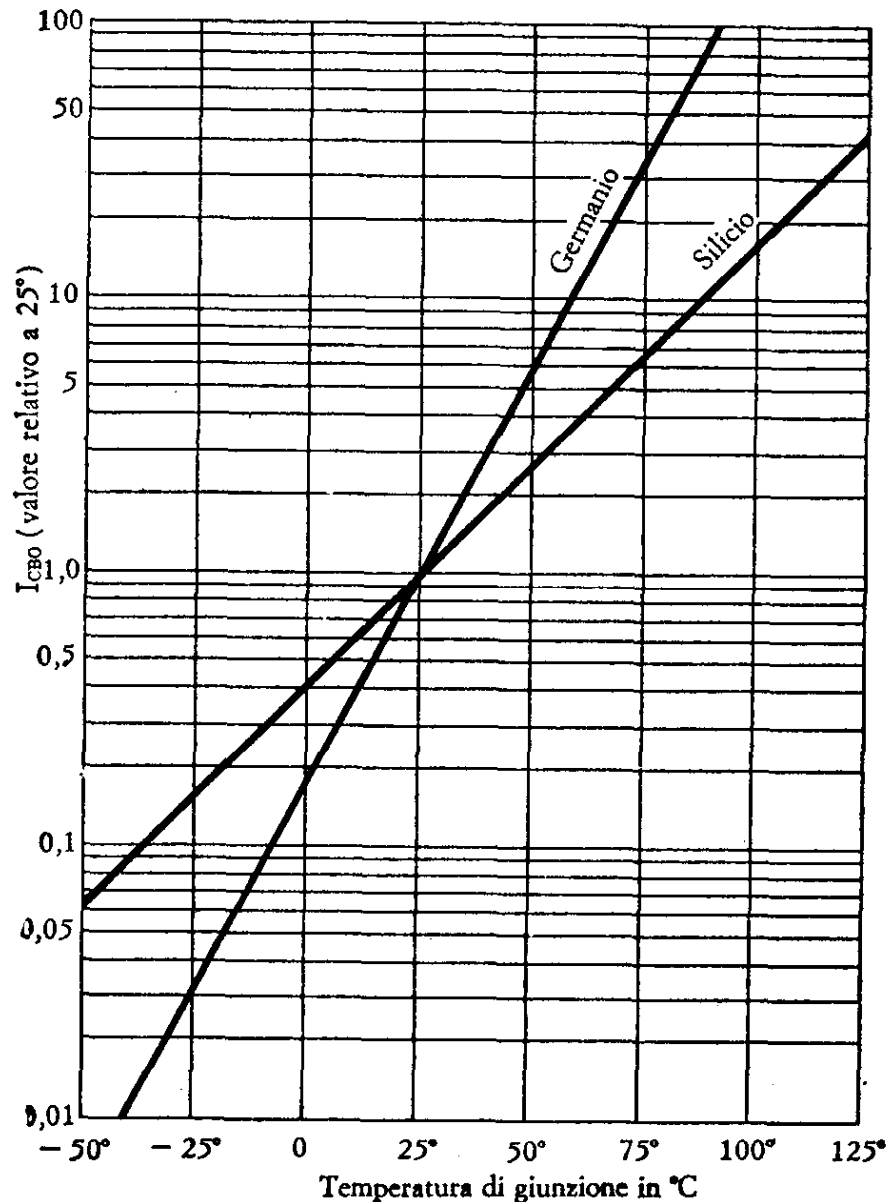
Il termine  $(aKT/q_e)$  ha le dimensioni di una tensione e, alla temperatura ambiente di 27 °C (300 °K), vale circa 26 mV per i diodi al germanio e circa 52 mV per quelli al silicio.

Nella (1), per tensioni  $V_{AK} \gg aKT/q_e$ , si può trascurare il termine 1 rispetto a:

$$e^{\frac{q_e}{aKT} \cdot V_{AK}}$$

per cui la relazione in questione può essere scritta in via approssimata:

$$I_A = I_S \cdot e^{\frac{q_e}{aKT} \cdot V_{AK}} \quad (2)$$



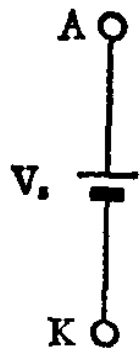
La corrente inversa di saturazione  $I_S$  dipende sia dalla temperatura che dal tipo di diodo. Nei diodi al silicio infatti essa è dell'ordine di 1000 volte più piccola di quella di un corrispondente diodo al germanio.

Con la temperatura,  $I_S$  varia secondo la legge di fig. 5, in cui sono state adoperate scale logaritmiche; poiché con tali scale si hanno diagrammi rettilinei, si deduce che la variazione di  $I_S$  con la temperatura è di tipo esponenziale. Si può anche notare che i diodi al silicio sono meno sensibili alle variazioni di temperatura rispetto a quelli al germanio e che per questi ultimi si ha circa un raddoppio per ogni aumento di 10°C

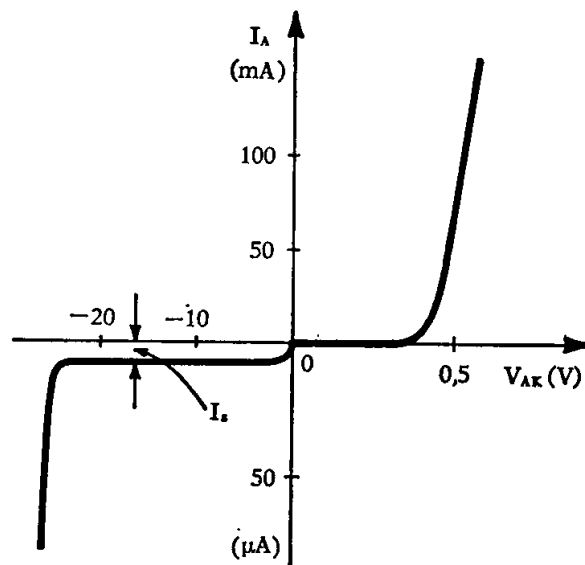
**FIG. 5. - Variazione di  $I_S$  con la temperatura. Sull'asse delle ordinate la corrente inversa è indicata con  $I_{CB0}$ , come si usa fare nei transistori.**

## Circuito equivalente e resistenza differenziale di un diodo a giunzione.

Dall'esame della caratteristica di fig. 4, si può notare che, nel senso di conduzione, la caduta di tensione fra anodo e catodo varia poco al variare della corrente che attraversa il diodo, quando questa supera un certo valore; cioè si nota che la caratteristica, dopo il primo tratto iniziale, in cui la corrente assume valori modesti, diventa molto ripida, quasi verticale. In base a queste considerazioni, la caratteristica di un diodo a giunzione **può essere approssimata con una retta** praticamente parallela all'asse delle ordinate e che taglia l'asse delle  $V_{AK}$  in un punto di ascissa  $V_S$  il cui valore dipende dal tipo di diodo. Il valore di  $V_S$ , risulta di circa  $0,2 \div 0,3$  V per i diodi al germanio e  $0,5 \div 0,7$  V per quelli al silicio e spesso viene indicato come *tensione di soglia*, in quanto finché  $V_{AK}$  si mantiene inferiore a  $V_S$ , la corrente nel diodo risulta molto piccola.



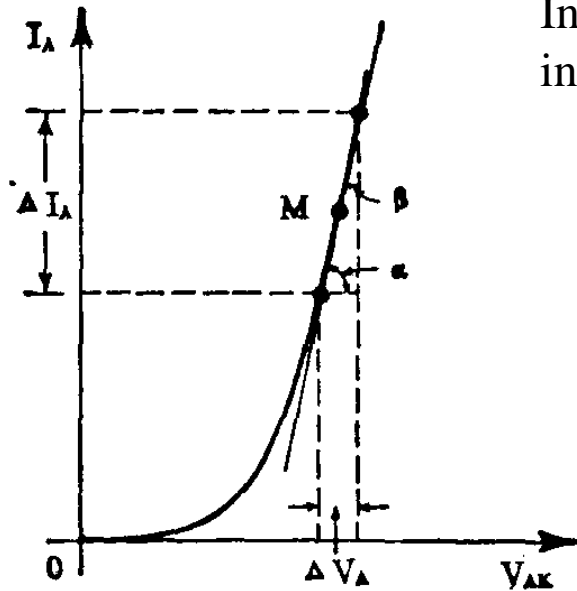
**FIG. 6. -**  
Circuito  
equivalente  
approssimato  
di un diodo a  
giunzione.



**FIG. 4**

Ciò porta a concludere che se il diodo non lavora con correnti estremamente modeste, esso presenta fra anodo e catodo una caduta di tensione quasi costante e di valore dipendente dal tipo di diodo. In prima approssimazione si può dire che il diodo a giunzione equivale ad una f.c.e.m. di valore  $V_S$ , e con le polarità indicate in fig. 6.

Tornando alla caratteristica di fig. 4, si può osservare che in realtà l'approssimazione della caratteristica con una retta parallela all'asse delle ordinate non è del tutto esatta, però è tanto più vicina al vero, quanto maggiori sono le correnti che circolano nel diodo.



**FIG. 7. - Definizione di resistenza differenziale di un diodo a giunzione**

Infatti si può dimostrare (\*) che la pendenza  $m$  di una retta tangente in un punto della caratteristica vale:

$$m = \frac{I_S \cdot q_e}{aKT} \cdot e^{\frac{q_e}{aKT} V_{AK}} \cong \frac{I_A \cdot q_e}{aKT} \quad (3)$$

da cui si deduce che ad esempio nei diodi al germanio, per correnti  $I_A$  superiori a 26 mA, il valore di  $m$  supera l'unità e assume valori sempre maggiori al crescere di  $I_A$ .

L'inverso della pendenza della retta tangente in un punto della caratteristica costituisce la *resistenza differenziale* del diodo a giunzione. Infatti, dall'esame della fig. 7, si vede che considerando un intorno del punto  $M$  piuttosto ristretto, tale tratto di caratteristica si confonde con la retta ad essa tangente in  $M$ .

Poiché la resistenza differenziale  $r_a$  viene definita dal rapporto  $\Delta V_A / \Delta I_A$ , quando tali variazioni sono molto piccole, risulta che esso è uguale alla tangente dell'angolo  $\beta$  di fig. 7, ma è anche:

$$\text{tang } \beta = 1 / \text{tang } \alpha = 1 / m \quad \text{da cui:} \quad r_a = \frac{1}{m} = \frac{aKT}{q_e I_A} \quad (4)$$

Si può notare che la resistenza differenziale è molto piccola se la corrente  $I_A$  supera un certo valore. Infatti nei diodi la germanio, per  $I_A = 26$  mA, essendo  $aKT / q_e = 26$  mV, la resistenza  $r_a$  vale:

$$r_a = \frac{26 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} = 1 \Omega$$



Dimostrazione  
(facoltativa)

Dalla (2) è:  $I_A = I_S \cdot e^{\frac{q_e}{aKT} \cdot V_{AK}}$  si ricava:  $m = \frac{dI_A}{dV_{AK}} = \frac{I_S \cdot q_e}{aKT} \cdot e^{\frac{q_e}{aKT} \cdot V_{AK}}$

Si ricava la (3), sostituendo l'espressione (2) di  $I_A$ :  $m = \frac{q_e}{aKT} \cdot I_A$

Per valori superiori di  $I_A$ , il valore di  $r_a$  è ancora più piccolo, perciò normalmente la resistenza differenziale di un diodo a giunzione è trascurabile. Si può quindi concludere che un diodo a giunzione da luogo ad una caduta di tensione fissa, di solito non superiore al Volt e per variazioni nell'intorno di un punto della sua caratteristica, si comporta come un cortocircuito (resistenza zero) sempre nel caso che sia polarizzato in senso diretto.

Nel caso di polarizzazione in senso inverso, il diodo si comporta in prima approssimazione come un circuito aperto (corrente circa zero).

## **Potenza dissipata in un diodo a giunzione.**

In un diodo a giunzione polarizzato in senso diretto, le cariche elettriche che danno luogo alla corrente del diodo, attraversando la barriera di potenziale, compiono un lavoro che si trasforma in calore.

Nella giunzione viene quindi dissipata una certa potenza che è praticamente data dal prodotto della corrente che attraversa il diodo per la caduta di tensione fra anodo e catodo (infatti in prima approssimazione si può ritenere trascurabile la resistenza del cristallo).

Essendo tale caduta piuttosto modesta, cioè in pratica inferiore al Volt, risulta che i diodi a giunzione possono essere percorsi da forti correnti senza che la dissipazione di potenza diventi eccessiva. Tuttavia la potenza dissipata nel diodo dà luogo ad uno sviluppo di calore che innalza la temperatura della giunzione. Tale innalzamento della temperatura è legato alla capacità di dissipazione del calore sviluppato nel diodo verso l'esterno. Infatti l'aumento di temperatura della giunzione sarà tanto minore quanto maggiori sono le possibilità del diodo di dissipare calore verso l'esterno.

