

Sistemi Elettronici per Automazione e Robotica



UNIVERSITÀ DI PISA



3 Componenti Elettronici di Potenza

Prof. Sergio Saponara

DII, Università di Pisa

sergio.saponara@unipi.it

Agenda

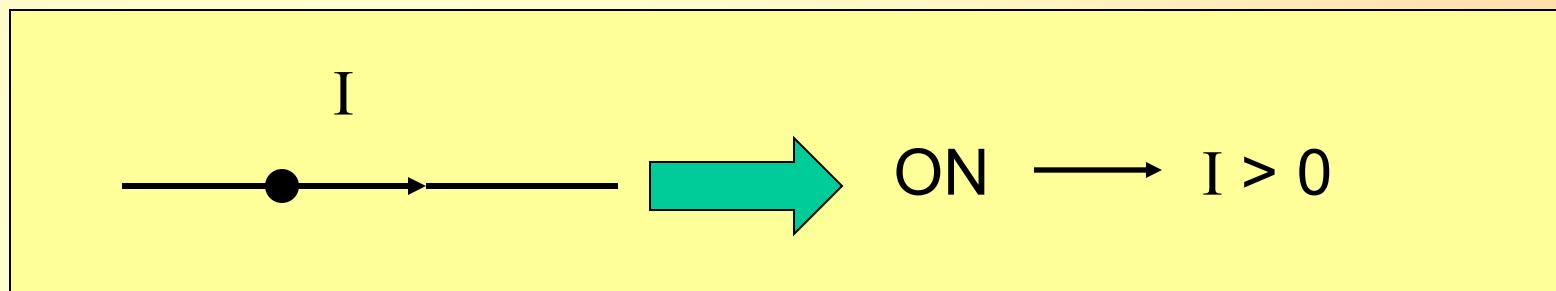
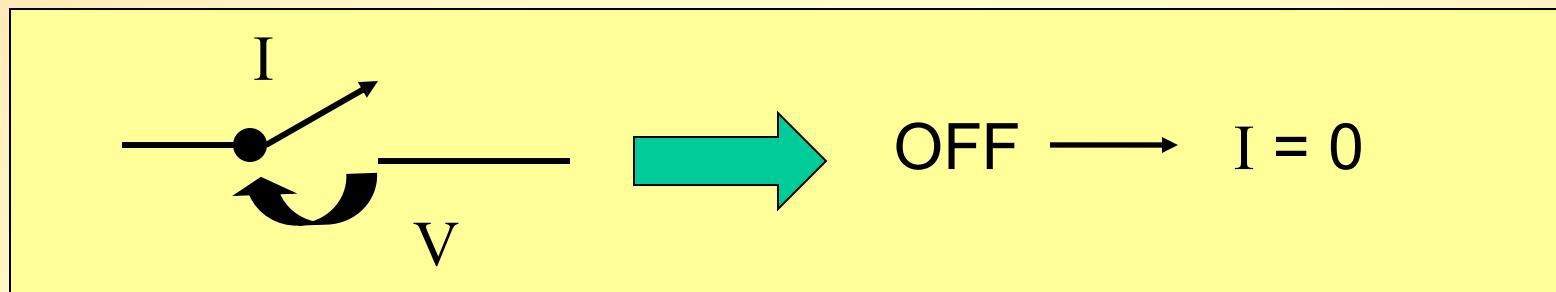
- Componenti (Materiali, Dispositivi) Elettronici di Potenza:
 - generalità
 - materiali
 - dispositivi (diodi, SCR, BJT, MOSFET, IGBT)
 - protezione (diodi, snubber)
 - smart power (circuiti integrati di potenza)
- Analisi data sheet MOSFET e IGBT commerciali per automotive

Generalità sui dispositivi elettronici di potenza

- I moderni sistemi elettronici di controllo e comando di motori e macchine elettriche impiegano diffusamente dispositivi elettronici di potenza, grazie ai quali è possibile regolare flusso di potenza, e dunque di energia, e regolare prestazioni delle macchine quali ad esempio la velocità

Dispositivi a semiconduttore utilizzati come Switch in stati

ON (dispositivo in forte conduzione),
OFF (dispositivo come circuito aperto)



Perché i dispositivi di potenza sono utilizzati come Switch?

ON (dispositivo in forte conduzione) -> caduta di tensione sul dispositivo è nulla → non si spreca potenza

OFF (dispositivo come circuito aperto) → corrente nulla → non si spreca potenza

Quali componenti passivi vengono usati in applicazioni di potenza ?

Si usano come componenti passivi soprattutto **induttanze (L) e capacità (C)** che idealmente non hanno perdite (immagazzinano energia) e non resistenze (R) che la dissipano

Ordine di grandezza dei parametri elettrici

Applicazioni di potenza

- Tensioni: V - kV**
- Correnti: A - kA**
- Potenze: W- kW - MW**

Dispositivi elettronici di potenza

Dispositivi allo stato solido preferibili a relè elettromeccanici per:

- maggiore compattezza
- più alta frequenza di lavoro*

*vantaggi ad alte frequenze:

dimensioni passivi per filtri C e L e trasformatori più piccoli
possibilità di sostenere tecniche di controllo più sofisticate
possibilità di distribuire a frequenze diverse emissioni EM
riducendo problemi di interferenza

Dispositivi elettronici di potenza

- DIODI
- SCR (Silicon Controlled Rectifier)*
- SWITCH CONTROLLATI:
 - BJT (Bipolar Junction Transistor)
 - MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) chiamati anche solo MOS
 - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
 - GTO* (Gate Turn-Off)
 - Mos Controlled Thyristor (MCT) *

* SCR, GTO, MCT = TIRISTORI

Dispositivi elettronici di potenza

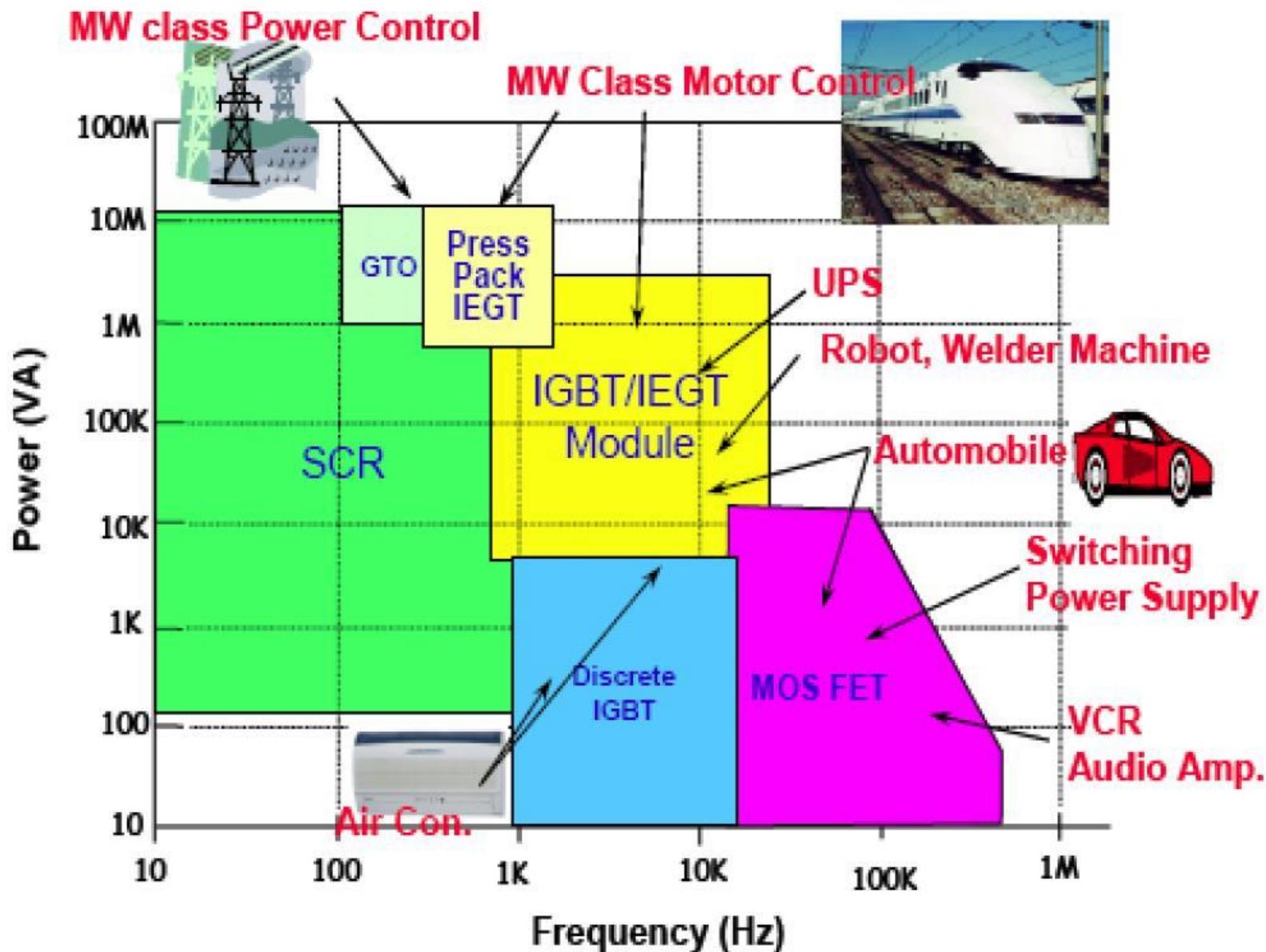
I componenti di potenza a semiconduttori attualmente disponibili si possono così classificare:

- **Diodi**: accensione e spegnimento controllati dal circuito esterno di potenza (*diodo, diodo Schottky*).
- **Tiristori**: accensione controllata da un segnale esterno, spegnimento controllato dal circuito esterno di potenza (*SCR, TRIAC, ASCR, RCT*).
- **Interruttori controllati**: accensione e spegnimento controllati da un segnale esterno (*Bipolar Junction Transistor (BJT), Metal-Oxide-Semiconductors Field Effect Transistor (MOSFET), Gate Turn Off (GTO) Thyristor, Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), Mos Controlled Thyristor (MCT)*).

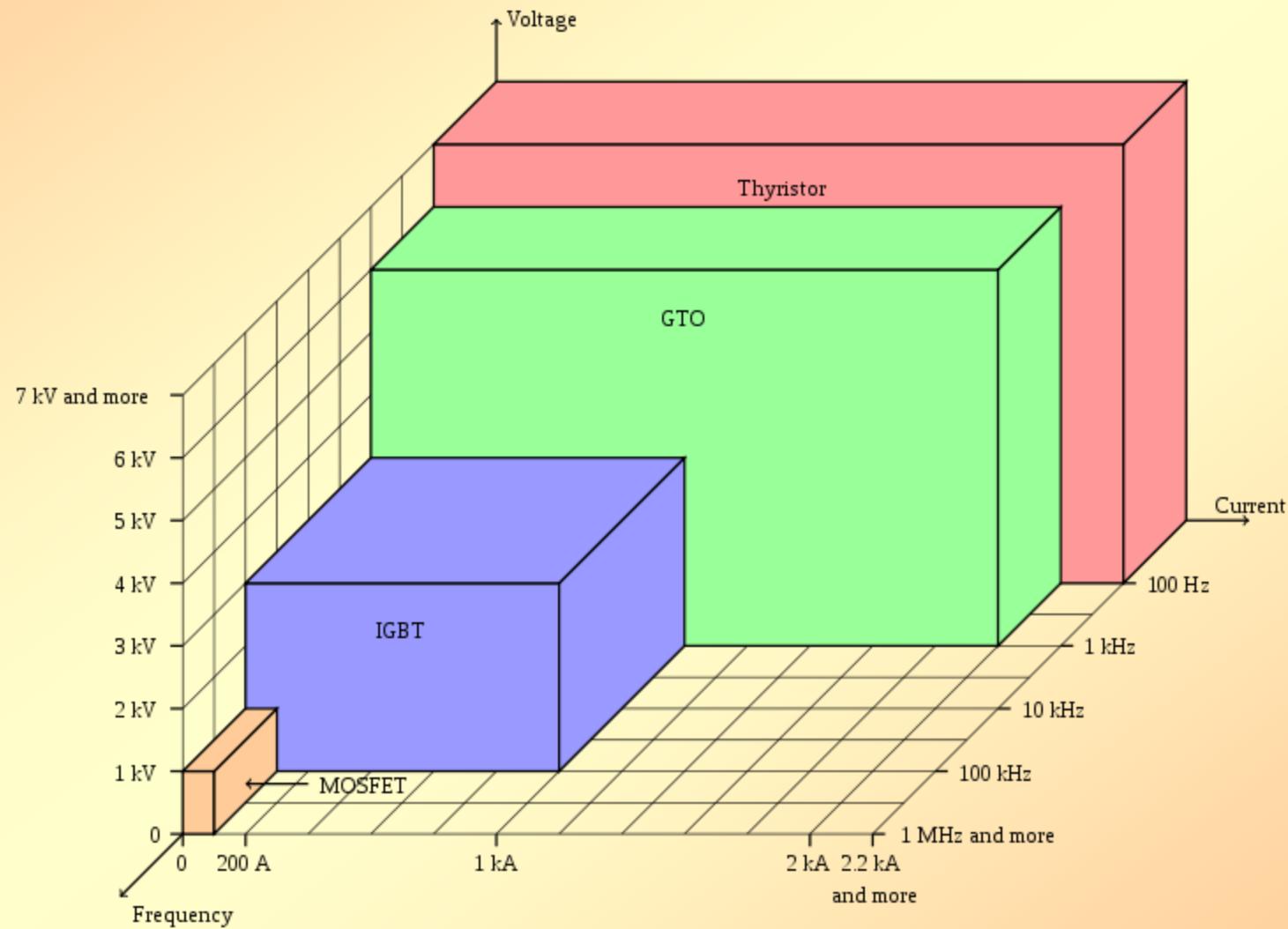
Confronto tecnologie

	<i>Potenza</i>	<i>Vel. comm.</i>
BJT	Media	Media
MOSFET	Bassa	Alta
GTO	Alta	Bassa
IGBT	Media	Media
MCT	Media	Media

Domini applicativi tecnologie



Confronto tecnologie



Materiali

- Si or SiC or GaN?

Characteristic	Unit	Si	GaAs	SiC	GaN
Electron mobility	cm ² /Vs	1350	8500	700	2000
Critical electric field	MV/cm	0.3	0.4	2.4	3.0
Relative dielectric constant	er	11.8	13.1	10.0	9.0

	Si	GaAs	SiC	GaN
Bandgap at Room T (eV)	1.12	1.43	2.2-3	3.4
Thermal conductivity (W/(cm K))	1.5	0.5	5	1.3
Max Operating Temp. (C)	150	300	600-1000	400
Saturation velocity (cm/s)	1e7	2e7	2.5e7	2.5e7

Materials

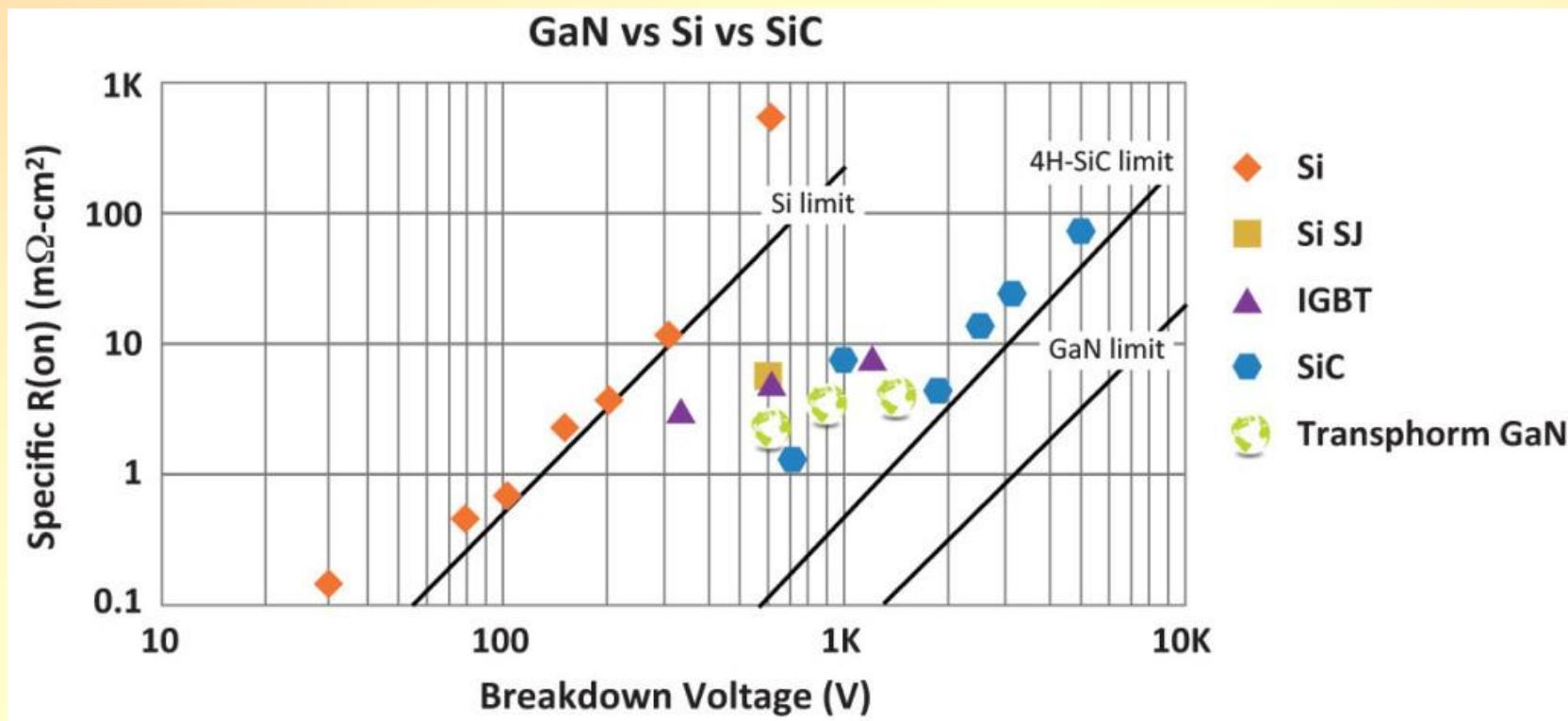
	Si	GaAs	SiC	GaN
Bandgap at Room T (eV)	1.12	1.43	2.2-3	3.4
Thermal conductivity (W/(cm K))	1.5	0.5	5	1.3
Max Operating Temp. (C)	150	300	600-1000	400
Saturation velocity (cm/s)	1e7	2e7	2.5e7	2.5e7

Higher bandgap → Harder impact ionization → Higher E_{BD}

Higher bandgap → Lower intrinsic carrier density n_i at a given T
→ Lower leakage currents at given T
→ Higher Max operating Temp

