

# COMPONENTI ELETTRONICI DI POTENZA

**Prof. Simone CASTELLAN**

[1] B.Wu, *High-power converters and AC drives*, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006.

[2] M.H.Rashid, *Power electronics: circuit, devices and applications*, Pearson Education – Prentice Hall, 2004.

Versione italiana: *Elettronica di potenza – Dispositivi e circuiti (Volume 1), Elettronica di potenza – Applicazioni (Volume 2)*, Pearson Paravia Bruno Mondadori, 2008.

[3] M.H.Rashid, *Power electronics handbook*, Academic Press, 2001.

[4] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins, *Power electronics – Converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, 1995.

Versione italiana: *Elettronica di potenza – Convertitori ed applicazioni*, Hoepli, 2005.

# DISPOSITIVI A SEMICONDUCTTORE

I principali *componenti elettronici di potenza*, o *dispositivi a semiconduttore*, sono:

- **Diodi**
- **Tiristori (SCR)**
- **GTO**
- **IGCT**
- **Transistor bipolari (BJT)**
- **MOSFET**
- **IGBT**

I componenti elettronici di potenza vengono sostanzialmente utilizzati con la funzione di interruttori e per questo vengono anche detti *interruttori elettronici di potenza*.

Possono assumere due stati di funzionamento fondamentali:

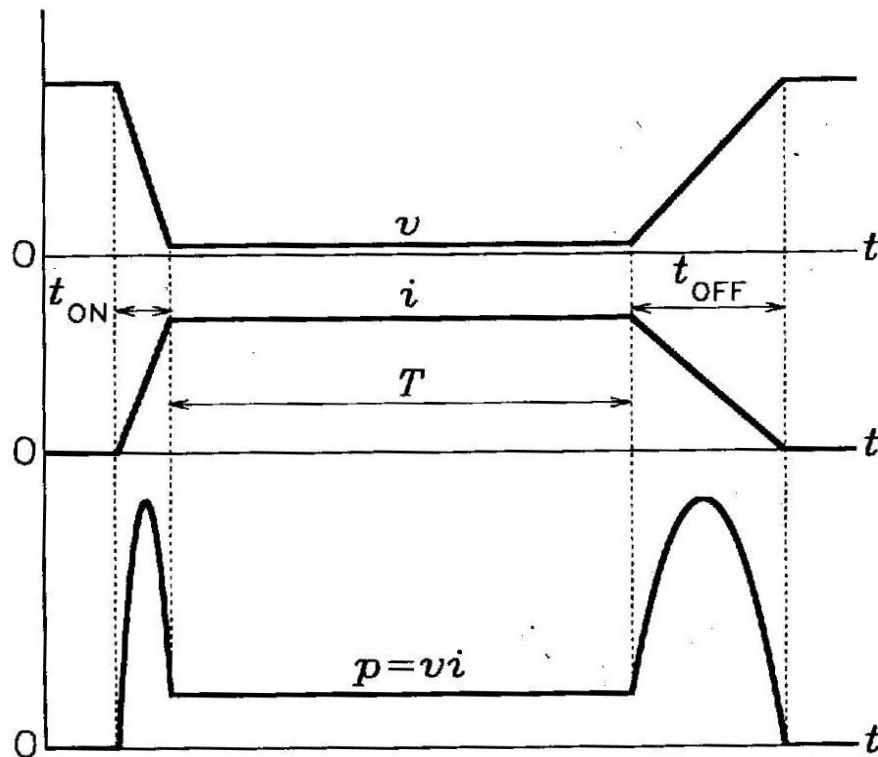
1. Stato di **conduzione (ON)** → resistenza elettrica molto bassa (idealmente nulla)
2. Stato di **blocco (OFF)** → resistenza elettrica molto alta (idealmente infinita)

Caratteristiche di un interruttore ideale:

- Nello stato ON conducono corrente in entrambe le direzioni (bidirezionali)
- Nello stato ON conducono corrente di ampiezza qualsiasi e per un tempo indefinito
- Nello stato ON la caduta di tensione ai capi è nulla
- Nello stato OFF sostengono una tensione di ampiezza qualsiasi
- Nello stato OFF la corrente che li attraversa è nulla
- I tempi di commutazione OFF-ON e ON-OFF sono nulli
- La potenza di comando delle commutazioni è nulla

# INTERRUTTORI REALI

- Dispositivi a semiconduttore → corrente unidirezionale
- Limiti per i valori di corrente (diretta) nello stato ON
- Limiti per i valori di tensione (diretta) nello stato OFF
- Caduta di tensione non nulla nello stato ON (dissipazione di potenza)
- Corrente (inversa) non nulla nello stato OFF (dissipazione di potenza)
- Tempi di commutazione non nulli (dissipazione di potenza)
- Potenze di comando non nulle



Perdite di potenza in conduzione

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

Perdite di potenza in commutazione

$$P_{cmt} = P_{ON} + P_{OFF}$$

$$P_{ON} = f_c \left( \int_0^{t_{ON}} p dt \right)$$

$$P_{OFF} = f_c \left( \int_0^{t_{OFF}} p dt \right)$$

# PARAMETRI

I parametri dei dispositivi elettronici di potenza si possono suddividere in descrittivi e restrittivi.

Esempi di parametri restrittivi:

- massimo valore della corrente media di conduzione diretta,
- massimo valore della tensione di blocco diretto,
- massimo valore della tensione inversa ripetitiva,
- massimo valore di picco non ripetitivo della corrente diretta,
- massimo valore della temperatura di giunzione.

Esempi di parametri descrittivi:

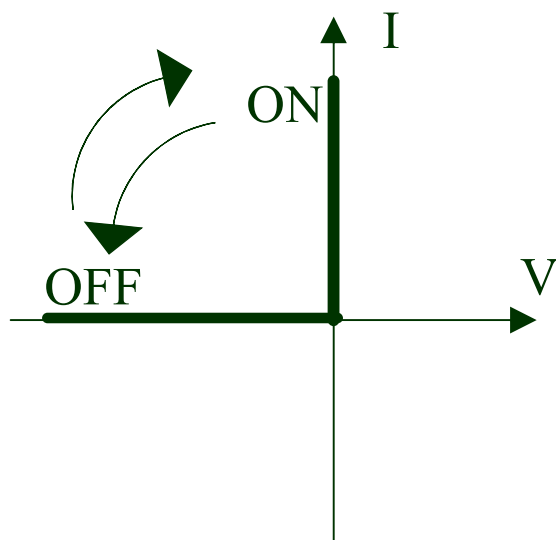
- valore della corrente inversa nello stato OFF,
- valore della caduta di tensione nello stato ON,
- tempo di ripristino inverso.

# DIODI DI POTENZA

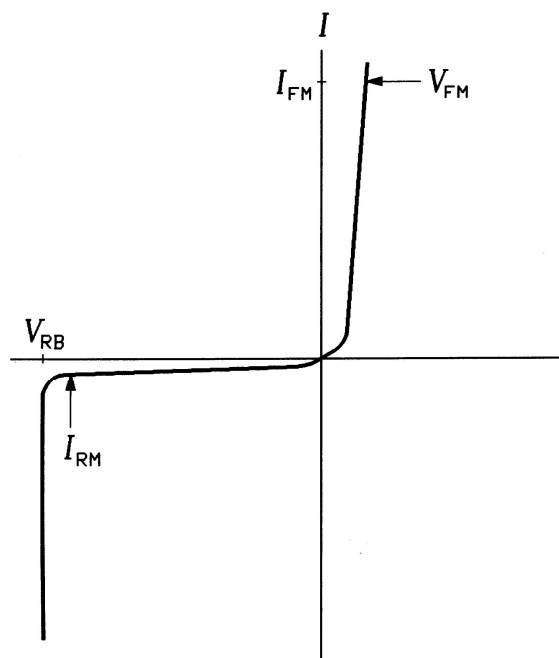
Sono interruttori elettronici di potenza non controllabili.

## Caratteristiche esterne: andamento tensione-corrente

Caratteristica ideale



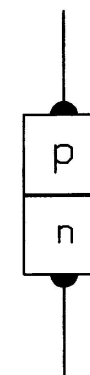
Caratteristica reale



I diodi commutano nello stato ON quando sono polarizzati direttamente e commutano nello stato OFF quando la corrente diretta si inverte.

Struttura

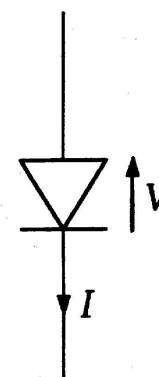
ANODO



CATODO

Simbolo

A



C

# DIODI DI POTENZA: PARAMETRI

Corrente diretta:  $I_F$

Tensione diretta:  $V_F$  (dipende dalla  $I_F$  varia da 1 a 2 V ca.)

Corrente inversa (di perdita)  $I_R$

Tensione inversa di rottura  $V_{RB}$

Tensione inversa ripetitiva (massimo valore ammissibile)  $V_{RRM}$

Corrente diretta media persistente (massimo valore ammissibile)  $I_{F(av)}$

Corrente impulsiva non ripetitiva (massimo valore ammissibile)  $I_{FSM}$

Temperatura di giunzione (massimo valore ammissibile)  $\theta_{JM}$

Parametro  $I^2t$  (per i fusibili)

$$I^2t = \left( \frac{I_{FSM}}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{T}{2} = \frac{I_{FSM}^2}{200}$$

## VALORI TIPICI

Valori massimi di  $V_{RRM}$  ed  $I_F$ : 6.5 kV, 5kA

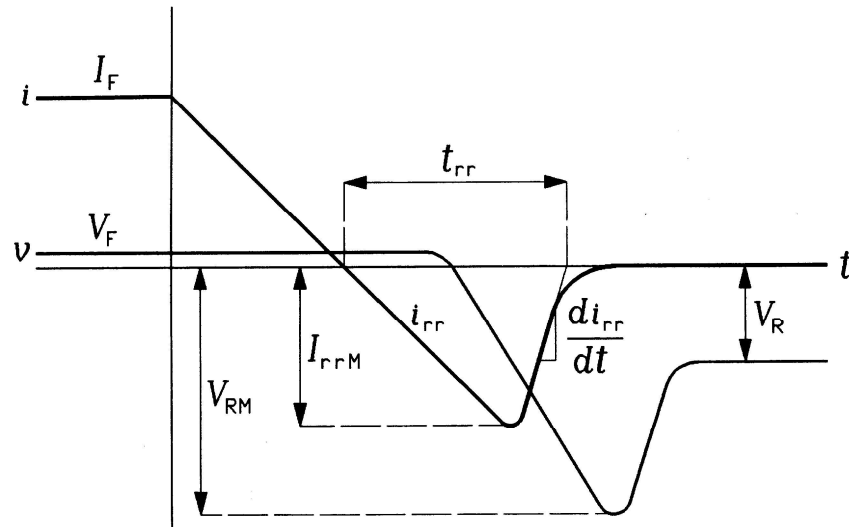
$t_{rr}$  varia da alcuni  $\mu s$  fino a 20  $\mu s$

Diodi *fast recovery* o *ultra-fast recovery*:  $t_{rr}$  varia dal centinaio di ns fino al  $\mu s$

Diodi *Shottky* (diodi con giunzione metallo-semiconduttore):

- hanno bassa caduta di tensione diretta  $V_F < 0.5V$
- ma hanno bassi valori di corrente diretta  $I_F < 500A$
- e bassi valori di tensione di rottura ( $V_{RB} \cong 200V$ )

# DIODI DI POTENZA: COMMUTAZIONE



Andamento della tensione e della corrente nella fase di interdizione del diodo (commutazione ON->OFF)

L'interdizione di un diodo è forzata dall'inversione della corrente diretta.

Durante l'interdizione si ha un picco di corrente inversa dovuta allo svuotamento delle cariche immagazzinate nella giunzione.

La durata del picco di corrente inversa è detto tempo di *recupero inverso*  $t_{rr}$  e corrisponde al tempo richiesto dal dispositivo affinché recuperi la capacità di blocco inverso nella fase di interdizione.

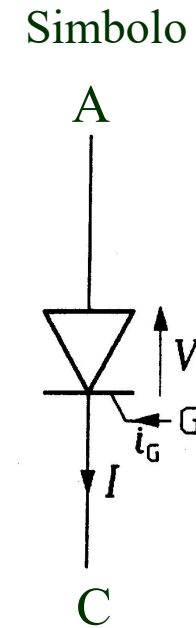
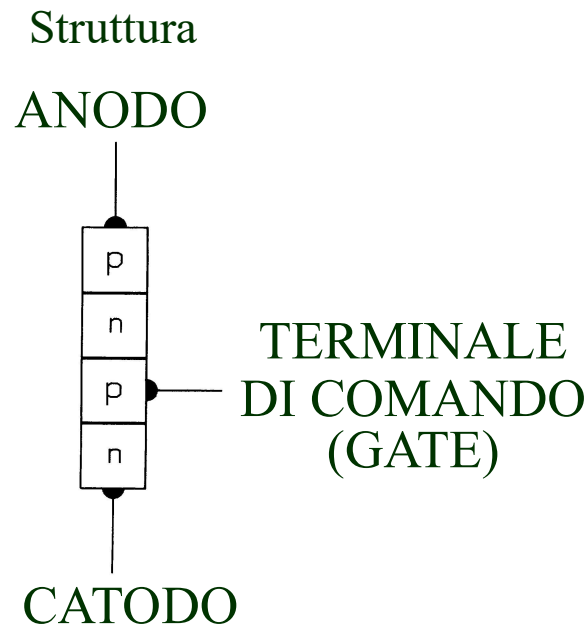
All'interno di detto intervallo si ha il *picco*  $I_{rrM}$  e la *coda* di corrente inversa caratterizzata dalla pendenza  $dI_{rr}/dt$ .

La tensione ai capi del diodo inizialmente rimane al valore  $V_F$  poi si inverte, raggiunge un picco negativo  $V_{RM}$ , proporzionale alla pendenza della coda, e quindi si porta al valore inverso finale.

# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Il raddrizzatore controllato al silicio (tiristore) è un dispositivo semi-controllabile costituito da tre terminali: anodo, catodo e terminale di comando (gate).

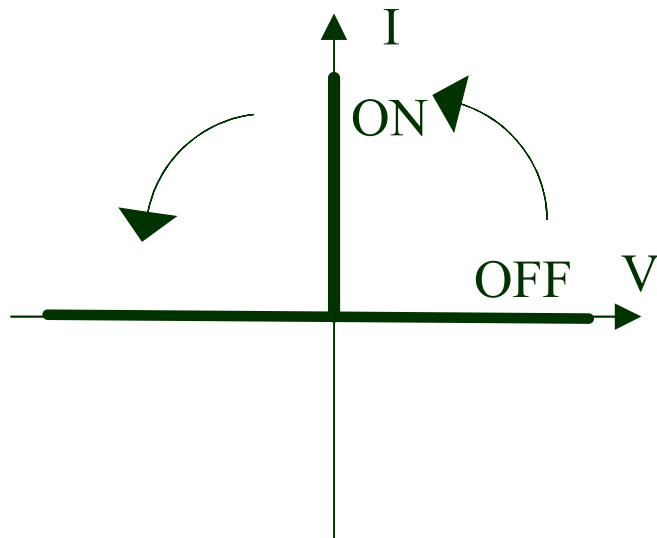
Può essere acceso dal terminale di comando quando è in una condizione di polarizzazione diretta ma, una volta in conduzione, può essere spento solo invertendo la corrente diretta (non dal terminale di comando).



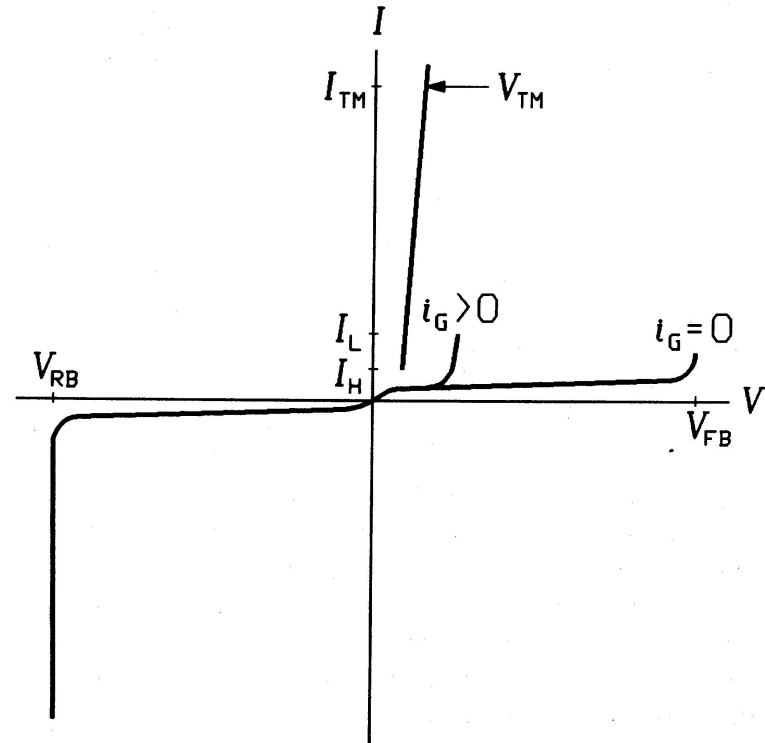


# SCR: CARATTERISTICA V-I

Caratteristica ideale



Caratteristica reale



È un dispositivo elettronico di potenza comandato in corrente.

La transizione OFF->ON avviene tramite l'innescò di un effetto valanga (caratteristica comune ai tiristori).

# SCR: CARATTERISTICA V-I

Nel terzo quadrante della caratteristica v-i (polarizzazione inversa) l'SCR si comporta come un diodo.

Nella zona a polarizzazione positiva, quando la corrente di gate  $I_G=0$ , l'SCR blocca la tensione positiva applicata ai suoi capi  $V_T$  finché il suo valore è inferiore alla tensione di rottura diretta  $V_{FB}$ . Quando  $V_T > V_{BF}$  il dispositivo entra in conduzione purché la corrente diretta sia maggiore del valore di aggancio  $I_L$ .

In conduzione l'SCR si comporta come un diodo.

Se  $I_G > 0$ ,  $V_{FB}$  diminuisce, per  $I_G$  sufficientemente grande  $V_{FB}$  è praticamente nullo per cui l'SCR entra in conduzione con una piccola tensione diretta.

Una volta in conduzione l'SCR vi rimane indipendentemente dal valore di  $I_G$ , purché la corrente diretta  $I_T > I_H$  (corrente di mantenimento).

L'SCR si spegne forzando una inversione di corrente.

# SCR: PARAMETRI

Molti parametri di un SCR sono analoghi a quelli dei diodi. Oltre a quelli, ci sono:

- Tensione di rottura diretta  $V_{FB}$  per  $I_G = 0$
- Corrente di aggancio  $I_L$
- Corrente di mantenimento  $I_H$
- Massimo valore ammissibile per  $di/dt$
- Massimo valore ammissibile per  $dv/dt$
- Tempo di accensione  $t_{ON}$
- Tempo di spegnimento  $T_{off}$

## VALORI TIPICI

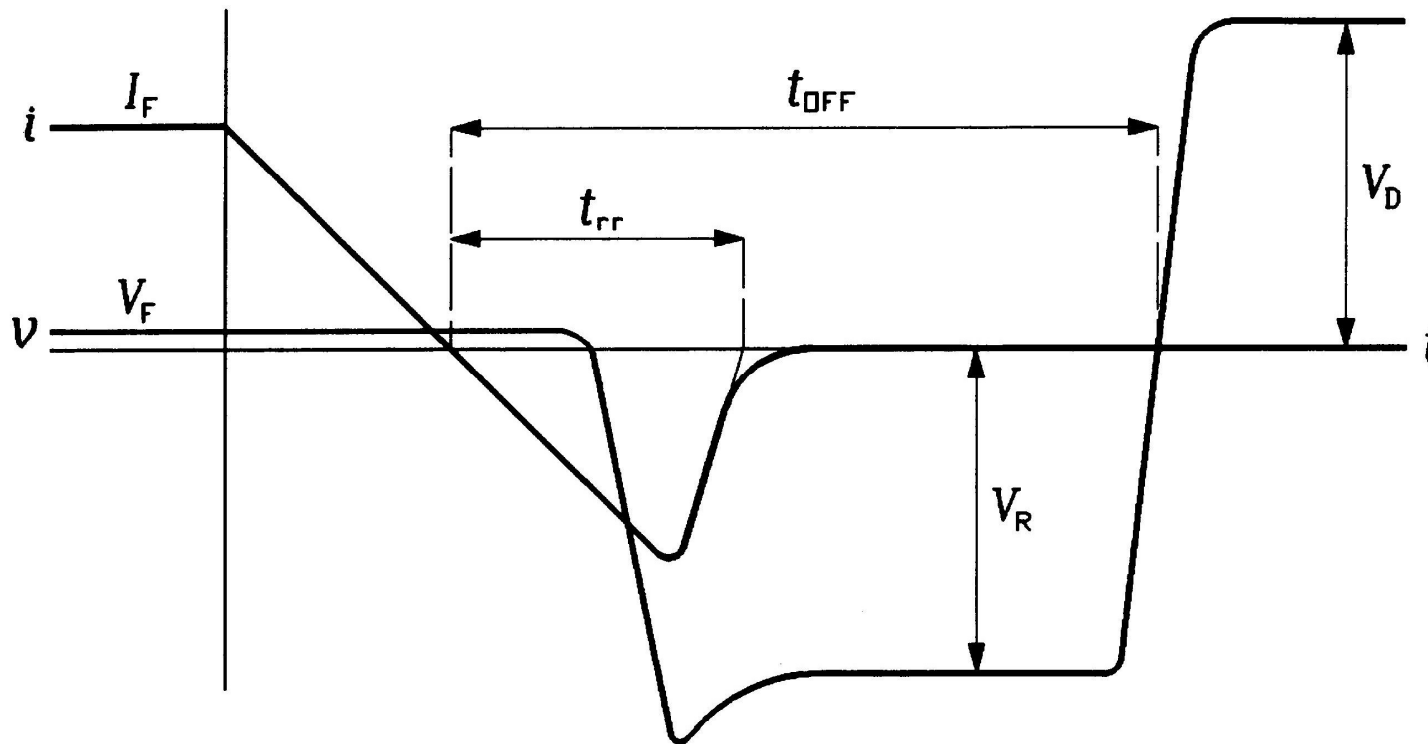
### SCR per controllo di fase attivati dal gate

- massima tensione inversa di lavoro e massima tensione di blocco diretto 4kV,
- corrente diretta fino a 3 kA
- caduta di tensione diretta 1.5-3 V
- $t_{ON}$  dell'ordine del ms
- $t_{OFF}$  varia da 10 a 200 ms

### SCR per controllo di fase attivati dalla luce (utilizzati per raddrizzatori ad alta tensione)

- valori massimi → 6kV, 4kA

# SCR: COMMUTAZIONE



$t_{OFF} > t_{rr}$  in quanto è necessario un certo intervallo di tempo dopo lo spegnimento dell'SCR affinché esso recuperi la capacità di blocco diretto.

$t_{OFF}$  limita la frequenza di commutazione utilizzabile con il dispositivo.

$t_{ON}$  è costituito dalla somma di due tempi: il *tempo di ritardo* che intercorre tra il comando di accensione e l'istante in cui la tensione anodo-catodo del dispositivo scende al 90% del valore iniziale e il *tempo di caduta della tensione* necessario affinché la tensione passi dal 90% al 10% del valore iniziale.

# TRIAC

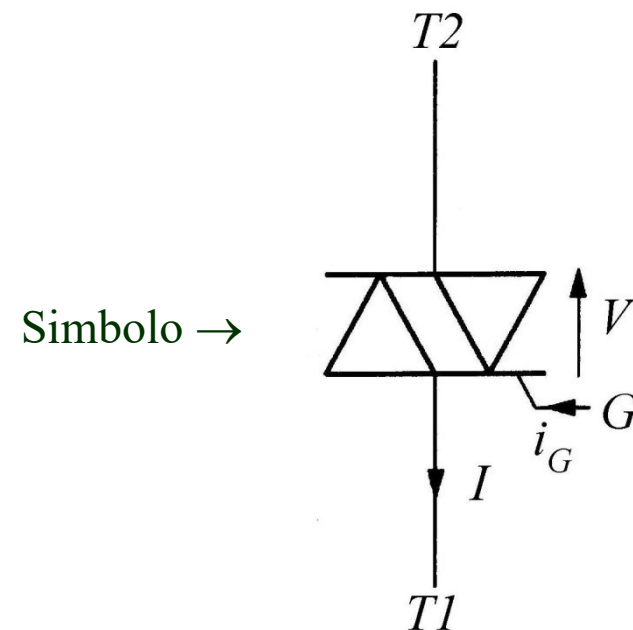
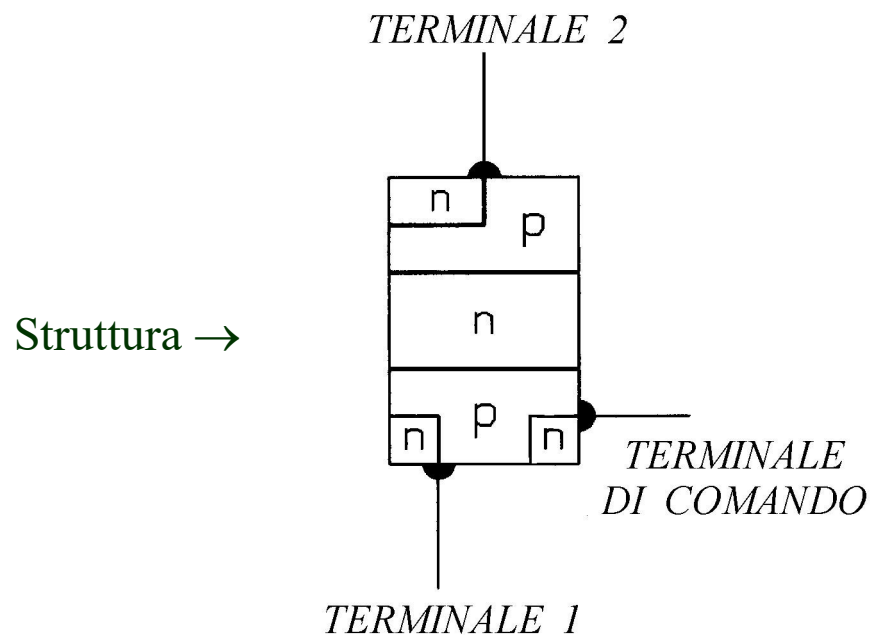
È un dispositivo a semiconduttore il cui funzionamento esterno è equivalente a quello di due SCR connessi in antiparallelo.

Conduce corrente in entrambe le direzioni a seconda della polarità della tensione applicata ai suoi terminali T1 e T2.

Può essere acceso da una corrente di gate sia positiva che negativa.

Ha caratteristiche generalmente peggiori di un SCR: tensioni e correnti molto più limitate, velocità di commutazione inferiori, valori di  $dv/dt$  critici più piccoli.

È convenientemente utilizzato in variatori di luminosità, nel controllo delle resistenze per la produzione di calore, in relè allo stato solido, e nel controllo di piccoli motori (soprattutto quelli a collettore).