A questo scopo si usa introdurre il concetto di *resistenza termica*  $\theta$ , la quale misura la difficoltà del calore a propagarsi verso l'esterno. Essa viene espressa in °C/W e rappresenta l'aumento in °C della temperatura di giunzione, rispetto a quella ambiente, per ogni W di potenza dissipata, per cui se ad esempio la resistenza termica  $\theta$  vale 50 °C/W, la temperatura di giunzione aumenta di 50 °C quando la potenza dissipata nel diodo è di un watt. La temperatura di giunzione  $T_j$ , risulta legata alla potenza dissipata e alla temperatura ambiente dalla relazione:

$$T_j = \theta \cdot P_d + T_a \quad (5)$$

Dalla (5) si deduce la massima potenza che può dissipare un diodo a giunzione in funzione della temperatura ambiente. Infatti risolvendo rispetto a  $P_d$ , si ha:

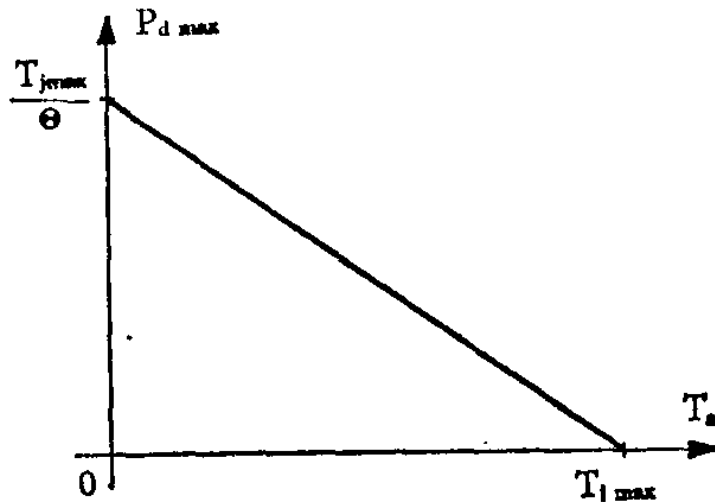
$$P_d = \frac{T_j - T_a}{\theta} \quad (6)$$

che, scritta per i valori massimi di dissipazione, in corrispondenza della massima temperatura di giunzione  $T_{jmax}$  diventa:

$$P_{dmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\theta} \quad (7)$$

Il diagramma di  $P_{dmax}$  in funzione di  $T_a$  è riportato in fig. 8.

Come si vede, se la temperatura ambiente (quella in cui lavora il diodo) raggiunge il valore  $T_{jmax}$  la potenza dissipabile diventa nulla, in quanto qualsiasi valore di corrente non farebbe altro che innalzare ulteriormente la temperatura di giunzione. Una volta fissata la potenza massima che può essere dissipata nel diodo, poichè la caduta di tensione anodo-catodo e dell'ordine del Volt (nei diodi al silicio che sono i più comunemente impiegati nei circuiti di potenza), risulta determinato anche il valore massimo della corrente anodica  $I_{Amax}$ .



**FIG. 8. - Potenza massima dissipabile in un diodo in funzione della temperatura ambiente.**

Il concetto di resistenza termica è molto importante in quanto in un diodo la temperatura della giunzione non può superare certi limiti se non si vuole rischiare la sua distruzione. Di solito viene prescritta una temperatura massima di giunzione  $T_{jmax}$  di circa 100 °C per i diodi al germanio e di 200 °C per quelli al silicio (\*)•

**(\*) Nelle applicazioni dei diodi in circuiti di potenza, è possibile ridurre la resistenza termica di un diodo montandolo su apparati dissipatori di calore (alette di raffreddamento); in tal modo si può, a parità di temperatura di giunzione, aumentare la potenza dissipata e quindi la corrente  $I_A$ .**

### **Esempio:**

A titolo di esempio, per il diodo al silicio BAX 78 è indicata la temperatura massima di giunzione  $T_{jmax} = 190^\circ\text{C}$  e una resistenza termica  $\theta = 0,4 \text{ }^\circ\text{C/mW} = 400 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Se la temperatura ambiente è  $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , la massima potenza  $P_{dmax}$ , dissipabile dal diodo, dalla (7) risulta:

$$P_{dmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\theta} = \frac{190 - 25}{400} = 0,412\text{W}$$

e poichè i manuali indicano che la caduta di tensione anodo-catodo  $V_{AK}$  è nell'intorno di 1 V, segue che la massima corrente continua che può circolare nel diodo in questione alla temperatura di 25°C è:

$$I_{Amax} = \frac{P_{dmax}}{V_{AK}} = \frac{0,412}{1} = 0,412 \text{ A}$$

## Grandezze caratteristiche di un diodo a giunzione.

Spesso si usa suddividere i diodi a giunzione in diodi di segnale e in diodi di potenza a seconda che siano impiegati in circuiti in cui circolano correnti modeste (dell'ordine di decine di mA) oppure in circuiti in cui siano in gioco potenze di una certa entità, nel qual caso le correnti possono variare da alcuni A ad alcune decine o centinaia di A.

Le grandezze caratteristiche di un diodo a giunzione, sono fornite normalmente dai manuali; fra esse riportiamo le principali:

1. Il valore massimo della corrente continua in senso diretto  $I_{Amax}$  che è quello che può circolare in permanenza ad una data temperatura ambiente;
2. Il massimo valore di picco  $I_{max}$  della corrente per brevi durate (ad esempio 1 sec o un periodo della tensione di rete);
3. Il massimo valore di picco della corrente ad una determinata frequenza;
4. Il massimo valore della caduta di tensione  $V_{AKmax}$  in corrispondenza del massimo valore di corrente continua;
5. Il massimo valore della tensione inversa  $V_{imax}$ ;
6. Il massimo valore della corrente inversa (corrente di saturazione inversa  $I_S$ );
7. Il valore della resistenza termica  $\theta$ ;
8. Il massimo valore di temperatura ammissibile nella giunzione  $T_{jmax}$ ;

A titolo di esempio si riportano le grandezze caratteristiche del diodo di segnale BAX 13:

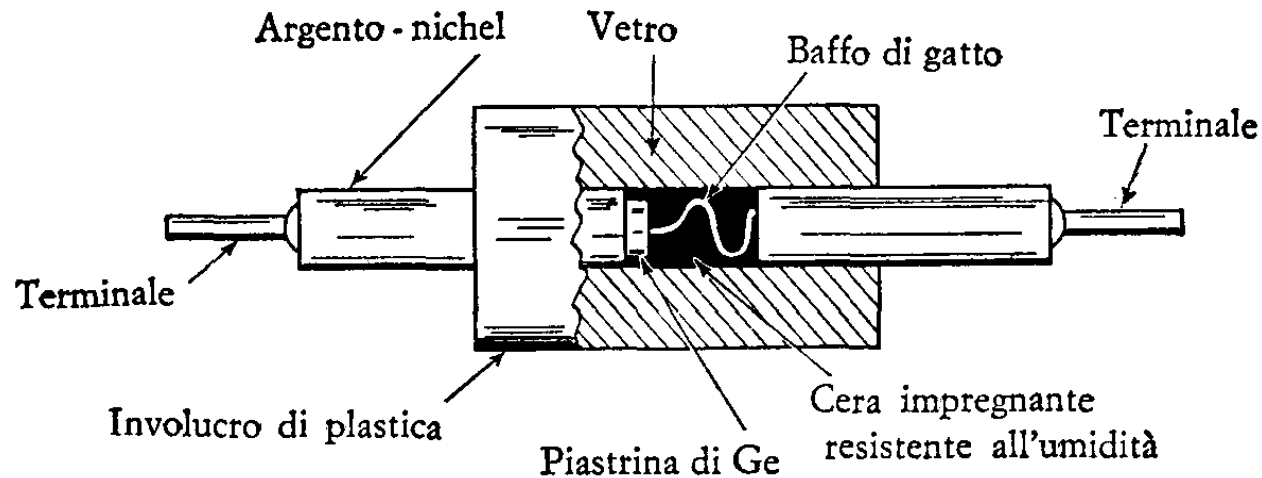
1. Massimo valore della corrente continua:  $I_{Amax} = 75 \text{ mA}$ ;
2. Massimo valore di picco della corrente per la durata di 1 s:  $I_{max} = 500 \text{ mA}$ ;
3. Massimo valore di picco della corrente alla frequenza di 50 Hz: 150 mA;
4. Valore massimo della caduta di tensione per  $I_A = 75 \text{ mA}$ :  $V_{AKmax} < 1,5 \text{ V}$ ;
5. Massimo valore della tensione inversa:  $V_{imax} = 50 \text{ V}$ ;
6. Massimo valore della corrente inversa per  $V_i = 50 \text{ V}$ :  $I_s < 0,2 \text{ }\mu\text{A}$ ;
7. Resistenza termica:  $\theta = 0,6 \text{ }^\circ\text{C/mW}$ ;
8. Valore massimo della temperatura di giunzione:  $T_{jmax} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Come esempio di diodi di potenza, riportiamo le grandezze caratteristiche del diodo al silicio BY 127:

1. Massimo valore della corrente continua:  $I_{Amax} = 1 \text{ A}$ ;
2. Massimo valore di picco della corrente per la durata di 10 ms:  $I_{max} = 40 \text{ A}$ ;
3. Massimo valore di picco della corrente alla frequenza di 50 Hz: : 10 A;
4. Valore massimo della caduta di tensione per  $I_A = 1 \text{ A}$ :  $V_{AKmax} < 1,5 \text{ V}$ ;
5. Massimo valore della tensione inversa:  $V_{imax} = 1250 \text{ V}$ ;
6. Massimo valore della corrente inversa per  $V_i = 1250 \text{ V}$ :  $I_s < 10 \text{ }\mu\text{A}$ ;
7. Resistenza termica:  $\theta = 60 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;
8. Valore massimo della temperatura di giunzione:  $T_{jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Diodo a punta di contatto.

Il diodo a punta di contatto è formato da una piastrina di germanio o di silicio di tipo  $N$  e da un filo appuntito di tungsteno premuto sulla piastrina e chiamato *baffo di gatto*, secondo lo schema di fig. 9. Tali elementi sono racchiusi in un involucro di vetro o di materiale ceramico. In questo componente la corrente può passare dal filamento al cristallo e non viceversa. Si può spiegare ciò in maniera elementare pensando che al passaggio di corrente si viene a formare nell'intorno della punta del filamento una zona di tipo  $P$  che con la restante parte tipo  $N$  dà luogo ad una giunzione  $PN$ . Il diodo a punta di contatto ha praticamente caratteristiche simili a quelli a giunzione, ma possono essere normalmente impiegati solo per correnti limitate, come diodi di segnale.



**FIG. 9. - Diodo a punta di contatto al germanio con contenitore in vetro impregnato internamente con cera e rivestito esternamente con plastica.**



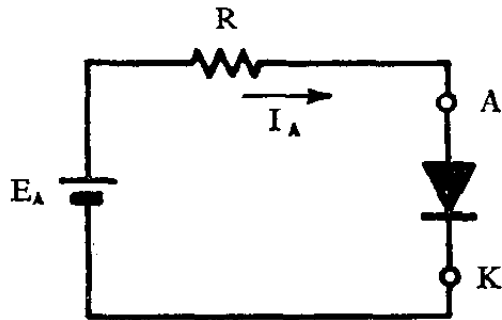
### **Serie di un diodo con una resistenza e una f.e.m. continua.**

Si è visto nel paragrafo precedente che il diodo a giunzione non obbedisce esattamente alla legge di Ohm, cioè non sussiste una relazione di proporzionalità fra tensione applicata ai suoi capi e corrente in esso circolante.

Infatti la legge che lega tensione e corrente è molto più complessa di quella lineare che lega tensione e corrente in una resistenza. Tale legge esprimibile analiticamente dalla relazione generica:  $I_A = f(V_{AK})$

nel caso di un diodo a giunzione è approssimabile con la relazione (1). Normalmente, però, la relazione che lega  $I_A$  e  $V_{AK}$  viene espressa per via grafica tramite la curva caratteristica del diodo. Nello studio di circuiti comprendenti diodi, si pone molto spesso il problema di determinare il valore della corrente  $I_A$  che circola nel diodo e quello della corrispondente tensione  $V_{AK}$  ai suoi capi.

Il caso più semplice è quello in cui un diodo si trovi in serie ad un generatore di f.e.m. continua  $E_A$  e ad una resistenza  $R$ , secondo lo schema di fig. 10. È da notare che anche in circuiti più complessi, ci si può ridurre allo schema di fig. 10, applicando il teorema di Thevenin fra i morsetti A e K della rete ottenuta staccando il diodo.



**FIG. 10. - Circuito comprendente un diodo con in serie una resistenza e una f.e.m. continua.**

Si premette inoltre che le considerazioni che seguono valgono anche se nel circuito di fig. 10 è inserito un altro tipo di diodo al posto di uno a giunzione.

