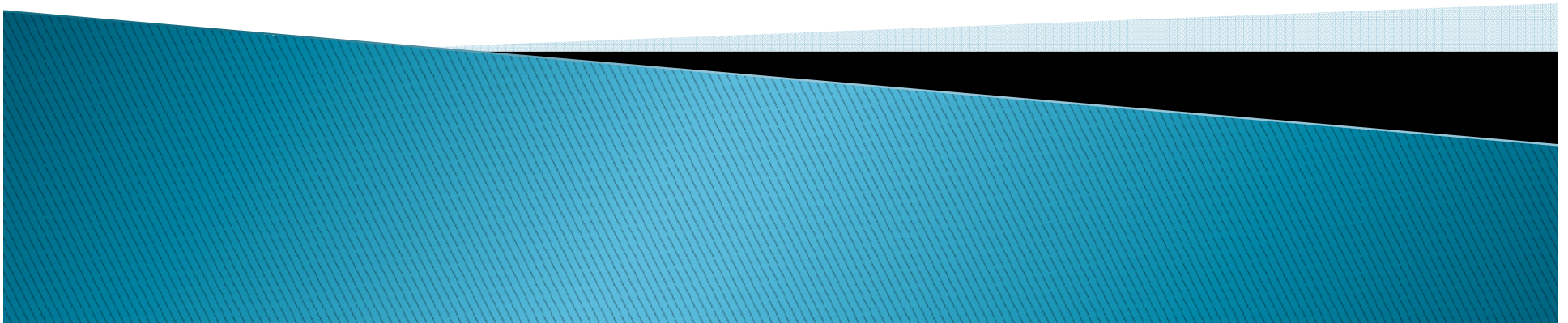


I SEMICONDUTTORI

I semiconduttori hanno un comportamento intermedio fra quello dei **conduttori** e quello degli **isolanti**. Presentano una **conduttività** intermedia fra quella dei conduttori e degli isolanti e che cresce all'aumentare della temperatura. Trovano impiego nella costruzione dei circuiti integrati digitali e analogici.

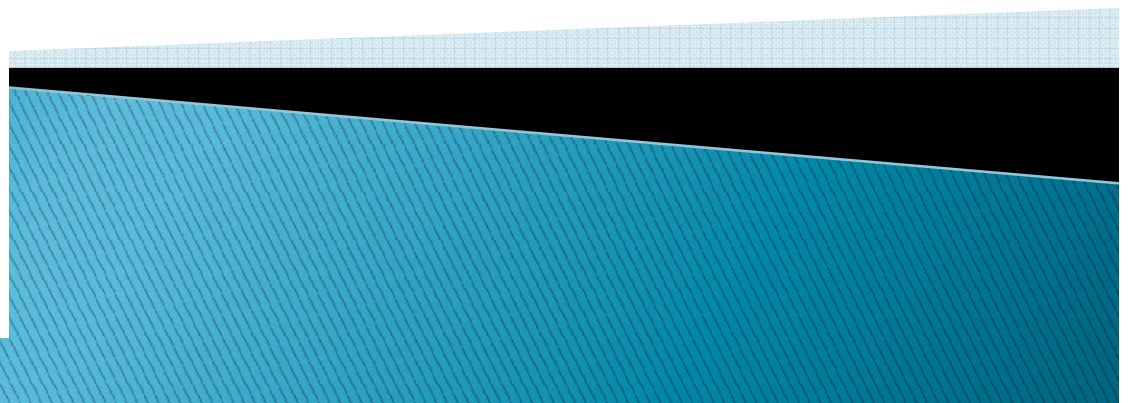
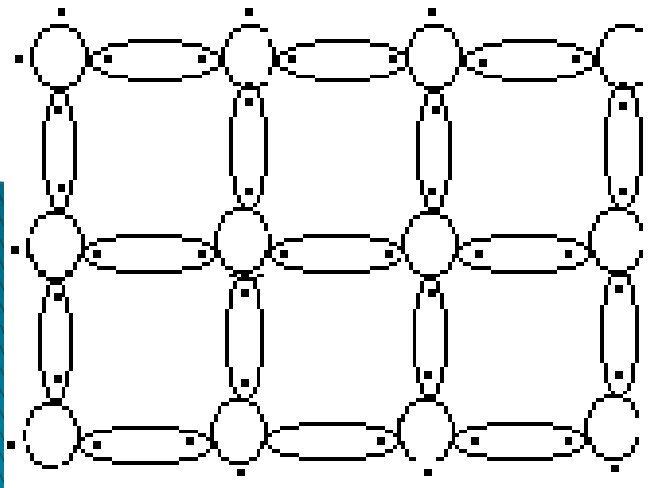
I principali semiconduttori sono : il **silicio** (Si) , il **germanio** (Ge) e l' **arseniuro di gallio** (GaAs).

I loro atomi costituiscono uno schema cristallino, noto come reticolo a facce centrate, nel quale gli atomi sono tenuti a posto dai legami covalenti.



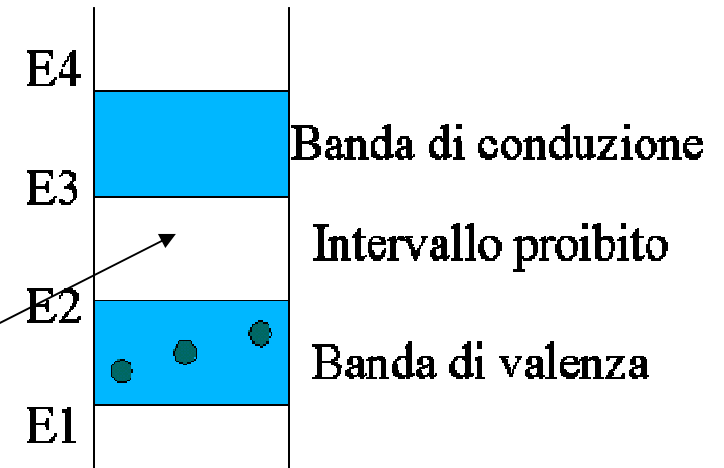
Negli atomi di Si e di Ge il livello energetico più esterno contiene quattro elettroni e per raggiungere l'ottetto elettronico, tende ad acquistarne altri quattro. Ogni atomo di Si o di Ge mette in compartecipazione i suoi quattro elettroni più esterni formando quattro legami covalenti come si può vedere nella struttura cristallina in cui ogni atomo si lega (mediante i quattro legami covalenti) con altri quattro atomi uguali.

A temperatura ambiente ci sono sempre degli elettroni che si liberano dal loro legame (se così non fosse, germanio e silicio sarebbero degli isolanti perfetti) e applicando tensione si darà sempre luogo a una piccola corrente detta corrente intrinseca dovuta alla concentrazione dei portatori di carica.



I semiconduttori sono, infatti, caratterizzati dall'aver una banda proibita () relativamente stretta e, già a temperatura ambiente, un certo numero di elettroni salta dalla banda di valenza a quella di conduzione. (*

è dell'ordine dell' eV

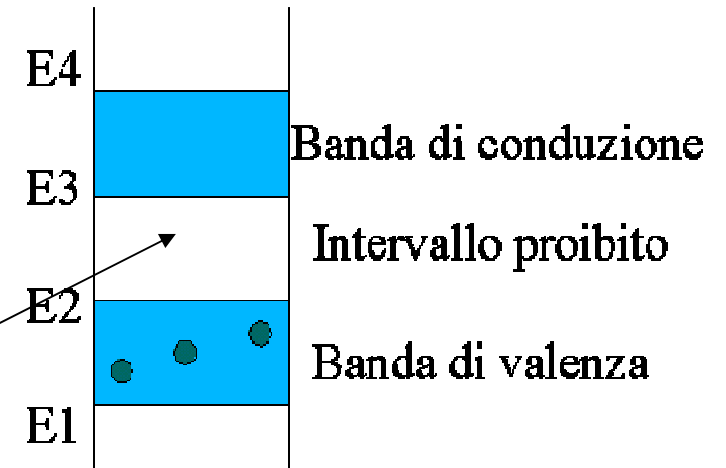


(*) L'ampiezza della banda energetica che vi è tra la banda di valenza e la banda di conduzione viene indicata salto energetico o banda proibita o intervallo proibito. Nei semiconduttori il salto è relativamente basso per cui alcuni elettroni, acquistata l'energia necessaria (dovuta ad es. al calore), possono raggiungere la banda di conduzione diventando elettroni liberi e lasciando un numero corrispondente di lacune, che a loro volta, possono essere colmate da altri elettroni della banda di valenza. In definitiva nel semiconduttore vi è la disponibilità sia di portatori di carica negativa che positiva.

Quanto maggiore è il salto energetico tanto più il semiconduttore mantiene le proprie caratteristiche alle alte temperature. Il Ge può lavorare sino a 100°C, il Si sino a 200°C, e GaAs sino a 300°C

I semiconduttori sono, infatti, caratterizzati dall'aver una banda proibita () relativamente stretta e, già a temperatura ambiente, un certo numero di elettroni salta dalla banda di valenza a quella di conduzione.*

è dell'ordine dell' eV



Quando un elettrone si libera passando nella banda di conduzione lascia un posto vuoto definito buco o lacuna, che verrà occupato prima o poi da un altro elettrone che passa nelle vicinanze, ripristinando così il legame covalente. Per cui:

quando un elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione si forma una coppia Elettrone-lacuna (**generazione**)

quando un elettrone libero ricade nella banda di valenza si ha la scomparsa di una coppia (**ricombinazione**).

In un semiconduttore si ha una continua generazione di coppie elettrone libero – lacuna e contemporaneamente la ricombinazione.