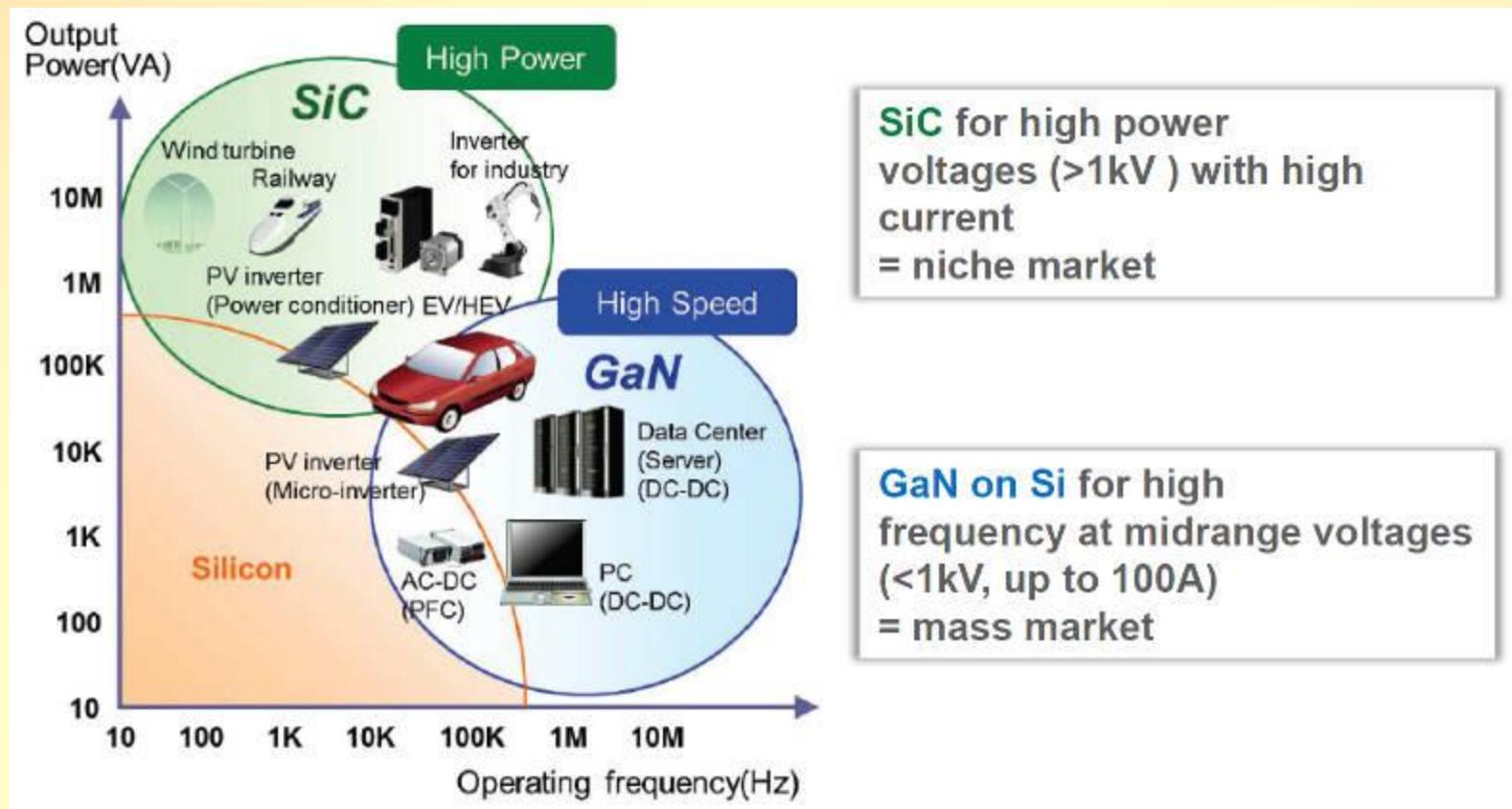
Materials

- Si or SiC or GaN?
- Low Ron measures ON-state efficiency
- High BV measures OFF-state performance

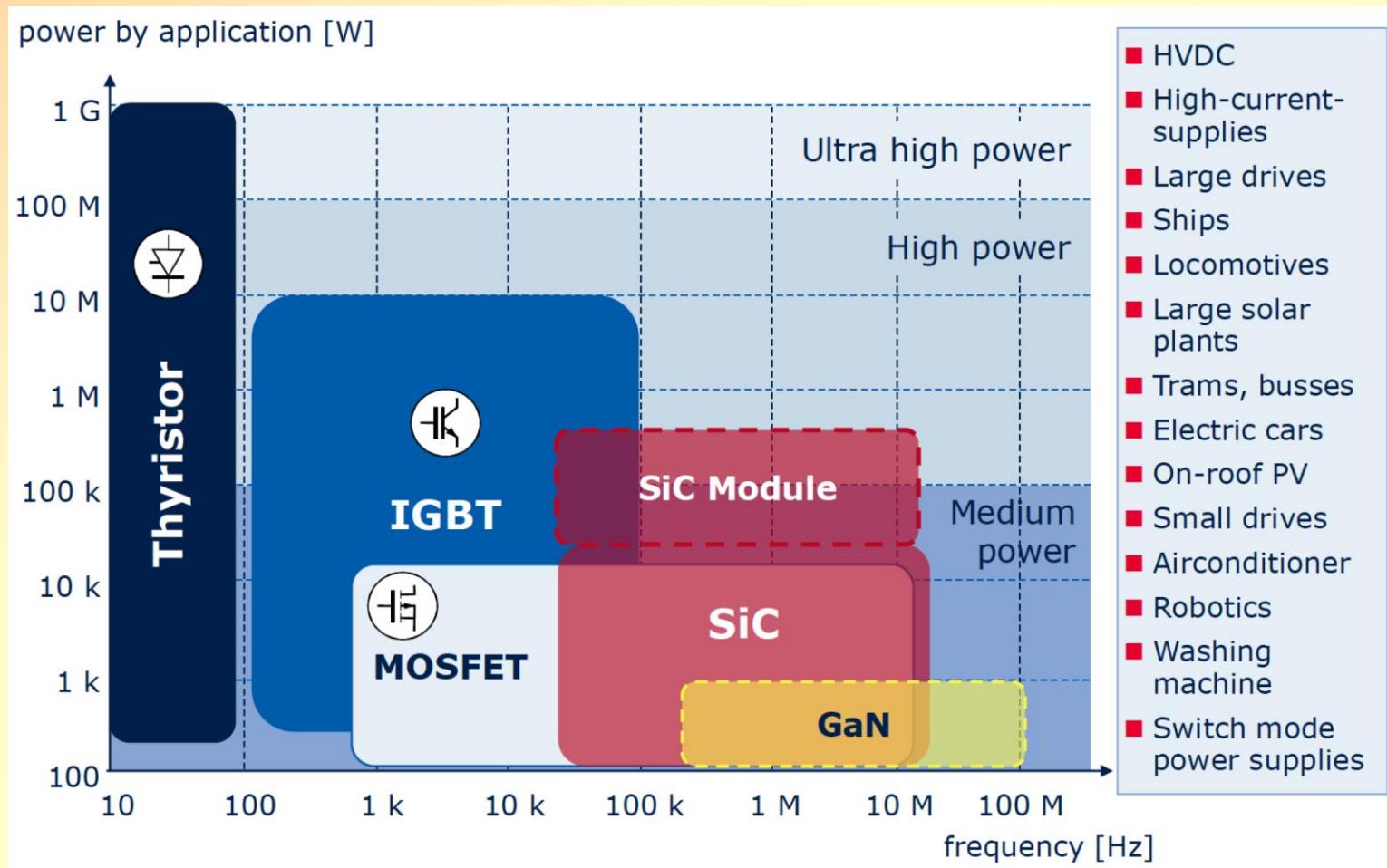


Materiali

- Si or SiC or GaN?
- Si is the present, SiC and GaN the future
- GaN still an emerging technology
- SiC is now market ready



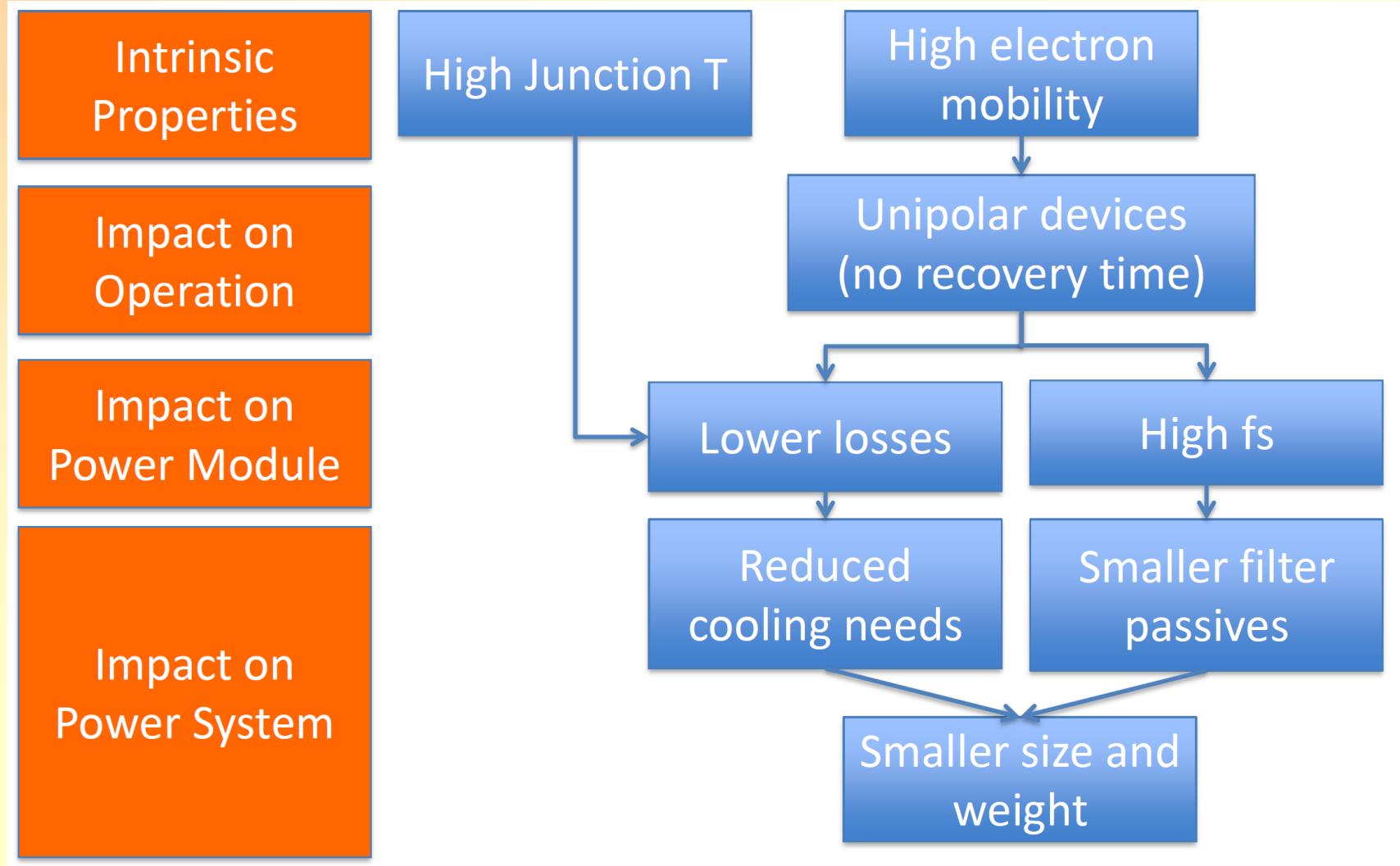
Power vs Freq by devices and materials (source: Infineon2011)



SiC, GaN higher device cost but can lead to lower system cost

- Silicon has enormous accumulated past investments. Money spent on other materials is small in comparison
- GaAs
 - Small wafer size (\rightarrow higher cost)
 - Unwanted impurities \rightarrow reduce EBD and carrier lifetime
 - No oxide (is it really a problem?)
- SiC
 - Even smaller wafer size and more impurities (SiC on Si)
 - SiC-SiO₂ interface not perfect
- GaN (GaN on Si)
 - Reliability issues (impurities)

SiC, GaN higher device cost but can lead to lower system cost



Innovation on Power Switch

SiC power Mosfets are more expensive than Si power Mosfets: a market analysis on stocks from 100 to 1000 devices for the power mosfets in Table 1 has shown that the selling price for each SiC power device is 1.7 to 3.5 times higher than that of Si power device. Hence, a circuit solution like that in Figure 8A that minimizes the use of active devices make more convenient the adoption of SiC power Mosfets.

Power Mosfets	Package	I _{Dmax}	V _{DSmax}	R _{DSon}	Q _G	T _{dON}	T _{dOFF}	T _{rr}
SiC C2M0040120D	TO-247	60 A	1200 V	40 mΩ	115 nC	15 ns	26 ns	54 ns
Si IPW60R045CP	TO-247	60 A	60 V	45 mΩ	150 nC	30 ns	100 ns	600 ns

Ricerche in corso su processi GaN compatibili con tecnologie al Si per ridurre costi es. GaN-on-Si
<https://www.imec-int.com/en/200mm-GaN-on-Si-technology>

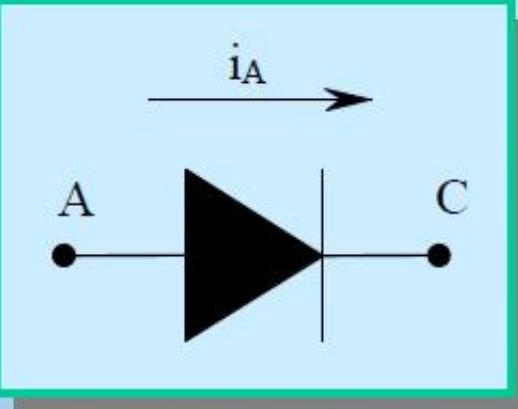
REQUISITI GENERALI DI UN INTERRUTTORE CONTROLLATO

- Basse perdite in stato di conduzione;
- Alta tensione di blocco (i.e. capacità di mantenere in stato di OFF la corrente a valori molto bassi anche con alte tensioni applicate allo switch)
- Rapidità di commutazione;
- Bassa potenza di controllo;
- Capacità di sopportare rapide variazioni di “V” e “I”

Altri Parametri

V_T	<i>tensione di soglia</i>
$I (I_{RMS})$	<i>valore efficace della corrente</i>
$I_m (I_{AVE})$	<i>valor medio della corrente</i>
I_{FSM}	<i>corrente di sovraccarico</i>
i^2dt	<i>(per il coordinamento fusibili)</i>
V_{RRM}	<i>massimo valore permesso di tensione inversa ripetitiva (repetitive peak reverse voltage)</i>
I_{RRM}	<i>corrente di perdita ripetitiva</i>

DIODI



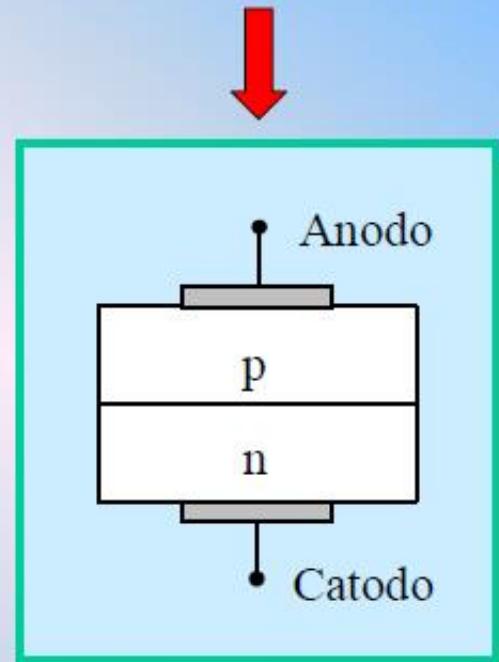
Simbolo

Lo stato del diodo dipende solamente dalla polarizzazione del componente.

Polarizzazione diretta: conduzione.

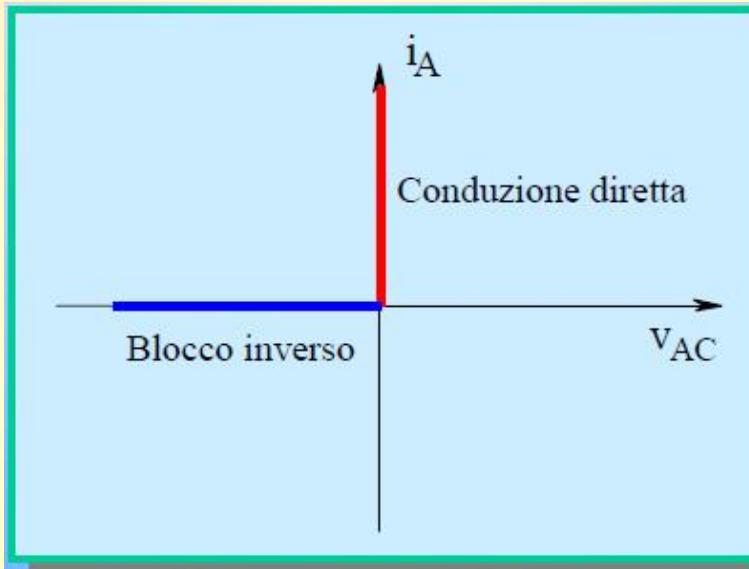
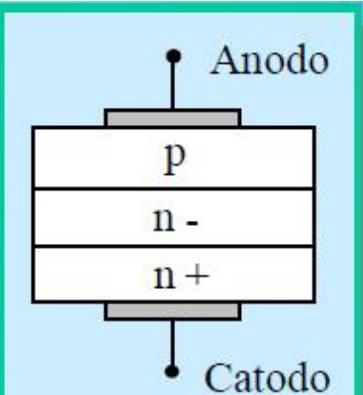
Polarizzazione inversa: interdizione.

Il diodo è composta da una unica giunzione *p-n*.