La corrente  $I_A$  potrebbe essere determinata per via analitica conoscendo la relazione:

$$I_A = f(V_{AK}) \quad (8)$$

che lega corrente e tensione nel diodo e considerando che, in base alla legge di Ohm generalizzata, è anche:

$$V_{AK} = E_A - R \cdot I_A \quad (9)$$

Risolvendo il sistema formato dalle equazioni (8) e (9), si ottiene la corrente  $I_{A0}$  che passa nel circuito e la tensione  $V_{AK0}$  ai capi del diodo.

In realtà la risoluzione per via analitica del sistema non è semplice, essendo la (8) una relazione non lineare. *Normalmente si preferisce risolvere il sistema per via grafica.*

È infatti noto che la soluzione grafica di un sistema di due equazioni a due incognite è data dalle coordinate dei punti d'incontro delle curve che esprimono graficamente le due equazioni; ciò in quanto ciascuna curva rappresenta il luogo dei punti le cui coordinate soddisfano ad una delle equazioni e i punti d'incontro, appartenendo alle due curve hanno coordinate che soddisfano ad ambedue le equazioni, quindi costituiscono la soluzione del sistema.

Se ora si osserva che la rappresentazione grafica della (8) non è altro che la curva caratteristica del diodo e che la (9), scritta nella forma:

$$I_A = \frac{E_A - V_{AK}}{R} \quad (10)$$

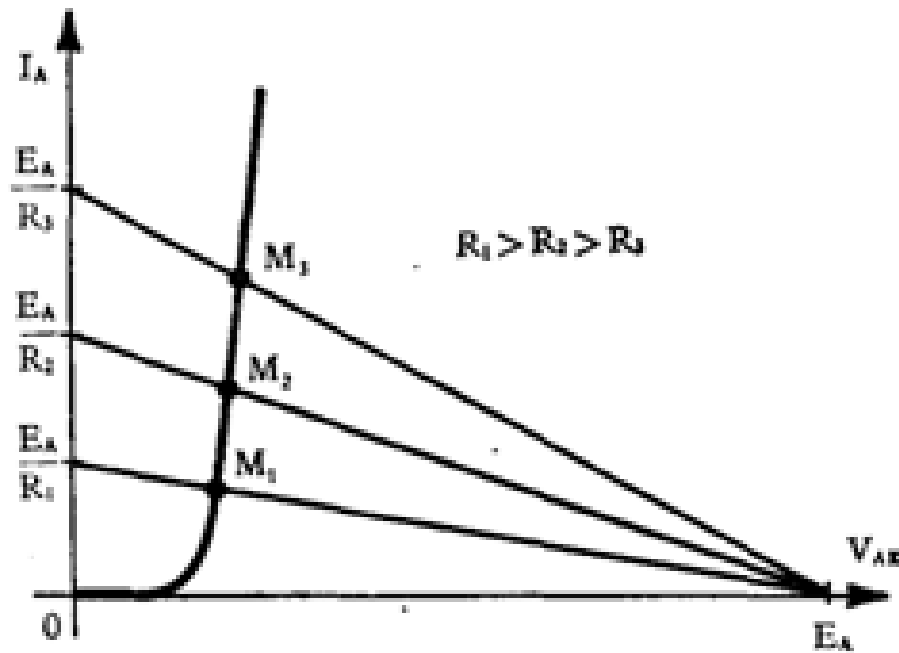
rappresentata graficamente da una retta che taglia l'asse delle  $I_A$  ( $V_{AK} = 0$ ) nel punto di ordinata  $E_A/R$  e l'asse delle  $V_{AK}$  ( $I_A = 0$ ) nel punto di ascissa  $V_{AK} = E_A$ , risulta che la soluzione del sistema è fornita, come indicato in fig. 11, dalle coordinate del punto d'incontro **M** delle due curve, detto anche *punto di funzionamento* del diodo. Tali coordinate forniscono quindi la corrente  $I_{A0}$  che circola nel diodo e la tensione  $V_{AK0}$  ai suoi capi.



**FIG. 11. - Studio grafico di un circuito comprendente un diodo con in serie una resistenza e una fem continua.**

La retta risultante dall'equazione (10) prende il nome di *retta di carico* e si può concludere che il punto di funzionamento di un diodo, inserito in un circuito come quello di fig. 10, è dato dall'incontro della retta di carico con la caratteristica del diodo. Graficamente, sempre con riferimento alla fig. 11, il segmento **AB** vale  $E_A - V_{AK0}$  e rappresenta la caduta di tensione sulla resistenza **R**, detta anche resistenza di carico; inoltre l'area del rettangolo **OAMC**, tenendo conto delle scale, rappresenta la potenza dissipata nel diodo ( $P_d = V_{AK0} \cdot I_{A0}$ ).

Si può ora osservare che, se nel circuito di fig. 10 si varia la resistenza di carico  $R$ , viene in corrispondenza a cambiare il punto d'incontro della retta di carico con l'asse delle ordinate. Infatti, aumentando ad esempio il valore di  $R$ , tale punto di ordinata  $E_A/R$ , si avvicina all'origine degli assi, mentre quello d'incontro con l'asse delle ascisse di valore  $E_A$ , resta costante dipendendo unicamente dalla f.e.m. applicata. In tal caso quindi la retta di carico ruota intorno al punto  $E_A$ , come indicato in fig. 12.



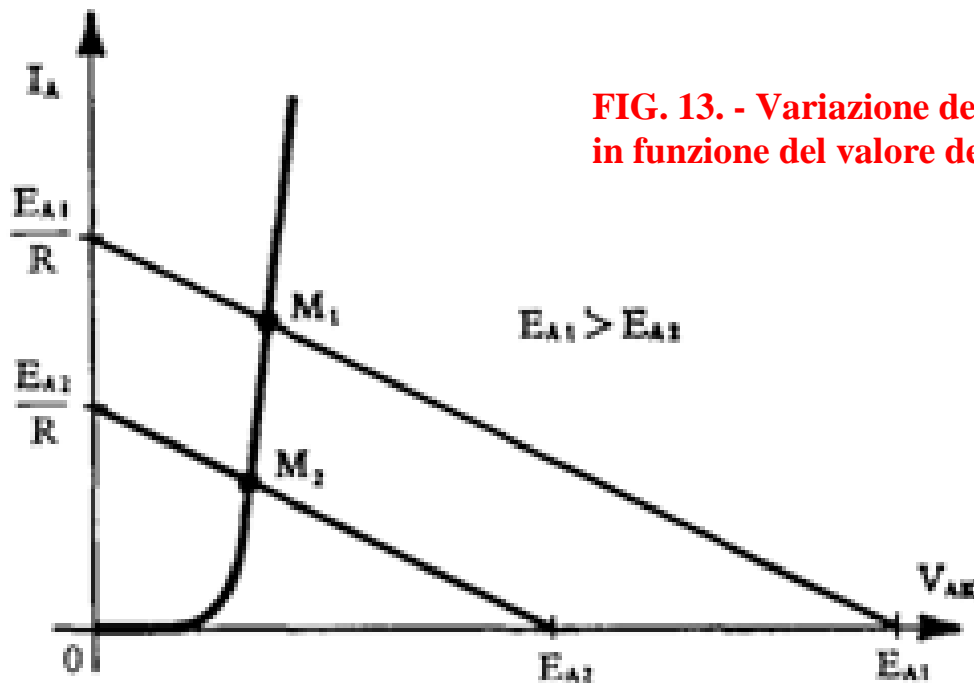
**FIG. 12. - Variazione della retta di carico in funzione del valore della resistenza in serie al diodo.**

Se, invece, tenendo costante la resistenza  $R$ , si varia la f.e.m. applicata  $E_A$ , vengono a cambiare ambedue i punti d'incontro della retta di carico con gli assi coordinati. Se però si osserva l'equazione (10) oppure il diagramma di fig. 11, si nota che non varia l'angolo che tale retta forma con l'asse delle ascisse. Infatti il rapporto  $OD / OB$  (fig. 11) vale:

$$\frac{E_A/R}{E_A} = \frac{1}{R}$$

ed è indipendente dalla f.e.m.  $E_A$ .

Si conclude quindi che al variare di  $E_A$  la retta di carico si sposta mantenendosi parallela a se stessa, come indicato in fig. 13.



**FIG. 13. - Variazione della retta di carico in funzione del valore della f.e.m. applicata  $E_A$ .**

Limitatamente al diodo a giunzione, pur restando valide tutte le considerazioni precedenti, data la forma della sua caratteristica, particolarmente ripida quando la tensione  $V_{AK}$  supera il valore di soglia  $V_S$ , il procedimento in precedenza esposto, può essere notevolmente semplificato. Infatti si può notare, osservando la fig. 12, che i punti d'incontro delle rette di carico con la caratteristica del diodo a giunzione, hanno quasi la stessa ascissa, la quale in prima approssimazione (a meno di qualche frazione di Volt) viene a coincidere con il valore di  $V_S$ . In tali condizioni, comportandosi il diodo, come già visto nel paragrafo precedente, praticamente come una f.c.e.m. di valore  $V_S$ , si può determinare la corrente  $I_{A0}$ , che circola nel diodo, con buona approssimazione, mediante la relazione analitica:

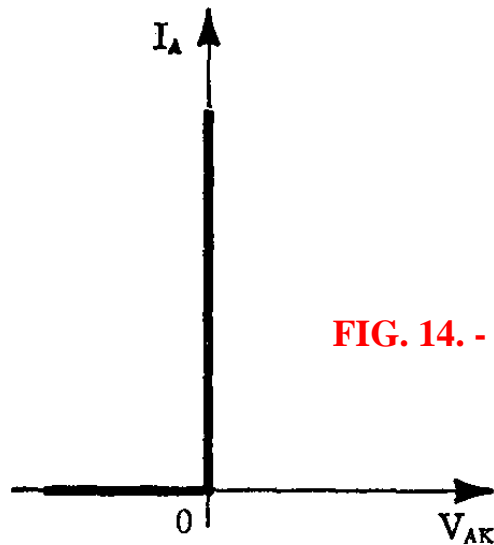
$$I_{A0} = \frac{E_A - V_S}{R} \quad (11)$$

ottenuta dalla (10), sostituendo  $V_{AK}$  con  $V_S$ .

Nel caso in cui la f.e.m.  $E_A$  sia abbastanza elevata (almeno una decina di Volt), in modo che  $E_A \gg V_S$ , la (11) può essere semplificata trascurando il termine  $V_S$  rispetto ad  $E_A$ ; in tal caso si può scrivere:

$$I_{A0} \cong \frac{E_A}{R} \quad (12)$$

Poichè, come si è visto, normalmente  $V_S$  di solito non supera il Volt, molto spesso accade di trovarsi nella condizione in cui è valida la relazione (12). *Ciò significa che quando il diodo a giunzione è polarizzato in senso diretto, può essere considerato come un cortocircuito, mentre quando è polarizzato in senso inverso come una resistenza infinitamente grande (corrente trascurabile).* Si dice in tal caso che il diodo si avvicina ad un diodo ideale, la cui caratteristica appare come in fig. 14.



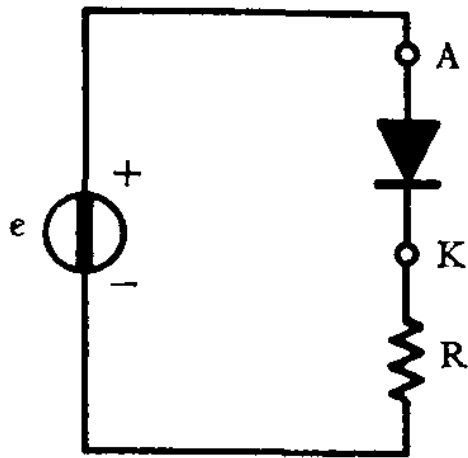
**FIG. 14. - Caratteristica di un diodo ideale**

A quest'ultima approssimazione ci si riferirà spesso nelle successive applicazioni.