Il numero di coppie può :

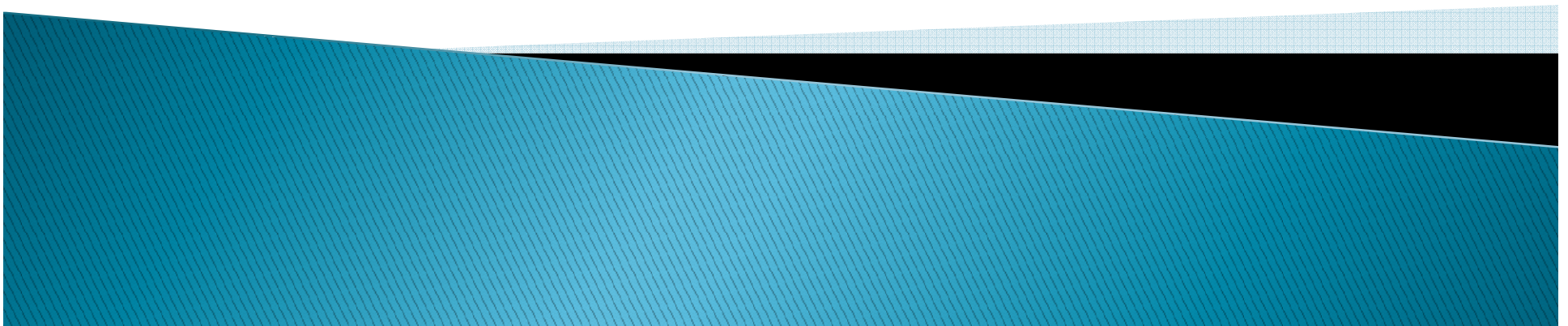
aumentare nel tempo (la generazione predomina sulla ricombinazione)

diminuire nel tempo (la ricombinazione predomina sulla generazione)

rimanere inalterato nel tempo (ricombinazione e generazione si equilibrano).

La concentrazione delle coppie elettrone-lacune aumenta con l'aumentare della temperatura in quanto la generazione predomina sulla ricombinazione al crescere della temperatura.

Ma l'aumento della generazione fa aumentare anche la ricombinazione per cui si arriva ad un nuovo stato di equilibrio caratterizzato però da una maggiore concentrazione di coppie.

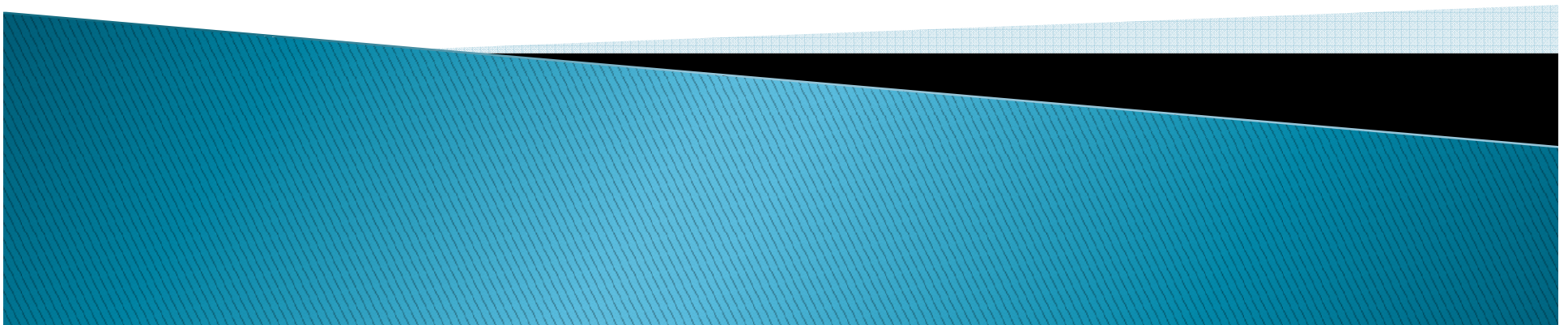


In un semiconduttore intrinseco, ossia non drogato e nella condizione di equilibrio dinamico, la concentrazione di elettroni liberi n_i eguaglia quella delle lacune p_i e cresce, come abbiamo già detto, all'aumentare della temperatura. Per cui

$$n \cdot p = n_i^2 \quad \text{legge dell'azione di massa}$$

Se viene drogato con una concentrazione di atomi donatori $N_d \approx n$

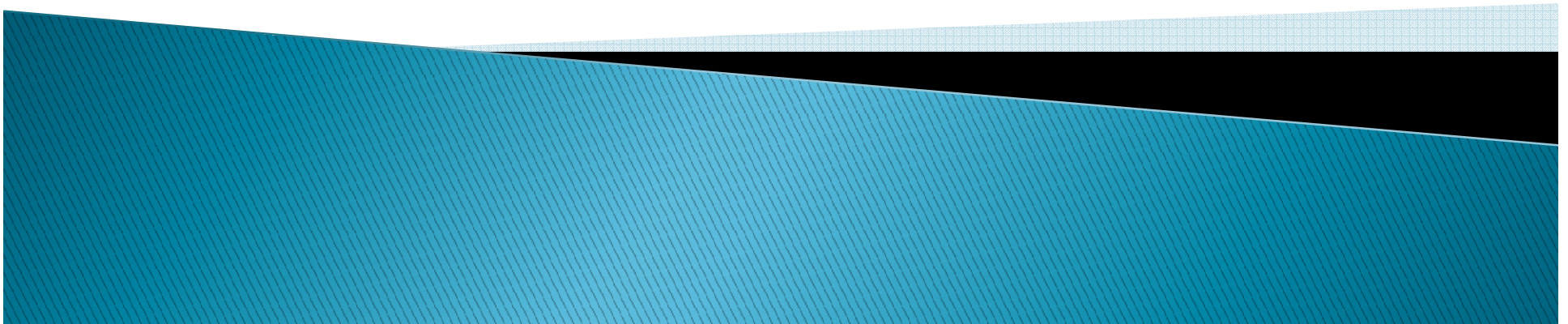
► $p = n_i^2 / N_d$



L'elettrone libero e la lacuna vengono definiti **portatori di carica** e possono muoversi all'interno del materiale trasportando con sé la carica elettrica posseduta. ($q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

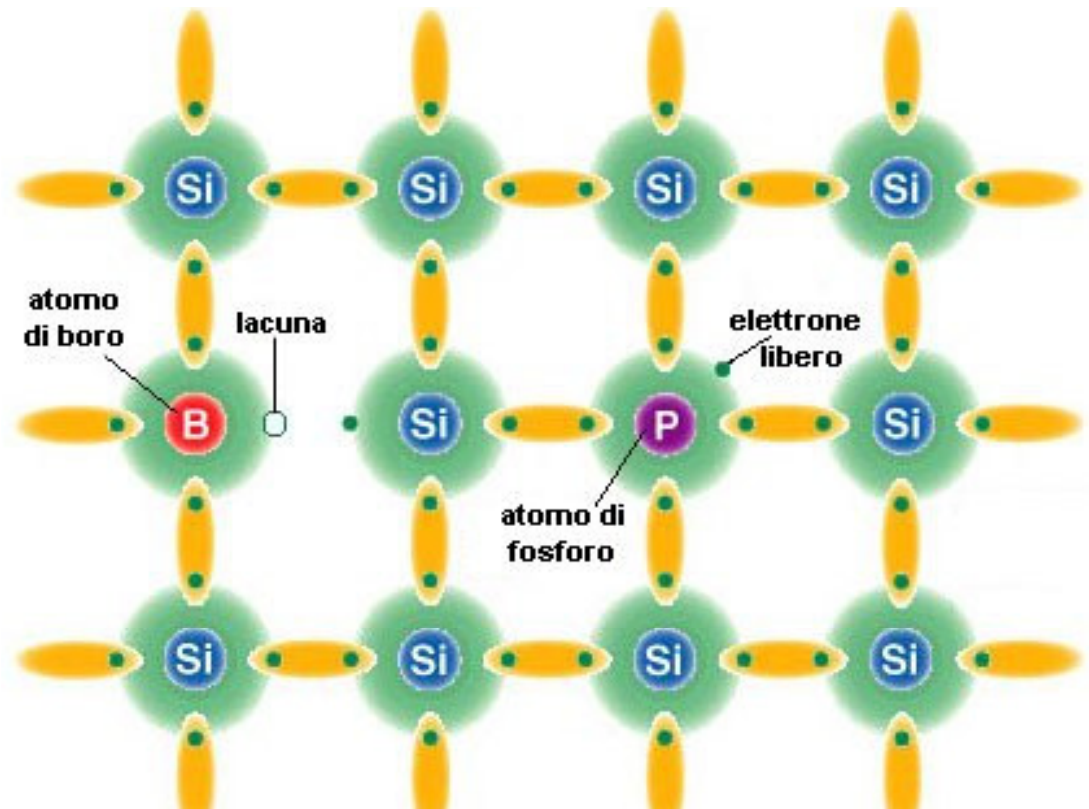
Se l'elettrone si sposta in un senso andando ad occupare posti vuoti, le lacune si postano in senso opposto.

*La **resistività** di un semiconduttore è legata alla concentrazione dei portatori di carica, sia elettroni liberi che lacune; in particolare essa **diminuisce** con l'aumentare di dette concentrazioni ossia **con l'aumentare della temperatura** a differenza dei conduttori in cui la resistività aumenta e nei quali la corrente è dovuta solo al movimento di elettroni liberi.*



Un cristallo puro di Silicio può essere “drogato” in due modi: drogaggio di tipo p e drogaggio di tipo n .

Es. Silicio (tetravalente) drogato con Boro (trivalente) e Fosforo (pentavalente)



Il drogaggio con atomi trivalenti (**atomi accettori**: alluminio, boro, gallio, indio) provoca un aumento delle lacune e viene denominato drogaggio di **tipo p**.

Il drogaggio con atomi pentivalenti (**atomi donatori**: fosforo, antimonio) provoca un aumento degli elettroni (portatori maggioritari) e viene denominato drogaggio di **tipo n**.

Si definisce giunzione P–N la superficie di separazione fra due zone di materiale semiconduttore drogate di tipo opposto (che si incontrano nello stesso cristallo in modo da non esserci interruzione nella struttura cristallina).

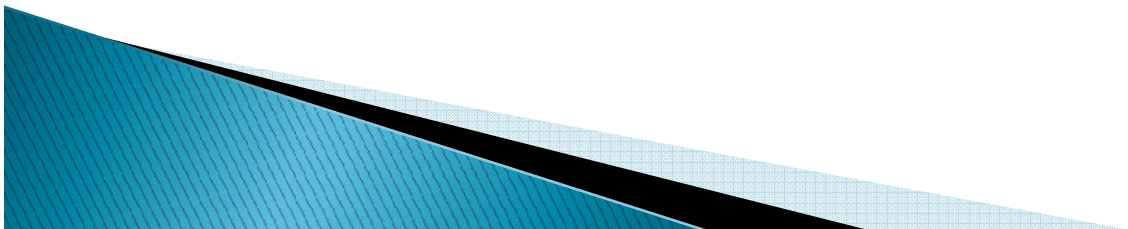
In altre parole la giunzione va realizzata drogando un unico pezzo di semiconduttore e non accoppiando due pezzi di semiconduttore distinti e drogati in modo diverso.