# GTO (Gate Turn-off Thyristor)

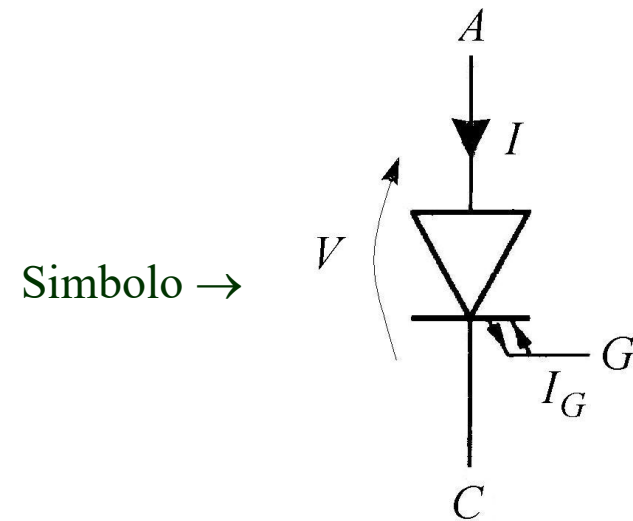
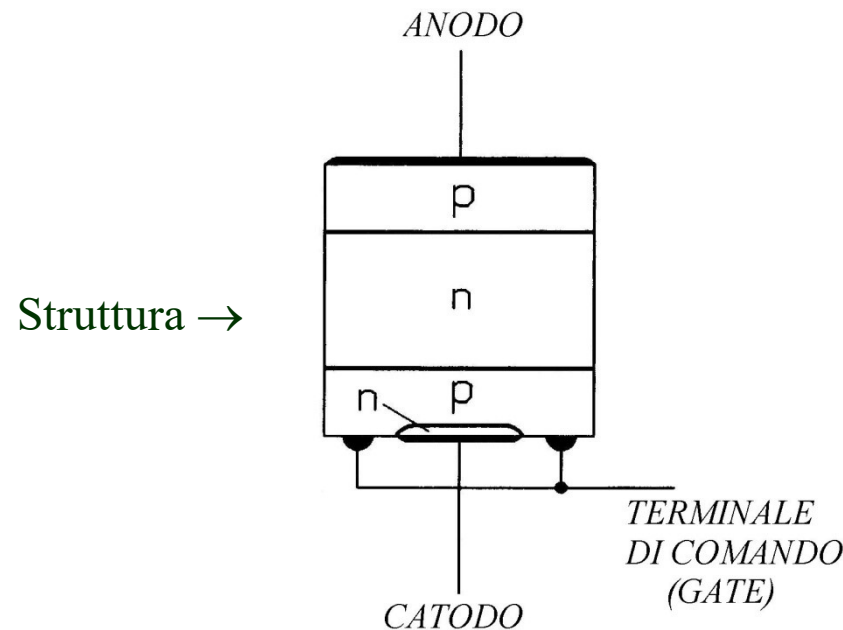
È un dispositivo della famiglia degli SCR. La transizione di accensione avviene come negli SCR, ma a differenza di quelli il GTO può anche essere spento dal terminale di comando (gate). È dunque un dispositivo a semiconduttore totalmente controllabile.

Può essere spento dal gate tramite un impulso di corrente negativo (“spillamento” di corrente dal gate) di ampiezza elevata, ma di durata limitata (dell’ordine dei 50  $\mu$ s).

Il guadagno di corrente per lo spegnimento è piccolo (3-5).

La fase di spegnimento è abbastanza critica e delicata; per esempio bisogna mantenere una tensione anodo-catodo piuttosto bassa.

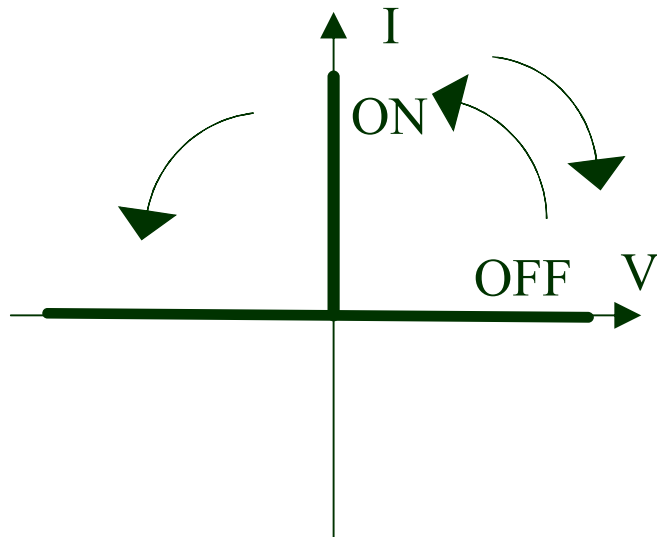
Anche il GTO è un dispositivo a semiconduttore comandato in corrente.



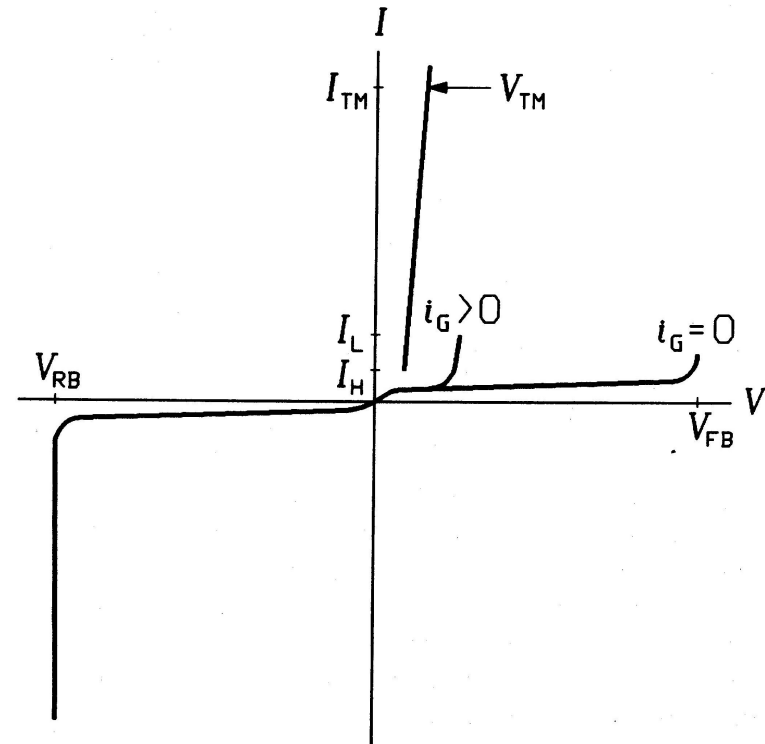
# GTO: CARATTERISTICA V-I

La caratteristica v-i del GTO è analoga a quella dell'SCR.

Caratteristica ideale



Caratteristica reale



## VALORI TIPICI

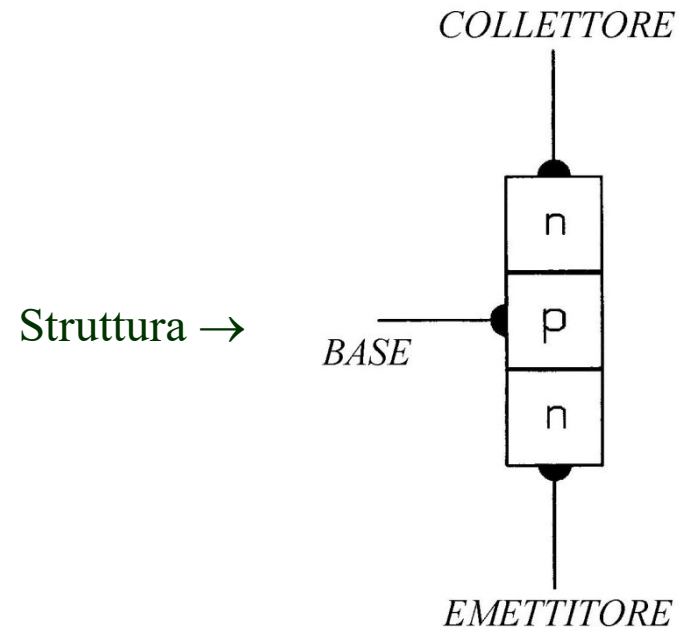
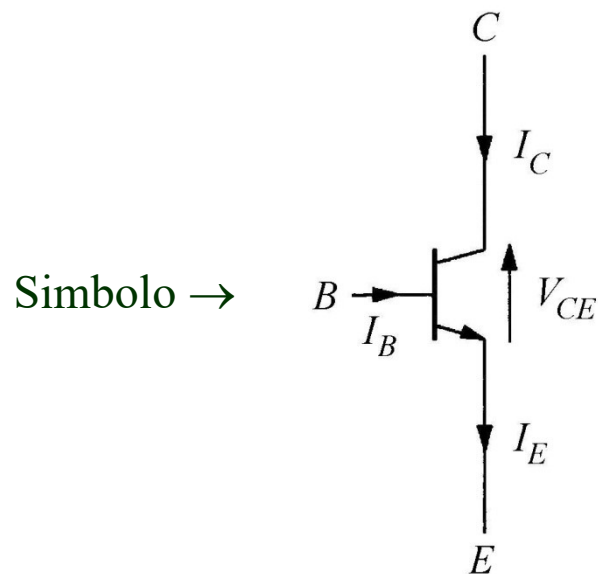
- massima tensione inversa di lavoro e massima tensione di blocco diretto fino a 6kV
- corrente diretta fino a 4 kA
- caduta di tensione diretta nello stato ON 3-4 V
- $t_{OFF}$  fino a 10 $\mu$ s

# BJT (Bipolar Junction Transistor)

Il transistor bipolare a giunzione (BJT) è un dispositivo a semiconduttore dotata di tre terminali: *collettore*, *base* ed *emettitore*.

È totalmente controllabile dal terminale di base.

Il BJT di potenza generalmente è di tipo npn.

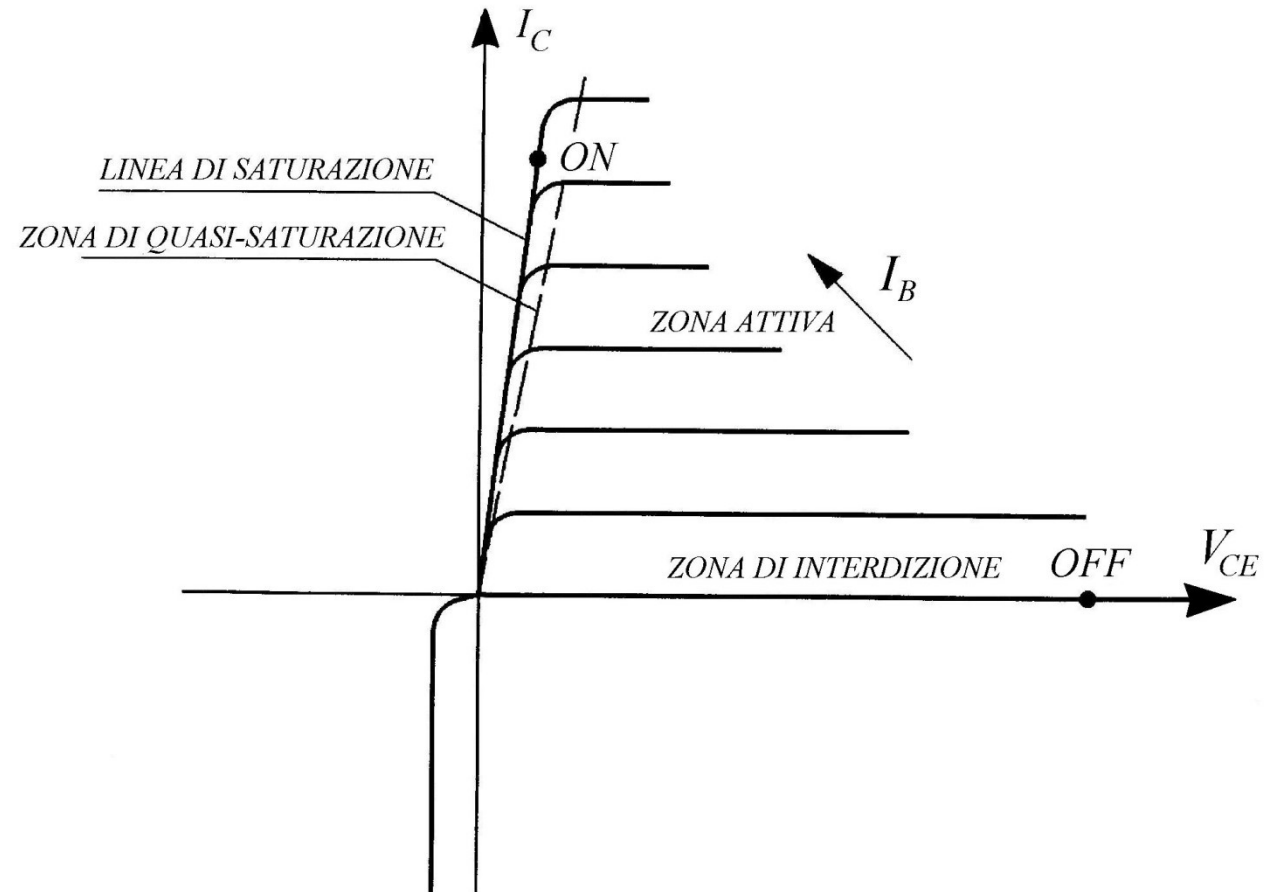


## VALORI TIPICI

- massima tensione di blocco fino a 1400 V
- corrente di collettore fino a 1000 A
- tensione collettore-emettitore 2-3 V
- tempi di commutazione inferiori a qualche  $\mu\text{s}$  (frequenze di commutazione intorno alla decina di kHz)



# BJT: CARATTERISTICA



# BJT: ZONE DI FUNZIONAMENTO

Il BJT rimane in conduzione finché viene mantenuta la corrente in base.

Per correnti  $I_B$  relativamente piccole la corrente  $I_C$  è determinata dalla relazione

$$I_C = \beta I_B$$

dove  $\beta$  è il guadagno di corrente in continua. Il BJT funziona nella zona lineare (di **modulazione**). La tensione ai suoi capi è determinata dal circuito esterno. Per BJT di elevata potenza il guadagno è piccolo: dell'ordine di 10.

Se  $I_B$  è grande, la  $I_C$  è limitata dal circuito esterno e la tensione ai suoi capi  $V_{CE\ sat}$  è piccola. Il BJT funziona nella zona di **saturazione**.