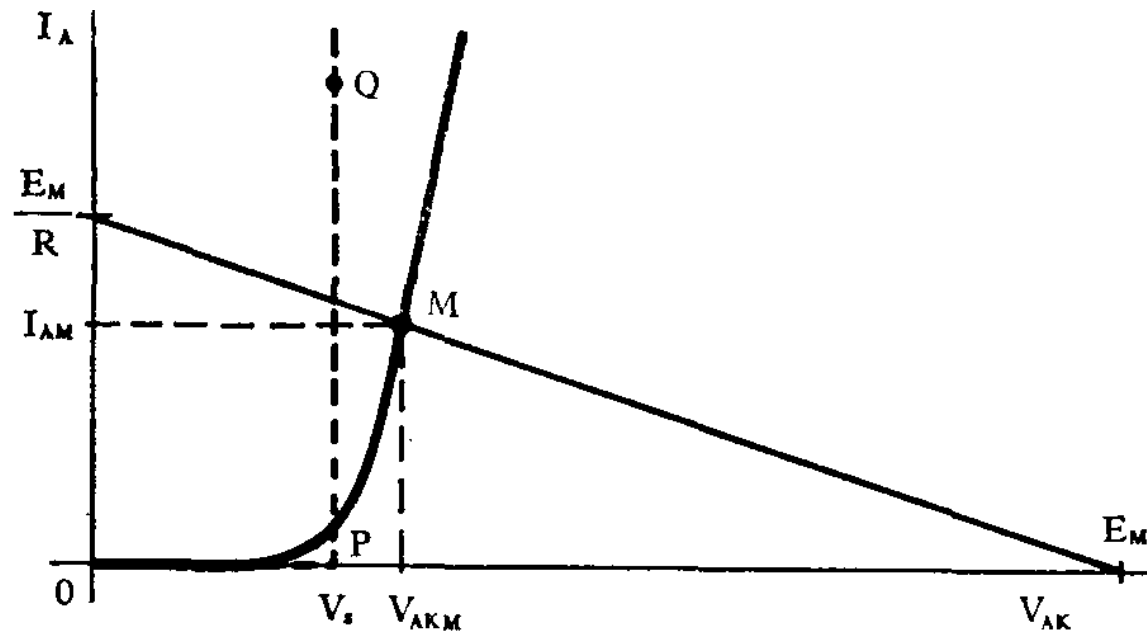
### Diodo con in serie una resistenza e una f.e.m. alternate.

Prendiamo ora in considerazione il circuito di fig. 15, in cui in serie ad un diodo è posto un generatore di f.e.m. alternata di ampiezza  $E_M$  e una resistenza  $R$ .

Durante la semionda positiva di tensione, cioè con  $V_{AK}$  positiva, il diodo conduce e la corrente è limitata dalla resistenza  $R$ . Il valore massimo di corrente  $I_{AM}$ , circolante nel diodo è facilmente determinabile con la costruzione grafica indicata nel paragrafo precedente, tenendo presente che esso si ha nell'istante in cui la f.e.m. applicata raggiunge il valore massimo  $E_M$ ; basta allora tracciare la retta di carico che incontra gli assi coordinati nei punti  $E_M$  e  $E_M/R$ , come indicato in fig. 16. Le coordinate del punto  $M$  forniscono il valore  $I_{AM}$  e il corrispondente valore  $V_{AKM}$  della tensione anodica.



**FIG. 15. - Serie di un diodo con una resistenza e una ferm altemata**



**FIG. 16. - Costruzione grafica per la determinazione del massimo valore  $I_{AM}$  di corrente circolante nel diodo nel circuito di fig. 15.**



La costruzione ora effettuata può essere ripetuta per tutti i valori istantanei che assume la f.e.m. nel semiperiodo positivo; così si otterrebbe istante per istante il valore della tensione anodica  $V_{AK}$  e della corrente anodica  $I_A$ . Normalmente però tale operazione, piuttosto lunga, non è necessaria. Infatti, come si è detto nel paragrafo precedente, nel caso di un diodo a giunzione si può approssimare la caratteristica con la retta PQ di fig. 16 e quindi sostituire il diodo con una f.c.e.m. di valore  $V_S$ .

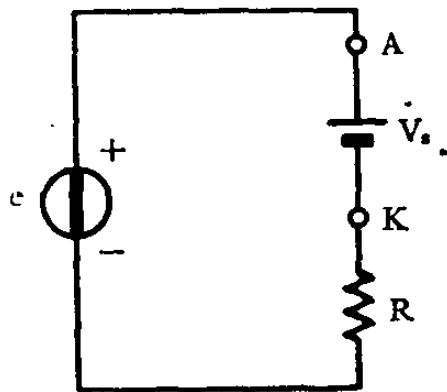
In tali condizioni, durante la semionda positiva della corrente alternata il circuito si comporta approssimativamente come quello di fig. 17 e quindi la tensione ai capi della resistenza  $R$  ha l'andamento all'incirca di una mezza senoide di ampiezza:  $V_{RM} = E_M - V_S$  (13)

Durante la semionda negativa, invece, il diodo risulta polarizzato inversamente e la corrente in esso circolante è nulla; di conseguenza nulla anche la tensione ai capi della resistenza  $R$ .

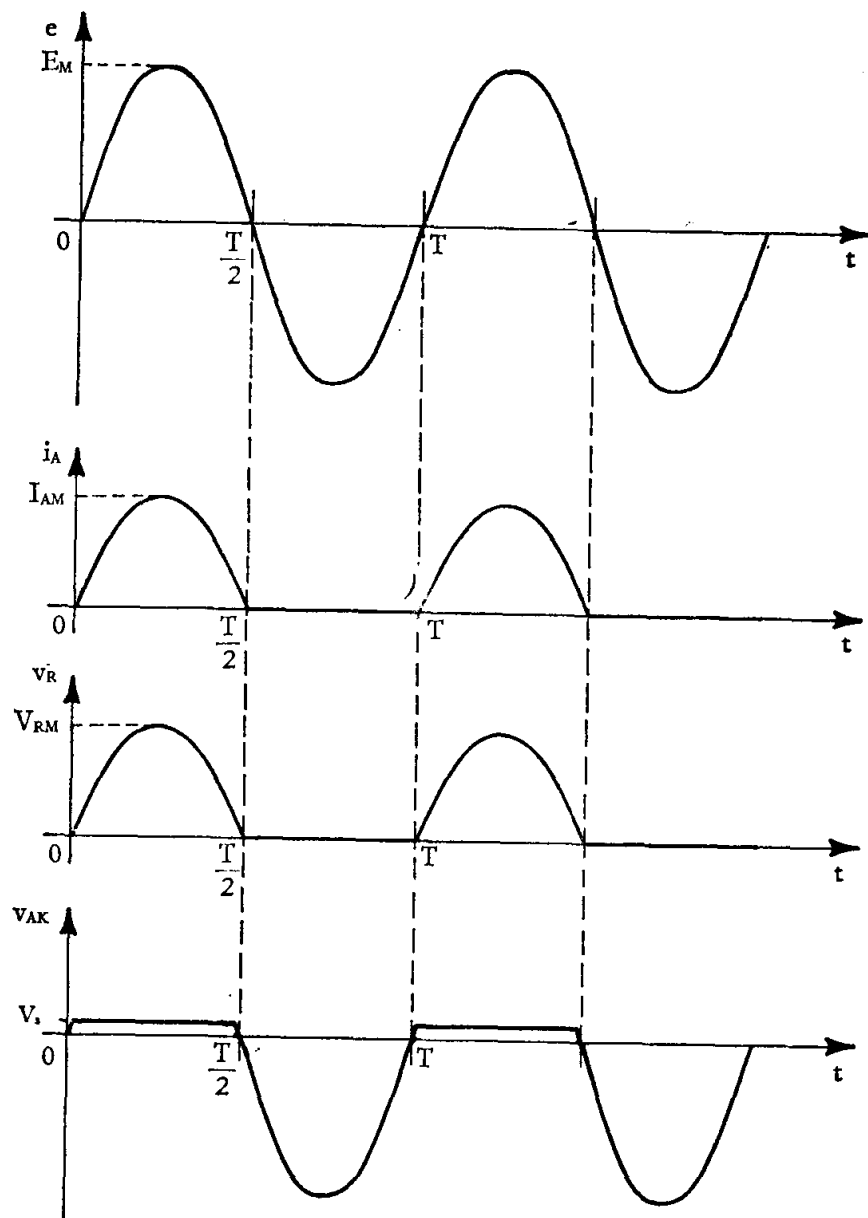
L'andamento della corrente nel circuito di fig. 15 e quindi anche della tensione ai capi della resistenza  $R$  ( $v_R = i_A \cdot R$ ), nonché quello della tensione  $v_{AK}$  ai capi del diodo è riportato in fig. 18.

Si noti che la tensione  $v_{AK}$  è ottenuta dalla relazione:

$$v_{AK} = e - R \cdot i_A$$



**FIG. 17. - Circuito approssimato equivalente a quello di fig. 15.**



**FIG. 18. - Andamento delle tensioni e correnti nel circuito di fig. 15.**

Come si può osservare dalla fig. 18, l'andamento della corrente  $i_A$  nel diodo e quindi della tensione  $v_R$  ai capi di  $R$ , è *pulsante*, cioè ha sempre lo stesso verso. Si dice anche che la corrente è *raddrizzata* e che il circuito di fig. 15 è un circuito raddrizzatore.

Il valore medio  $I_m$ , della corrente  $i_A$  si può, facilmente ricavare pensando che esso è la metà del valor medio di una sinusoide in un semiperiodo (infatti la corrente circola solo in un semiperiodo, mentre nell'altro è nulla), e che quest'ultimo vale:  $2 I_{AM} / \pi$  perciò è:

$$I_m = \frac{I_{AM}}{\pi} \quad (14)$$

Con analoghe considerazioni, si può dedurre che il valor medio  $V_{Rm}$  della tensione ai capi della resistenza  $R$ , vale:

$$V_{Rm} = \frac{V_{RM}}{\pi} = \frac{E_M - V_S}{\pi} \quad (15)$$

Per quanto riguarda il valor medio  $V_{AKm}$  della tensione ai capi del diodo, basta pensare che la somma dei valori medi delle tensioni ai capi della resistenza  $R$  e ai capi del diodo deve essere uguale al valor medio della tensione applicata, poiché quest'ultimo è nullo, essendo il valor medio di una sinusoide in un periodo, risulta che  $V_{AKm}$  deve essere uguale e di segno opposto al valore di  $V_{Rm}$ .

Da quanto esposto si deduce che la corrente nel circuito e quindi anche la tensione ai capi di  $R$  è caratterizzata da una componente continua, di valore pari al suo valor medio.

Il circuito di fig. 15 produce una corrente e tensione continua, partendo da una f.e.m. alternata.

Nel caso che sia  $E_M > V_S$ , quest'ultima è trascurabile, per cui, con buona approssimazione si può scrivere:

$$I_{AM} \cong \frac{E_M}{R}; \quad V_{RM} \cong E_M$$

**Esempio:**

Si supponga che nel circuito di fig. 15 sia applicata una f.e.m.  $e$  di ampiezza  $E_M = 25 \text{ V}$ , che la resistenza  $R$  sia di  $100 \Omega$  e che l'ascissa del punto  $M$  di fig. 16 valga:

$$V_{AM} \cong V_S = 0,7 \text{ V}$$

Determinare:

1. L'ampiezza di corrente  $I_{AM}$  nel diodo;
2. L'ampiezza del picco di tensione sulla resistenza  $R$ ;
3. Il valor medio della corrente nel circuito e della tensione ai capi di  $R$ .

Dalle relazioni viste in precedenza risulta:

$$I_{AM} = \frac{E_M - V_S}{R} = \frac{25 - 0,7}{100} = 243 \text{ mA}$$

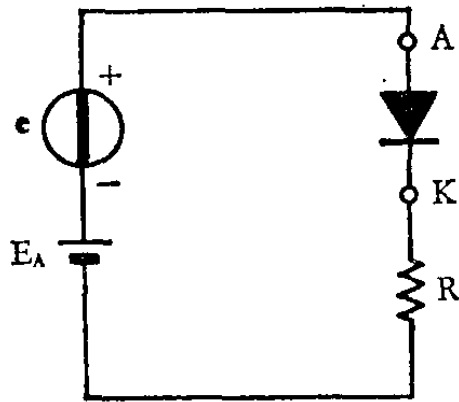
$$V_{RM} = I_{AM} \cdot R = 0,243 \cdot 100 = 24,3 \text{ V}$$

$$I_m = \frac{I_{AM}}{\pi} = \frac{0,243}{3,14} = 77,39 \text{ mA}$$

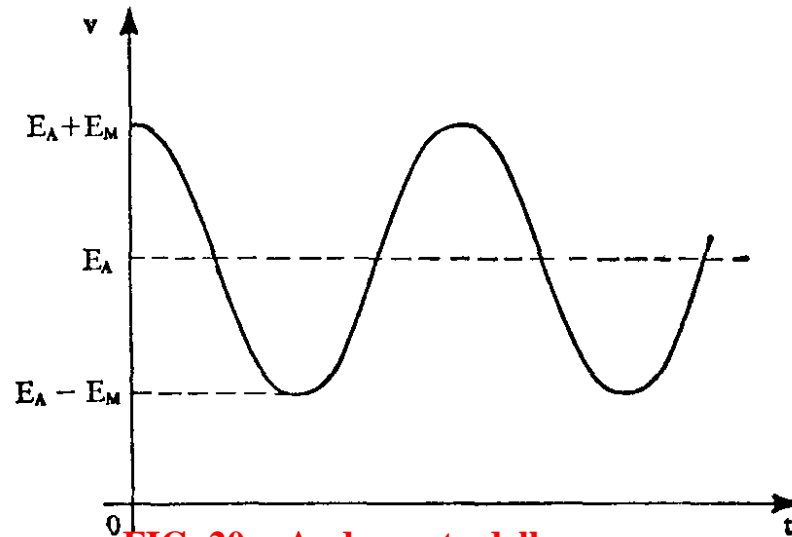
$$V_{Rm} = I_m \cdot R = 7,74 \text{ V}$$

## Diodo con in serie una resistenza, una f.e.m. continua e una alternata.

Esaminiamo ora il circuito di fig. 19, in cui per semplicità, si supposto di avere un diodo a giunzione con caratteristiche ideali come in fig. 14.