Nella zona di tipo P troviamo:

- una grande quantità di lacune;
- una piccola quantità di elettroni
- una grande quantità di ioni negativi (dovuti agli atomi accettori detti cariche stazionarie negative) che bilanciano le lacune per rendere la zona elettricamente neutra;

Nella zona di tipo N troviamo invece:

- una piccola quantità di lacune;
- una grande quantità di elettroni
- una grande quantità di ioni positivi (dovuti agli atomi donatori detti cariche stazionarie positive) che bilanciano gli elettroni;

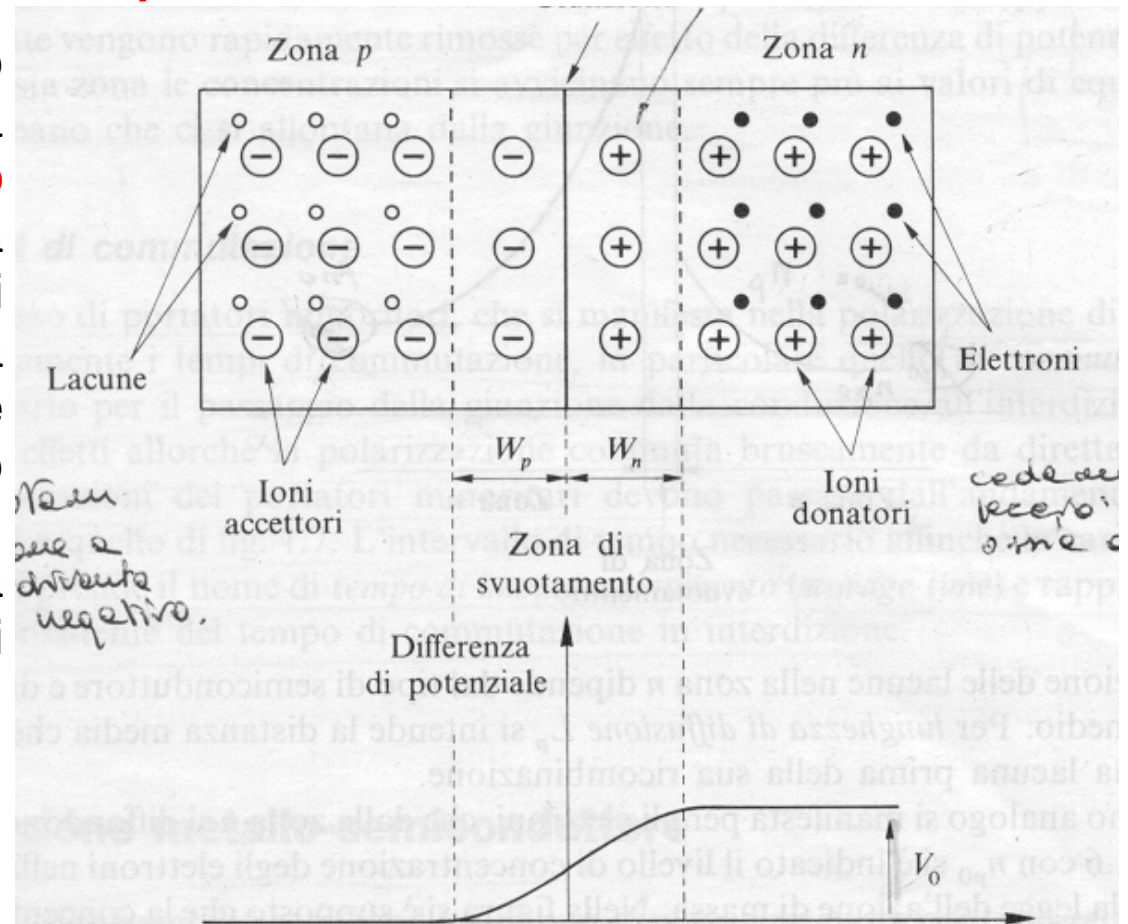


Nella regione a cavallo della giunzione si manifesta il fenomeno della diffusione:

le lacune, numerose nella zona P, tendono a diffondersi nella zona N, dove la loro concentrazione è molto più bassa, e gli elettroni al contrario tendono a diffondersi dalla zona N a quella P.

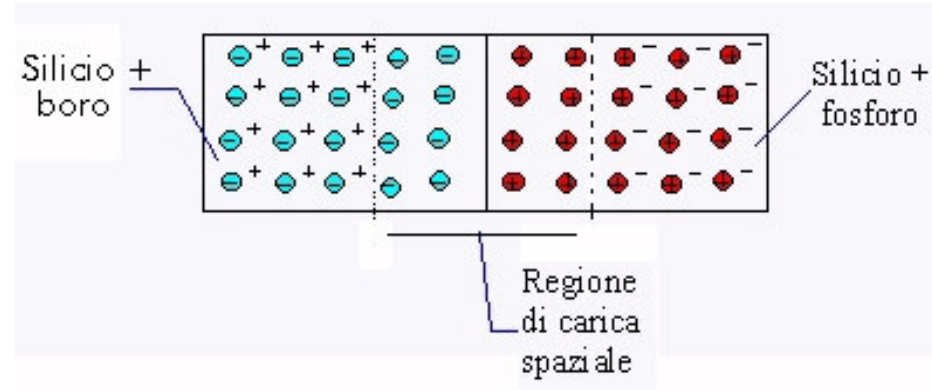
Si provoca così uno sbilanciamento della neutralità elettrica che crea un **campo elettrico** diretto verso sinistra che produce una differenza di potenziale V_0 che va via via aumentando con l'aumentare delle cariche che si accumulano ai lati della giunzione stessa.

Lacune ed elettroni tendendo a ricombinarsi lasciano ai due lati della giunzione strati di ioni negativi nella zona P e ioni positivi nella zona N.

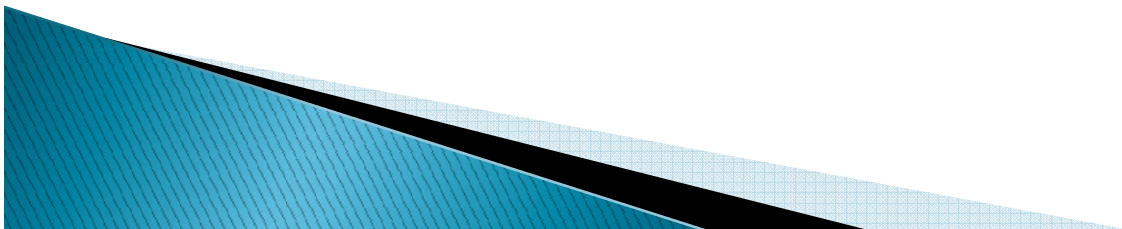


Gli elettroni (ad es.) vengono spinti dalla diffusione verso sinistra (**corrente di diffusione**) ma la forza esercitata dal campo elettrico li spinge in senso contrario (verso destra) (**corrente di deriva**).

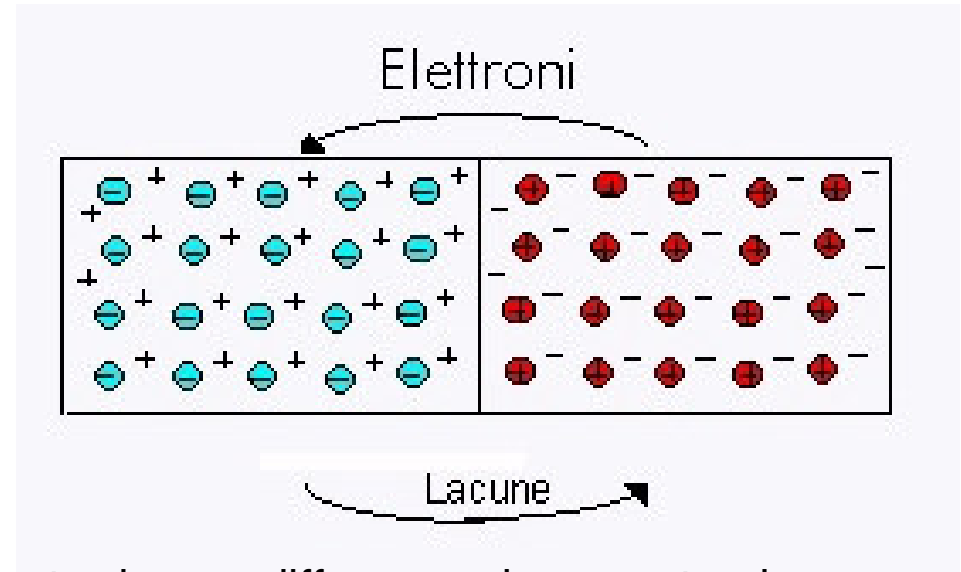
Si perviene ad un equilibrio quando le due correnti quella di diffusione e quella di deriva, deboli e di verso opposto, si annullano a vicenda.