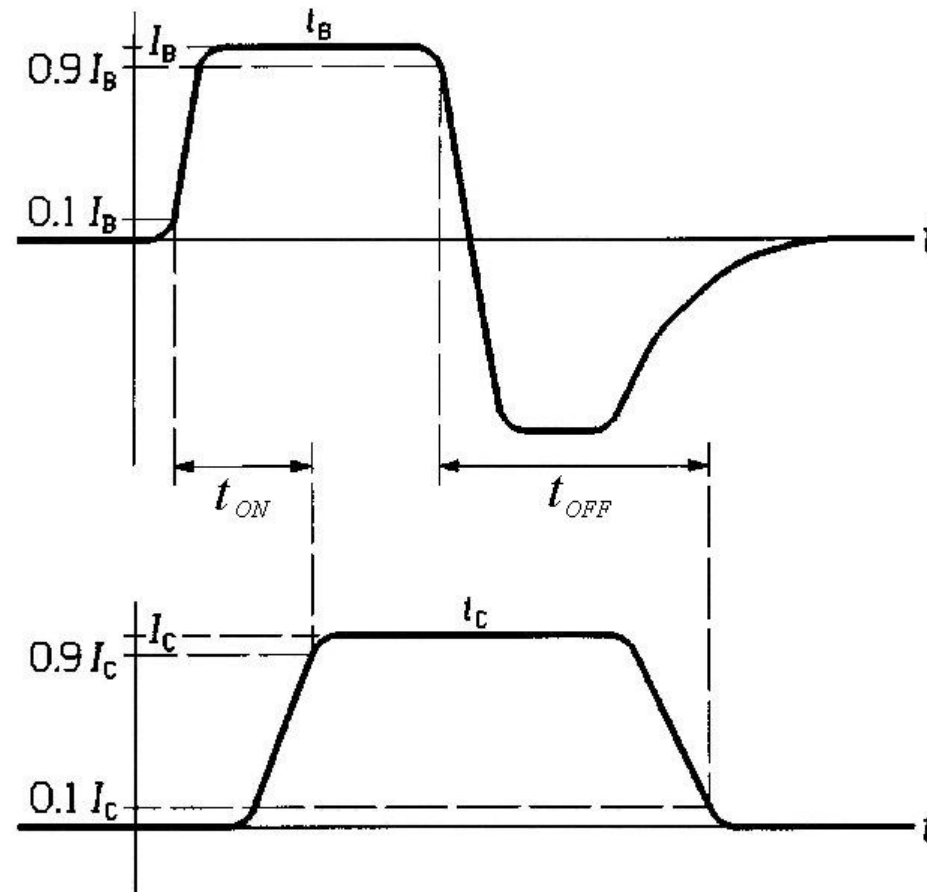
Per  $I_B = 0$  il BJT non conduce e funziona nella zona di **interdizione**.

$V_{CE0}$  indica la massima tensione  $V_{CE}$  diretta che il BJT riesce a sostenere quando  $I_B = 0$ .

Il BJT non è in grado di sostenere tensioni  $V_{CE}$  inverse. Quando è usato con tensioni alternate si deve introdurre un diodo polarizzato inversamente in serie al circuito di collettore.

Il BJT soffre del cosiddetto “*secondo breakdown*” che si distingue dal “*primo*” (che si ha per  $V_{CE}$  inversa). Esso può avvenire nella fase di accensione o spegnimento, quando sia la  $V_{CE}$  che la  $I_C$  sono elevate. È causato da un aumento di temperatura locale all'interno del semiconduttore (difetto del cristallo) che provoca un aumento di corrente (coefficiente di temperatura positivo) e in definitiva la fusione localizzata del semiconduttore.

# BJT: COMMUTAZIONE

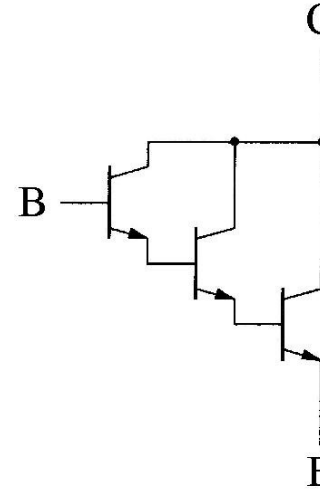
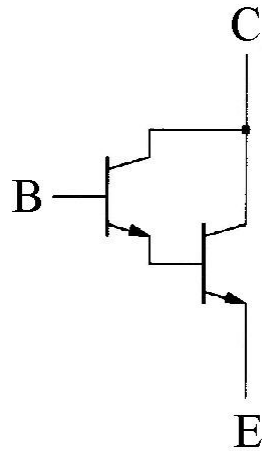


Per rendere più veloce il processo di spegnimento conviene invertire, per un breve intervallo di tempo la  $I_B$ .

Il tempo di spegnimento può essere ridotto anche impedendo al BJT di lavorare nella zona di completa saturazione.

La corrente  $I_B$  deve essere tale da far funzionare il BJT nella zona di *quasi-saturazione*.

# BJT: CONNESSIONE DARLINGTON



Nei convertitori statici si usa spesso la connessione *Darlington* di due o tre BJT allo scopo di aumentare il guadagno complessivo di corrente. In questo modo si ottengono valori di  $\beta$  complessivo fino a 100 per due BJT e 1000 per tre BJT.

Come contropartita si ha un aumento della caduta di tensione diretta nello stato di conduzione.

# MOSFET

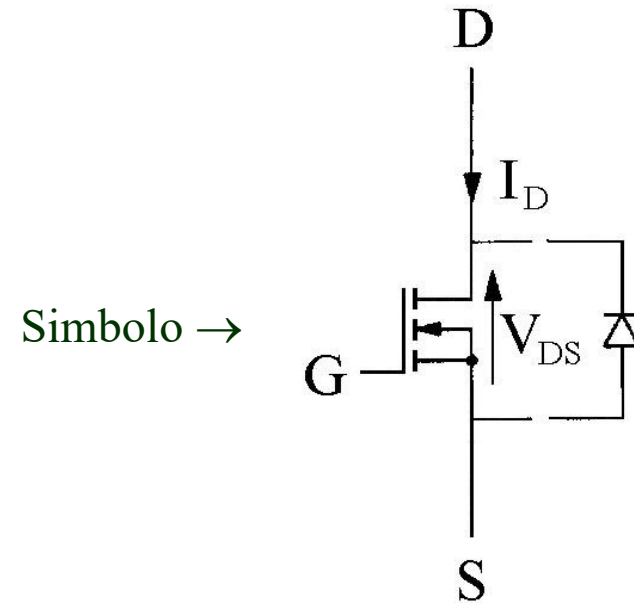
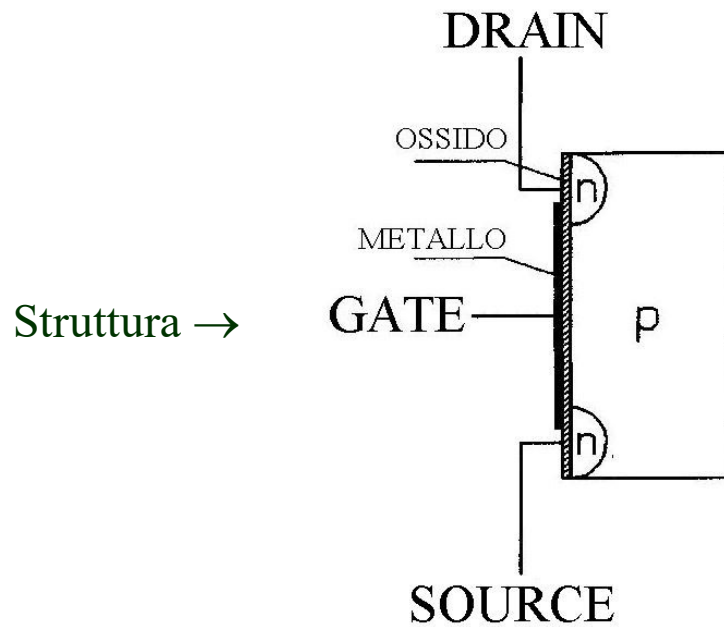
## (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Le sue proprietà fondamentali sono il ridotto tempo di commutazione e la facilità di comando.

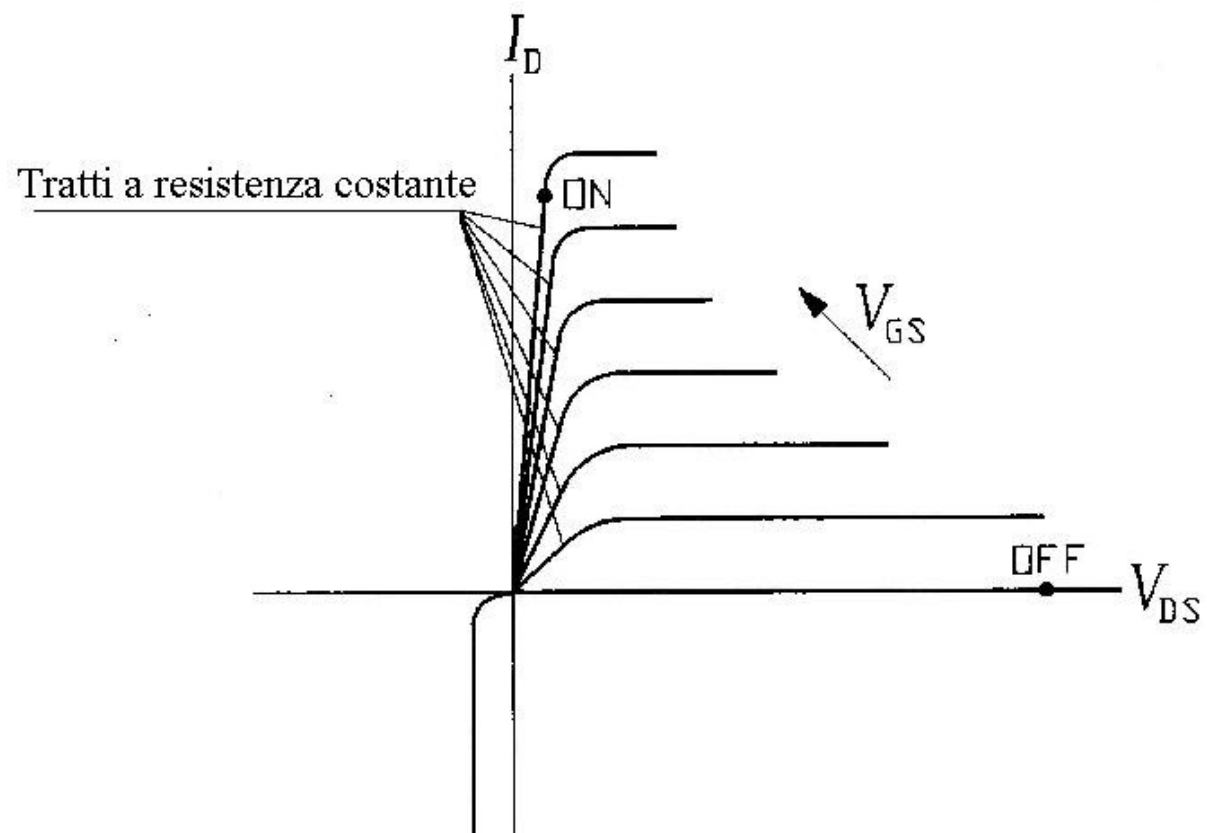
Per contro è un componente che lavora con tensioni e correnti relativamente limitate.

È un componente comandato in tensione.

L'impedenza gate-source è molto elevata ( $10^9 \div 10^{11} \Omega$ ).



# MOSFET: CARATTERISTICA



# MOSFET

Ciascuna curva con  $V_{GS}$  costante presenta un tratto a resistenza costante.

Nel funzionamento da interruttore, nello stato ON la tensione  $V_{GS}$  dovrà essere sufficientemente grande da portare il MOSFET a lavorare nel tratto a resistenza costante coerentemente con il circuito esterno.

Nelle fasi di commutazione in realtà si hanno delle leggere correnti di gate dovute agli effetti capacitivi tra i terminali.

Anche il MOSFET mal sopporta tensioni inverse.

I MOSFET hanno coefficiente di temperatura positivo e quindi possono essere facilmente connessi in parallelo.

Il difetto principale è la resistenza relativamente elevata che presentano nello stato di conduzione. Essa provoca una elevata caduta di tensione diretta e quindi consistente dissipazione di potenza.

## VALORI TIPICI

- massima tensione di blocco fino a 1000 V
- corrente  $I_D$  fino a 100 A
- resistenza drain-source  $0.1 \div 1 \Omega$
- tensione gate-source 4-6 V
- tempi di commutazione anche inferiori a 100 ns (massima frequenza di commutazione oltre i 100 kHz)

# IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

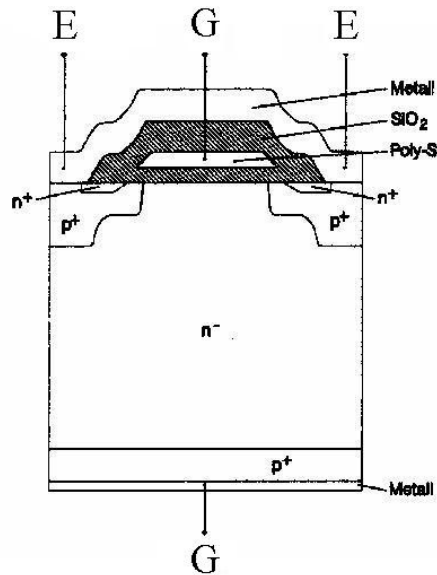
È un componente che combina i vantaggi del MOSFET e del BJT.

È comandato in tensione (bassi valori della corrente di comando) come il MOSFET ma ha potenze di esercizio superiori.