DIODI

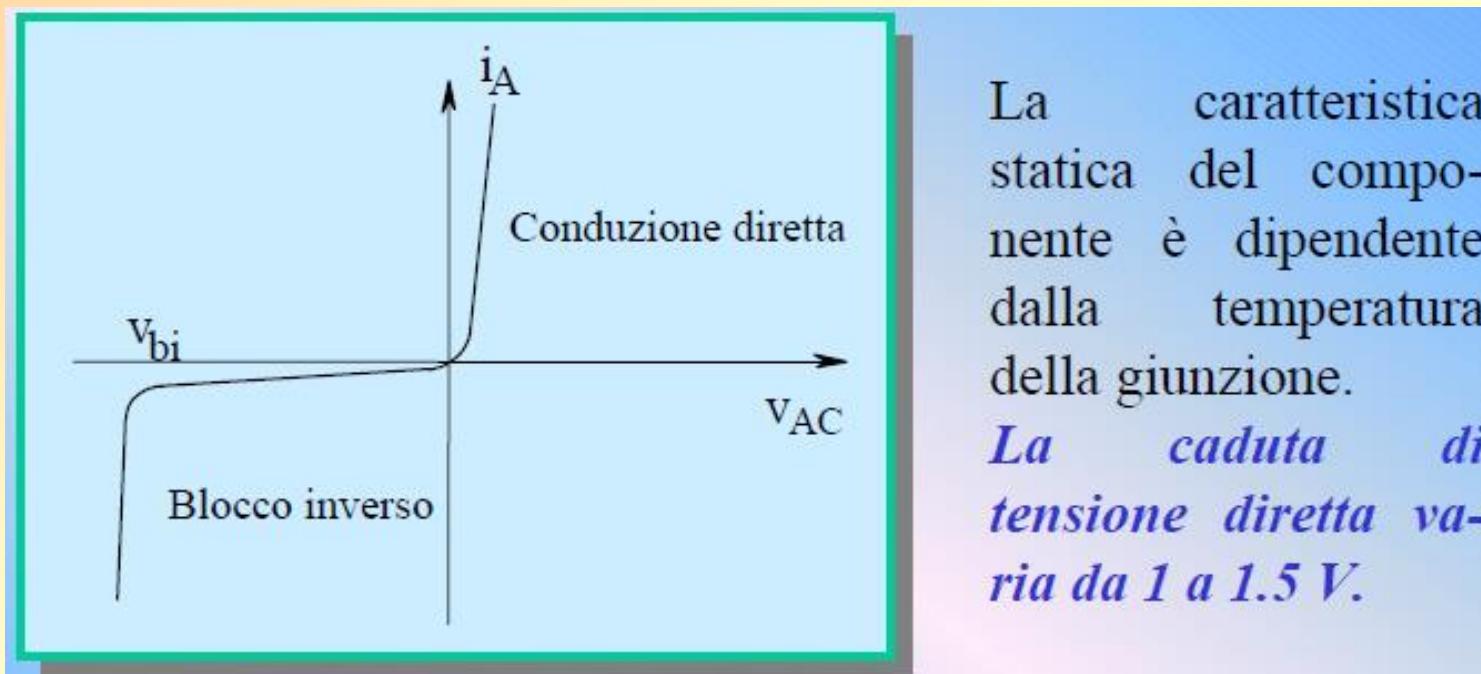
La struttura del diodo di potenza è diversa da quella del diodo di segnale e prevede l'impiego di due zone *n* con diverso grado di drogaggio.



La caratteristica statica ideale del componente, presenta:

- tensione nulla in conduzione (resistenza equivalente zero);
- corrente nulla in interdizione (resistenza equivalente infinita).

DIODI - caratteristica

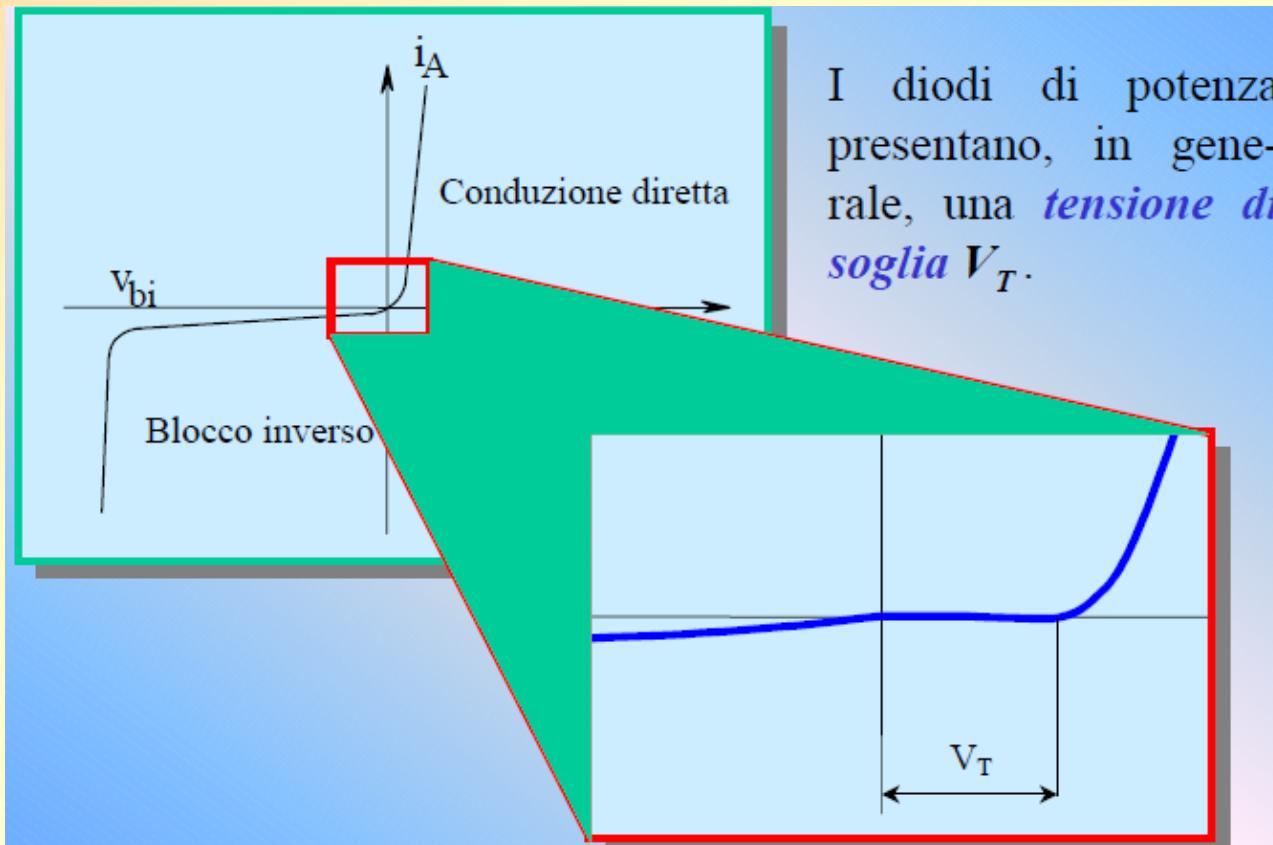


La caratteristica statica del componente è dipendente dalla temperatura della giunzione.

La caduta di tensione diretta varia da 1 a 1.5 V.

La tensione v_{bi} (breakdown voltage) rappresenta il limite superiore di tensione inversa che il diodo è in grado di sopportare; oltre tale valore il componente perde la capacità di blocco inverso e viene danneggiato **irreversibilmente**.

DIODI - caratteristica



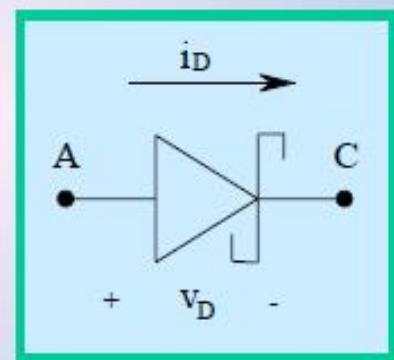
DIODI – vari tipi

Esistono diodi *Line Frequency*, diodi *Fast Recovery* e diodi *Schottky*.

I diodi *Line Frequency* hanno solitamente tensione di blocco inversa elevata ($6\div 7 \text{ kV}$) e possono portare elevate correnti dirette ($5\div 6 \text{ kA}$), pur mantenendo piccole cadute in conduzione.

I diodi *Fast Recovery* arrivano a tensioni di blocco inverse minori (*inferiori al kV*) ed a correnti in conduzione più piccole (*inferiori al kA*), ma sono *più veloci*.

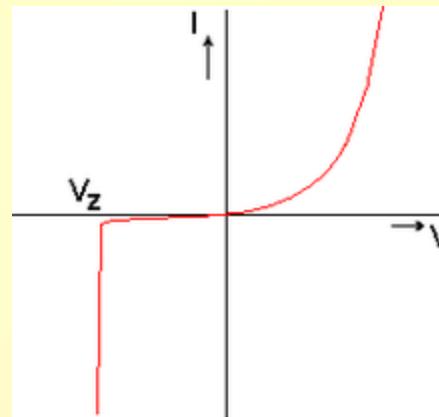
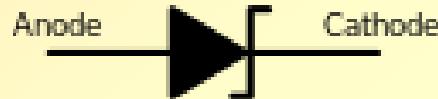
Un diodo veloce è il *diodo Schottky* che presenta minime cadute dirette (*circa 0.3 V*), ma basse tensioni di blocco inverse (100 V) ed elevate correnti di perdita in inversa.



DIODO Zener

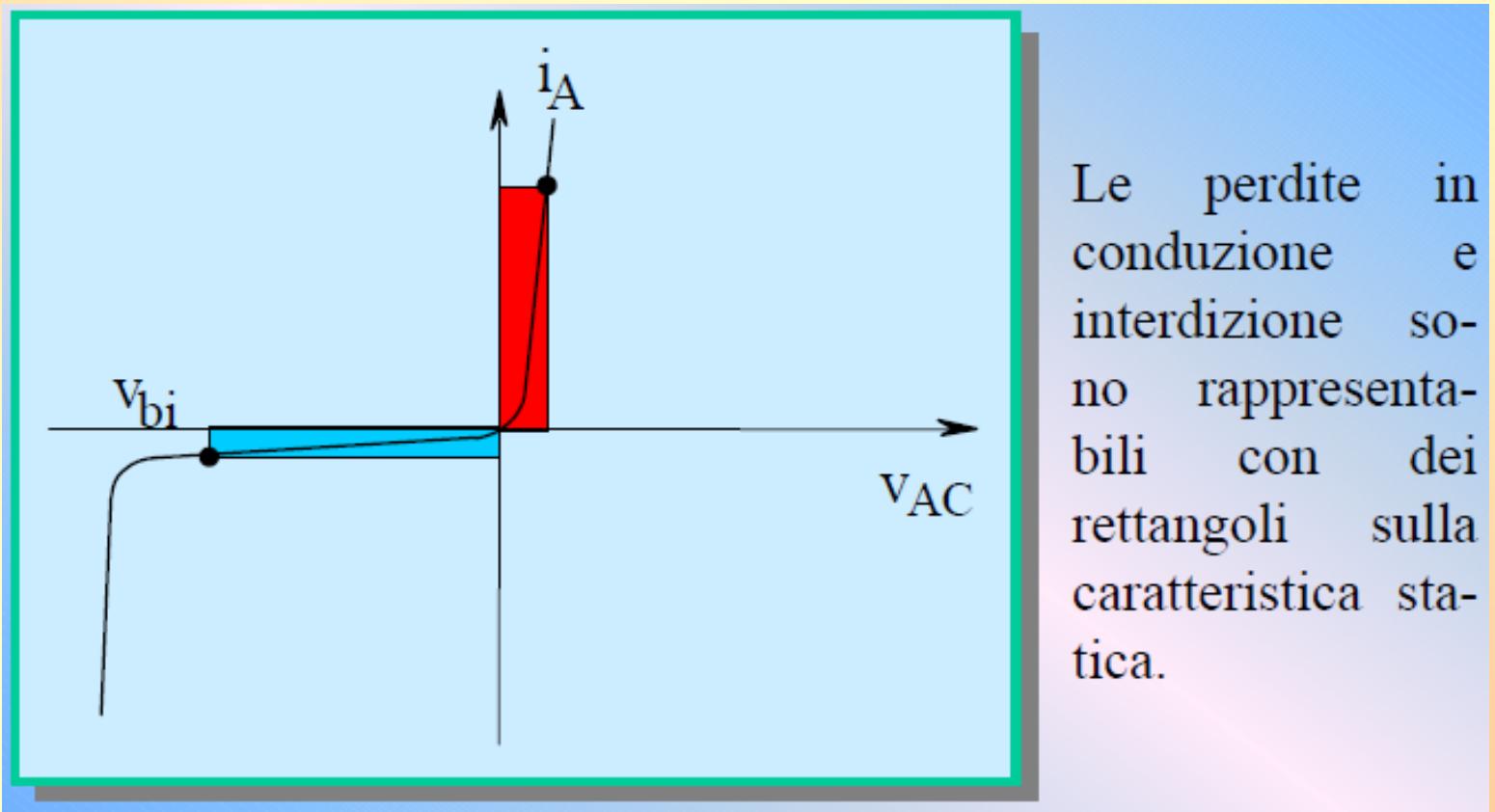
Se polarizzato direttamente (tensione anodo > tensione catodo), il diodo Zener ha un comportamento analogo al diodo normale

Caratteristica peculiare del diodo Zener è il suo comportamento quand'è polarizzato inversamente (tensione anodo < tensione catodo) e viene di solito utilizzato in questo modo **come riferimento di tensione**



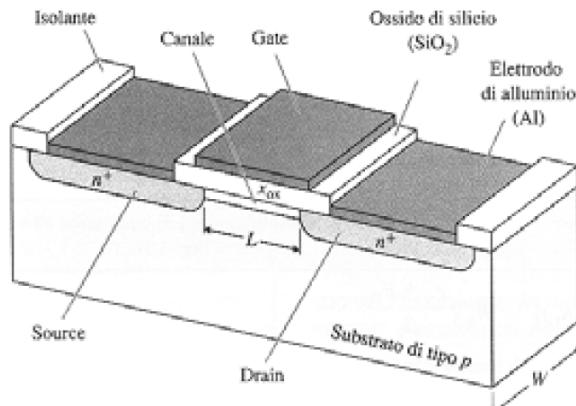
Se la tensione inversa ai capi del diodo Zener è tra 0 V e V_z , il componente è interdetto e si comporta come un interruttore OFF. Se la tensione inversa applicata arriva a V_z (tensione di Zener o tensione di *breakdown*) si innesca l'effetto valanga → si ha un forte passaggio di corrente tra i due terminali del dispositivo. Il diodo Zener è capace di resistere al forte passaggio di corrente e mantiene ai suoi capi la tensione V_z .

DIODI – perdite

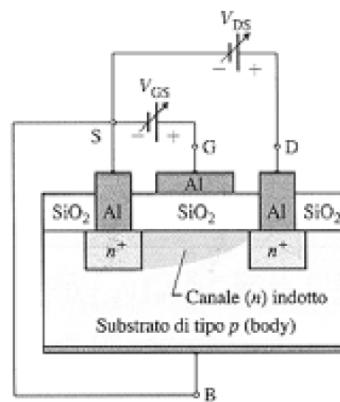


MOSFET

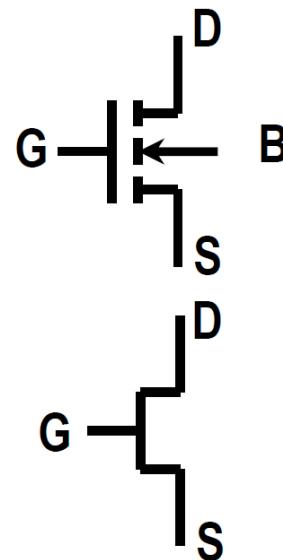
✧ Struttura e simboli circuitali MOS (canale n, indotto)



(a) Struttura

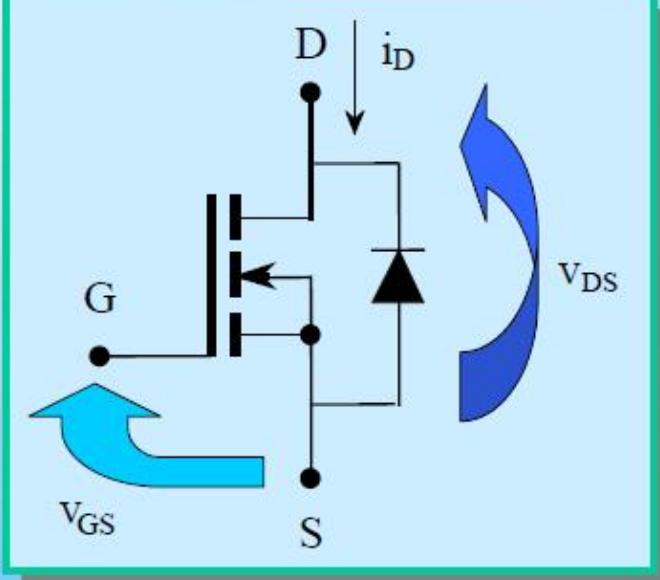


(b) Schematizzazione



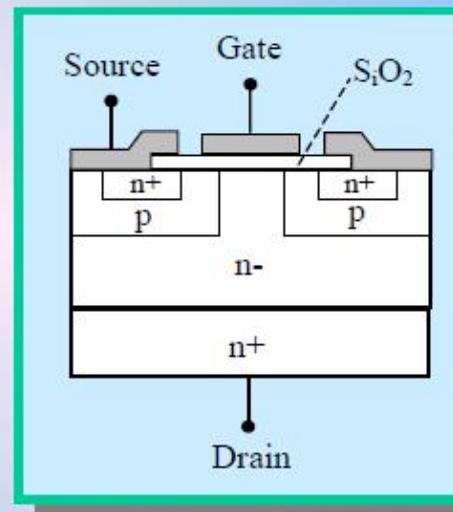
Se la tensione tra Gate e Source V_{GS} , e quindi V_{GB} tra Gate e Bulk (connesso al Source), supera valore di soglia $V_{T(n)}$ si forma canale n (elettroni presenti in diffusioni n di Source e Drain e come portatori minoritari in substrato p) tra Source e Drain permettendo, in funzione di V_{GS} e V_{DS} , passaggio di corrente ($I_D=I_S$ essendo $I_G=0$ per presenza di SiO_2 isolante)

MOSFET di potenza (struttura verticale)



Lo stato del MOSFET dipende dalla polarizzazione del componente e dal segnale di comando del Gate.

Struttura del MOSFET VDMOS a canale n.



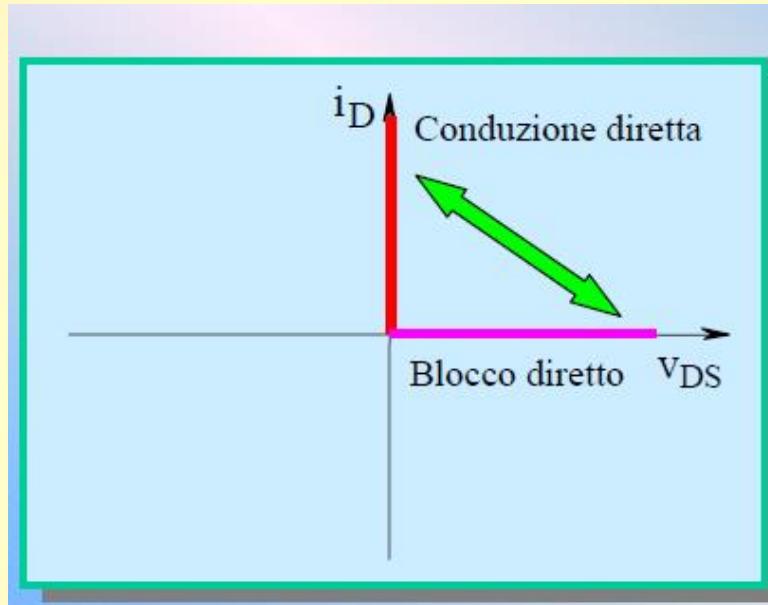
MOSFET

Il nome significa *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*.