La zona a cavallo della giunzione in cui è avvenuta la ricombinazione risulta essere così priva di portatori liberi e si comporta da isolante. Viene detta **zona di svuotamento** e ai suoi capi si è stabilita una differenza di potenziale V_0 detta barriera di potenziale che tende ad opporsi ad un ulteriore passaggio dei portatori maggioritari (**corrente di diffusione**)

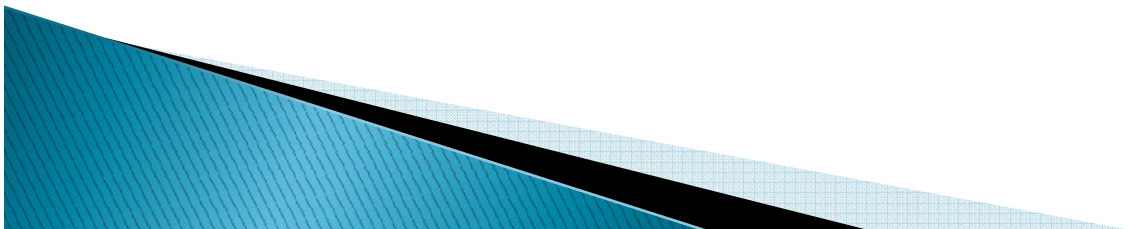


Fenomeno della diffusione

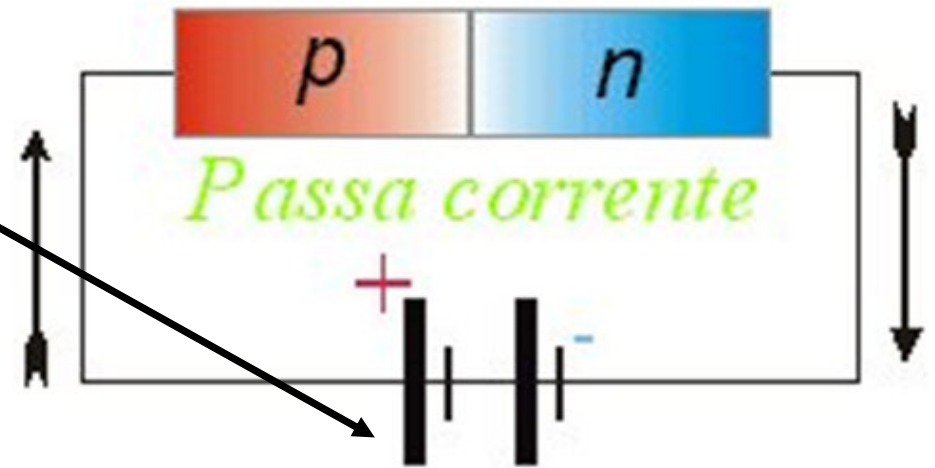


La **corrente di diffusione** è quella provocata da una differenza di concentrazione nelle lacune o negli elettroni

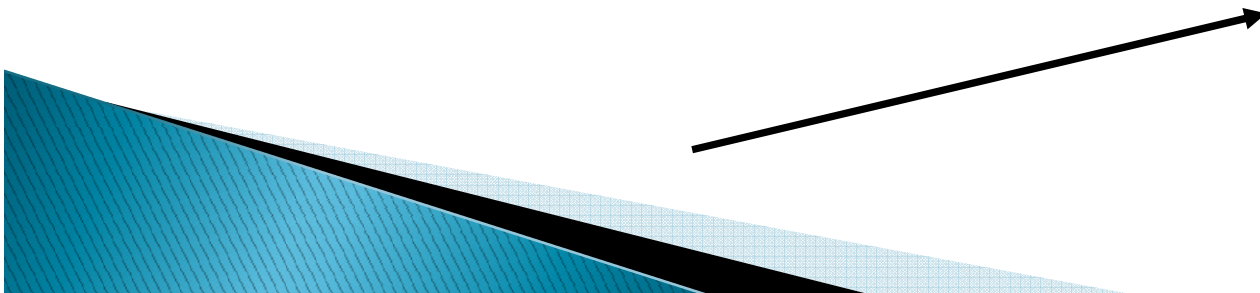
La **corrente di deriva** è invece quella in cui i portatori di carica si muovono perché spinti da un campo elettrico.



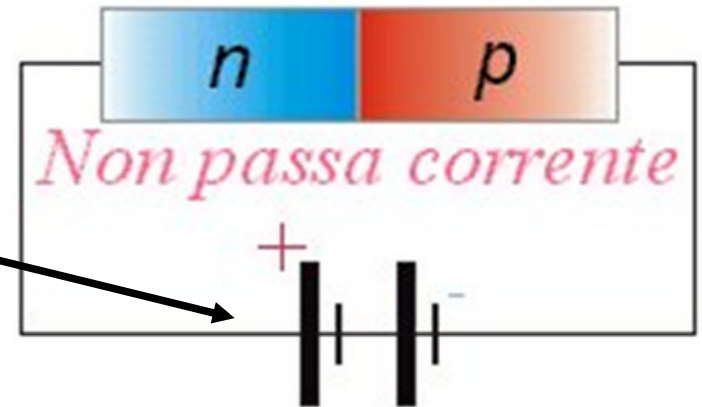
Polarizzazione Diretta



- ▶ Se al materiale P si applica una tensione positiva e all'N una negativa i portatori di carica del cristallo si spostano verso la giunzione. La regione di svuotamento diminuisce e la giunzione si dice a **polarizzazione diretta**.
- ▶ Se la polarizzazione diretta aumenta fino a far scomparire la regione di svuotamento i portatori di carica si sposteranno attraverso la giunzione e si avrà corrente. Ci vogliono circa 0,2 V per la polarizzazione diretta a conduzione di una giunzione PN al germanio; per quella al silicio ce ne vogliono 0,7 V.



Polarizzazione Inversa



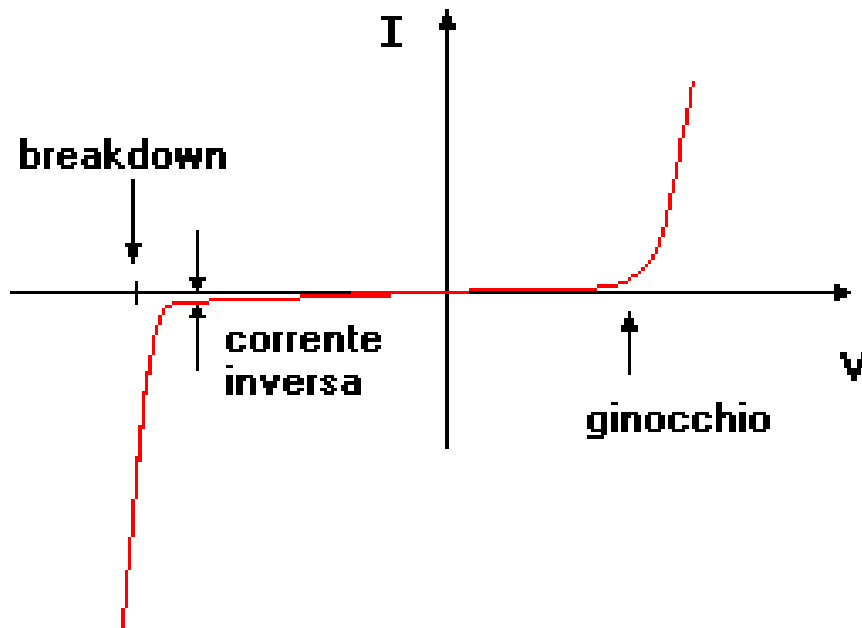
Se al materiale si applica una tensione negativa e all'N una positiva i portatori di carica si allontanano dalla giunzione . Le lacune positive vengono attratte verso il terminale negativo; gli elettroni negativi sono attratti da quello positivo, quindi la regione di svuotamento aumenta e la giunzione si dice a polarizzazione inversa. Per un certo valore della **polarizzazione inversa** attraverso la giunzione PN non passa corrente. Se invece questa polarizzazione è abbastanza alta la barriera si spezza e la corrente passa. Il punto in cui ciò si verifica identifica la tensione zener.

La maggior parte della giunzioni al germanio se viene polarizzata fino al punto zener si distrugge. Questo non succede alle giunzioni al silicio, sempre che la corrente inversa non sia eccessiva.

Polarizzazione Inversa :

- ▶ Viene favorita la corrente di drift (pressoché costante)
- ▶ Aumentando la tensione inversa si arriva ad una tensione detta di "**breakdown**".

Caratteristica del DIODO



$$I = I_o * (e^{V/\eta V_o} - 1)$$

I_o = corrente di saturazione
inversa (μA nel Ge, nA
nel Si)