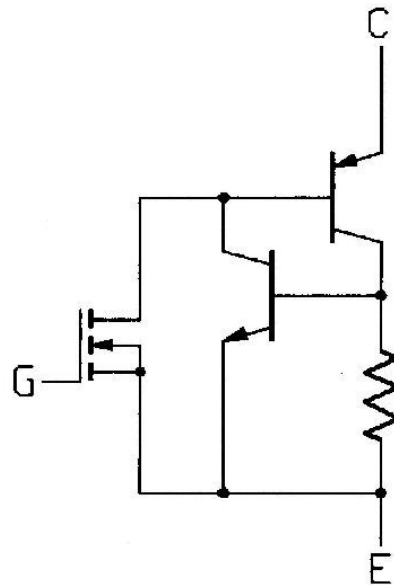
Similmente ai BJT ha bassi valori di caduta di tensione diretta in conduzione ed elevati valori di corrente diretta e tensione di blocco.

I tempi di commutazione sono compresi fra quelli del MOSFET e quelli del BJT.

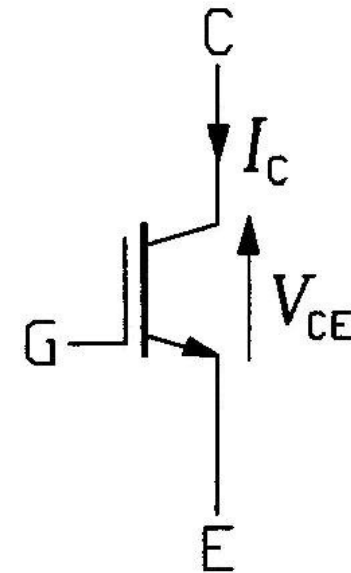
Struttura



Circuito equivalente

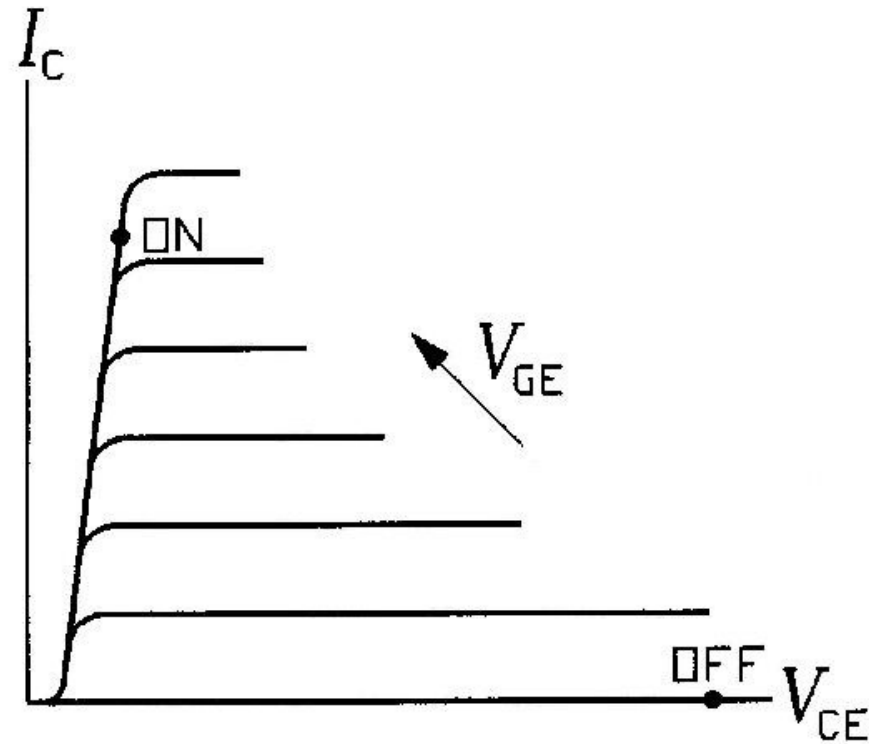


Simbolo





# IGBT: CARATTERISTICA V-I



La famiglia di caratteristiche ha la stessa forma di quelle del BJT, solo che nell'IGBT il parametro variabile è la tensione  $V_{GE}$ .

# TIPI DI IGBT

Si hanno due principali tipi di IGBT:

*punch-through* (o asimmetrici) i quali non hanno capacità di blocco inverso ma hanno basse perdite di potenza nello stato ON. Sono impiegati nei convertitori con alimentazione in continua (es. invertitori) dove ai capi del componente è inserito un diodo di ricircolo in antiparallelo.

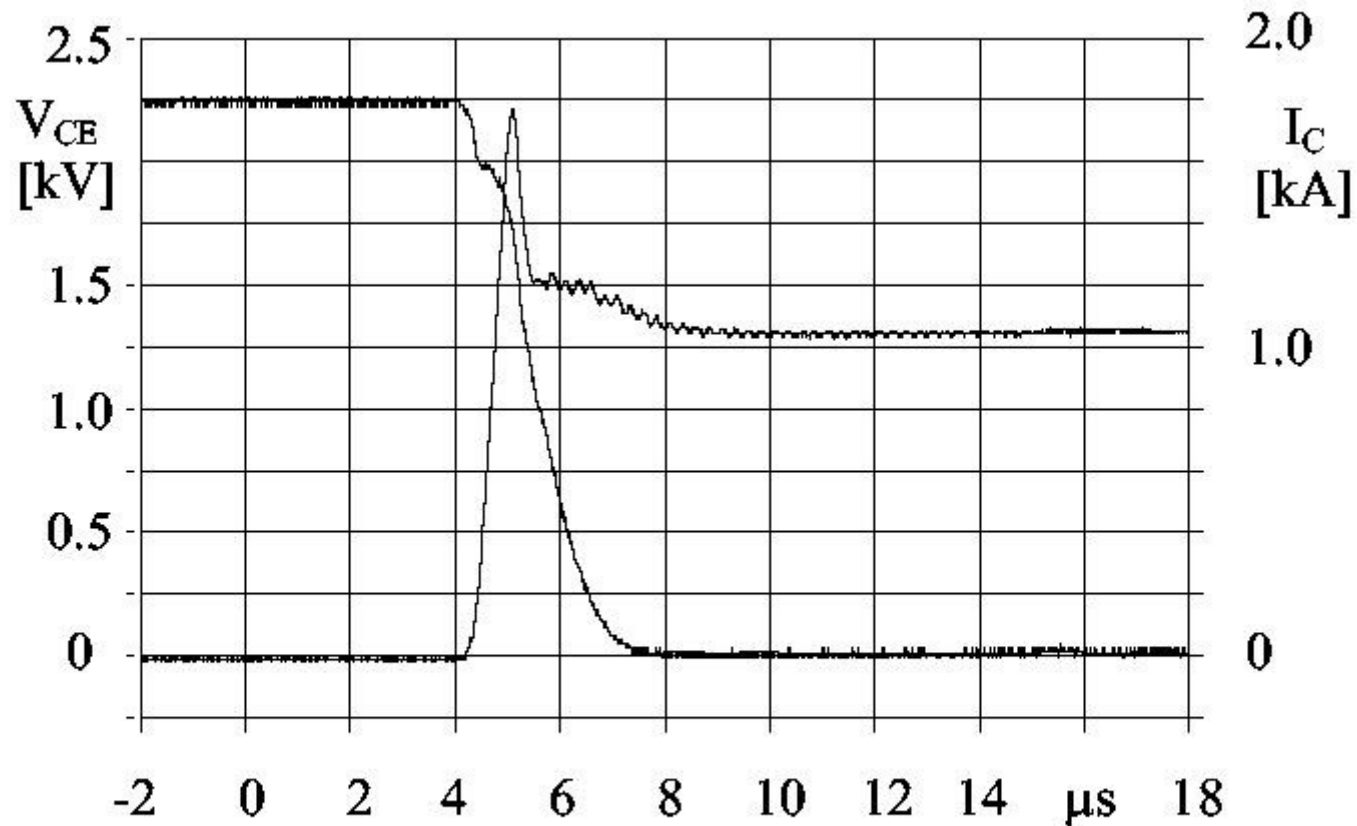
*non-punch-through* (o simmetrici) i quali hanno capacità di blocco inverso della stessa entità di quello diretto, ma hanno perdite di potenza nello stato ON più elevate rispetto a quelli asimmetrici. Sono usati in convertitori PWM con ingresso in alternata (regolatori in corrente alternata).

## VALORI TIPICI

- massima tensione di blocco tipica a 3300 V (esistono IGBT fino a 6500 V)
- corrente di collettore fino a 1500 A
- tensione collettore-emettitore in saturazione 2-5 V
- tensione gate-emettitore 3-5 V
- tempi di commutazione inferiori a 2  $\mu$ s (frequenza di commutazione fino a 20 kHz)

# IGBT: COMMUTAZIONE

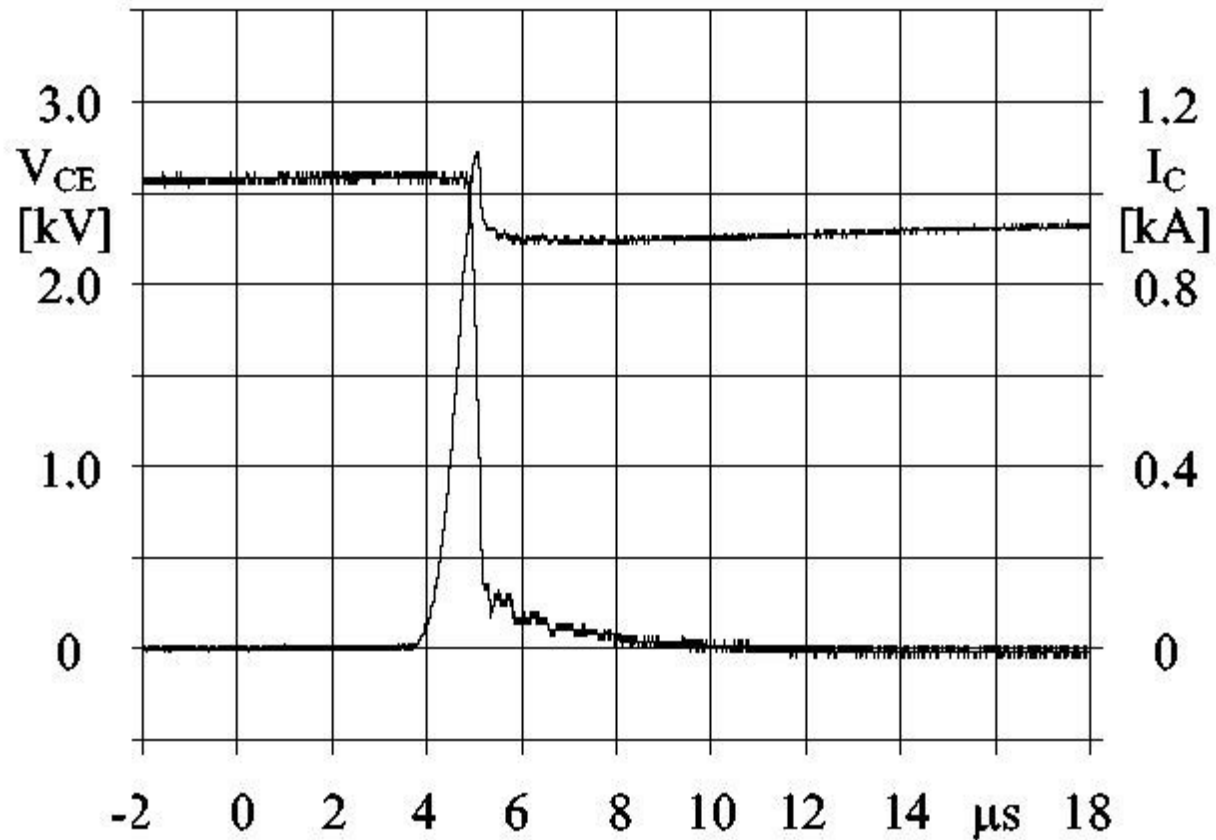
Andamento della tensione e della corrente durante un processo di accensione



(FZ1200R33KF1 (3300V; 1200A),  $V_{dc}=2250V$ ,  $I_o=1050A$ ,  $T_j=25^\circ C$ )

# IGBT: COMMUTAZIONE

Processo di spegnimento



(FZ1200R33KF1 (3300V; 1200A),  $V_{dc}=2250V$ ,  $I_o=1050A$ ,  $T_j=25^\circ C$ )

# IGCT (Integrated-Gate Commutated Thyristor)

L'IGCT è un'evoluzione del GTO.

Lo spegnimento avviene tramite un robusto pilotaggio (il guadagno di corrente per lo spegnimento è unitario). È sufficiente però un impulso di corrente negativo di durata molto breve, anche se esso deve avere comunque un elevato  $di/dt$ .

La corrente di comando può essere fornita dal parallelo di più MOSFET connessi ad un circuito a bassissima induttanza parassita.

Nel processo di spegnimento il componente cambia comportamento: da modalità tiristore passa alla modalità transistor.

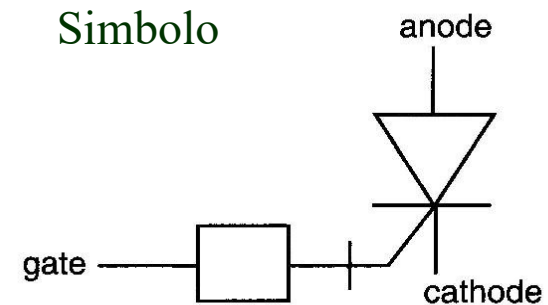
Il circuito di pilotaggio è incorporato all'interno del componente (da qui deriva il termine integrated-gate).

Le sue caratteristiche di caduta di tensione diretta,  $di/dt$  del processo di accensione, potenza di comando,  $dv/dt$  del processo di spegnimento, lo rendono superiore al GTO.

Con le dovute cautele può essere connesso in serie e/o parallelo per applicazione di elevata potenza.