Nella struttura è compreso un diodo in antiparallelo (quindi il componente non possiede una caratteristica di interdizione inversa).

Ne esistono di diversi tipi (VDMOS, VVMOS, ...).

Prerogativa fondamentale è che sono controllati in tensione.

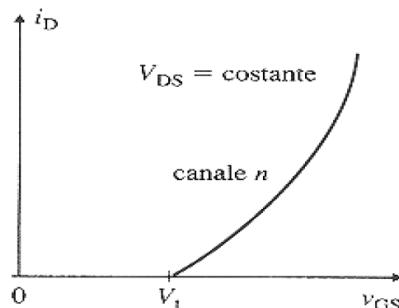


Il componente presenta lo stato di conduzione diretta e interdizione diretta, ma non lo stato di interdizione inversa.

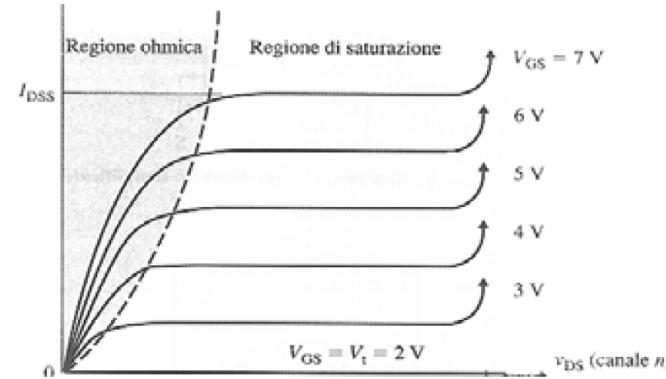
Il controllo della tensione di Gate consente il cambio di stato nelle due direzioni.

MOSFET CARATTERISTICHE

Caratteristica Ingresso-Uscita



Caratteristica Uscita



Per valori piccoli di V_{DS} il canale tra Source e Drain ha andamento uniforme con uno spessore, e quindi conducibilità, che cresce al crescere di V_{GS} (Regione ohmica in cui MOS si comporta come resistenza variabile controllata da V_{GS})

Al crescere di V_{DS} il canale non è uniforme poiché la tensione tra il Gate e la regione del canale è pari a V_{GS} nei pressi del Source ma diminuisce avvicinandosi al Drain. Se $V_{GS} - V_{DS} < V_{T(n)}$ esiste zona, verso il Drain, dove canale è strozzato (Regione di saturazione)

MOSFET CARATTERISTICHE

✧ Impedenza d'ingresso capacitiva

Equazioni del MOS (n)

✧ Zona di INTERDIZIONE

$$I_D = 0 \quad \text{per } V_{GS} < V_T$$

✧ Zona OHMICA (TRIODO)

$$I_D = \beta_n \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{per } V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

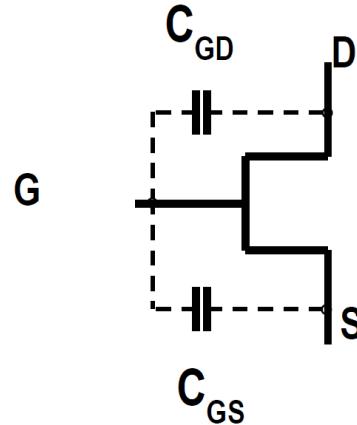
✧ Zona di SATURAZIONE

$$I_D = \beta_n \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \quad \text{per } V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

$$\beta_n = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \left[\frac{A}{V^2} \right], \mu_n = \text{mobilità elettroni} \left[\frac{m^2}{V \cdot s} \right]$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \text{Capacità ossido per unità di superficie}$$

t_{ox} = Spessore ossido, W = Larghezza canale, L = Lunghezza canale



MOSFET CARATTERISTICHE

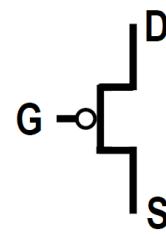
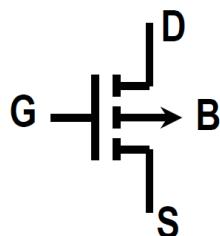
MOS a Canale p

Struttura analoga a MOS (n) ma substrato è di tipo n mentre Source, Drain e canale indotto sono di tipo p (portatori di carica sono le lacune)

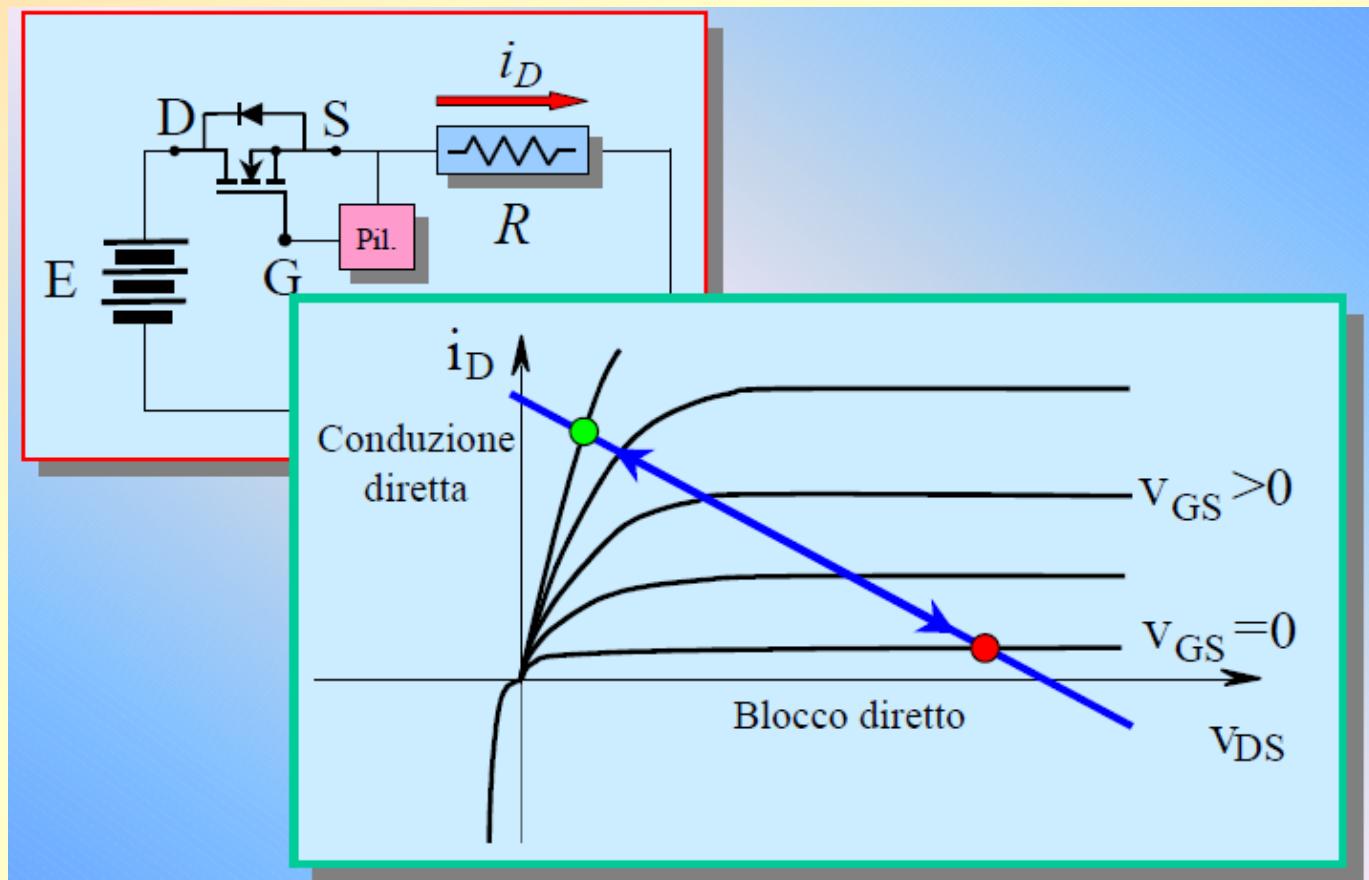
Caratteristiche equivalenti a MOS (n) purché si scambino segni di correnti e tensioni (lavora con tensioni V_{DS} , V_{GS} , $V_{T(p)}$ negative)

Mobilità lacune μ_p inferiore a mobilità elettroni μ_n , per ottenere $\beta_p = \beta_n$ si compensa scegliendo $(W/L)_p > (W/L)_n$

Simboli circuitali MOS (p)



MOSFET - REGOLATORI



MOSFET

I MOSFET arrivano fino a *tensioni massime di 1000 V*, con basse correnti, mentre per tensioni più ridotte possono sopportare anche **100 A**.

Il circuito di gate ha una soglia tipica di 2-4 V sotto la quale la corrente diretta è piccolissima.

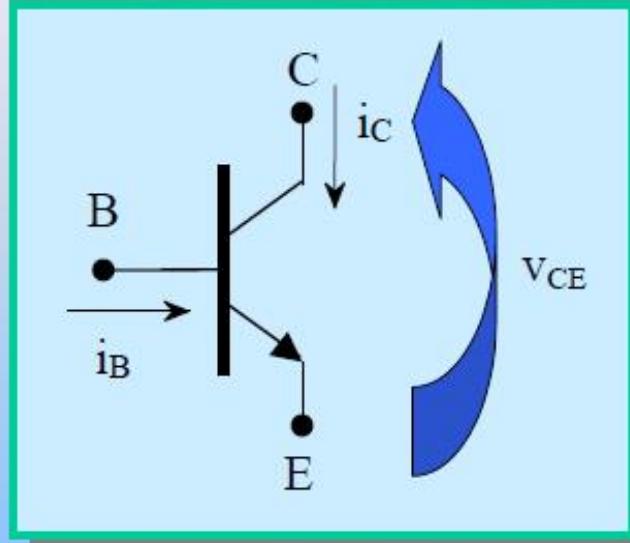
Si possono evidenziare due zone; la prima a R_{on} costante, la seconda a corrente costante. La R_{on} cresce con la taglia del componente e questo è un grosso svantaggio (*0.1÷1 Ω*).

Al contrario però hanno *bassissime perdite di commutazione*. E' necessario mantenere v_{GS} , ma non vi è passaggio di corrente e di conseguenza dissipazione di potenza, se non in commutazione.

Il tempo di commutazione risulta dell'ordine dei 100 nsec. Il componente è velocissimo (centinaia di kHz).

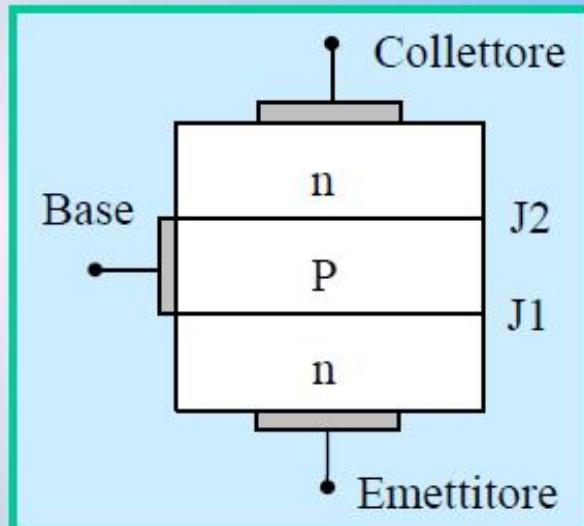
Questi componenti risultano *facilmente collegabili in parallelo* perché hanno coefficiente di temperatura positivo; quello che più si scalda, più aumenta di resistenza e di conseguenza cala la sua corrente.

BJT



Lo stato del BJT dipende dalla polarizzazione del componente e dal valore della corrente di Base.

Struttura di un comune BJT di tipo n-p-n.



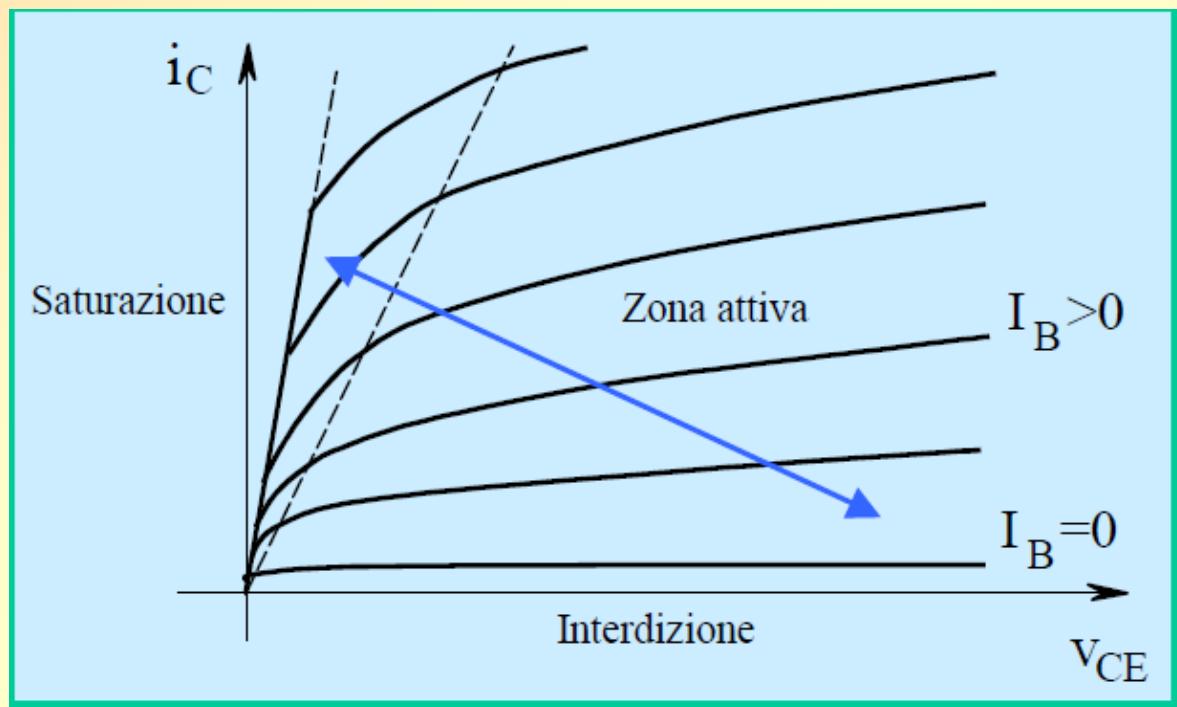
ZONE DI FUNZIONAMENTO

Nel BJT si possono definire tre modalità di funzionamento:
interdizione, *saturazione* e *attiva*.

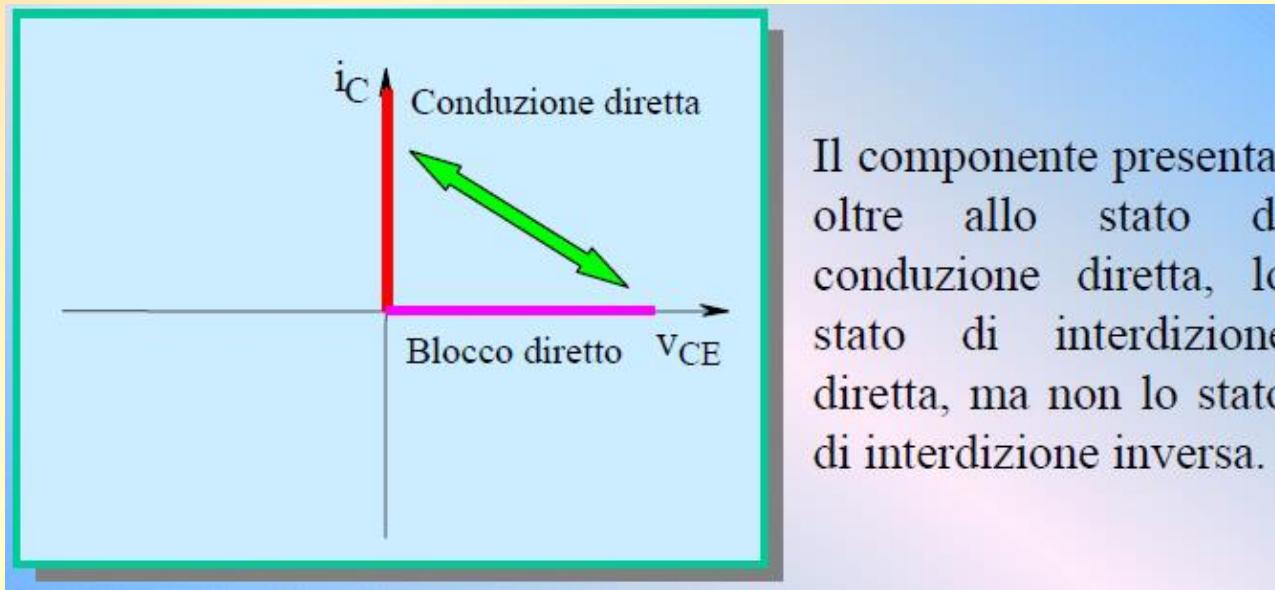
In queste tre zone di funzionamento, le due giunzioni risultano così polarizzate:

<i>Modo</i>	<i>j1 (B - E)</i>	<i>j2 (C - B)</i>
<i>Attiva</i>	Diretta	Inversa
<i>Interdizione</i>	Inversa	Inversa
<i>Saturazione</i>	Diretta	Diretta