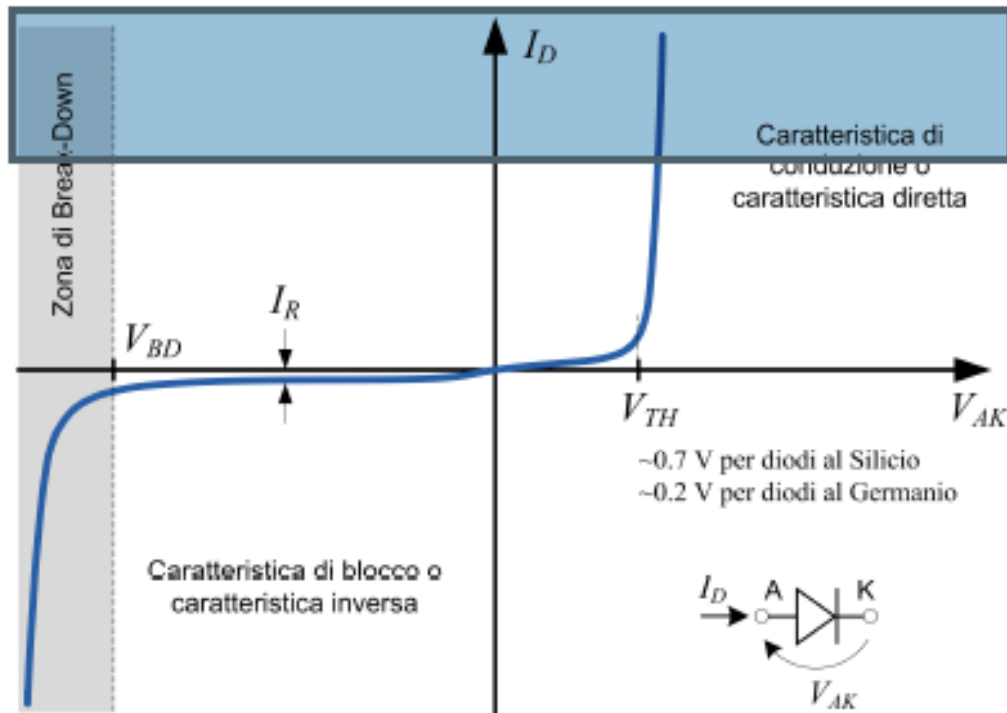
$V_o = 25mV$ a $25^\circ C$

$\eta = 1$ nel Ge

$\eta = 2$ nel Si

V = tensione di polarizzazione
diretta applicata

IL DIODO REALE

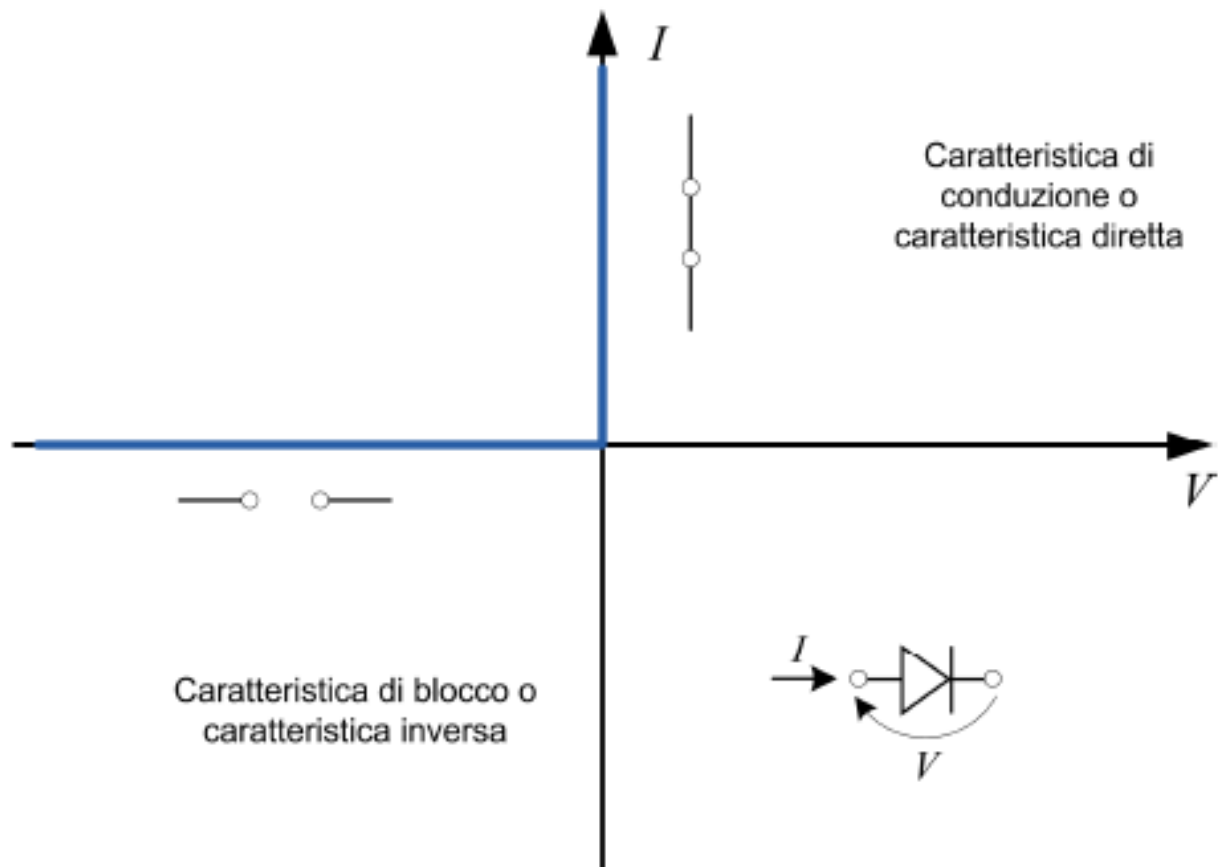


- Il diodo è un bipolo resistivo non lineare
 - I morsetti prendono il nome di **ANODO** e **CATODO**
 - Non è in grado di accumulare energia
 - I punti di lavoro nel piano V-I sono sempre nel primo e nel terzo quadrante.
 - I punti di lavoro nel piano V-I sono su una curva che non è una retta
- In elettronica di potenza viene utilizzato come **INTERRUTTORE STATICO A COMMUTAZIONE NATURALE**

- Le grandezze caratteristiche principali di un diodo sono:
 - **Portata (I_F)**: è la massima corrente diretta che il componente può portare in conduzione;
 - **Tensione di soglia (V_{TH})**: è la tensione al di sopra della quale il diodo entra in conduzione;
 - **Corrente inversa (I_R)**: è la corrente che drena il componente in stato di blocco;
 - **Massima Tensione Inversa (V_{RWM})**: è la massima tensione che può sopportare in stato di blocco;
 - **Tensione di Break Down (V_{BD})**: è la tensione inversa che il diodo può sopportare senza distruggersi

IL DIODO IDEALE

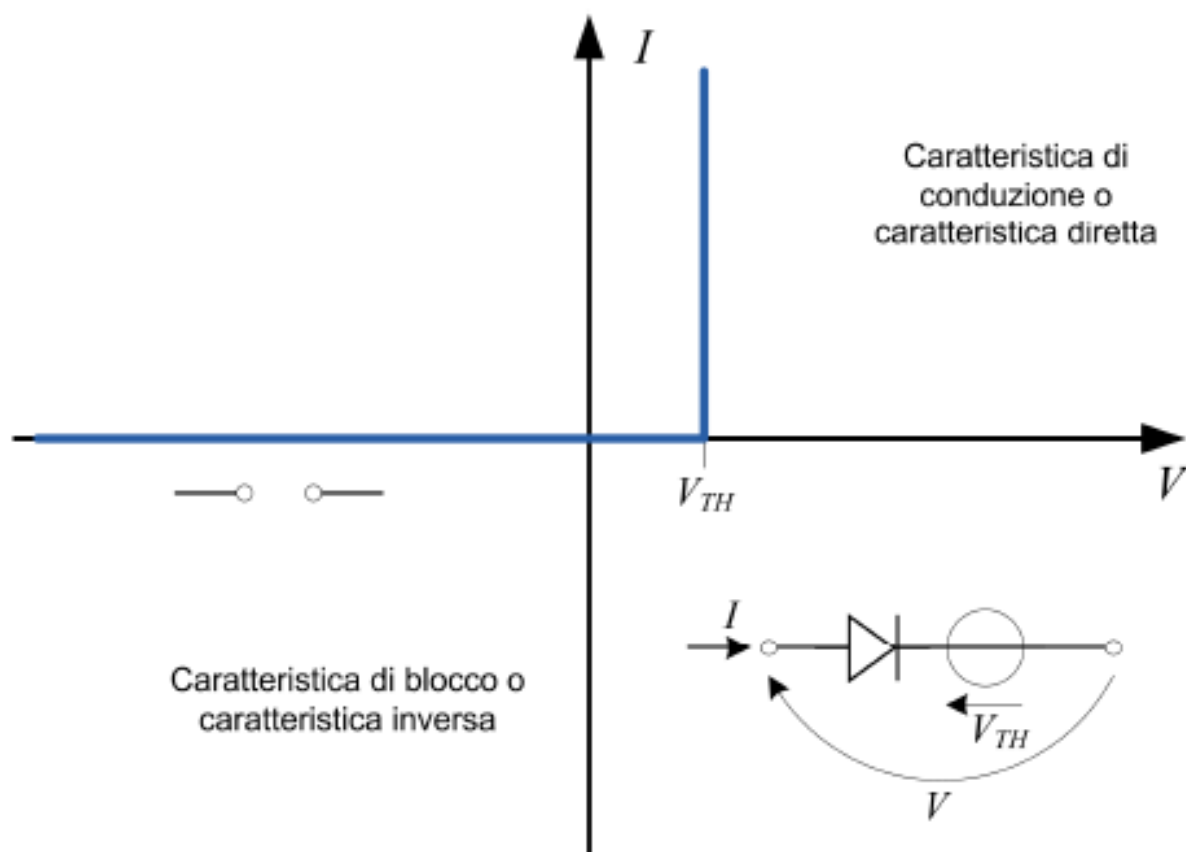
Caratteristica tipo interruttore ideale



- Il diodo viene modellizzato come un interruttore ideale
- Definisce il componente diodo ideale
- Serve per comprendere il funzionamento dei circuiti

IL DIODO IDEALE

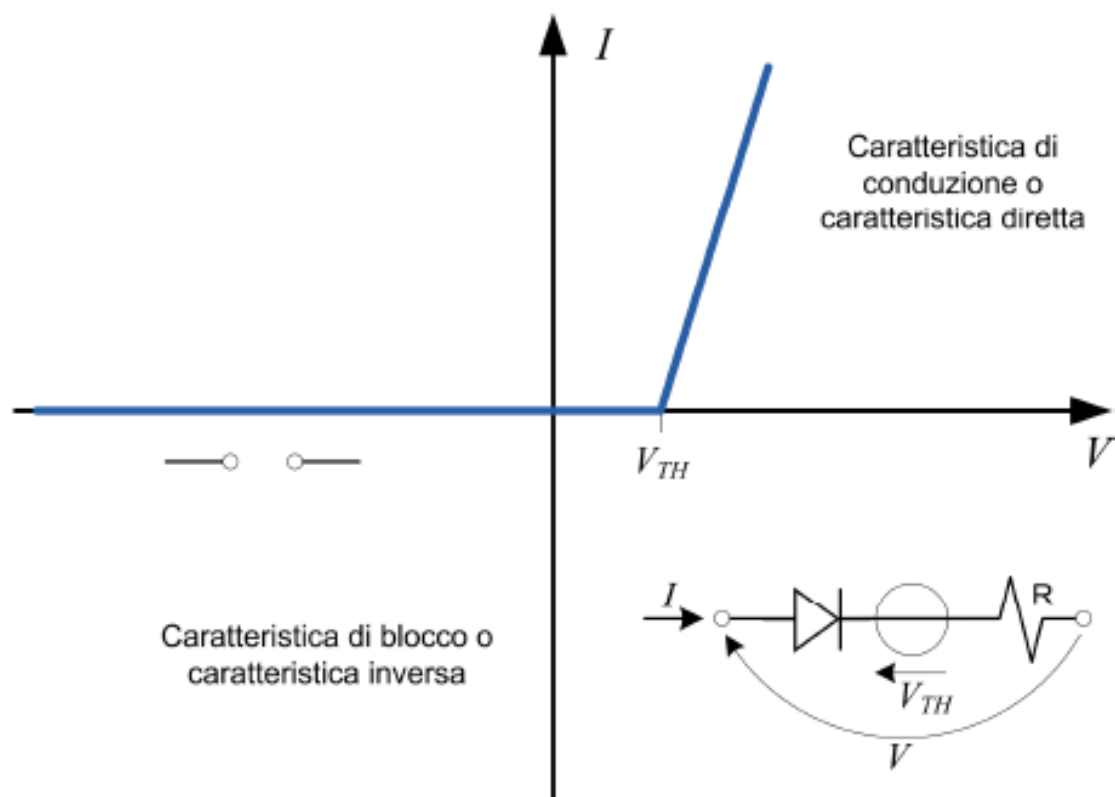
Caratteristica tipo interruttore ideale con tensione di soglia



- Il diodo viene modellizzato come un diodo ideale con un generatore di tensione in serie
- Permette di tenere presente i fenomeni associati alla tensione di soglia
 - "Ritardo" in accensione
 - Effetti termici