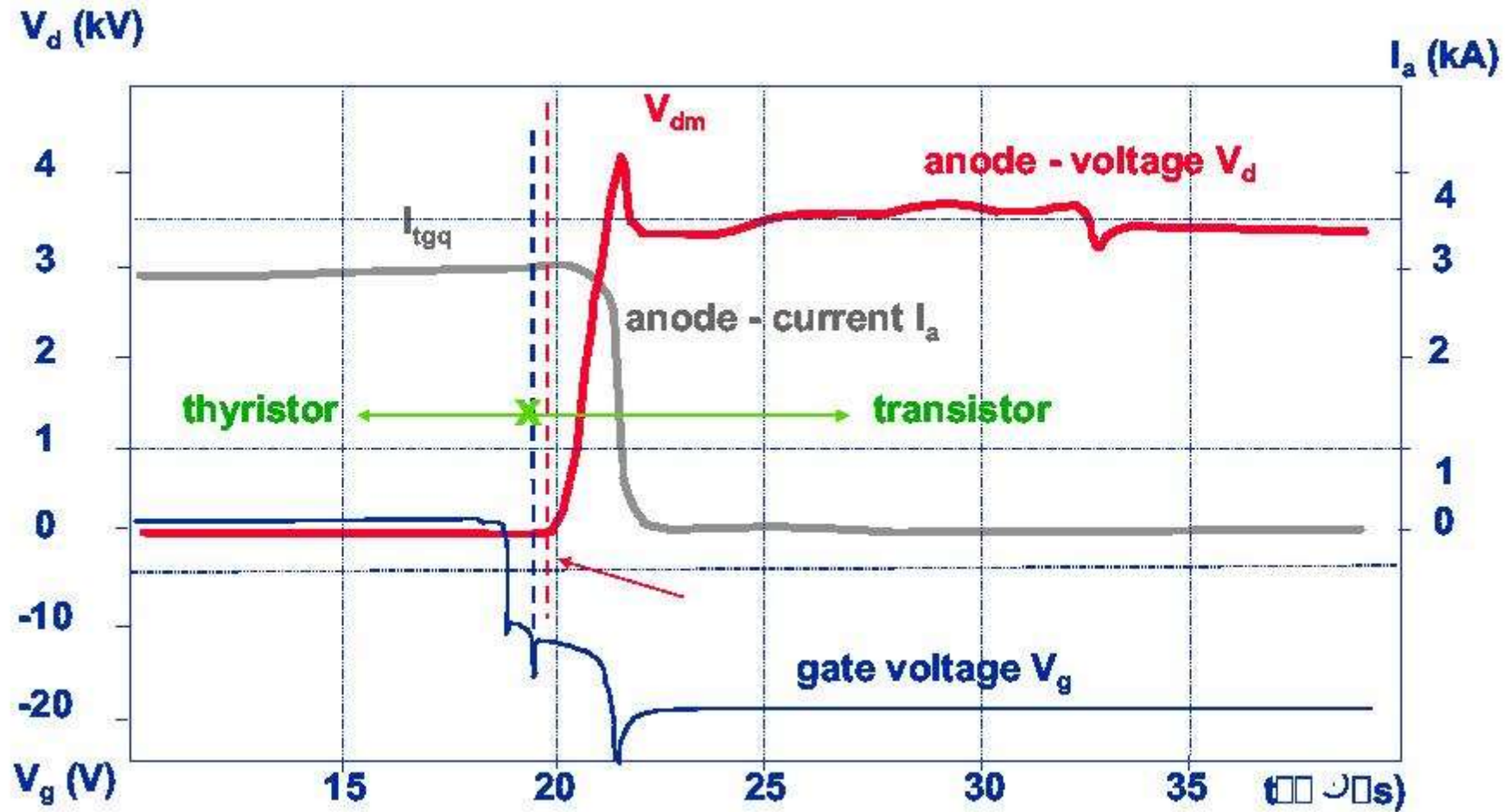
## VALORI TIPICI

- massima tensione di blocco fino a 5500 V
- corrente di anodo fino a 4000 A
- tensione anodo-catodo in conduzione circa 3 V
- tempi di commutazione inferiori a 10  $\mu s$  (frequenza di commutazione fino a 500 Hz).



# IGCT: COMMUTAZIONE

Andamento delle grandezze durante il processo di spegnimento

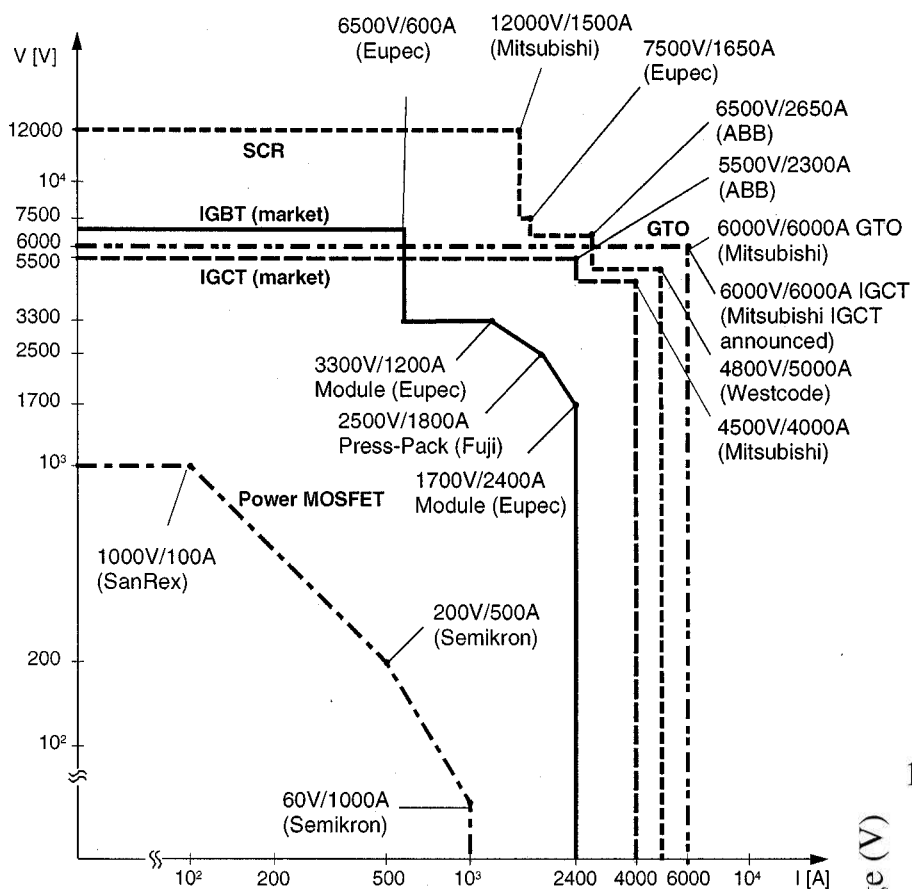


# TABELLA COMPARATIVA

S.Kouro, J.Rodriguez , B.Wu, S.Bernet, M.Perez, *Powering the future of industry*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 18, No. 4, pp. 26-39, July/August 2012.

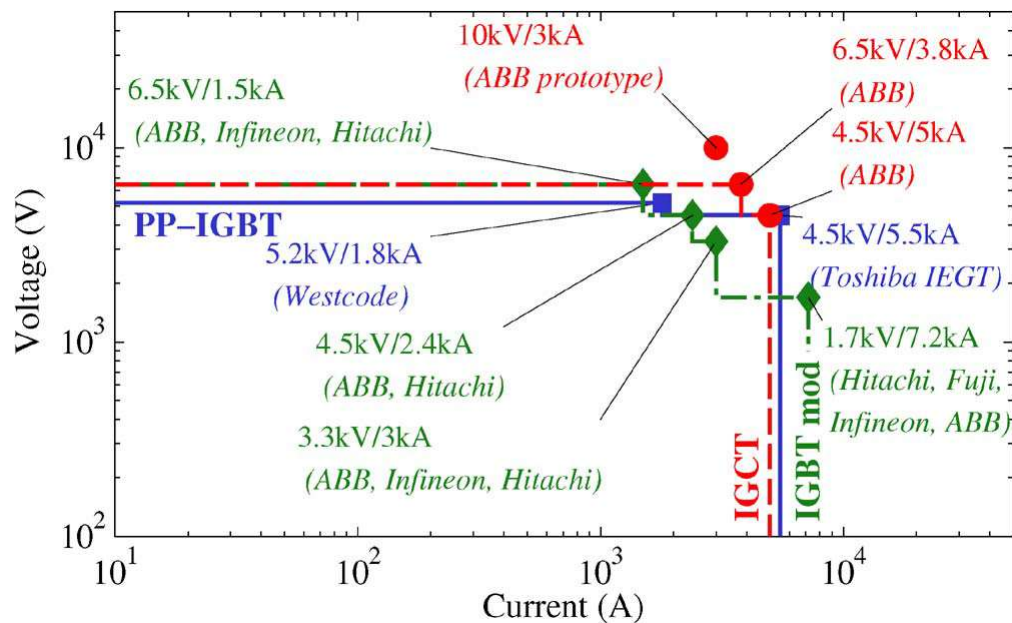
Power Semiconductor	Company	Ratings	Switch Power (MVA)	Case
GTO	MITSUBISHI	6000V; 6000A	36	Press-Pack
	HITACHI	6000V; 6000A	36	Press-Pack
	ABB	4500V; 4000A	18	Press-Pack
IGBT	EUPEC	3300V; 1200A, 6500V; 600A	3.96 3.6	Module Module
	MITSUBISHI	3300V; 1200A 4500V	3.96	Module
	HITACHI	3300V; 1200A	3.96	Module
	TOSHIBA	3300V; 1200A	3.96	Press-Pack
IGCT	ABB	4500V; 1500A	6.75	IPM
	ABB	4500V; 3500A	15.75	Press-Pack
		5500V; 2300A	12.65	Press-Pack
	MITSUBISHI	4500V; 4000A	18	Press-Pack
		6000V; 6000A	36	Press-Pack

# GRAFICI COMPARATIVI



S. Bernet, *Recent developments of high power converters for industry and traction applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1102-1117, November 2000.

F.Filsecker, R.Alvarez, S.Bernet, *Comparison of 4.5-kV press-pack IGBTs and IGCTs for medium-voltage converters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 2, pp. 440-449, February 2013.





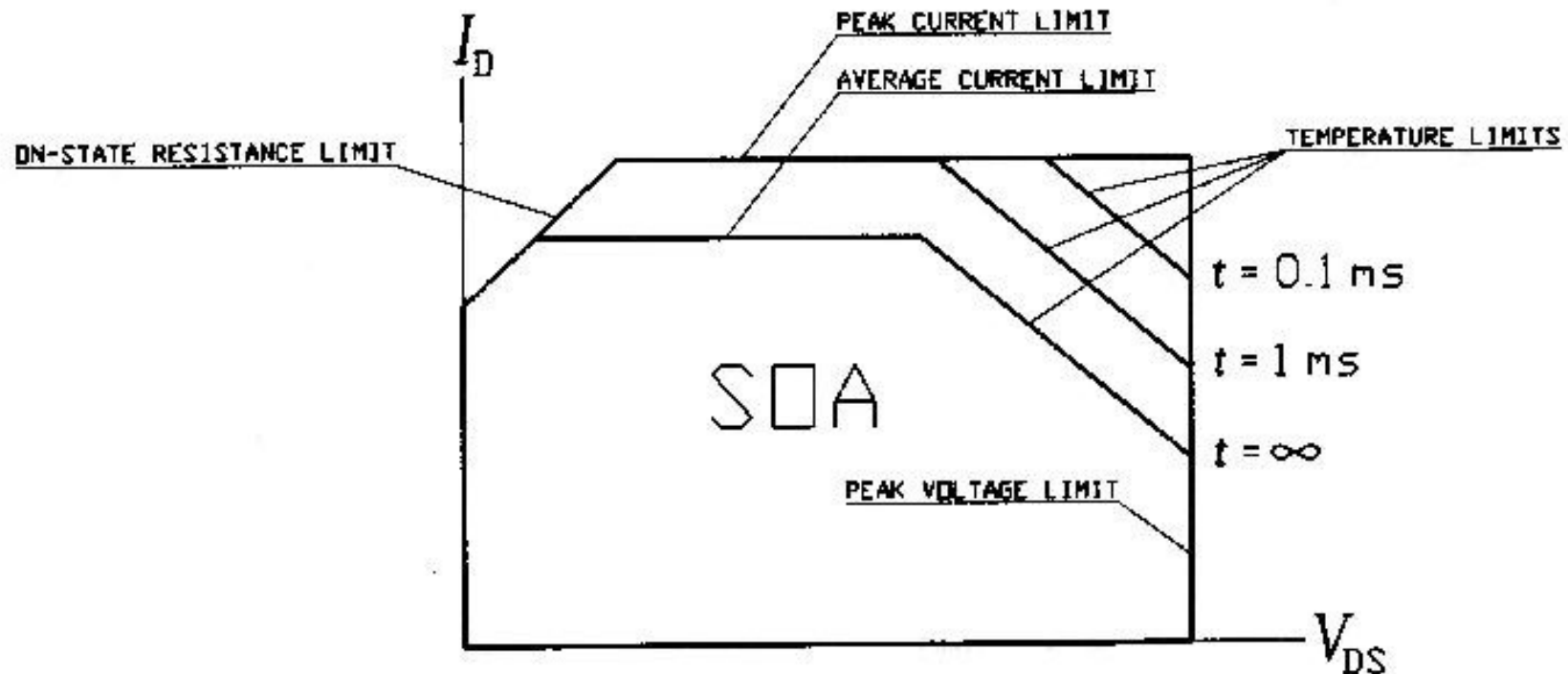
# SOA (Safe Operating Area)

La SOA è la zona nel piano delle caratteristiche v-i costituita da tutti i punti di funzionamento sicuro del componente.

Le caratteristiche v-i di un componente non si estendono indefinitamente ma hanno dei limiti. Ci sono limiti di corrente, di tensione e di potenza dissipata.