**FIG. 19. - Serie di un diodo con una resistenza, una fem continua e una alternata.**



**FIG. 20. - Andamento della tensione applicata nel circuito di fig. 19 nel caso che  $E_M < E_A$ .**

Indicando con  $E_M$  l'ampiezza della componente alternata ( $e = E_M \cdot \cos \omega t$ ), possiamo considerare i seguenti casi:

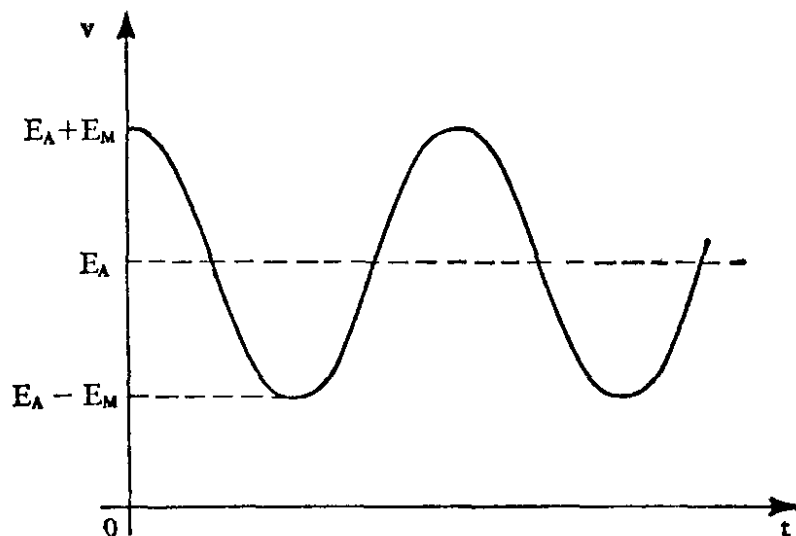
Indicando con  $E_M$  l'ampiezza della componente alternata ( $e = E_M \cdot \cos \omega t$ ), possiamo considerare i seguenti casi:

1)  $E_M < E_A$

In questo caso l'andamento della tensione nel tempo è indicato in fig. 20. Essa oscilla fra i valori  $E_A + E_M$  e  $E_A - E_M$  e, data l'ipotesi, si manterrà sempre positiva. Il diodo risulta polarizzato sempre in senso diretto e quindi si comporta come un cortocircuito; di conseguenza la forma d'onda della tensione ai capi della resistenza  $R$  coincide con quella della f.e.m. applicata e tale sarà anche l'andamento della corrente totale  $i_{At}$  che è espressa analiticamente dalla relazione:

$$i_{At} = I_{A0} + i_A = \frac{E_A}{R} + \frac{E_M}{R} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (16)$$

Nel caso di altri tipi di diodi non è di solito lecito considerare  $V_{AK} = 0$ , quando esso conduce. In tali condizioni l'andamento della corrente  $i_{At}$ , e della tensione  $v_{AK}$  ai capi del diodo può essere dedotto per via grafica.



**FIG. 20. - Andamento della tensione applicata nel circuito di fig. 19 nel caso che  $E_M < E_A$ .**

**Esempio:**

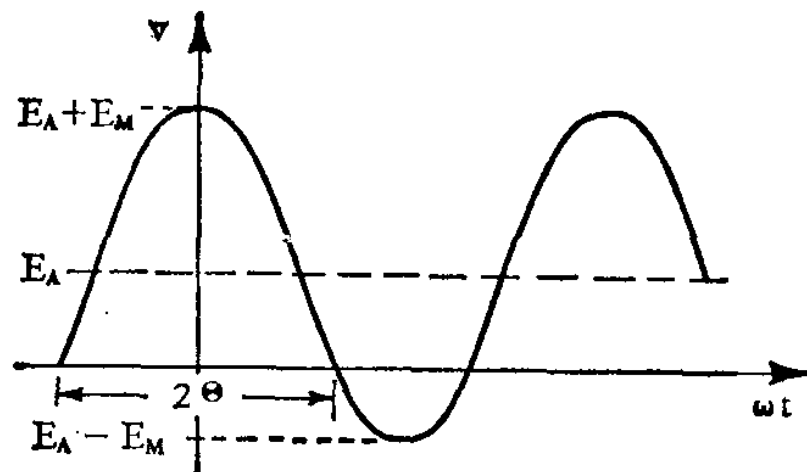
Nel circuito di fig. 19 si abbia  $E_A = 18 \text{ V}$ ,  $e = 5 \cos \omega t$  e  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Si determini l'andamento della corrente

Dalla (16) risulta:

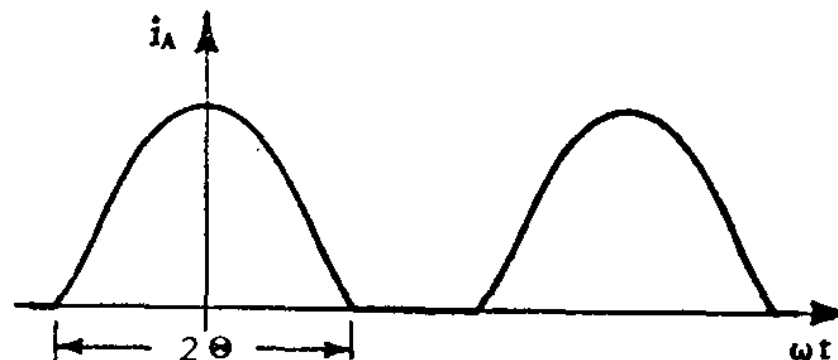
$$i_{At} = \frac{18}{1000} + \frac{5}{1000} \cdot \cos(\omega \cdot t) = 18 + 5 \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ mA}$$

## 2) $E_M > E_A$

In tale caso l'andamento nel tempo della f.e.m. applicata è riportato in fig. 21. Come si può osservare, per un certo intervallo di tempo la tensione  $v$  diventa negativa; in corrispondenza il diodo risulta polarizzato inversamente e quindi non conduce. La conduzione del diodo non avviene perciò per tutto il periodo della f.e.m., alternata, ma solo per una parte di esso. La forma d'onda della corrente che si ottiene è riportata in fig. 22



**FIG. 21. - Andamento della tensione applicata nel circuito di fig. 19 nel caso che  $E_M > E_A$ .**



**FIG. 22. - Forma d'onda della corrente nel circuito di fig. 19 nel caso di  $E_M > E_A$ .**

Si definisce come angolo di circolazione  $2\theta$  della corrente, quella frazione di periodo espressa in gradi per cui il diodo conduce (un intero periodo equivale a  $360^\circ$ ).

Il calcolo dell'angolo di circolazione  $2\theta$  può essere facilmente eseguito considerando la fig. 21 ed osservando che il diodo smette di condurre quando la f.e.m. applicata diventa nulla, cioè per un valore  $\omega t = \theta$  tale che:

$$E_A + E_M \cdot \cos(\theta) = 0$$



Si deduce:

$$\cos(\theta) = -\frac{E_A}{E_M}; \quad \theta = \arccos\left(-\frac{E_A}{E_M}\right) \quad (17)$$

Se come casi particolari si considerano  $E_A = E_M$  ed  $E_A = 0$ , rispettivamente si ha:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \theta &= 2 \cdot \arccos(-1) = 360^\circ && \text{per } E_A = E_M \\ 2 \cdot \theta &= 2 \cdot \arccos(0) = 180^\circ && \text{per } E_A = 0 \end{aligned}$$

Questi risultati sono evidenti se si considera che nel primo caso la f.e.m. applicata si annulla in un solo istante e nel secondo caso che si è in presenza di sola f.e.m. alternata e perciò si ricade nel caso del semplice circuito raddrizzatore esaminato nel paragrafo precedente in cui il diodo conduce solo durante la semionda positiva.

Infine si può notare che, se la f.e.m. continua  $E_A$  è di segno opposto a quella considerata in fig. 19, il  $\cos(\theta)$  è positivo, quindi  $\theta < 90^\circ$  e l'angolo di circolazione della corrente nel diodo risulta inferiore a mezzo periodo della f.e.m. alternata.

**Esempio:**

Nel circuito di fig. 19 si abbia  $E_A = 6 \text{ V}$ ,  $e = 8 \cdot \cos \omega t$  e  $R = 500 \Omega$

Si determini l'angolo di circolazione e il valore di picco della corrente anodica.

Dalla (17) si ha:

$$\theta = \arccos\left(-\frac{E_A}{E_M}\right) = \arccos\left(-\frac{6}{8}\right) = 131^\circ 30'$$

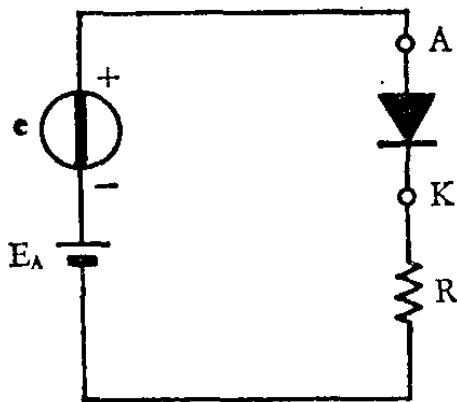
e, poiché l'angolo di circolazione vale  $2\theta$ , é:  $2 \cdot \theta = 2 \cdot (131^\circ 30') = 263^\circ$

Il valore di picco della corrente anodica si ha nell'istante in cui:

$$V_{AK} = V_{AK \max} = E_A + E_M = 6 + 8 = 14 \text{ V}$$

cui corrisponde, nell'ipotesi di un diodo ideale, una corrente:

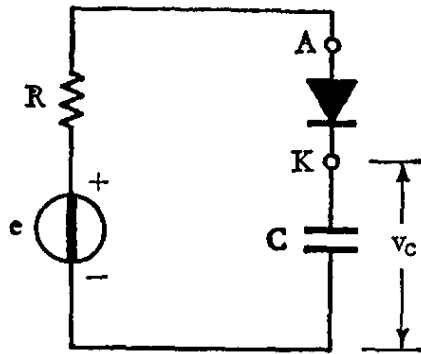
$$I_{A \max} = \frac{V_{AK \max}}{R} = \frac{14}{500} = 28 \text{ mA}$$