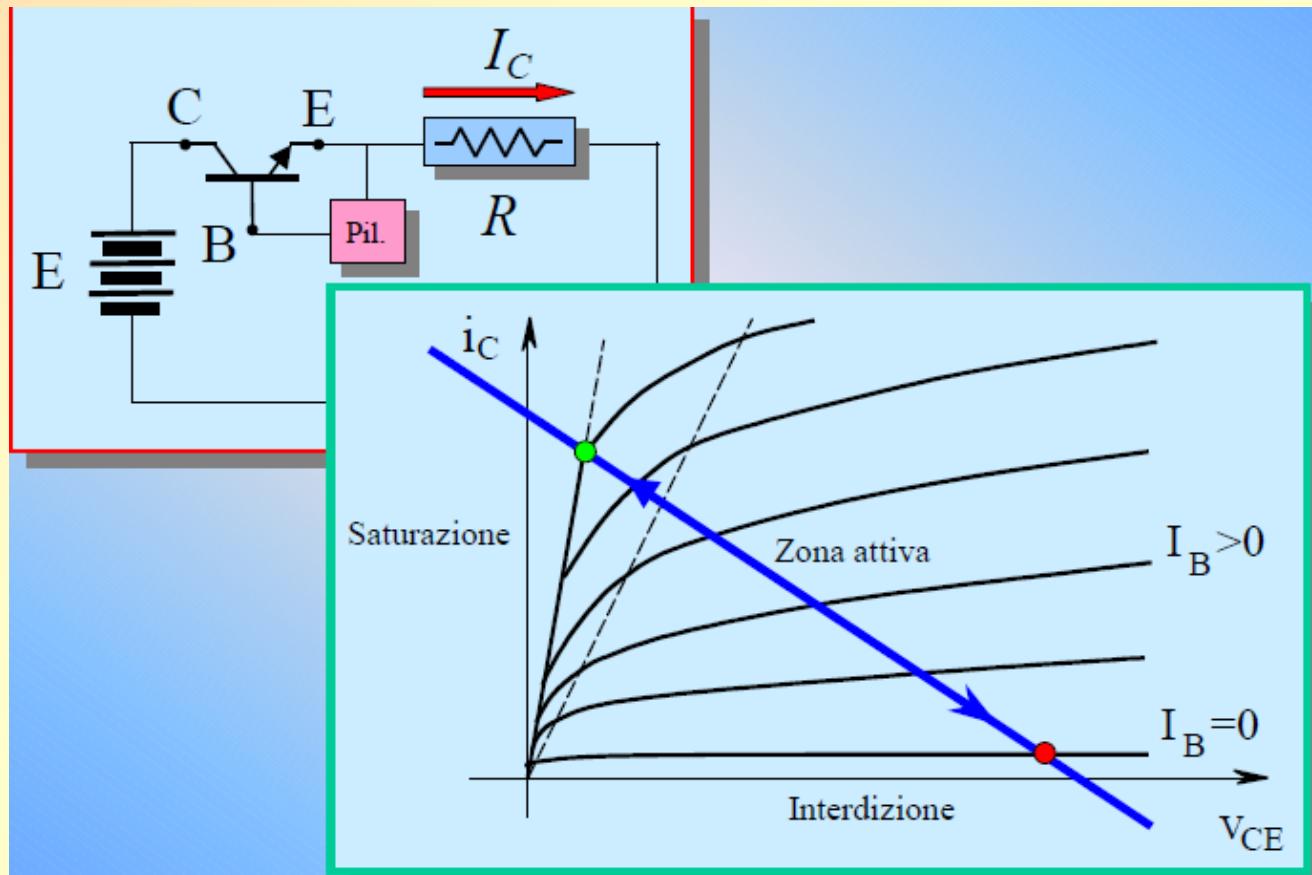
ZONE DI FUNZIONAMENTO



BJT COME SWITCH



BJT COME REGOLATORE LINEARE



BJT CARATTERISTICHE

Il BJT può essere collegato con connessione a emettitore comune o a base comune. *Nel caso di sistemi di potenza si usa la connessione a emettitore comune.*

Il componente rimane in conduzione solo se si mantiene una corrente di base; per lo spegnimento è sufficiente un picco di corrente di base negativo e quindi non sono richiesti circuiti esterni per la commutazione forzata.

Lavorando in switching mode, il BJT passa dalla zona di interdizione alla zona di saturazione.

Possono commutare ad elevata frequenza (10 kHz), ma non resistono alle tensioni inverse e le applicazioni sono perciò limitate ad inverter e chopper alimentati in corrente continua.

BJT CARATTERISTICHE

In generale le cadute in conduzione sono **2-3 V** e il guadagno in corrente è circa 10 nei transistor di potenza.

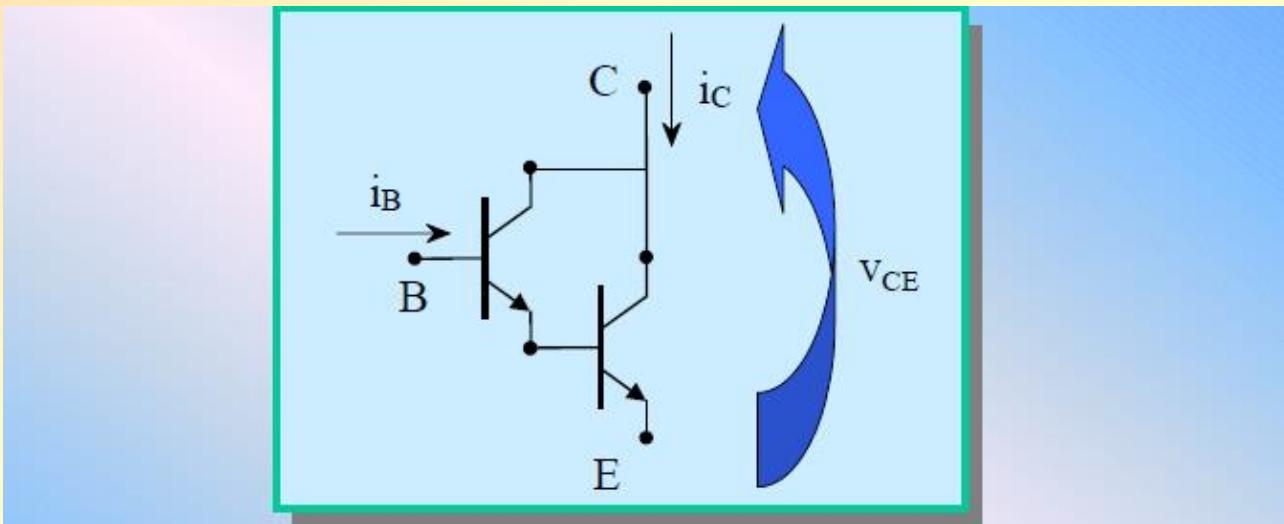
Fra i parametri caratteristici abbiamo:

Massima tensione collettore-emettitore: 1000÷1200 V

Massima corrente di collettore: 600÷800 A

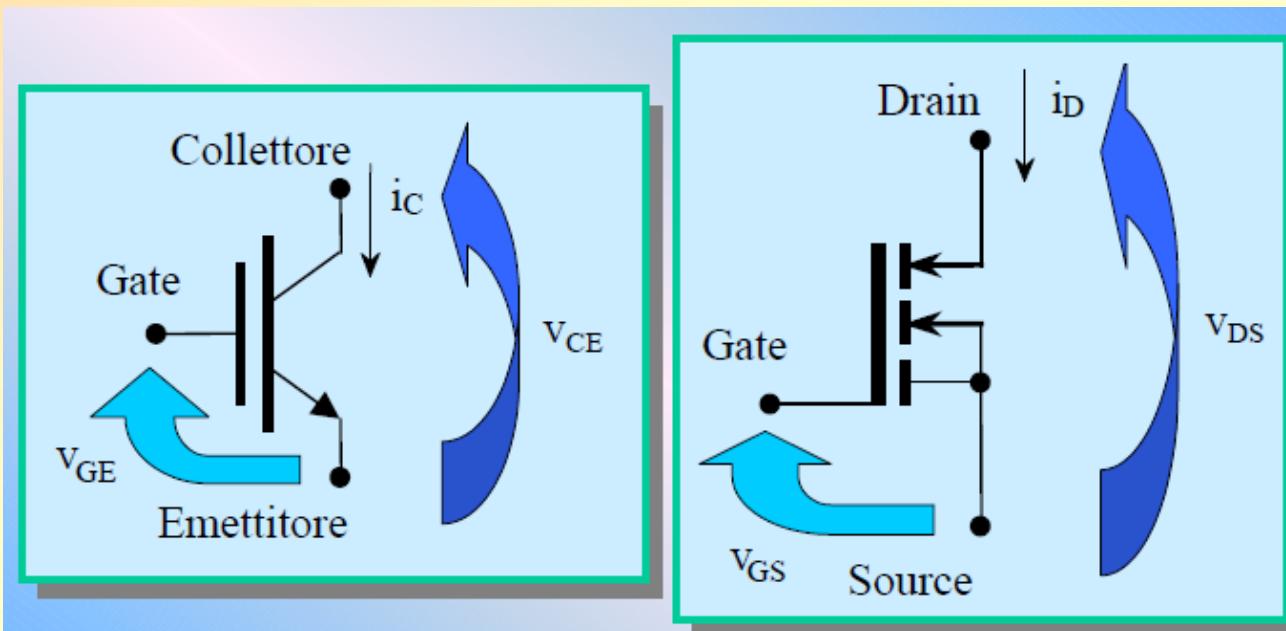
Durante la commutazione il BJT può presentare un fenomeno complesso detto effetto di breakdown secondario. E' la causa di molti guasti se il circuito non è progettato opportunamente. Il 1° breakdown è quello a valanga, simile a quello di altri componenti (diodo,...), il 2° breakdown è dovuto invece ad effetti localizzati di riscaldamento. Per evitare questo fenomeni è indispensabile utilizzare circuiti di snubber.

DARLINGTON



La configurazione Darlington ha *elevato guadagno di corrente*.
La potenza di base richiesta è minima, ma si ha una *riduzione della frequenza di commutazione* e un *incremento delle cadute in conduzione*. I Darlington possono essere realizzati su un unico chip.

IGBT



Lo stato dell'IGBT dipende dalla polarizzazione del componente e dal segnale di comando in tensione del Gate.

IGBT

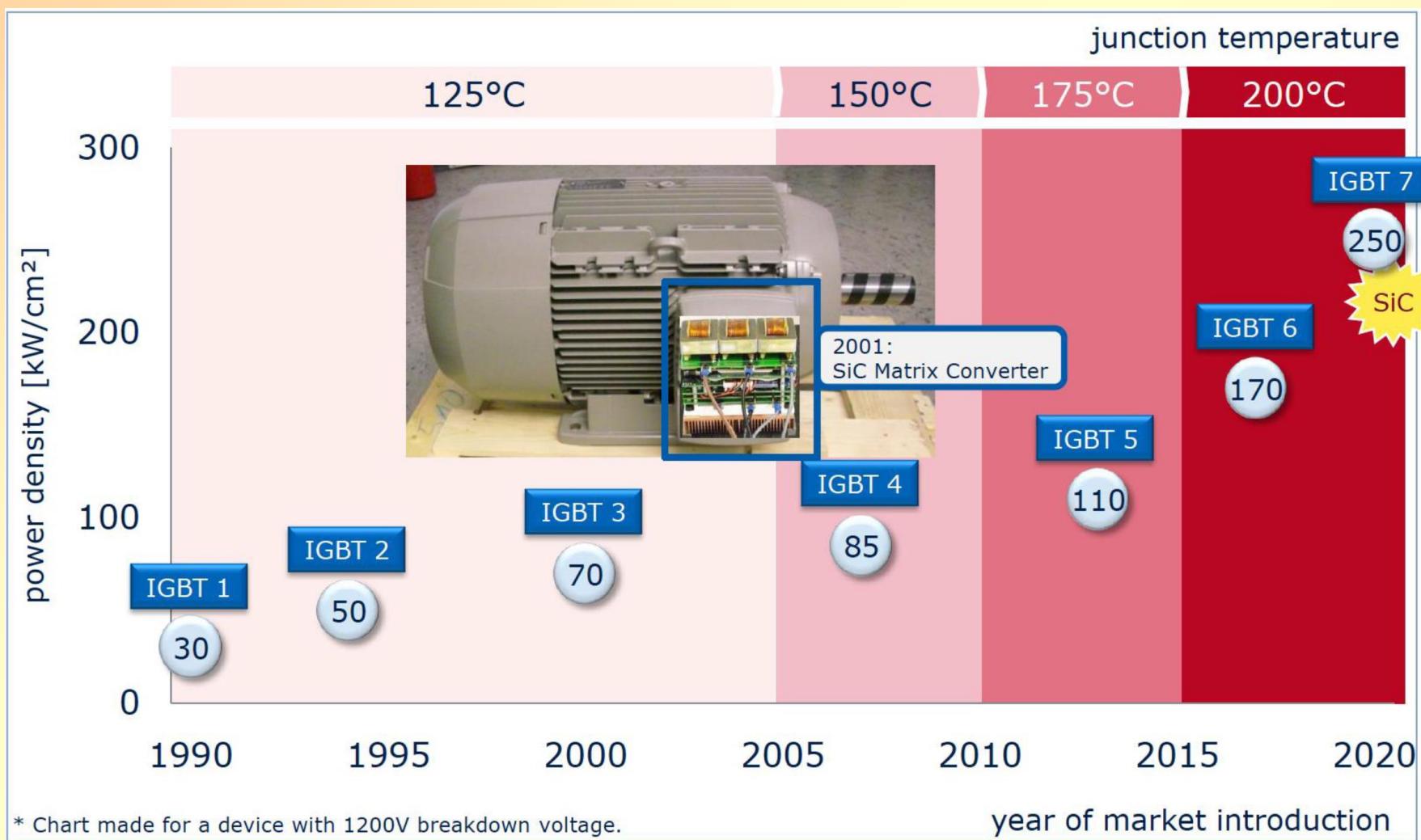
E' uno dei componenti più usati.

Questo componente offre alcuni vantaggi dei MOSFET, BJT e GTO combinati.

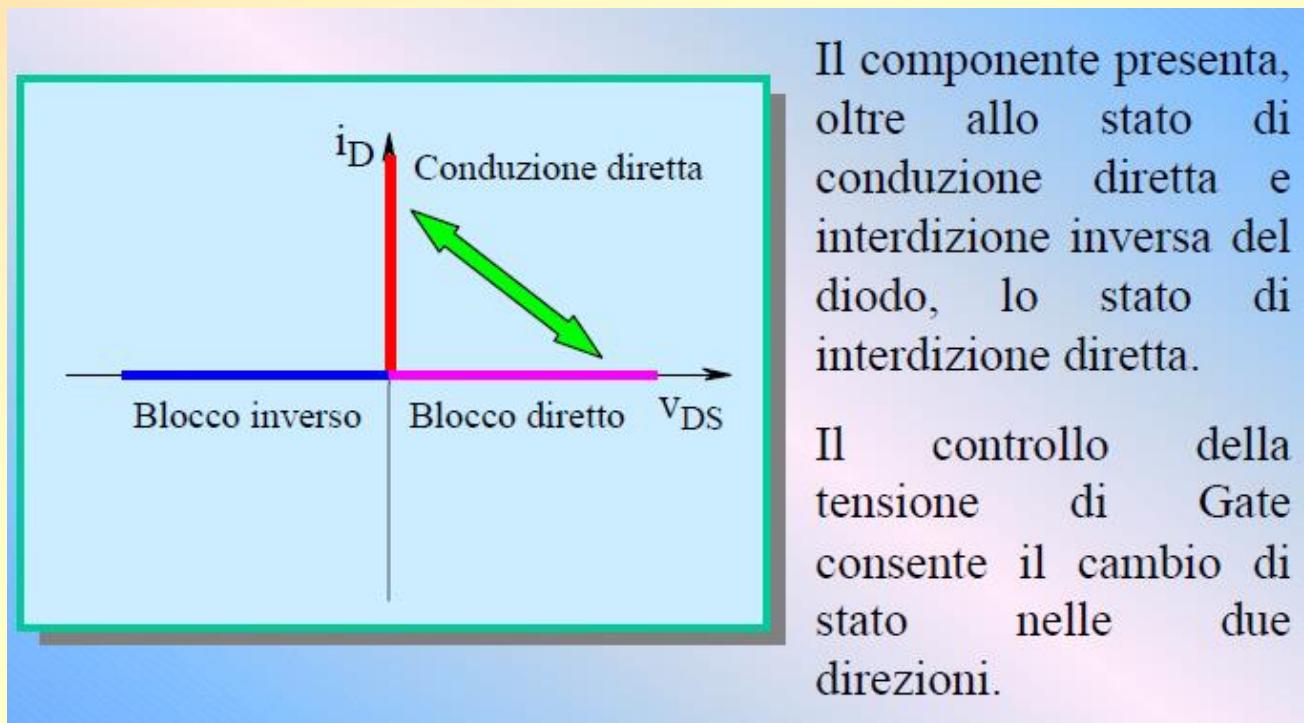
- Come il MOSFET è *controllato in tensione*, ha elevata impedenza di Gate, quindi piccole perdite per il controllo.
- Come il BJT ha *piccole cadute in conduzione (2÷5 V)*.
- Come il GTO *può resistere a tensioni inverse*.
- I tempi di commutazione sono dell'ordine di 1 Microsec (componente veloce, fino a *30 kHz*).
- I limiti attuali sono *2500 V, 1000 A*.