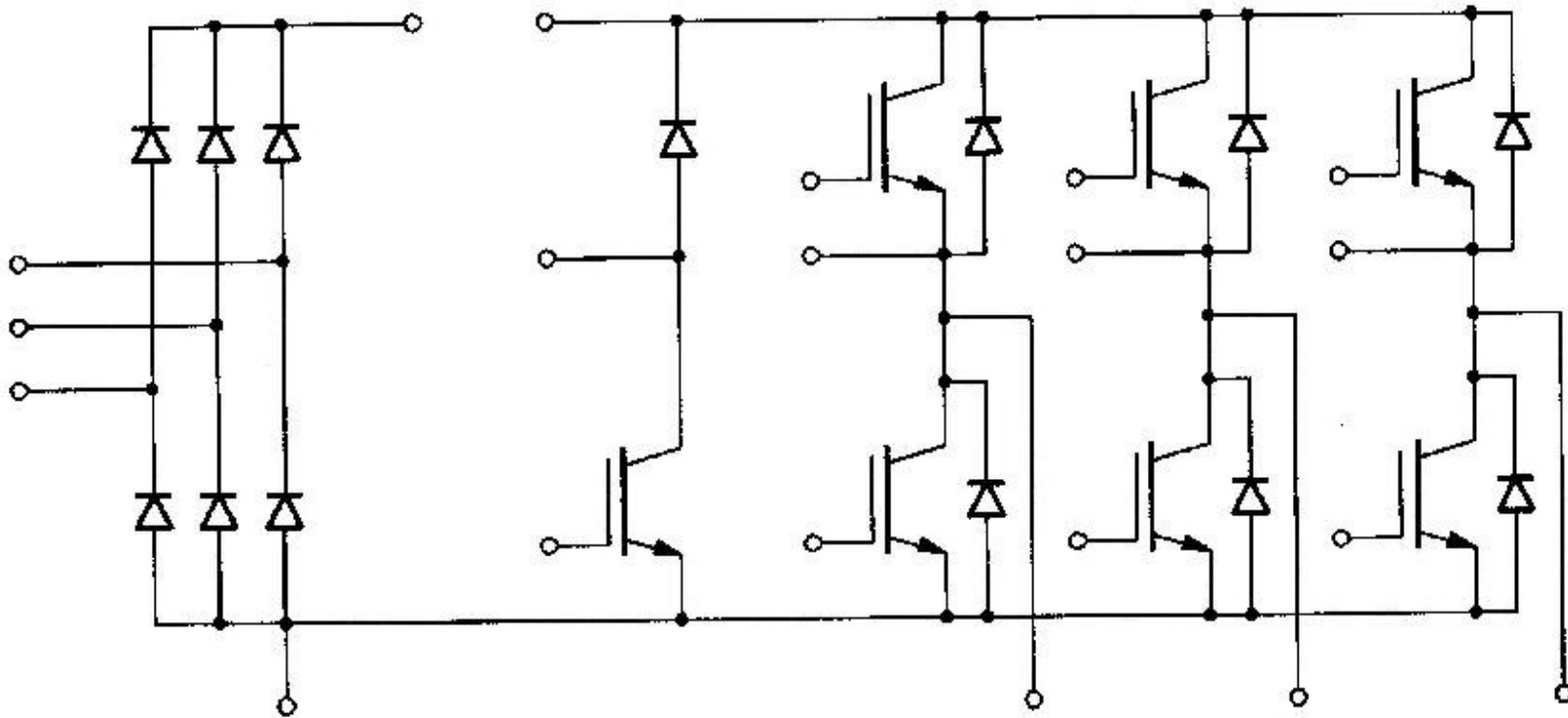
Solitamente si usano coordinate logaritmiche (Log v-Log i).

Una proprietà importante dei componenti è quella di avere una SOA più grande possibile.



# MODULI DI POTENZA

Le ditte costruttrici di componenti a semiconduttore hanno in catalogo anche i moduli di potenza. Essi sono costituiti da un insieme di più componenti (anche eterogenei) già interconnessi secondo delle opportune ed usuali topologie. Si va dal singolo ramo di una connessione a ponte fino ad un intero variatore di frequenza formato da raddrizzatore e invertitore.



Esempio di modulo con IGBT

# CIRCUITI E SISTEMI AUSILIARI

Comprendono:

- 1) circuiti smorzatori (snubber)
- 2) circuiti di protezione contro le sovracorrenti
- 3) circuiti di pilotaggio
- 4) circuiti di filtro
- 5) sistemi di raffreddamento
- 6) sistemi di controllo

Il funzionamento da interruttore dei componenti a semiconduttore è molto oneroso oneroso. Ne sono un esempio la fase di spegnimento e la fase di accensione.

Fase di spegnimento:

se non si adottano opportune contromisure, interruzioni repentine della corrente possono provocare sovratensioni, causate dalle induttanze parassite, tali da distruggere il componente.

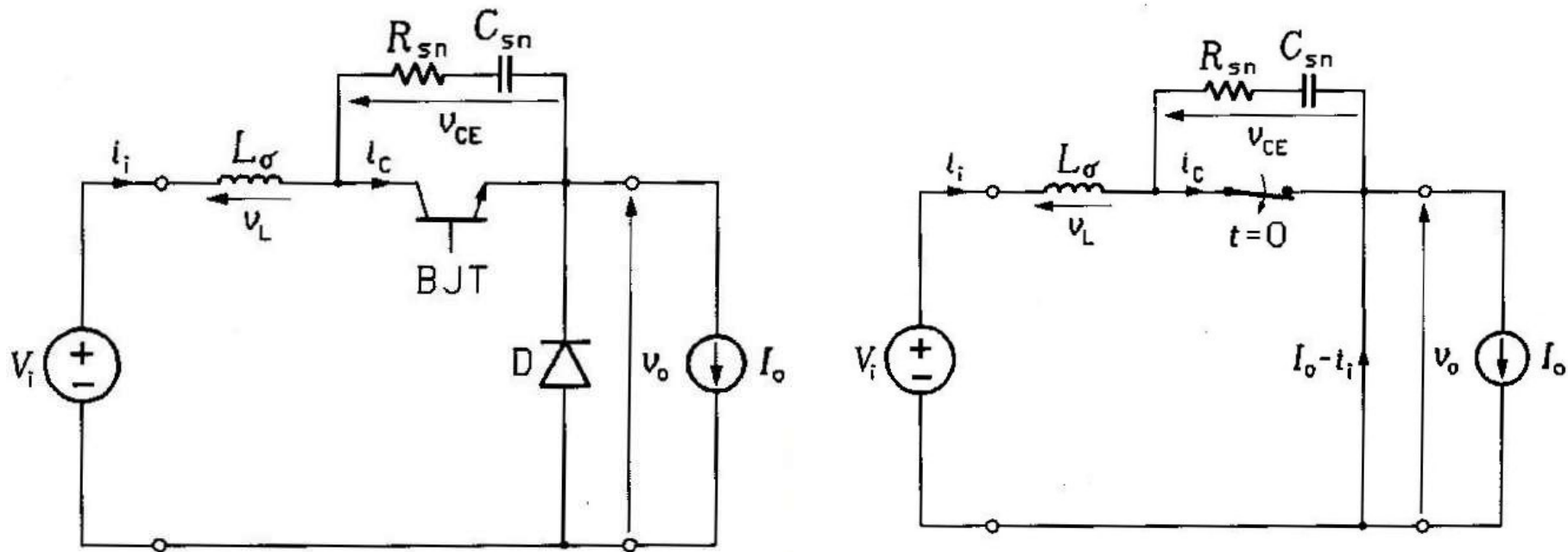
Fase di accensione:

valori elevati di tensione e corrente presenti contemporaneamente nel componente possono far uscire il punto di funzionamento dalla SOA.

# CIRCUITI SMORZATORI

È necessario inserire degli opportuni circuiti smorzatori (detti snubber) che coadiuvino le fasi di commutazione con lo scopo di:

- prevenire sovratensioni e sovracorrenti transitorie,
- ridurre le perdite,
- assicurare che il componente operi all'interno della SOA.



Schemi di principio per lo studio dell'effetto di un circuito smorzatore inserito in parallelo ad un BJT in una connessione tipica.

# CIRCUITI SMORZATORI: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

*Senza circuito smorzatore*

Fase di spegnimento: il BJT entra in interdizione.

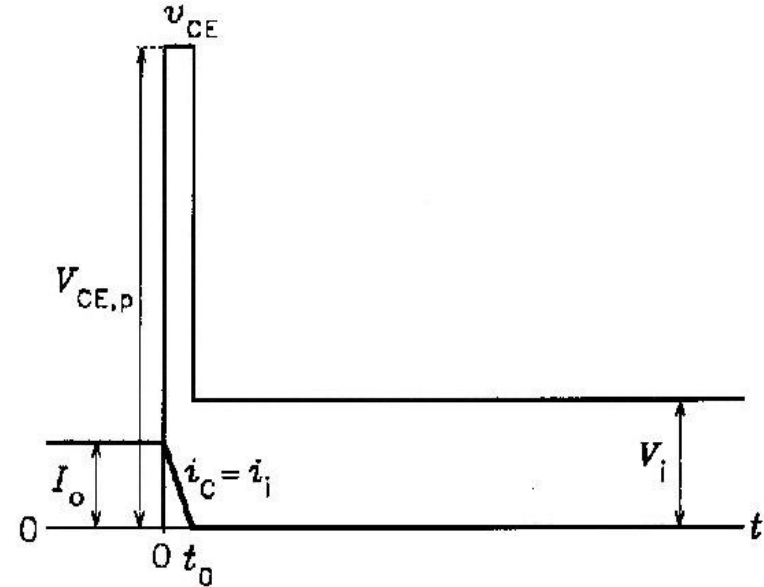
Si supponga  $I_0 = \text{costante}$ .

$$v_{CE} = V_i - v_L - v_0$$

$$v_0 = 0$$

$$v_{Lp} = -L_\sigma \frac{I_0}{t_0} \quad \Rightarrow \quad v_{CE} = V_i + L_\sigma \frac{I_0}{t_0}$$

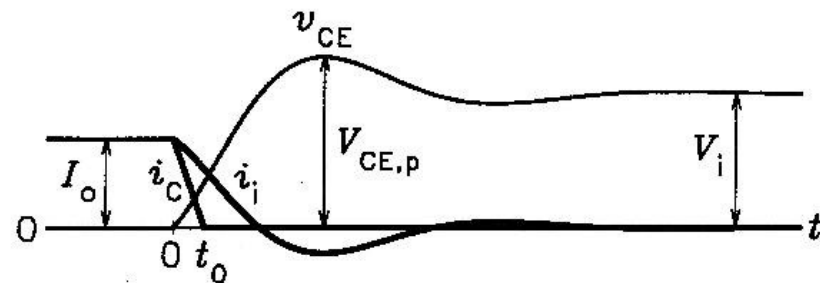
$t_0 = \text{tempo di spegnimento}$



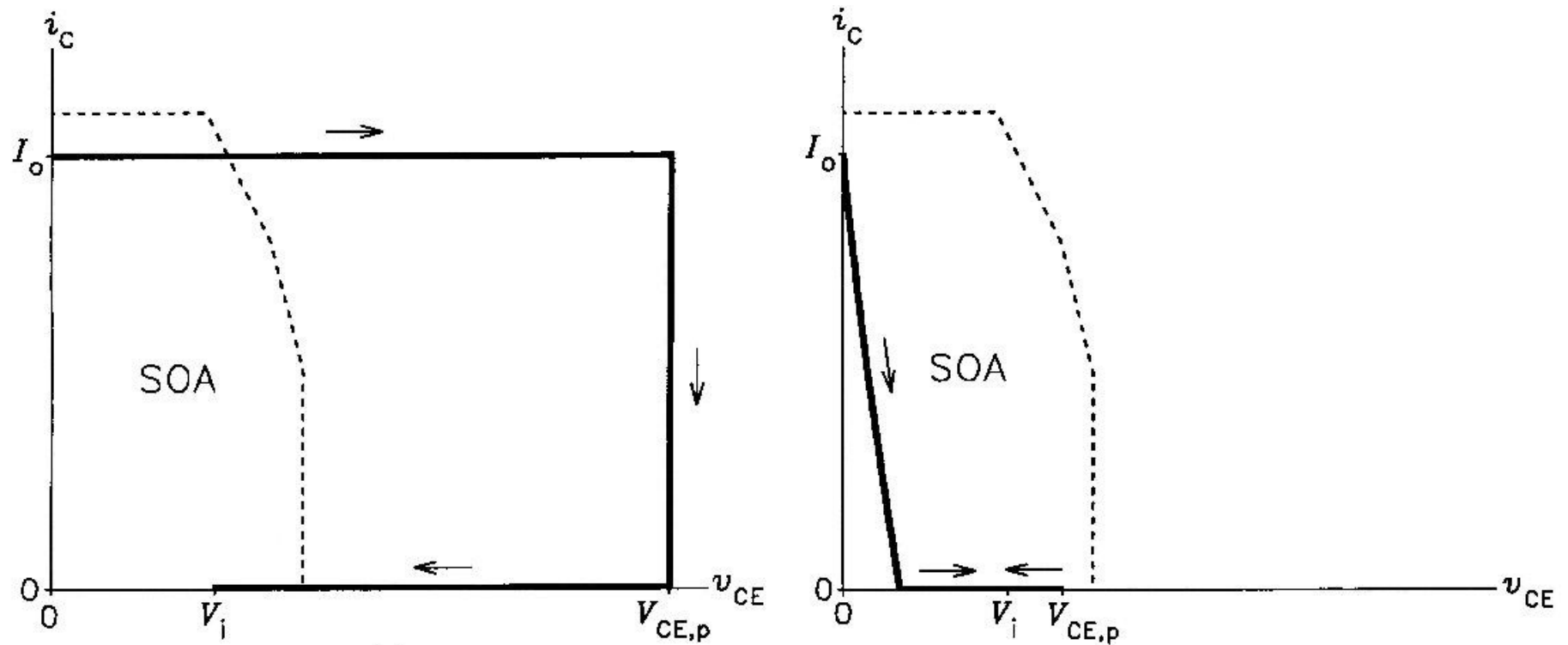
Valori piccoli di  $t_0$  implicano valori elevati di  $v_{CE}$  causati dall'induttanza  $L_\sigma$