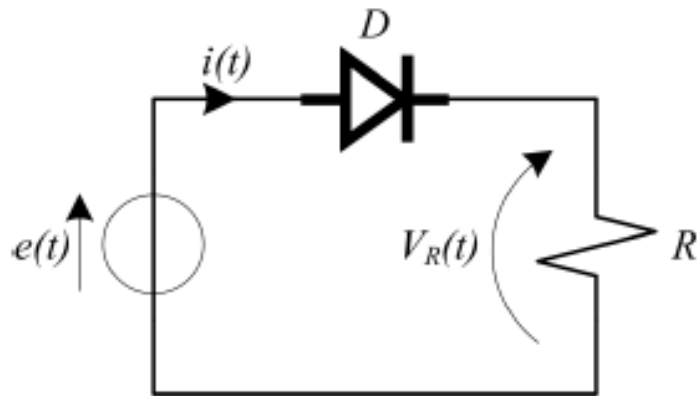
IL DIODO IDEALE

Caratteristica tipo interruttore reale con tensione di soglia



- Il diodo viene modellizzato come un diodo ideale con un generatore di tensione ed una resistenza in serie
- Permette di tenere presente i fenomeni associati alla tensione di soglia ed alla conduzione all'interno del componente
 - "Ritardo" in accensione
 - Effetti termici in modo più accurato

ANALISI DEL CIRCUITO



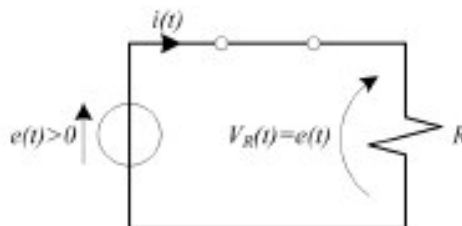
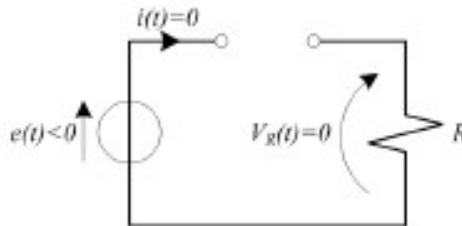
Il diodo può portare corrente **SOLO** in direzione positiva rispetto alla convenzione indicata.

In formule...

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} > 0 \Rightarrow e(t) > 0$$



Il diodo è in **blocco** durante la **semionda negativa** della tensione di rete



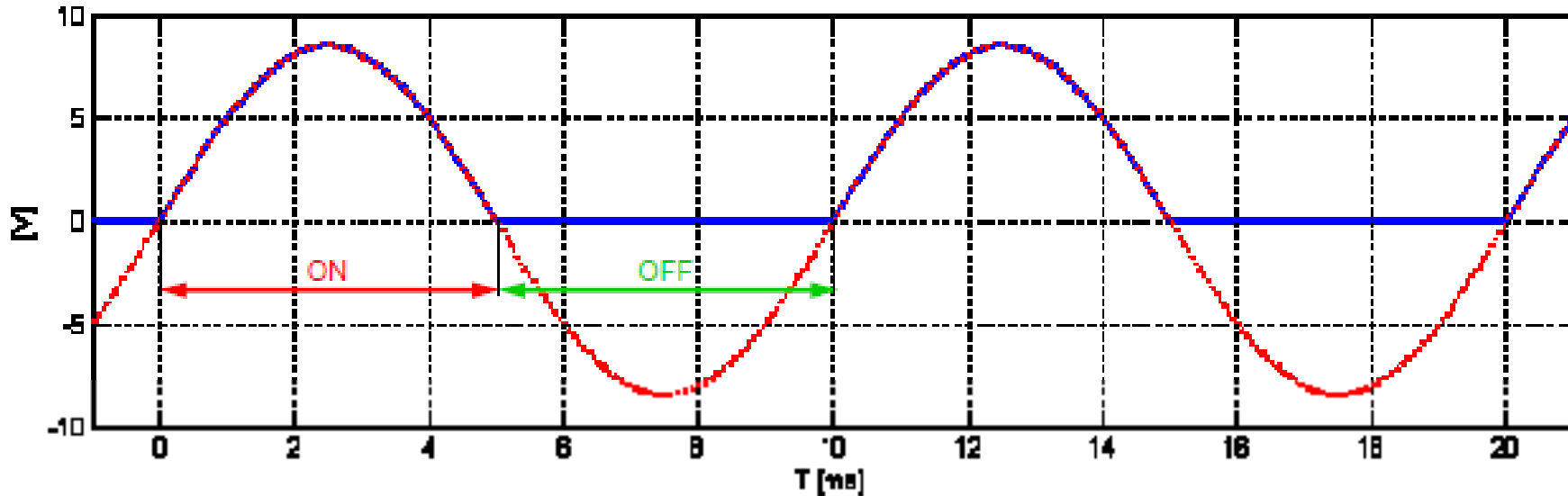
Il diodo è in **conduzione** durante la **semionda positiva** della tensione di rete



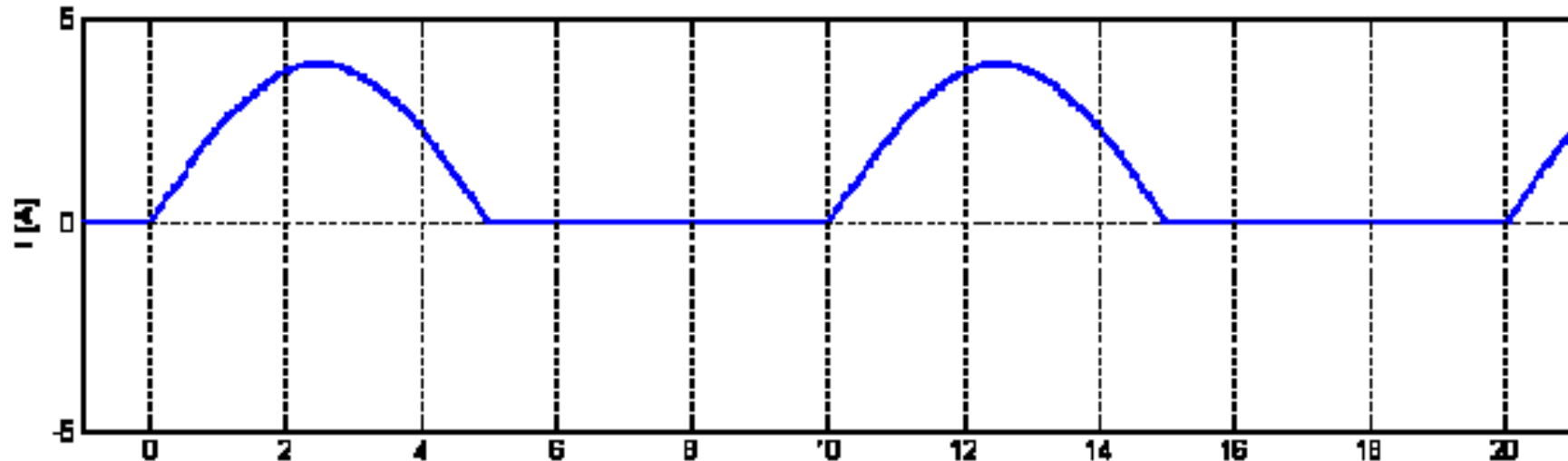
Raddrizzatore a una semionda

Andamenti delle grandezze ideali

Tensione raddrizzata e tensione di alimentazione

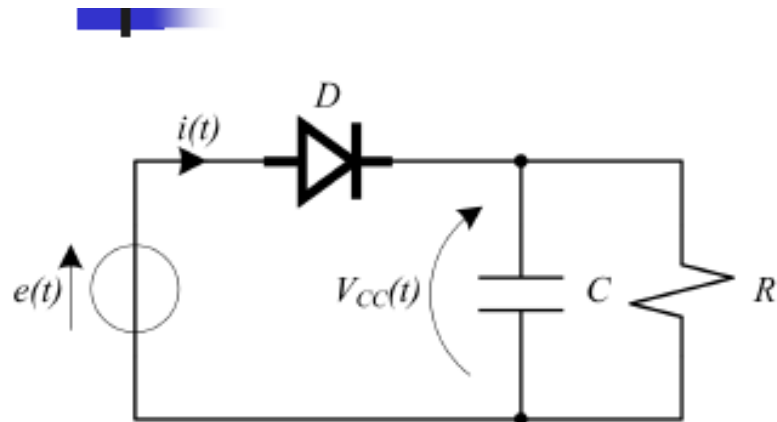


Corrente nel circuito



Raddrizzatore a semplice semionda su carico resistivo-capacitivo

Analisi del circuito



Quando entra in conduzione il diodo?

- Se il diodo entrerà in conduzione significa che lo stato attuale è di blocco.
 - In stato di blocco la rete di alimentazione è disaccoppiata dal carico in continua;
 - Il diodo si comporta come un interruttore aperto.
- La tensione all'anodo del diodo è impressa dal generatore di tensione.
- La tensione al catodo del diodo è impressa dalla capacità.