**FIG. 19. - Serie di un diodo con una resistenza, una fem continua e una alternata.**

## Diodo con in serie una resistenza, un condensatore e una f.e.m. alternate.

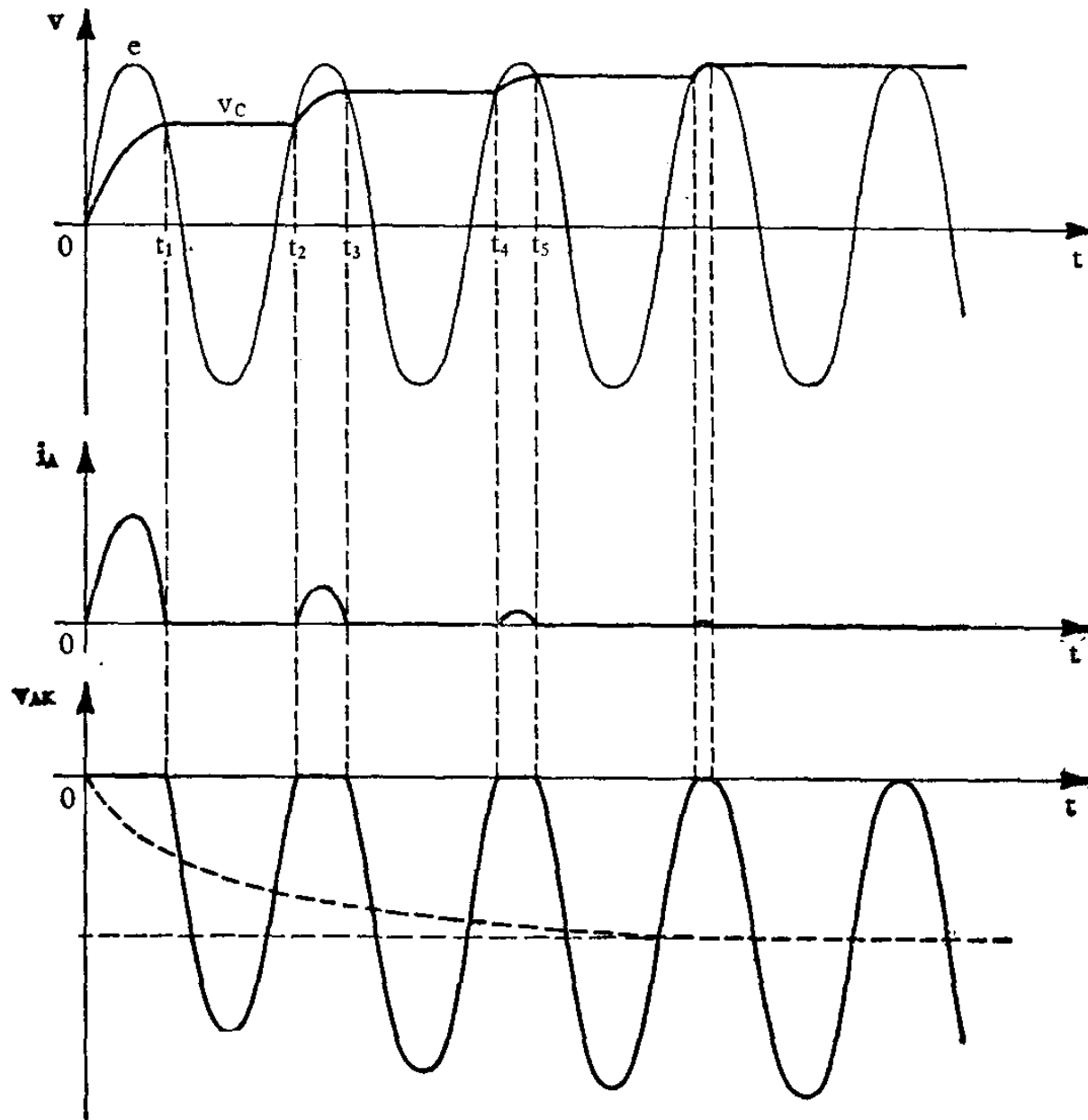
Il caso che ora si esamina è illustrato in fig. 23. La resistenza  $R$  comprende sia la resistenza interna del generatore, sia la eventuale resistenza equivalente del diodo in fase di conduzione, considerando quest'ultimo ideale.



Lo studio del circuito può essere effettuato tenendo presente che istante per istante deve valere la relazione:

$$e = v_R + v_{AK} + v_C \quad (18)$$

**FIG. 23. - Diodo con in serie una resistenza, un condensatore e una f.e.m. alternate.**



**FIG. 24. - Forme d'onda della fem applicata, della tensione ai capi del condensatore, della corrente nel diodo, e della tensione  $V_{ak}$ , nel circuito di fig. 23.**

Supponiamo che all'istante  $t=0$ , la f.e.m.  $e$  sia all'inizio della semionda positiva di tensione e che il condensatore  $C$  sia scarico ( $v_C = 0$ ) come indicato in fig. 24. A partire da tale istante, la f.e.m.  $e$  inizia ad essere positiva e poichè  $v_C = 0$ , il diodo risulta polarizzato positivamente e  $v_{AK}$  diventa nulla, avendo supposto il diodo ideale; la corrente comincia a circolare nel diodo e va a caricare il condensatore. Man mano che quest'ultimo si carica, la tensione ai suoi capi cresce partendo da zero.

La fase di carica del condensatore dura fino a che circola corrente, ma, essendo in questa fase  $v_{AK} = 0$  e  $v_R = R \cdot i_A$ , dalla (18) si ricava:

$$e = R \cdot i_A + v_C$$

$$i_A = \frac{e - v_C}{R} \quad (19)$$

Si deduce quindi che la corrente nel circuito si annulla nell'istante in cui la tensione  $v_C$  raggiunge il valore della f.e.m. applicata  $e$ . Tale istante  $t_1$  dipende dalla rapidità con cui si carica il condensatore e quindi dai valori della capacità  $C$  e della resistenza  $R$ .

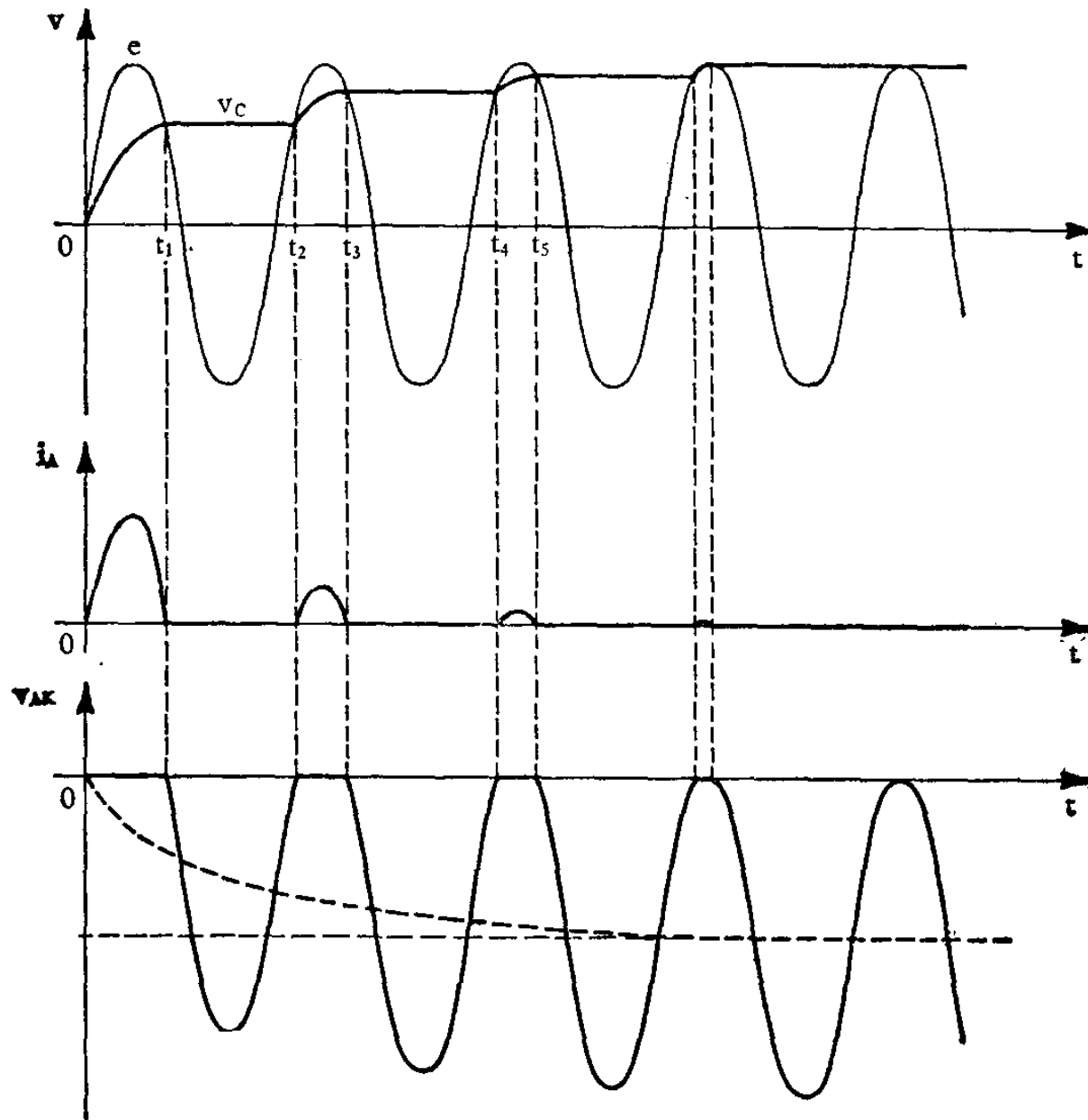
Negli istanti successivi la f.e.m.  $e$  diventa minore di  $v_C$ ; poiché in base alla (19) la corrente dovrebbe diventare negativa e quindi cambiare di verso, ne consegue che la conduzione nel diodo cessa. In questa fase è  $v_R = 0$  e la (18) può essere scritta:

$$e = v_{AK} + v_C$$

da cui:

$$v_{AK} = e - v_C \quad (20)$$

Ciò conferma che il diodo è polarizzato inversamente e quindi si comporta come un circuito aperto. In tale intervallo di tempo il condensatore resta carico al valore  $v_{CI}$  raggiunto all'istante  $t_1$ . La conduzione del diodo riprende all'istante  $t_2$  in cui la f.e.m.  $e$  supera il valore di  $v_C$ . Infatti dalla (20) risulta che da tale istante in poi la  $v_{AK}$  diventa positiva e quindi il diodo ritorna ad essere polarizzato direttamente. La corrente riprende a circolare nel diodo e quindi il condensatore a ricaricarsi; la tensione  $v_C$  di conseguenza riprende a crescere fino a che non ritorna di nuovo uguale ad  $e$  all'istante  $t_3$  e così di seguito.



**FIG. 24. - Forme d'onda della fem applicata, della tensione ai capi del condensatore, della corrente nel diodo, e della tensione  $v_{AK}$ , nel circuito di fig. 23.**

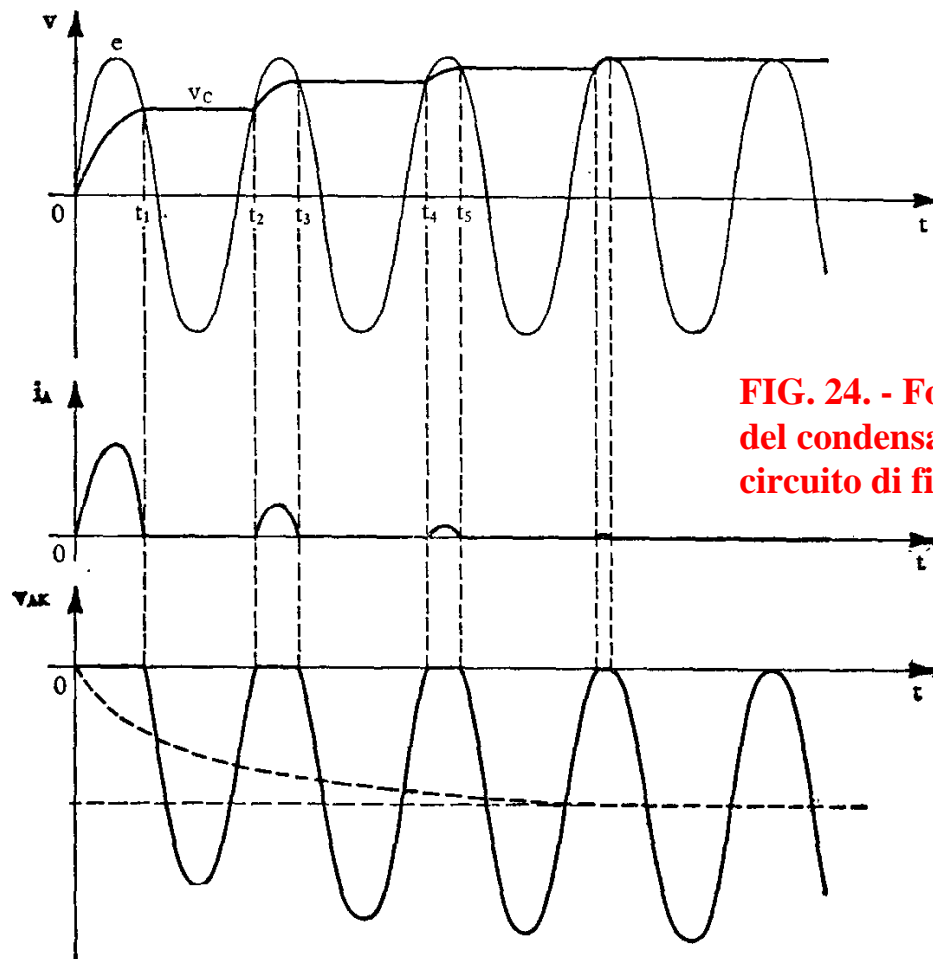
Come si vede dall'andamento di fig. 24 la tensione  $v_C$  ad ogni periodo della f.e.m. applicata subisce un incremento e tende al valore di cresta  $E_M$ , che raggiunge dopo un certo numero di periodi che dipende dai valori di  $C$  e  $R$ . Si può anche notare che gli intervalli di carica del condensatore e quindi gli angoli di circolazione della corrente  $i_A$  diminuiscono ad ogni periodo, come pure l'ampiezza dei picchi di corrente; tale fatto può essere dedotto dalla (19), notando che le differenze  $e - v_C$  si vanno riducendo ad ogni periodo. Quando il condensatore ha terminato la sua carica, cessa anche la circolazione della corrente; infatti dalla (20) si osserva che quando  $v_C = \frac{E_M}{38}$ , la  $v_{AK}$  non diventa mai positiva.