*Con circuito smorzatore*

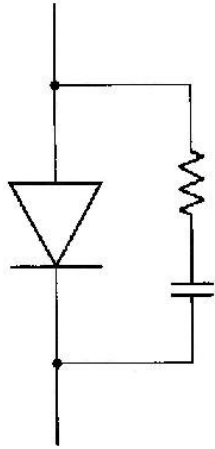
$$v_{CE} = V_i \left[ 1 - e^{-\frac{R_{sn} t}{L_\sigma}} \cos(\omega_d t) \right]$$



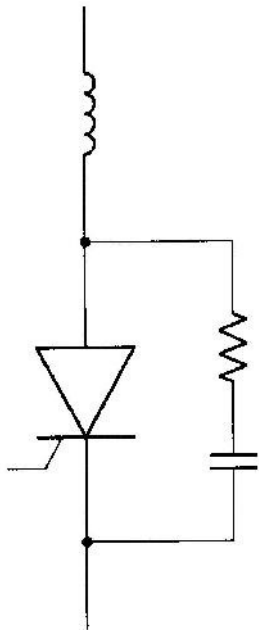
# CIRCUITI SMORZATORI: EFFETTO SULLA TRAIETTORIA



# CIRCUITI SMORZATORI PER DIODI E SCR



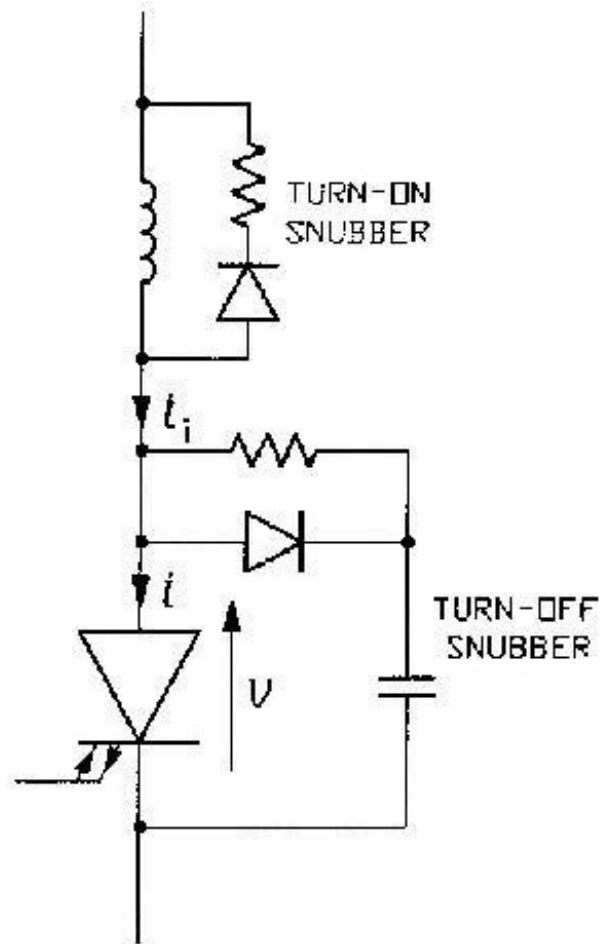
Nel diodo il circuito smorzatore protegge contro le sovratensioni in fase di spegnimento.



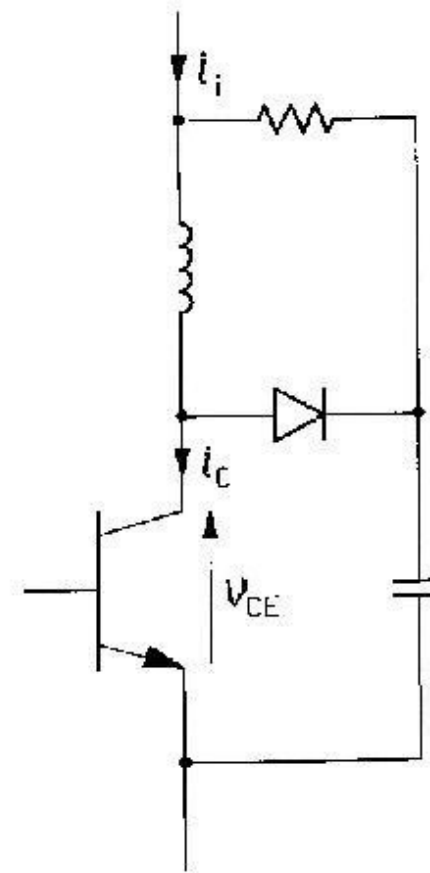
Nell'SCR, oltre che dalle sovratensioni in fase di spegnimento, il circuito smorzatore protegge anche da valori eccessivi di  $dv/dt$  che potrebbero innescarlo nuovamente.

Per evitare eccessivi  $di/dt$  nella fase di accensione si aggiunge una piccola induttanza in serie.

# CIRCUITI SMORZATORI PER GTO E BJT



Circuito smorzatore per GTO



Circuito smorzatore per BJT



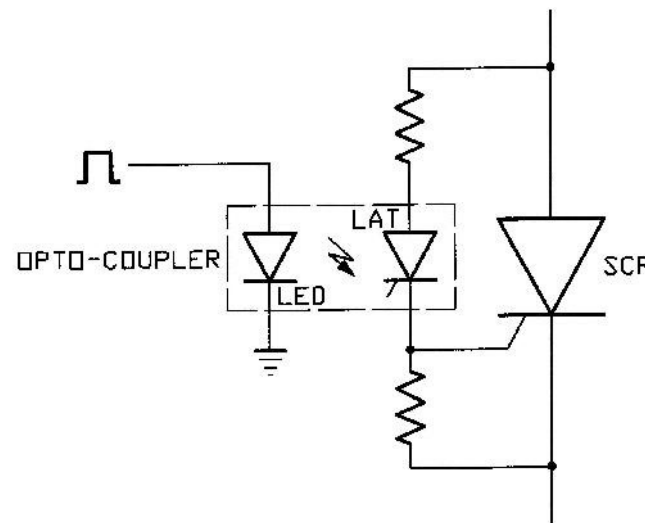
# CIRCUITI DI PILOTAGGIO

I segnali di comando dei componenti elettronici di potenza che compongono i convertitori sono di tipo logico (TTL, CMOS, ecc.). Per essere capaci di pilotare il terminale di comando degli interruttori elettronici devono essere convenientemente amplificati dai *circuiti di pilotaggio* (drivers).

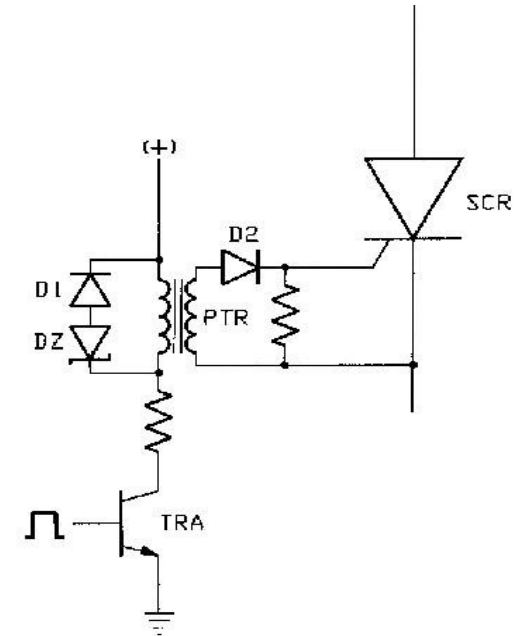
La struttura dei circuiti di pilotaggio dipende dal tipo di componente che deve essere comandato.

## CIRCUITI DI PILOTAGGIO PER SCR

Per innescare un SCR l'impulso di corrente da inviare al gate deve avere sufficiente ampiezza e durata con un piccolo tempo di salita.



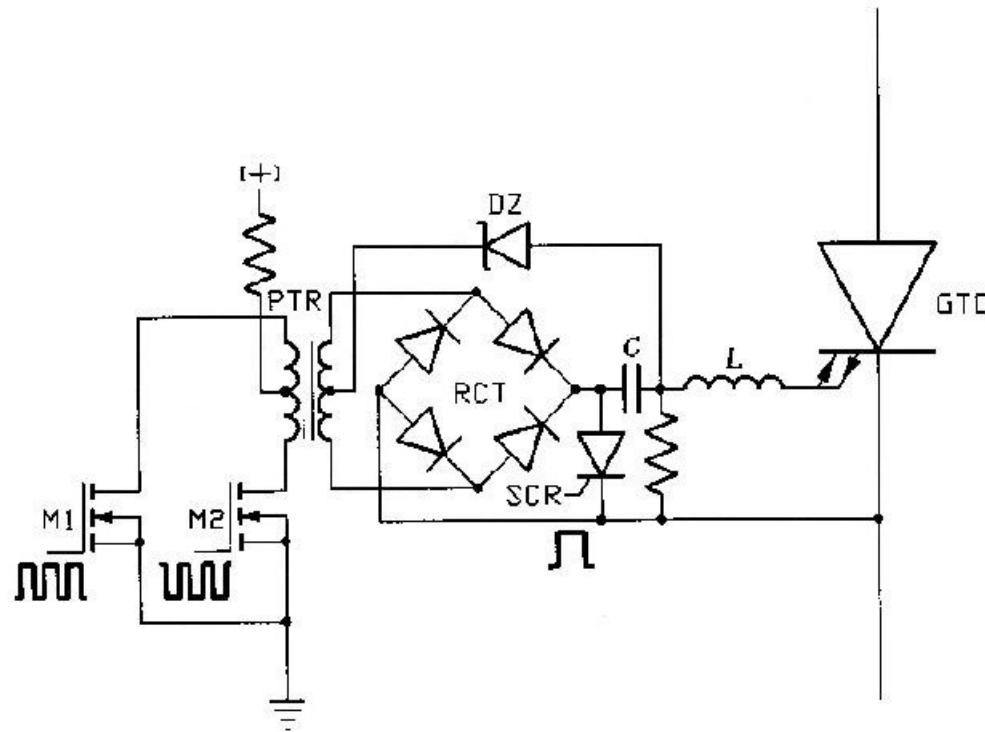
Opto-isolamento



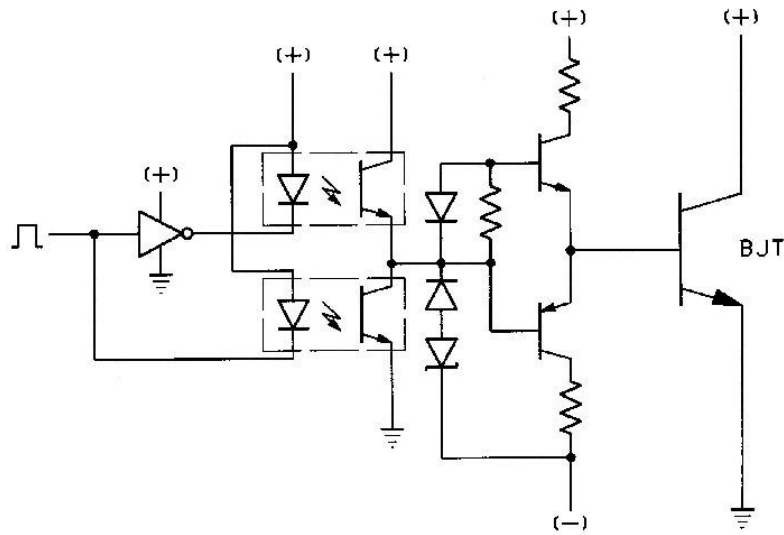
Isolamento con trasformatore

# CIRCUITI DI PILOTAGGIO PER GTO

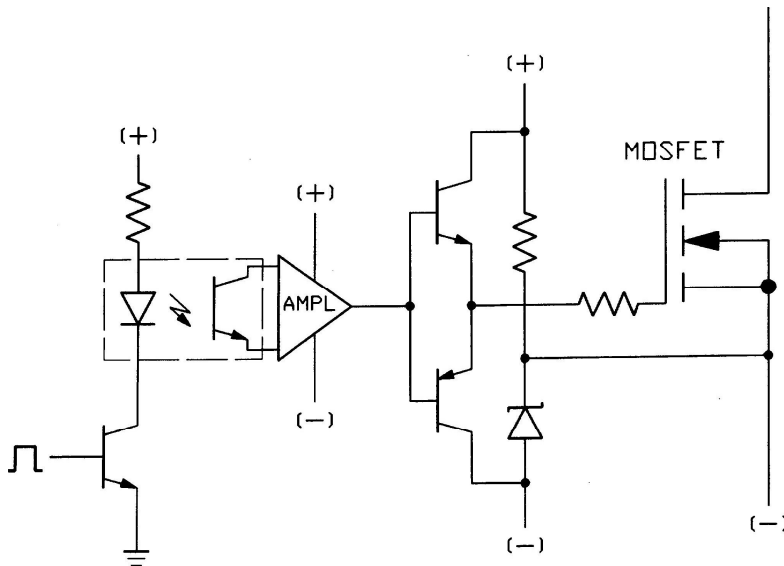
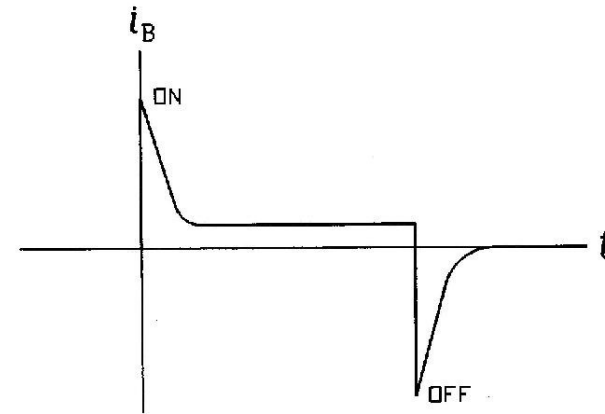
I circuiti di pilotaggio per GTO sono più complicati di quelli per gli SCR in quanto per lo spegnimento è richiesto un impulso di corrente negativa di notevole ampiezza.



# CIRCUITI DI PILOTAGGIO PER BJT, MOSFET E IGBT



Esempio di circuito di pilotaggio per BJT con isolamento e andamento della corrente di base



Esempio di circuito di pilotaggio per MOSFET (o IGBT)