IGBT

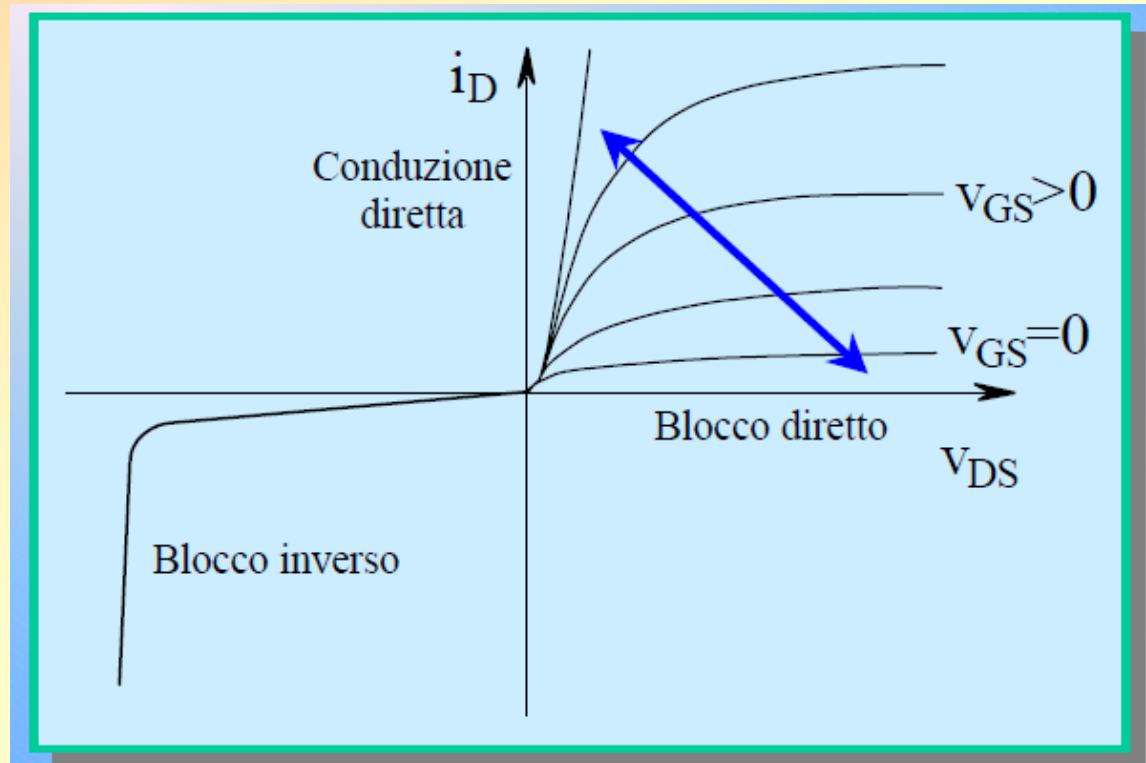
Evoluzione del mercato (densità di potenza e temperatura massima di giunzione)



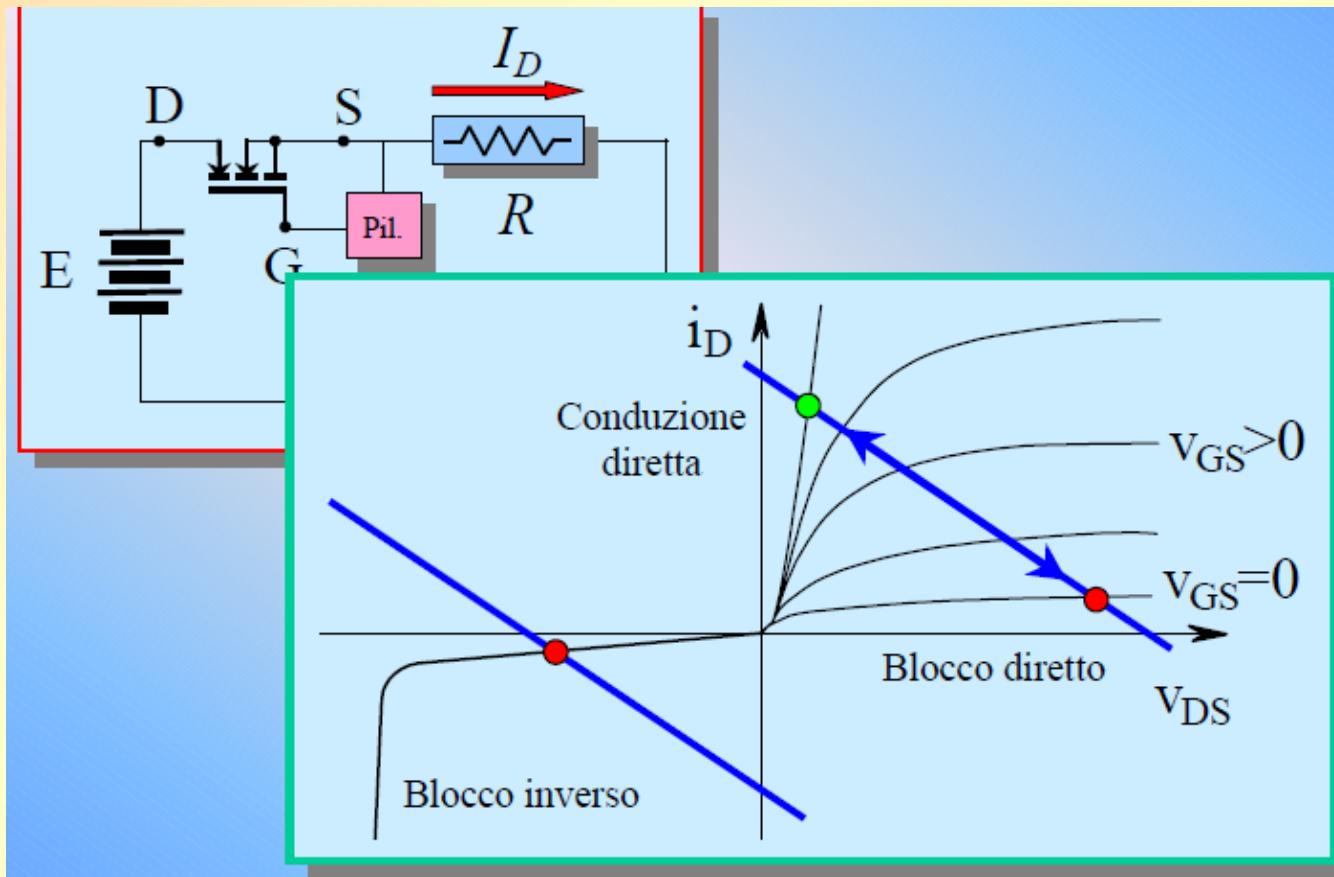
IGBT CARATTERISTICHE



IGBT CARATTERISTICHE

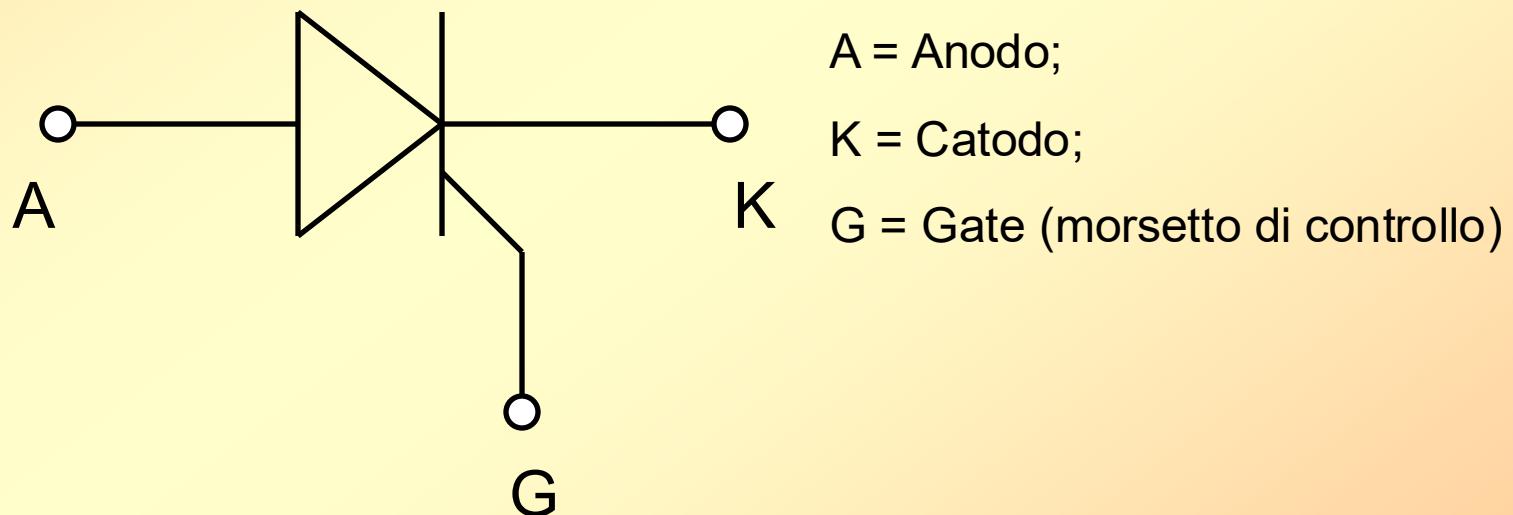


IGBT CARATTERISTICHE



TIRISTORI

- SCR : Dispositivo usato nella conversione della potenza



ALCUNE CARATTERISTICHE

E' l'elemento fondamentale su cui si basa la moderna conversione energetica.

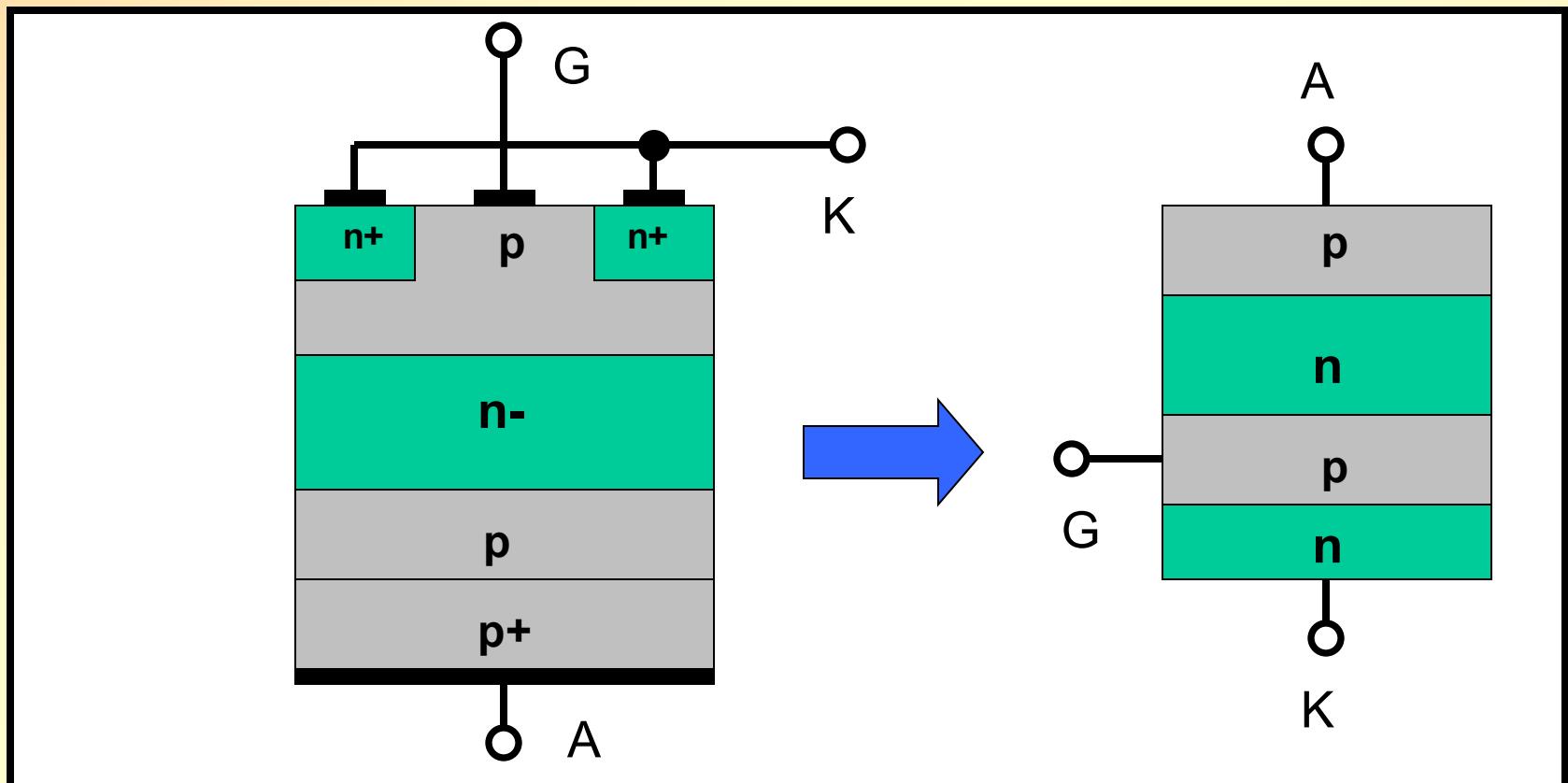
Dal 1960, anno della sua comparsa sul mercato, la tensione di funzionamento è passata da poche centinaia di volt a 3000-4000 V, e la corrente da 25 A a 3000 A. In configurazione serie/parallelo è quindi possibile operare un controllo di potenze dell'ordine dei MW.

Vantaggi della conversione statica dell'energia elettrica

- Possibilità di evitare tutte le perdite dovute al movimento: per esempio in passato la conversione della corrente alternata in continua si otteneva utilizzando il sistema rotante generatore – dinamo;
- Riduzione del peso e dell'ingombro dei dispositivi;
- Semplice installazione e manutenzione;
- Eliminazione delle vibrazioni e dei rumori, con conseguente aumento del rendimento;
- L'applicazione dei convertitori statici ha avuto un rapido incremento grazie alla possibilità di impiegare i microprocessori nel sistema di controllo

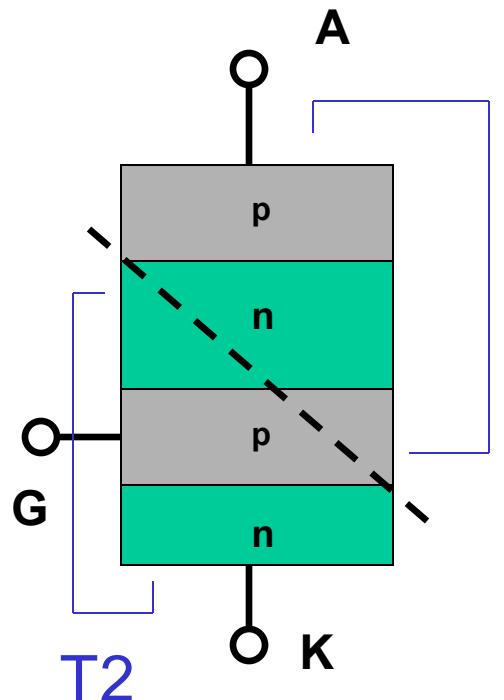
Struttura del SCR

E' caratterizzato da una struttura **p-n-p-n** che può essere assimilata ad una coppia di BJT. L'interazione con il circuito esterno avviene attraverso i due morsetti di potenza **A** e **K** e uno di controllo **G**.

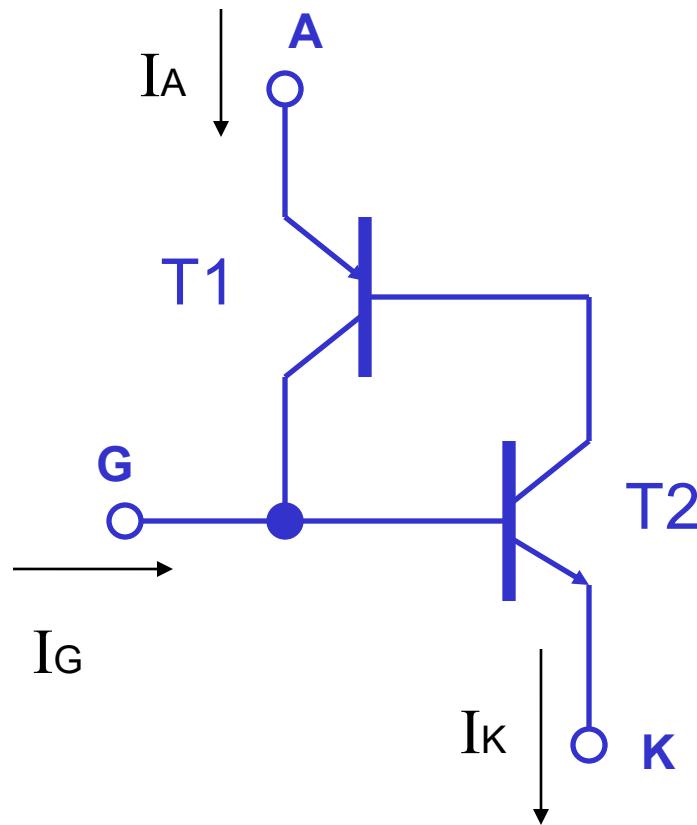
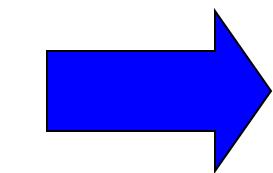


SCR visto come connessione di BJT

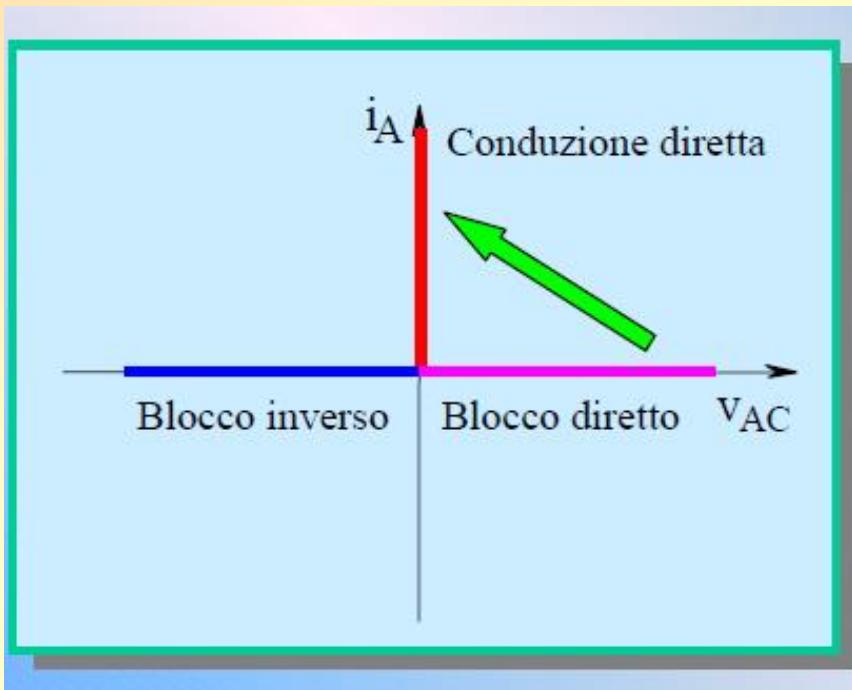
SCR:



T1



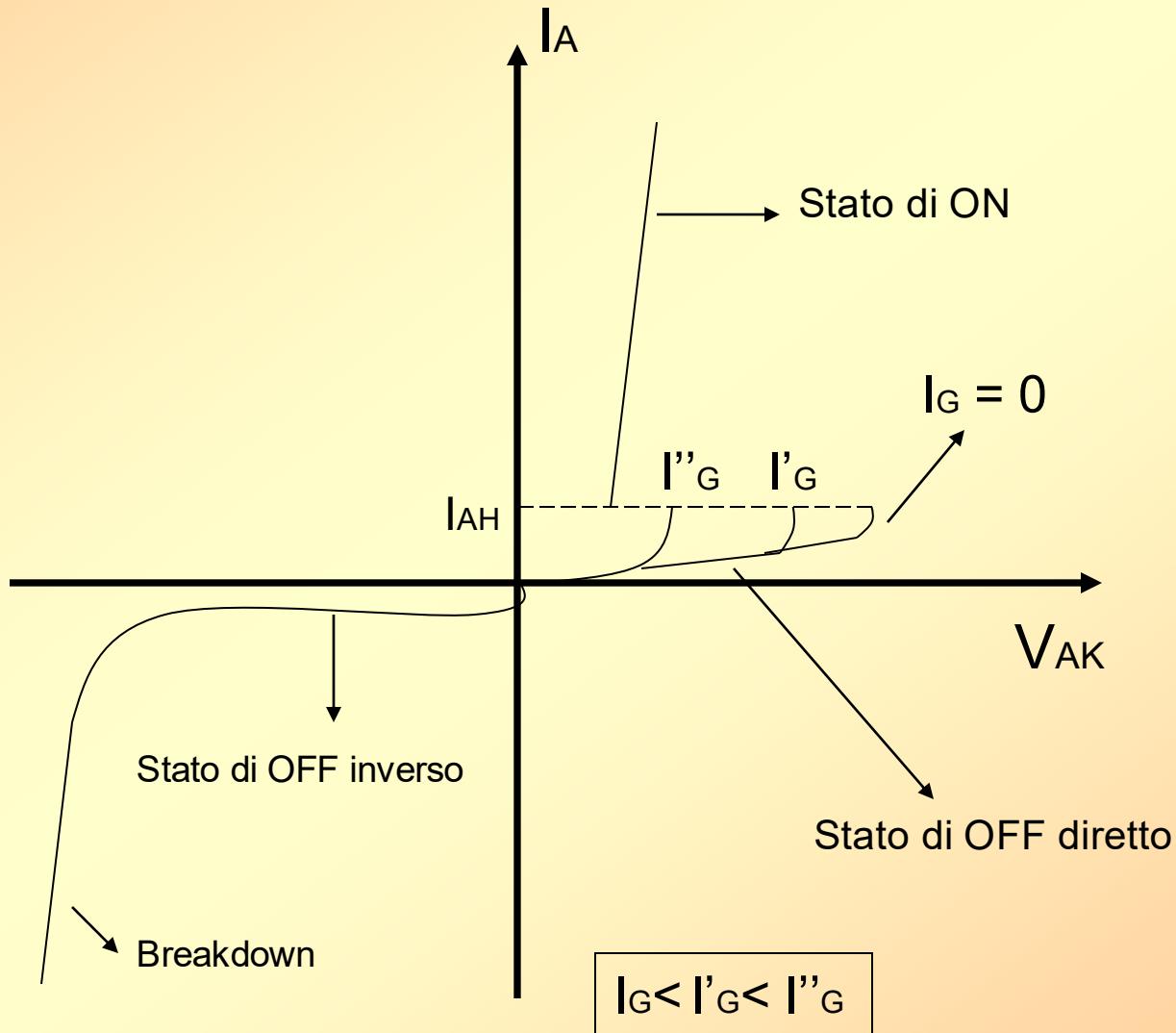
CARATTERISTICA I-V



Il componente presenta, oltre allo stato di conduzione diretta e interdizione inversa del diodo, lo stato di interdizione diretta.