Si può infine notare che la massima tensione inversa  $V_i$  che viene applicata al diodo viene raggiunta nell'istante in cui la  $e$  è al massimo valore negativo  $-E_A$ , quando il condensatore è carico al valore  $E_M$ . In tal caso dalla (20) si ricava:

$$V_i = -E_M - E_M = -2 \cdot E_M$$

cioè la tensione massima inversa uguaglia il valore picco-picco della f.e.m. applicata.

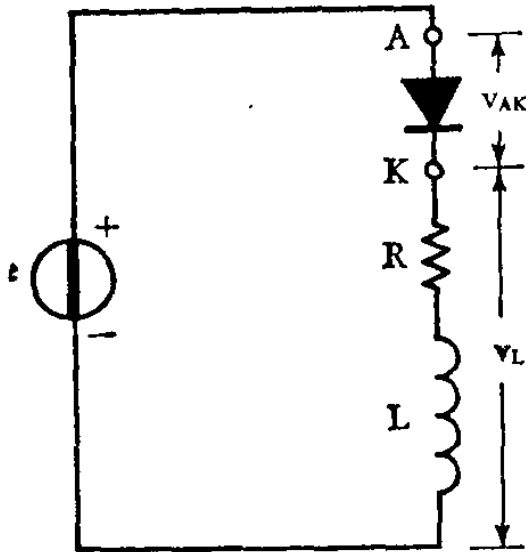
La relazione (20) permette anche di determinare l'andamento nel tempo della tensione  $v_{AK}$  ai capi del diodo, riportato sempre in fig. 24.



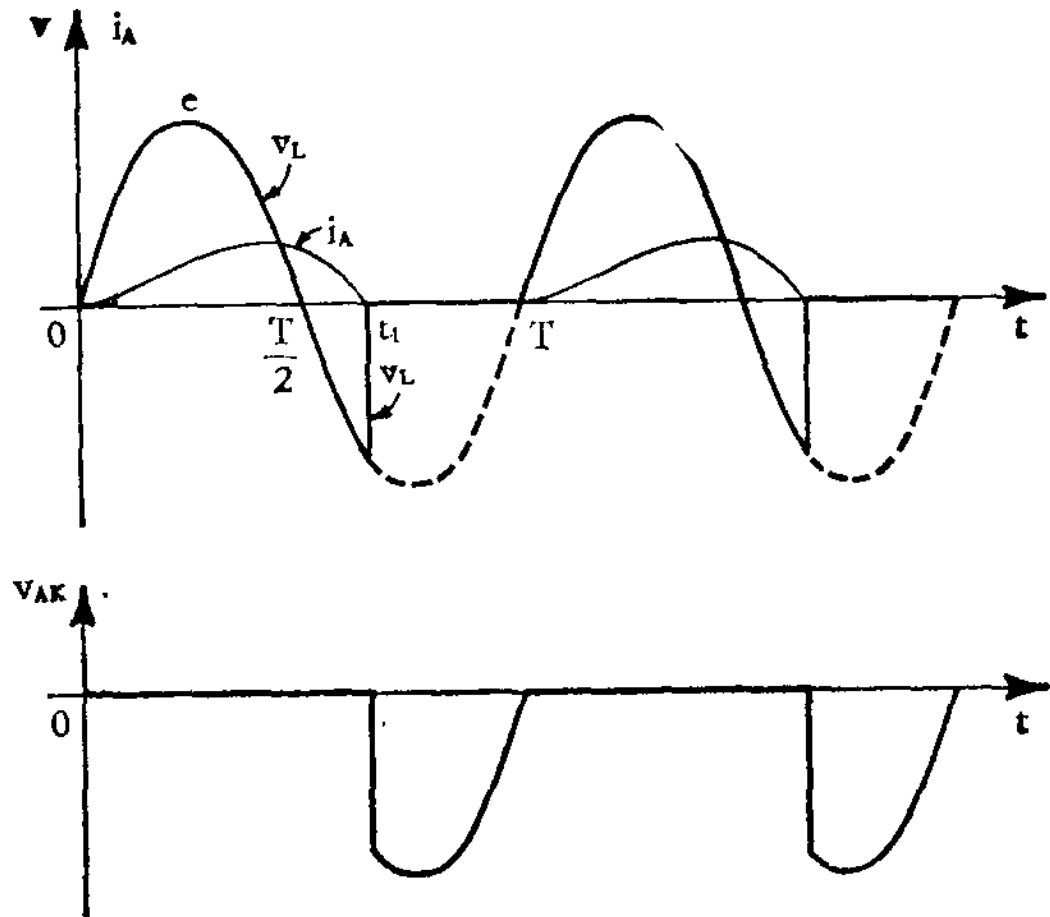
**FIG. 24. - Forme d'onda della fem applicata, della tensione ai capi del condensatore, della corrente nel diodo, e della tensione  $v_{AK}$ , nel circuito di fig. 23.**

### Diodo con in serie una resistenza, una induttanza e una f.e.m. alternata.

Il circuito in esame è illustrato in fig. 25; normalmente la resistenza  $R$  è quella propria della bobina di induttanza  $L$  e il tutto costituisce il carico del circuito. Il generatore e il diodo, per semplicità, vengono supposti ideali.



**FIG. 25. - Diodo con in serie una induttanza, una resistenza e una f.e.m. alternata.**



**FIG. 26. - Forme d'onda della tensione applicata, di quella ai capi del carico, della corrente e della  $V_{AK}$  ai capi del diodo nel circuito di fig. 25.**



Come nel paragrafo precedente, consideriamo come istante iniziale quello in cui la f.e.m. comincia a diventare positiva (fig. 26). A partire da tale istante il diodo risulta polarizzato direttamente e quindi si comporta come un cortocircuito; tutta la f.e.m. si trova allora applicata al carico e la tensione  $V_L$  ai capi di esso coincide con la f.e.m.  $e$ .

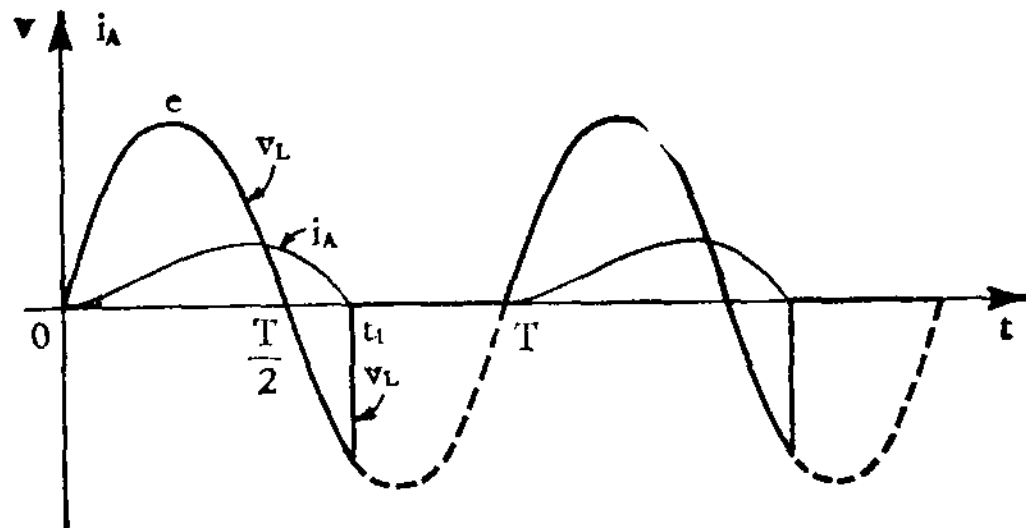
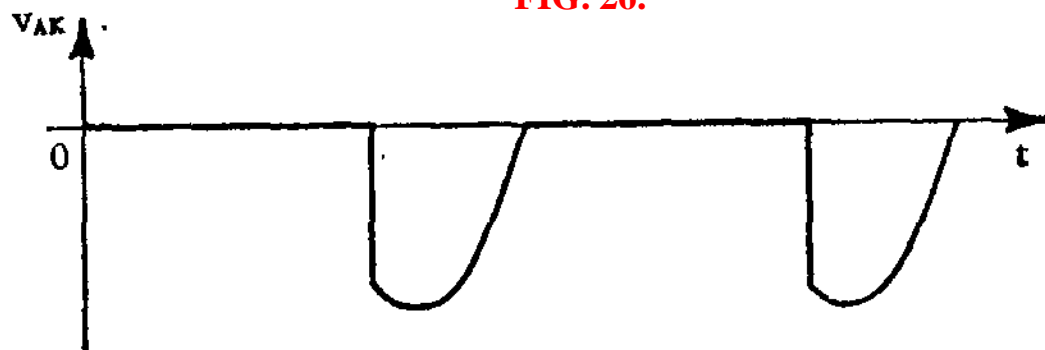


FIG. 26.



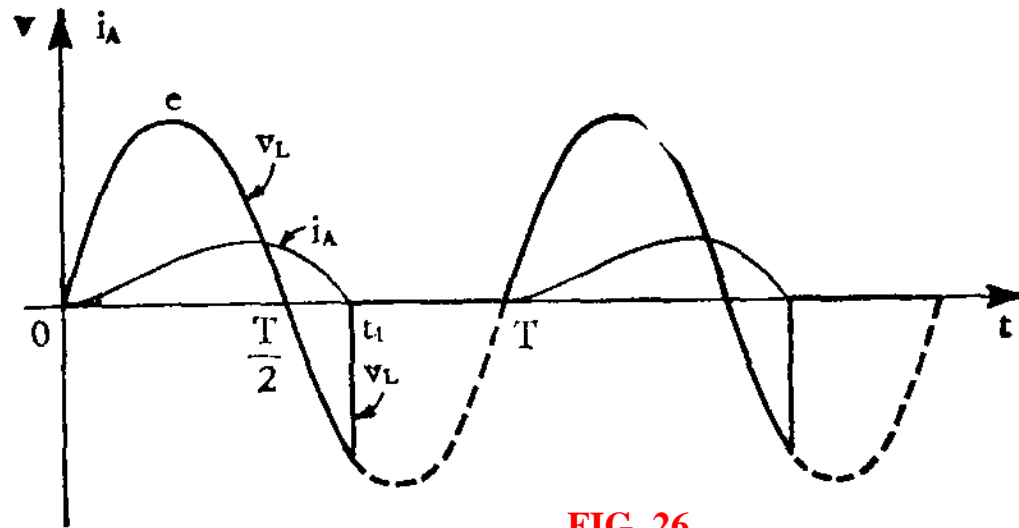
La corrente nel diodo tende ad aumentare insieme alla f.e.m. ma viene frenata in questo aumento dall'induttanza, la quale si oppone sempre alla variazione di corrente che l'attraversa, perciò questa aumenta con un certo ritardo rispetto alla tensione applicata; tale ritardo dipendendo dai valori di  $L$  e  $R$ . Viceversa, quando la f.e.m.  $e$  tende a diminuire, l'induttanza si oppone alla diminuzione di corrente, per cui anche quando la  $e$  ritorna al valore zero, dopo mezzo periodo, la corrente circola ancora per effetto della f.e.m. che si genera nell'induttanza. La tensione  $v_{AK}$  si mantiene nulla fino a che circola corrente, per cui, essendo valida istante per istante la relazione:

$$e = v_{AK} + v_L \quad (21) \quad 41$$

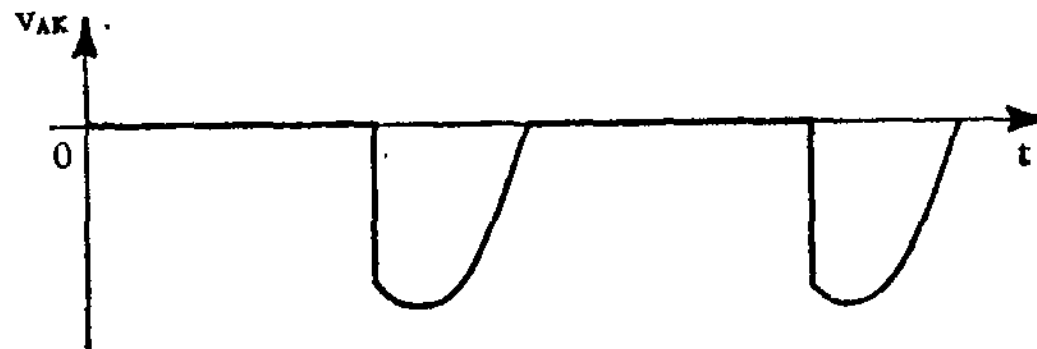
per tutto il periodo per cui circola la corrente si ha  $v_L = e$ .

La tensione ai capi del carico dall'istante  $T/2$  a  $t_1$  (fig. 26) diventa negativa; all'istante  $t_1$  la corrente si annulla, la tensione  $V_L$  si riduce bruscamente a zero, mentre dalla (21) risulta  $v_{AK} = e$ ; tale condizione si mantiene fino a che, trascorso un periodo, la f.e.m.  $e$  riprende valori positivi e il fenomeno ora descritto si ripete.