La tensione V_{ak} , che determina lo stato del diodo, è impressa: $V_{ak}(t) = e(t) - v_c(t)$

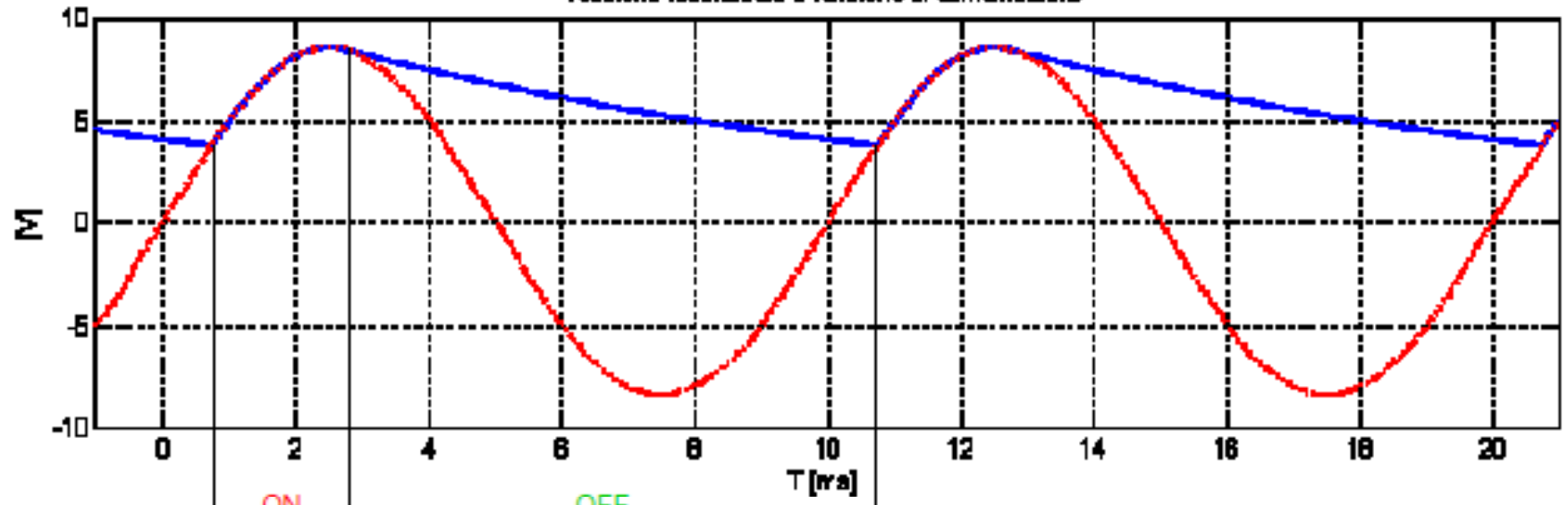
BLOCCO: $V_{ak}(t) < 0 \Rightarrow e(t) < v_c(t)$

CONDUZIONE: $V_{ak}(t) > 0 \Rightarrow e(t) > v_c(t)$

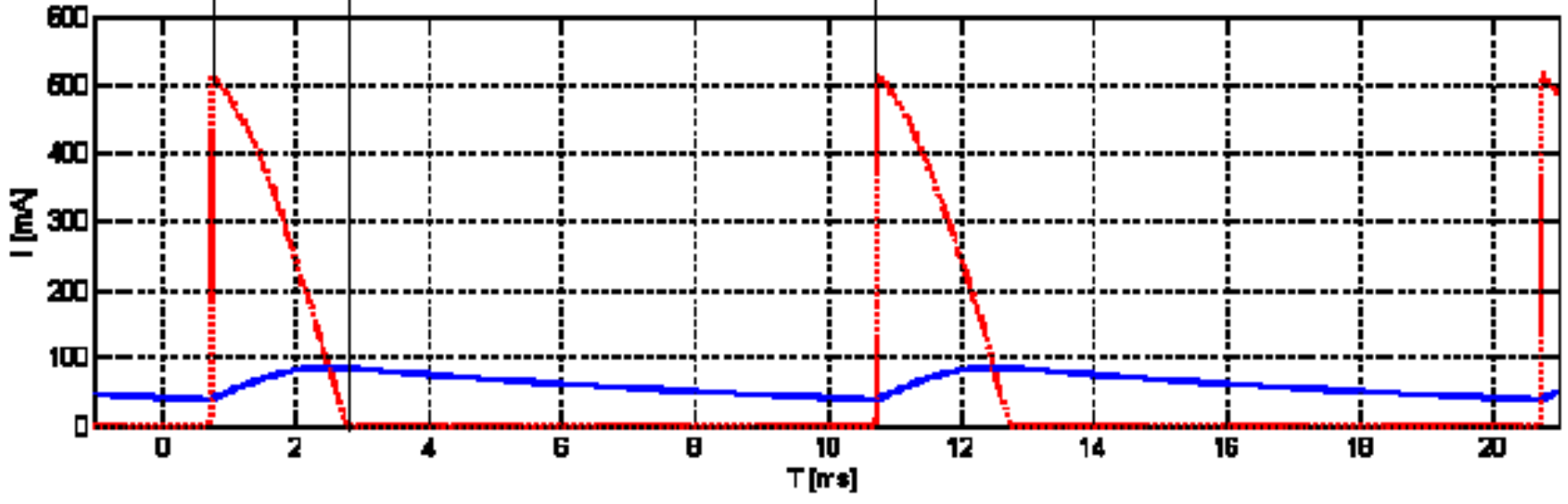


IL DIODO ENTRA IN CONDUZIONE QUANDO LA TENSIONE DI RETE SUPERA LA TENSIONE DEL CARICO IN CONTINUA

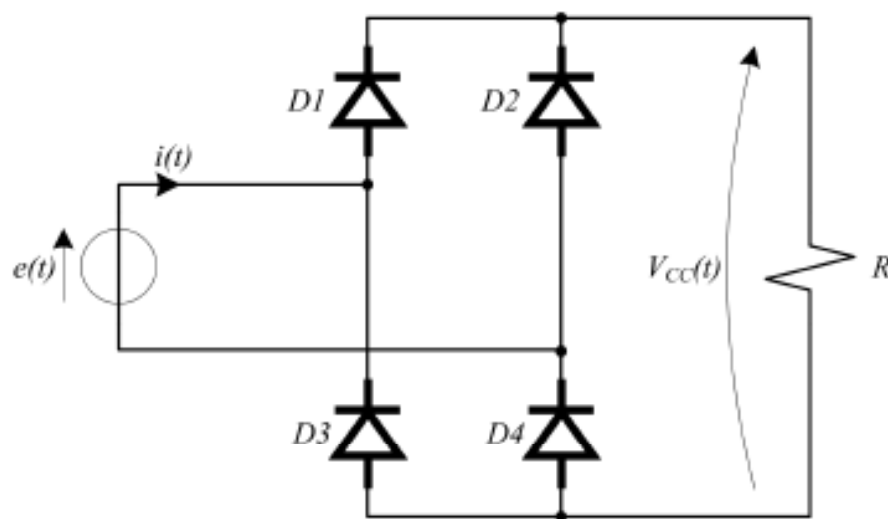
Tensione raddrizzata e tensione di alimentazione



Correnti lato CC e lato CA

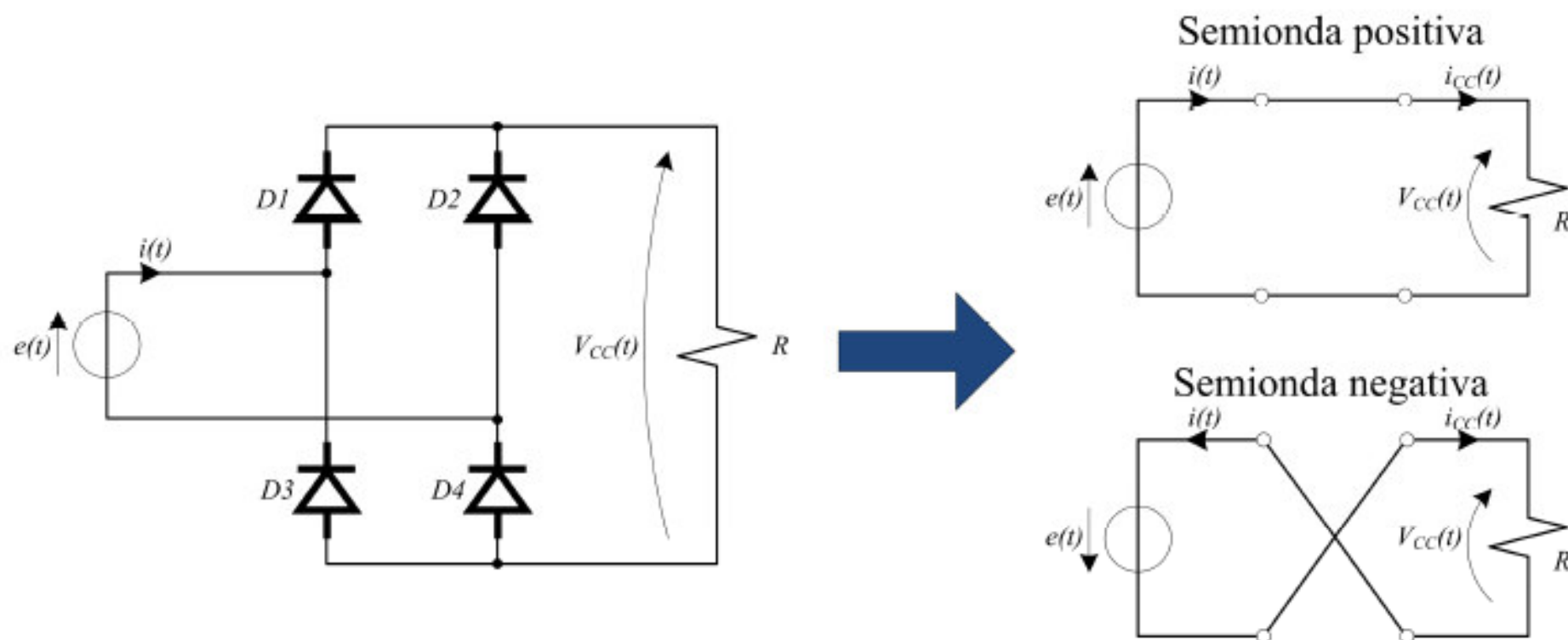


PONTE di GRAETZ



- Il raddrizzatore a semplice semionda sfrutta la sorgente per un tempo massimo pari al 50% del periodo
 - Opera sulla semionda positiva
 - Si cerca un modo per sfruttare anche la semionda negativa
 - E' necessario un circuito a topologia variabile che permetta di invertire i morsetti di connessione del carico in modo sincrono all'inversione di polarità della tensione di rete
-
- La coppia di diodi D1–D3 e la coppia di diodi D2–D4 sono connessi in serie
 - Non saranno mai in conduzione simultanea, perché cortocircuiterebbero il carico in CC
 - Le uniche due maglie possibili che connettono la rete al carico attraverso il ponte di Graetz sono quelle che vedono la conduzione simultanea delle coppie D1–D4 e D2–D3. Vediamo di mostrare il perché...