L'impulso di corrente di Gate consente il cambio di stato in una sola direzione.

CARATTERISTICA V-I



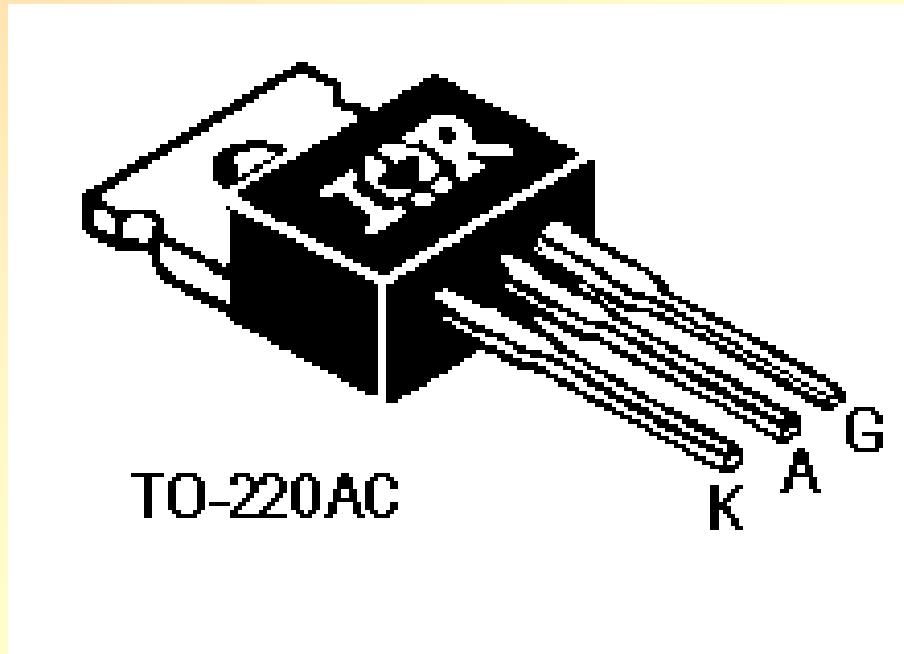
DUE CATEGORIE DI SCR

- SCR RECTIFIER GRADE: usati per convertitori AC-DC per frequenze fino a 400 Hz
- SCR INVERTER GRADE: usati per convertitori DC-AC fino a 20 kHz

SPEGNIMENTO (TURN-OFF) DELL'SCR

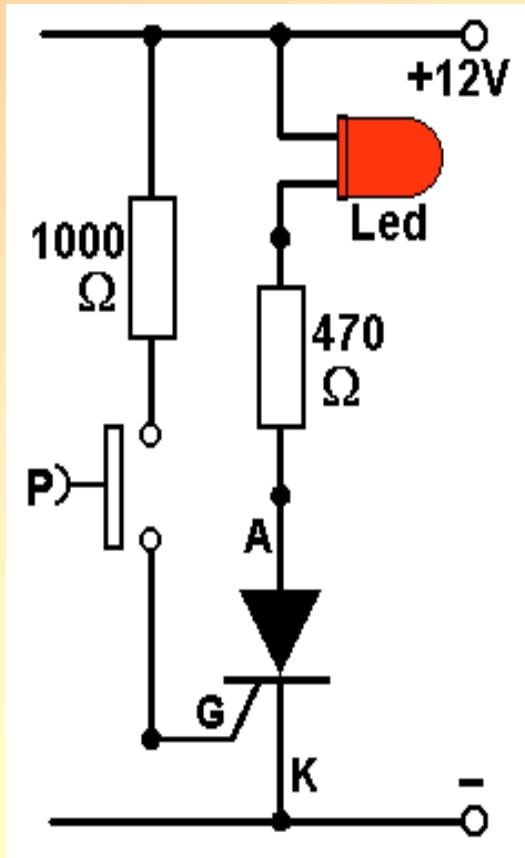
- Spegnimento naturale di linea (dato dall'alimentazione);
- Spegnimento naturale di carico (se è capacitivo o attivo);
- Spegnimento forzato a tensione impressa;
- Spegnimento forzato a corrente impressa.

SCR di potenza prodotto da “IR” (International Rectifier)



Può lavorare con correnti fino a 6,5 A e tensioni fino ad 800 V.
Le lettere indicano i tre elettrodi: K(catodo), A(anodo) e G(gate). Come si vede, l'aspetto non differisce da quello di un qualsiasi transistor di potenza.

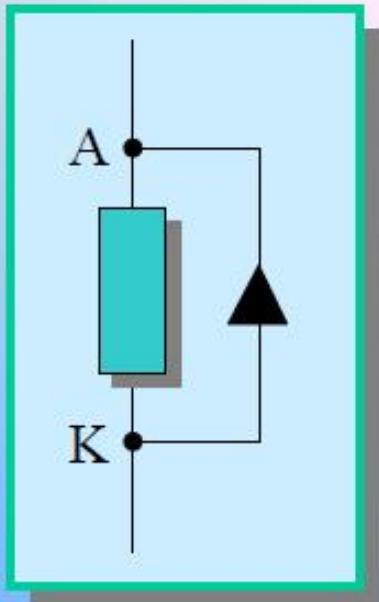
Esempio di circuito di prova



- Circuito collegato all'alimentazione: non passa alcuna corrente;
- Basta premere il pulsante P perché tiristore SCR passi in conduzione, facendo accendere il Led.
- Una volta che il led è acceso, l'unico modo per interrompere il passaggio di corrente è quello di staccare l'alimentazione al circuito.

DIODO di PROTEZIONE

Consideriamo un generico componente di morsetti A e K. Collegato in antiparallelo vi è un diodo.



Quando la tensione v_{AK} è maggiore di 0 (componente polarizzato in diretta) il diodo è polarizzato in inversa e non ha alcun effetto.

Quando la tensione v_{AK} tende a diventare negativa (componente polarizzato in inversa) il diodo è polarizzato in diretta, entra in conduzione lasciando fluire una corrente da K ad A, mantenendo la v_{AK} limitata a pochi Volt.

Snubber

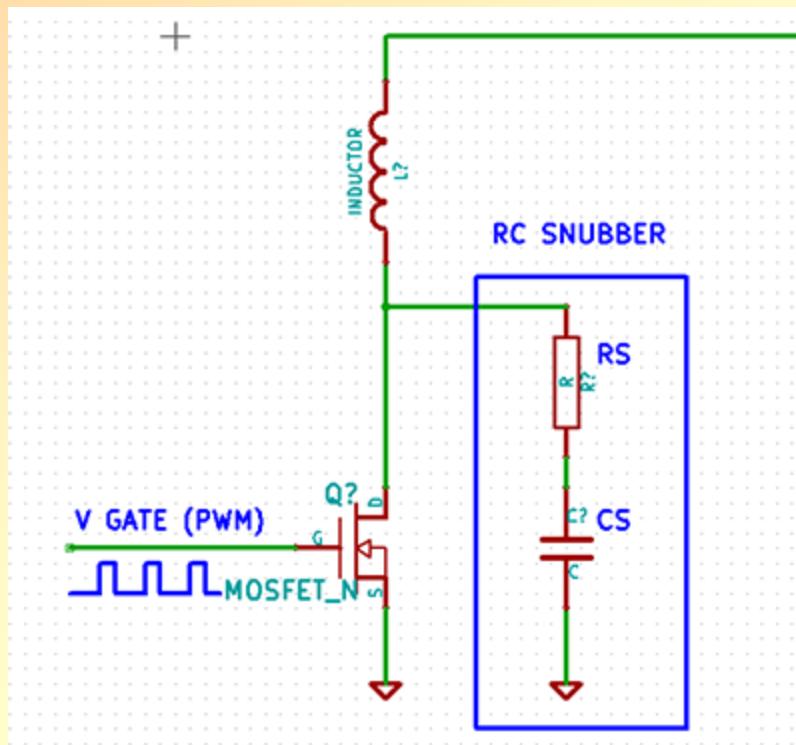
Circuito di **snubber** attenua o sopprime (snub) fenomeni di over-voltage in transitori di solito dovuti all'interruzione in power switch di corrente in carichi induttivi

Infatti in induttanza si ha $V=L \frac{dI}{dt}$

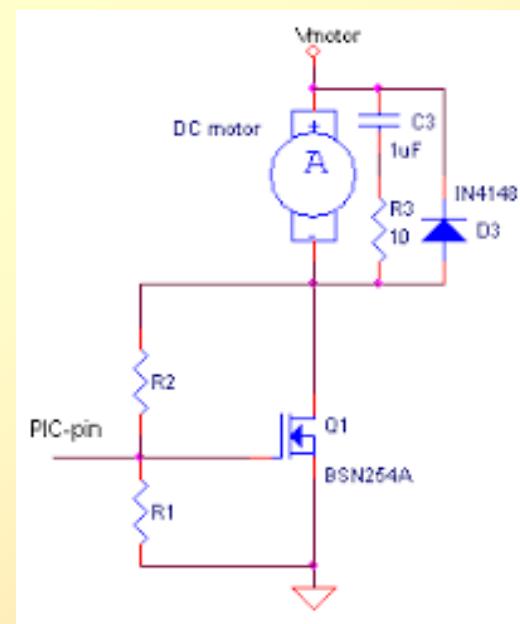
se I varia rapidamente (es. uno switch comandato interrompe flusso di corrente in L) si hanno fenomeni di over-voltage

Snubber

Esempi di circuito di **snubber** di tipo RC e RCD (effetto dissipativo di R serve per smorzare picchi nei segnali, intervenire solo in transitorio e quindi effetto negativo di R su efficienza energetica è limitato)



- RC snubber



- RCD snubber

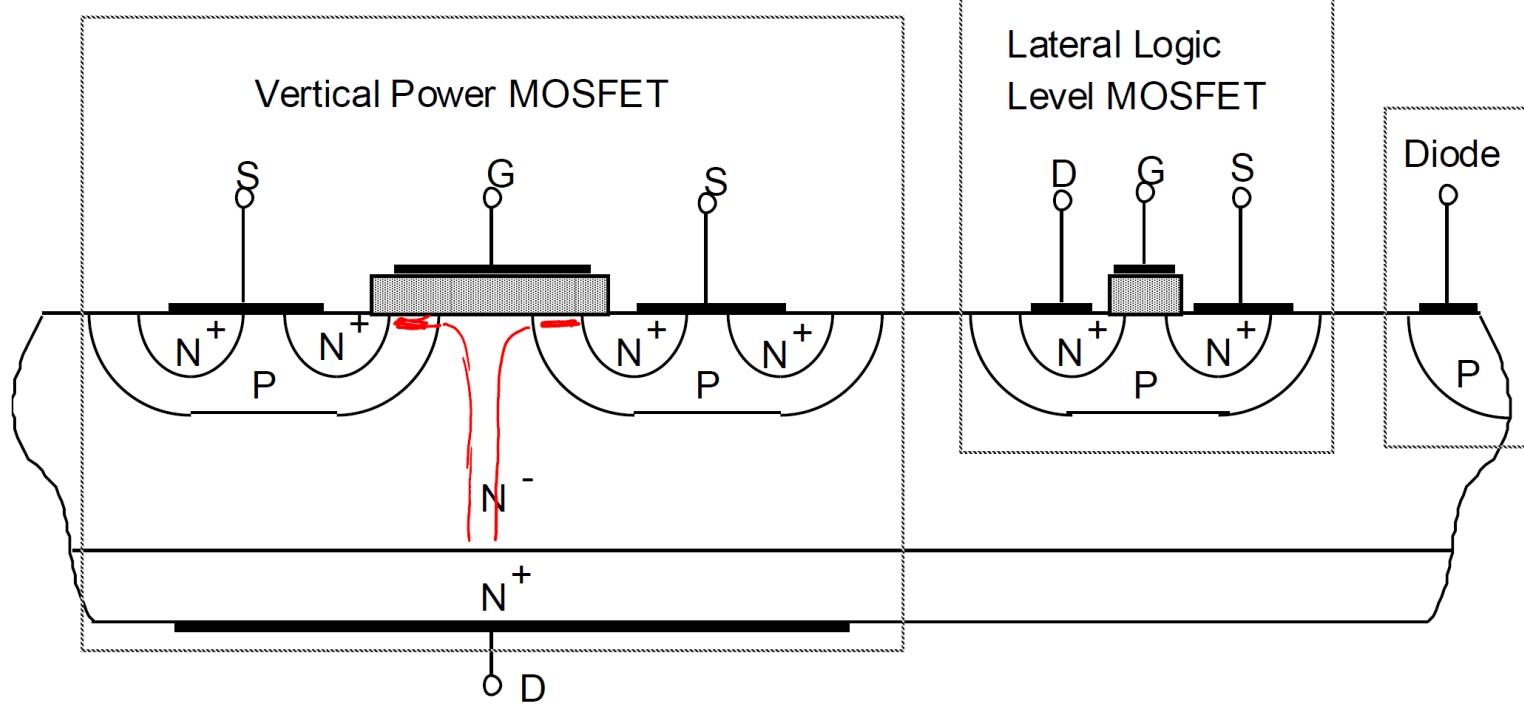
Smart power - circuiti integrati (IC) per potenza e controllo

Type	Ratings	Process (example)
Discrete modules	V up to ~KV, I up to ~KA	
Smart Power/Smart Switches	I < 50-100 A V < 1 KV	Vertical + Lateral Devices
High-Voltage ICs	I < 50-100 A, V < 1 KV	High Voltage BCD
High-density PMICs	V < 100 V	High Density BCD

- PMIC: Power management integrated circuits
- BCD: Bipolar (BJT) CMOS DMOS

Smart power

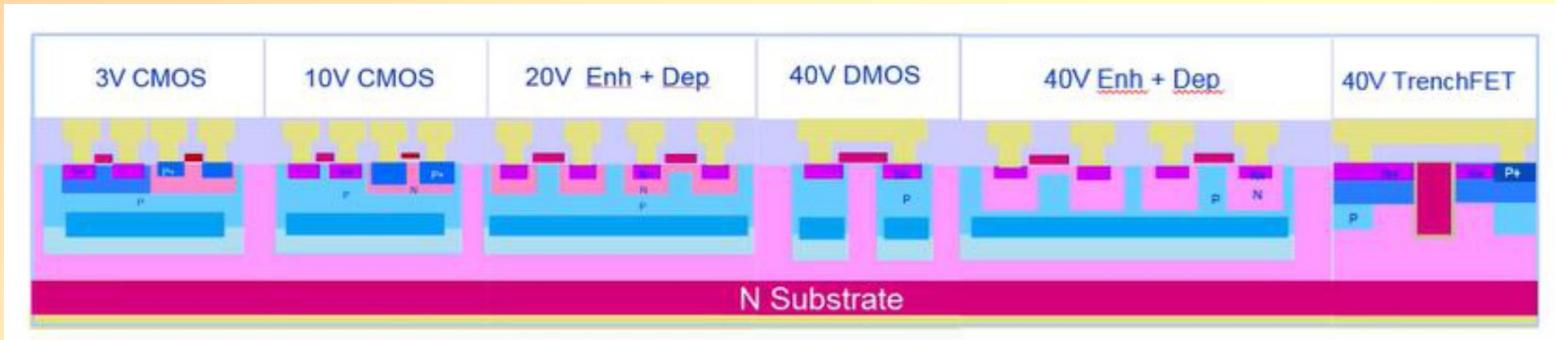
Vertical Power devices + Lateral Devices for (some) logic



Uso di Vertical devices per la potenza e lateral devices per controllo

Smart power

Esempio di integrazione di circuiti CMOS per segnali a bassa potenza e DMOS per applicazioni a 40V



Pros:

- Improved reliability (no bonding, no complex packaging)
- Reduced EMI
- Smaller chip area (improved integration)