Gli andamenti delle tensioni e della corrente sono riportati in fig. 26, da cui si può vedere che la massima tensione inversa  $V_i$  cui si trova soggetto il diodo, raggiunge il valore  $E_M$ .



**FIG. 26.**



## Diodo Zener.

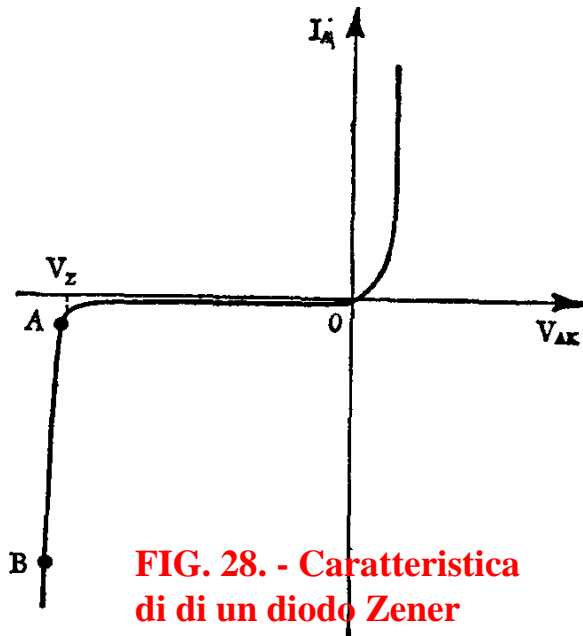
Si è già visto che un diodo a giunzione polarizzato inversamente è percorso da una debolissima corrente inversa, fino a che la tensione non raggiunge un certo valore, chiamato *tensione di Zener*, oltre il quale si ha un fenomeno di moltiplicazione a valanga delle coppie elettroni-lacune, che provoca un brusco aumento di corrente.

Si è già detto che questo fenomeno non è di per se distruttivo se il riscaldamento della giunzione viene contenuto e, in tal caso riducendo la tensione inversa, il diodo riprende le sue proprietà raddrizzatrici. *L'effetto Zener* può essere però sfruttato per ottenere delle tensioni costanti fra i due elettrodi al variare della corrente inversa che circola nel diodo, sfruttando la parte di caratteristica oltre il punto di Zener, naturalmente limitando la massima potenza dissipata entro valori consentiti dal diodo. I diodi usati a tale scopo sono chiamati *diodi Zener* e sono costruiti dosando opportunamente il drogaggio del semiconduttore che di solito è il silicio.

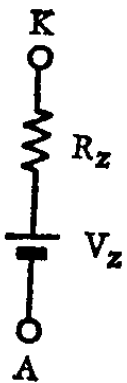
Il simbolo con cui viene rappresentato un diodo Zener è indicato in fig. 27.



**FIG. 27. - Rappresentazione schematica di un diodo Zener.**



**FIG. 28. - Caratteristica di di un diodo Zener**



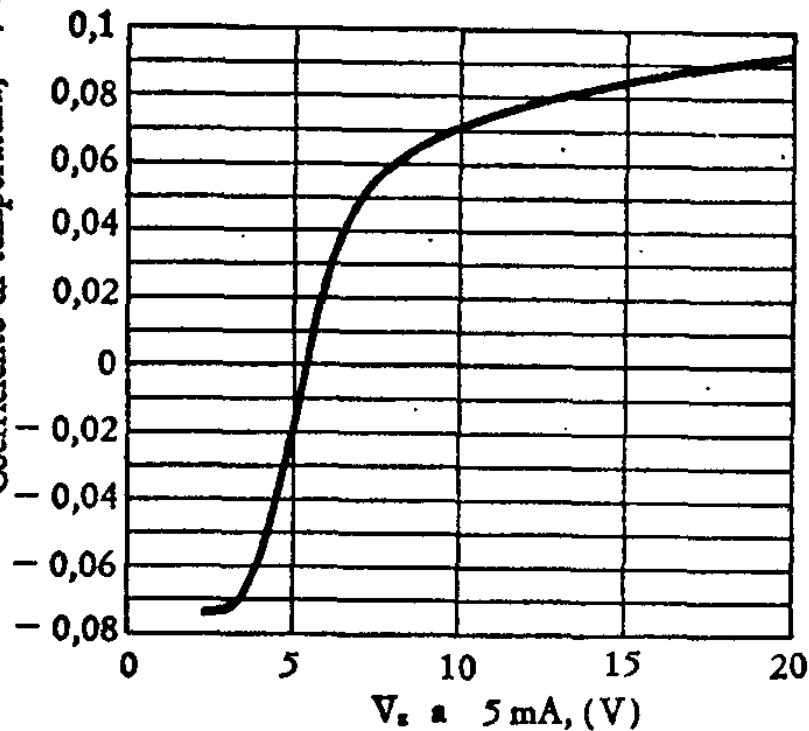
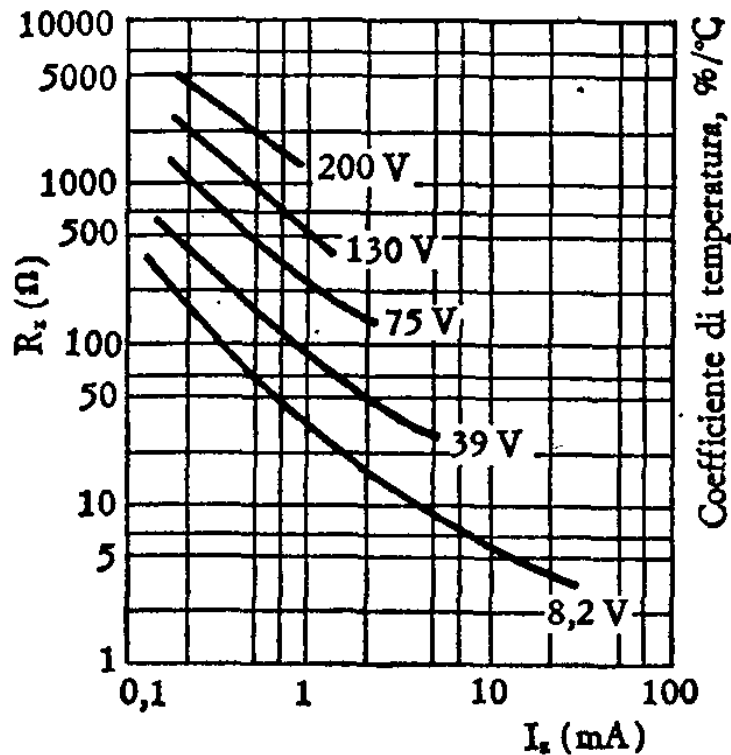
**FIG. 29. - Circuito equivalente di un diodo Zener.**

I dati più importanti riguardanti i diodi Zener sono la *tensione di Zener*  $V_Z$ , e la massima potenza dissipabile. Si trovano in commercio diodi Zener con valori di  $V_Z$ , compresi fra 2,4 V e 200 V e con potenze massime dissipabili da 1/4 W fino a 50 W.

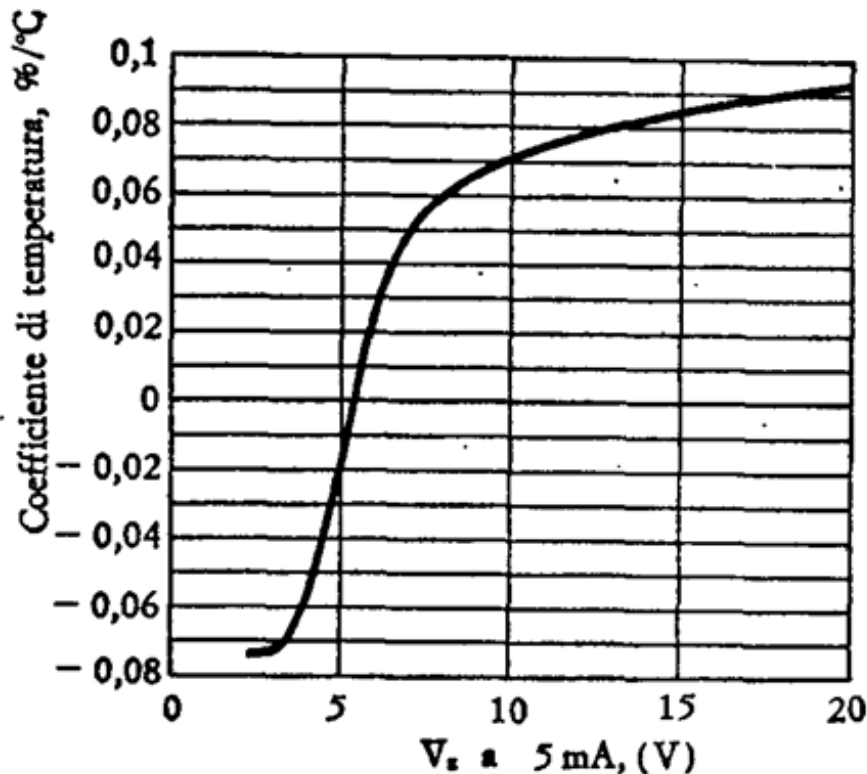
La caratteristica tipica di un diodo Zener è riportata in fig. 28; in essa il tratto utile è limitato dal punto **A** che è poco oltre il punto di Zener, ovvero prossimo al ginocchio della caratteristica e dal punto **B**, cui corrisponde la massima potenza dissipabile. Come si può notare, la caratteristica utile non è esattamente parallela all'asse delle ordinate, ma ha una leggera pendenza e quindi il diodo è caratterizzato da una certa resistenza differenziale  $R_Z$ , che nei casi più comuni è dell'ordine di pochi ohm. Normalmente tale resistenza differenziale è fornita dal costruttore in due punti della caratteristica, uno in corrispondenza del punto **A** e un altro in un punto intermedio al tratto utile **AB**.

In base alle considerazioni ora svolte, il circuito equivalente di un diodo Zener può essere rappresentato come in fig. 29, in cui l'andamento di  $R_Z$  in funzione della corrente che attraversa il diodo, è riportato in fig. 30.

La *tensione di Zener*  $V_Z$  è però influenzata dalla temperatura della giunzione; la sua variazione può essere espressa in  $\%/^{\circ}\text{C}$  o in  $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  e risulta funzione sia della tensione nominale di Zener sia della temperatura della giunzione, come indicato in fig. 31. Ad esempio un diodo con  $V_Z = 9,1 \text{ V}$ , risulta avere un coefficiente di temperatura di circa  $0,07 \%/^{\circ}\text{C}$ , per cui nel caso di una variazione termica di  $20^{\circ}\text{C}$ , la variazione di  $V_Z$  risulta di  $0,07 \cdot 20 = 1,4 \%$ , cioè di  $0,127 \text{ V}$ .



Come si può notare dalla curva di fig. 31, il coefficiente di temperatura dipende molto dalla tensione nominale di Zener e al di sotto di 5,5 V è negativo, cioè  $V_Z$ , diminuisce all'aumentare della temperatura, mentre al di sopra di tali tensioni è positivo. Nell'intorno di  $V_Z = 5$  V, il coefficiente di temperatura è quasi nullo; quindi i diodi Zener in-orno ai 5 V hanno le minime variazioni con la temperatura e perciò sono di uso più comune. Nel caso si abbia necessità di valori  $V_Z$ , più elevati si possono usare uno o più diodi in serie, oppure diodi Zener compensati in temperatura. La compensazione può essere eseguita ponendo in serie allo Zener un diodo a giunzione polarizzato direttamente e quindi avente coefficiente di temperatura negativo.



**FIG. 31. - Coefficiente di temperatura di un diodo Zener, in funzione della tensione di Zener  $V_Z$ .**

## Dati caratteristici di un diodo Zener.

I dati caratteristici di un diodo Zener, che si trovano sui manuali, sono:

1. tensione nominale di Zener  $V_Z$  ;
2. massima potenza dissipabile;
3. resistenza differenziale in uno o più punti della caratteristica;
4. coefficiente di temperatura.

A titolo di esempio si riportano nella tabella che segue i dati caratteristici di alcuni diodi Zener.

Tipo	Tensione di Zener (V)	Max potenza dissip. (W)	Resist. differ. in prossimità del ginocchio $\Omega$	Resist. differ. per $I_z = \dots$ $\Omega$	Coeff. di temp. ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )
1N957	6,8	0,4	700	5,5 ÷ 18,5 mA	—
1N3825	4,7	1	500	8 ÷ 53 mA	- 0,02
1N3048	150	1	6000	1000 ÷ 1,7 mA	0,095
1N2804	6,8	50	70	0,2 ÷ 1.85 A	0,04
1N2846	200	50	600	100 ÷ 65 mA	0,1

I diodi Zener, trovano larga applicazione come stabilizzatori di tensione, negli alimentatori.