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL PONTE DI GRAETZ

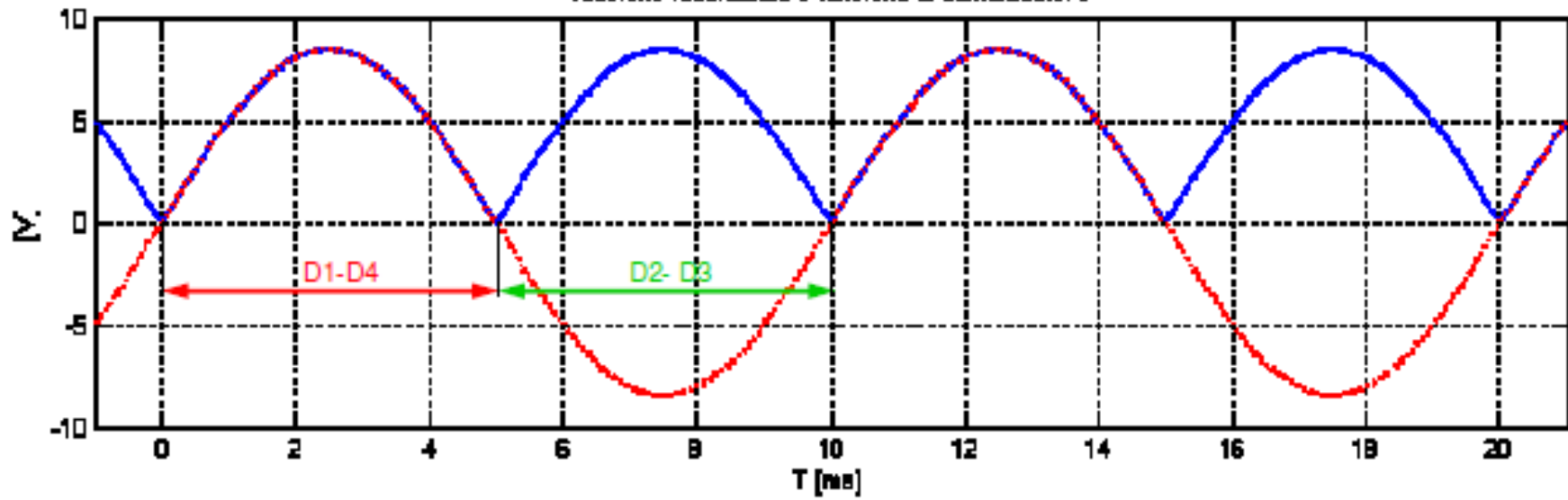


L'EFFETTO OTTENUTO E' IL "RIBALTAMENTO" DELLA SEMIONDA NEGATIVA

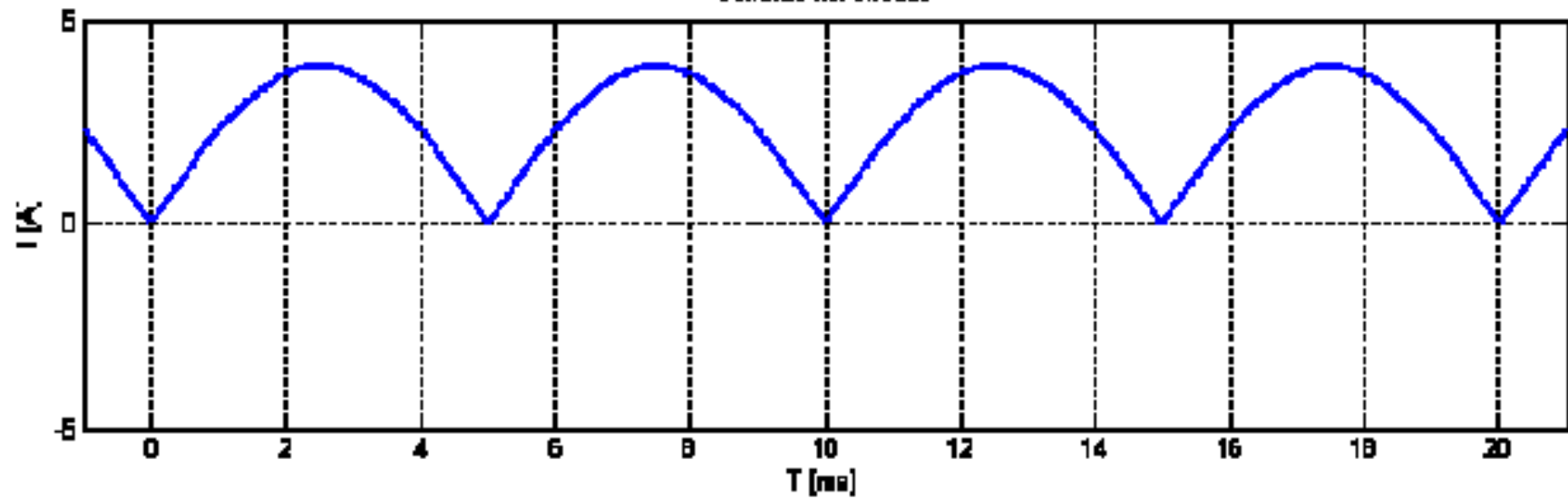
Il carico non è in grado di distinguere la semionda positiva dalla semionda negativa di rete.

- **Durante la semionda positiva conduce $D1$ (ha un potenziale anodico superiore a quello di $D2$), durante la semionda negativa conduce $D2$ (ha un potenziale anodico superiore a quello di $D1$).**

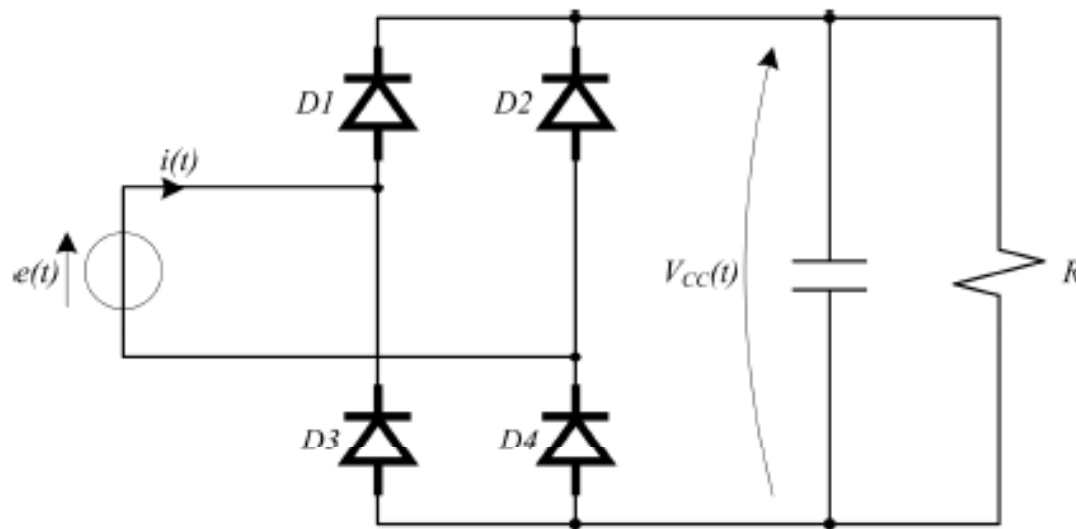
Tensione raddrizzata e tensione di alimentazione



Corrente nel circuito



Analisi del circuito



- Anche in questo caso non è necessario analizzare il circuito partendo da zero.
- I risultati ottenuti per il raddrizzatore a semplice semionda su carico resistivo-capacitivo possono essere visti come la risposta alla semionda positiva del sistema in CC.

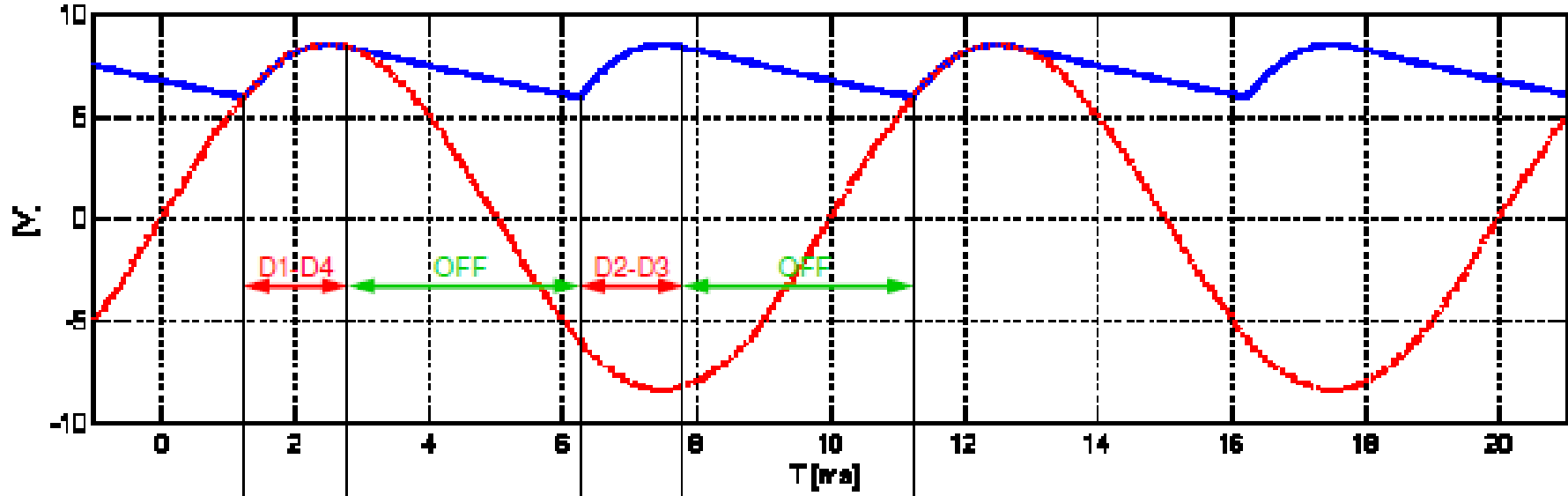
- **Durante la semionda di rete positiva:**

- La transizione OFF->ON dei diodi D1 e D4 avviene nell'istante in cui la tensione di rete supera la tensione presente sulla capacità di spianamento.
- La transizione ON->OFF dei diodi D1 e D4 avviene nell'istante in cui la corrente capacitiva è uguale in modulo ed opposta di segno alla corrente resistiva.

- **Durante la semionda di rete negativa:**

- La transizione OFF->ON dei diodi D2 e D3 avviene nell'istante in cui la tensione di rete supera in modulo la tensione presente sulla capacità di spianamento.
- La transizione ON->OFF dei diodi D2 e D3 avviene nell'istante in cui la corrente capacitiva è uguale in modulo ed opposta di segno alla corrente resistiva.

Tensione raddrizzata e tensione di alimentazione



Correnti lato CC e lato CA