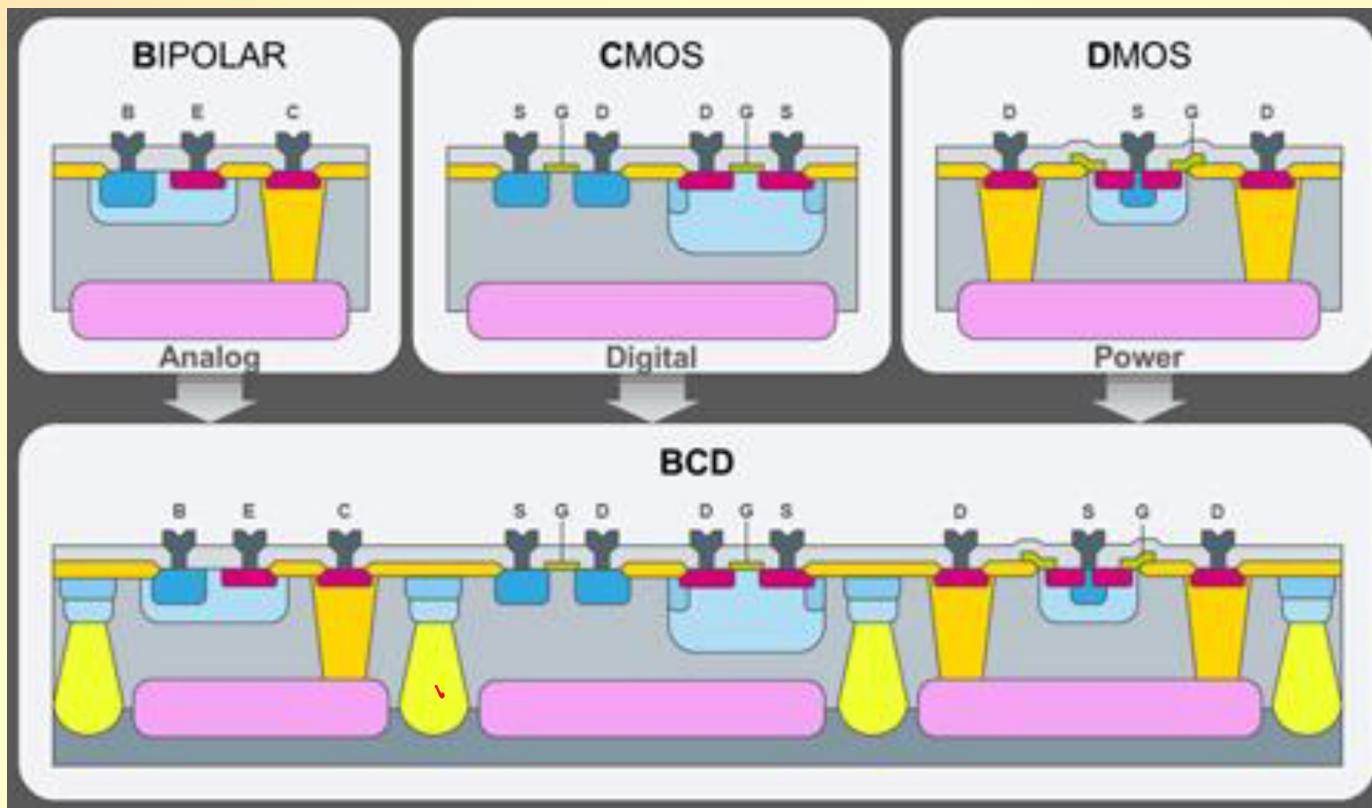
Cons

- No component is optimized (e.g. digital is not optimized (long channel lengths and thick oxides))

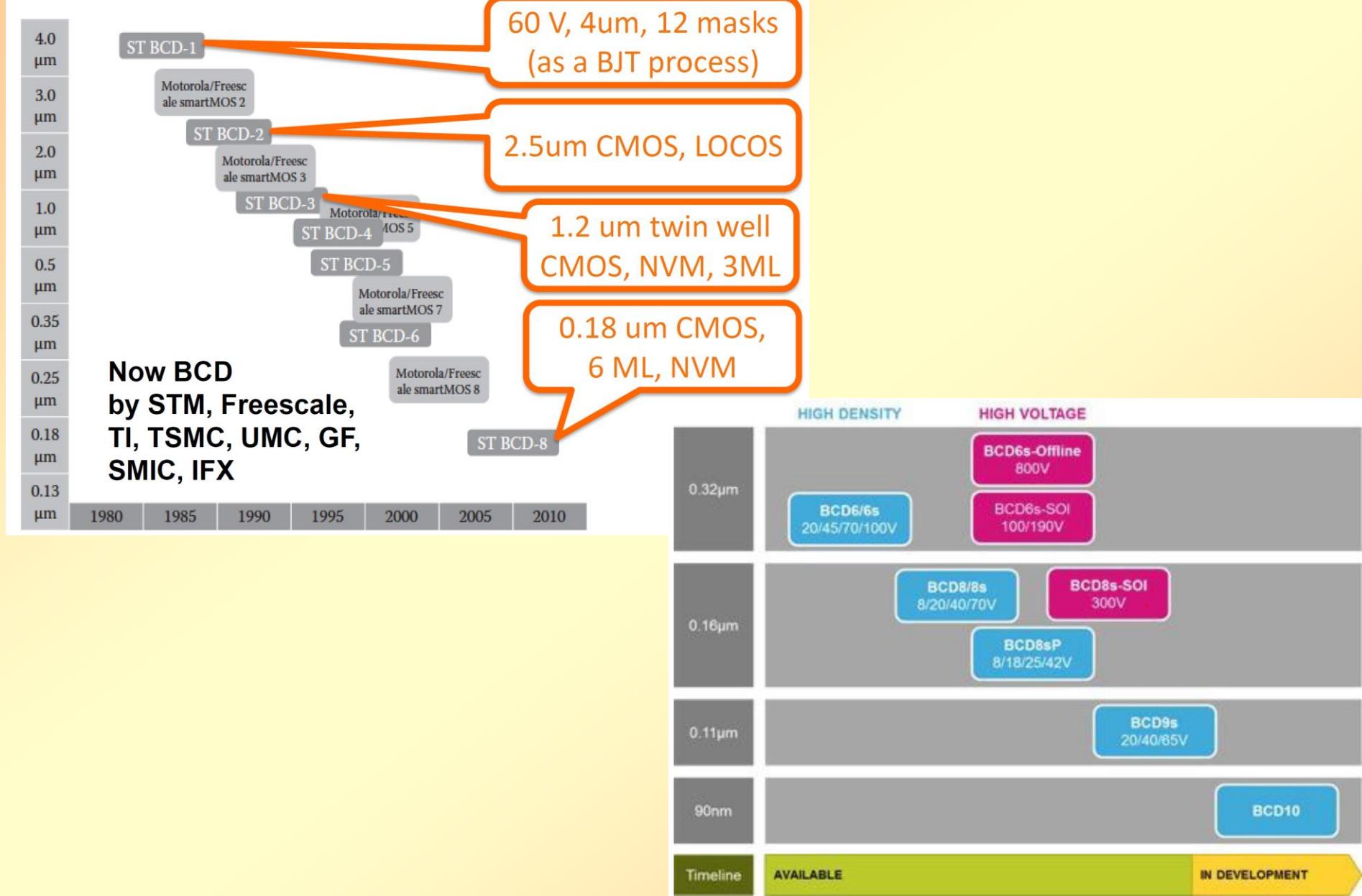
Smart power – BCD

Leader di mercato (STM, Infineon).

Esempio BCD di STM (lateral devices sia per logica CMOS che per alte tensioni DMOS con potenza gestita inferiore a vertical devices o discreti)



Smart power – STM BCD



Agenda

- Intro modulo 4: Elettronica di potenza, Convertitori (DC/DC e AC/DC, inverter DC/AC), Fuel Cells
- Componenti (Materiali, Dispositivi) Elettronici di Potenza:
 - generalità
 - materiali
 - dispositivi (diodi, SCR, BJT, MOSFET, IGBT)
 - protezione (diodi, snubber)
 - smart power (circuiti integrati di potenza)
- Analisi data sheet MOSFET e IGBT commerciali per automotive

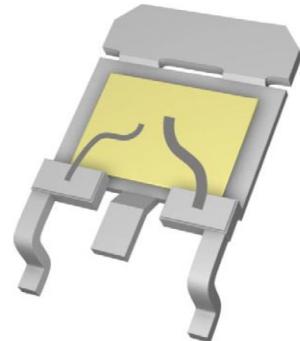
**Analisi di componenti
commerciali
power Mosfets (e.g. Toshiba) per
applicazioni 24V/48V HEV**

**IGBT (Infineon) per applicazioni
a veicoli Full Electric**

Innovazione su packaging

HEV are using 12V, 24V and up to 48V nominal DC Bus →
Demand of 100V (max Voltage) MOSFETs is increased

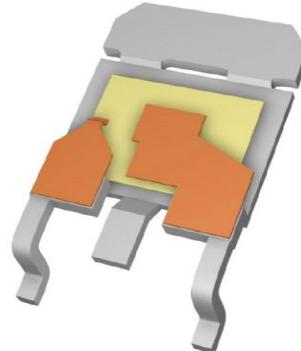
DPAK



Lower package
Resistance



DPAK+



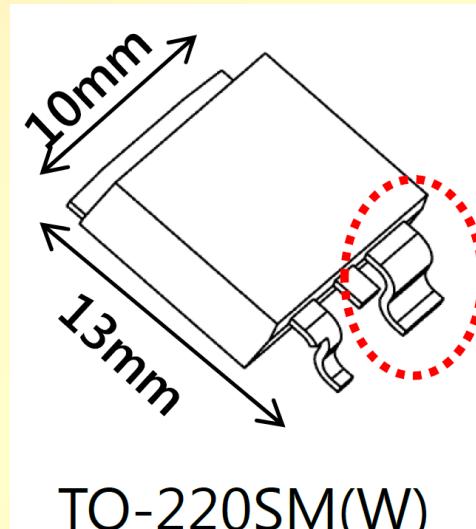
Al wire

Cu connector



both a thermal and electrical conductivity perspective copper is much better than aluminum. Thermal conductivity is 401W/(m·K) for copper, while it is 237W/(m·K) for aluminum. Electrical resistivity (at 20°C) is 16.8nΩ·m for copper and 28.2nΩ·m for aluminum. Higher thermal conductivity helps release heat from the connecter element of the package and the lower resistivity contributes to the reduction of package resistance.

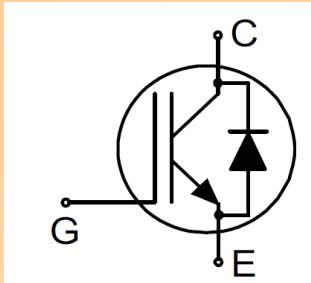
PowerMOSFET Toshiba



Package	Polarity	Process	V_{DSS} (V)	Part No.	$R_{DS(ON)}$ max (mΩ)		$I_D(\text{DC})$ (A)	P_D (W)	$Q_g \text{ typ}$ (nC)	AEC-Q101
					$V_{GS}=10\text{V}$ (-10V Pch)	$V_{GS}=6\text{V}$ (-6V Pch)				

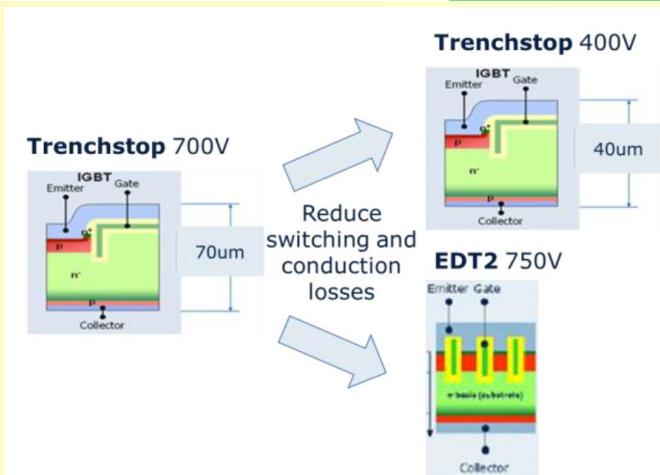
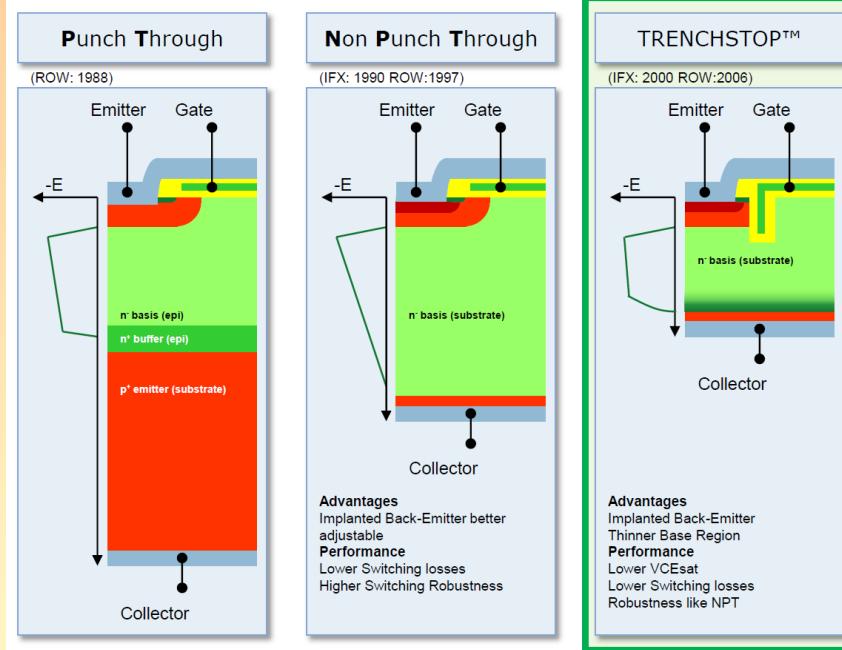
TO-220SM(W) Package (10mm x 13mm)

	Nch	UMOS9	40	TKR74F04PB	0.74	0.98	250	375	227	✓	
			40	TK1R4F04PB	1.35	1.90	160	205	103	✓	
		UMOS8	40	TK200F04N1L	0.9	1.37	200	375	214	✓	
			100	TK60F10N1L	6.11	9.25	60	205	60	✓	
		UMOS6	100	TK160F10N1L	2.4	3.9	160	375	122	✓	
	Pch		-40	TJ200F04M3L	1.8	2.6	-200	375	460	✓	
			-40	TJ100F04M3L	3.6	5.4	-100	250	250	✓	
			-60	TJ150F06M3L	5.6	6.1	-150	300	420	✓	
			-60	TJ100F06M3L	7.1	10.7	-100	250	250	✓	



IGBT Infineon

nomenclatura e tecnologie



I	K	W	75	N	65	E	S5	Explanation
1	2	3	4	5	6	7	8	Group
I								Infineon
S								Formerly Siemens
D								Single diode
G								Single IGBT
H								Reverse conducting IGBT for soft switching applications
K								IGBT + anti-parallel diode
A								TO-220 FullPAK
B								TO-263 DPAK
D								TO-252 DPAK
H								TO-220 real-2-pin
I								TO-262 PPAK
P								TO-220
Q								TO-247 PLUS
U								TO-251 IPAK
V								TO-220 real-2-pin FullPAK
W								TO-247
75								Current in A at 100°C case temperature
E								EmCon diode
N								N-channel
T								Trenchstop (1200V only)
		60						600V
		65						650V
		90						900V
		100						1000V
		110						1100V
		120						1200V
		135						1350V
		160						1600V
B								Emitter Controlled diode
C								Emitter Controlled full rated diode
D								Rapid1 diode
E								Rapid1 full rated diode
M								Rapid2 diode
N								Rapid2 full rated diode
R								SiC 5 th Gen diode
S								SiC 5 th Gen full rated diode
F5								Trenchstop™ (1200V)
H3								Fastest IGBT based on Trenchstop™ 5 technology
H5								High speed 3 based on Trenchstop™ technology
HS								High speed (600V)
L5								Low $V_{CE(sat)}$ technology based on Trenchstop™ 5 technology
R								Reverse conducting IGBT
R2								Reverse conducting IGBT Gen2
R3								Reverse conducting IGBT Gen3
R5								RC next generation
S5								Soft switching technology based on Trenchstop™ 5 technology
T								Trenchstop™ (600V)
T2								Trenchstop™ Gen2 (IGBT4), 1200V only
WR5								RC next generation optimized for welding applications

IGBT Infineon

tensioni e correnti

Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CES}$	$V_{GE} = 0V, I_C = 0.20mA$	650	-	-	V
-------------------------------------	---------------	-----------------------------	-----	---	---	---

Collector-emitter saturation voltage V_{CESat}

Collector-emitter saturation voltage	V_{CESat}	$V_{GE} = 15.0V, I_C = 40.0A$ $T_J = 25^\circ C$ $T_V = 125^\circ C$ $T_V = 175^\circ C$	-	1.65 1.85 1.95	2.10 - -	V
--------------------------------------	-------------	---	---	----------------------	----------------	---

DC collector current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ C$ $T_C = 100^\circ C$	I_C	74.0 46.0	A
---	-------	--------------	---

Pulse collector current I_{Cpuls}

Pulsed collector current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Cpuls}	120.0	A
--	-------------	-------	---

Current rating of DuoPack diode I_F and I_{Fpuls}

Diode forward current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ C$ $T_C = 100^\circ C$	I_F	36.0 21.0	A
Diode pulsed current, t_p limited by T_{vjmax}	I_{Fpuls}	120.0	A

Gate-emitter voltage V_{GE}

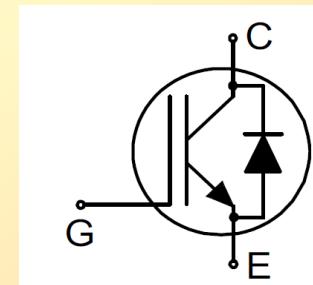
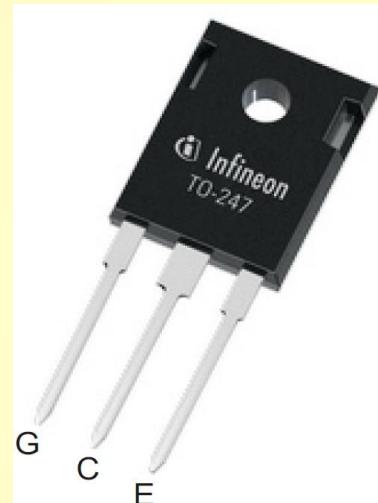
Gate-emitter voltage Transient Gate-emitter voltage ($t_p = 10\mu s, D < 0.010$)	V_{GE}	± 20 ± 30	V
---	----------	----------------------	---

Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(th)}$	$I_C = 0.40mA, V_{CE} = V_{GE}$	3.2	4.0	4.8	V
--------------------------------	--------------	---------------------------------	-----	-----	-----	---

Diode forward voltage	V_F	$V_{GE} = 0V, I_F = 20.0A$ $T_J = 25^\circ C$ $T_V = 125^\circ C$ $T_V = 175^\circ C$	-	1.45 1.40 1.40	1.80 - -	V
-----------------------	-------	--	---	----------------------	----------------	---

Leakage currents I_{CES} and I_{GES}

Zero gate voltage collector current	I_{CES}	$V_{CE} = 650V, V_{GE} = 0V$ $T_V = 25^\circ C$ $T_V = 175^\circ C$	-	-	40.0 4000.0	μA
Gate-emitter leakage current	I_{GES}	$V_{CE} = 0V, V_{GE} = 20V$	-	-	100	nA



IGBT Infineon

aspetti termici e transitori

Power dissipation P_{tot}

Power dissipation $T_C = 25^\circ\text{C}$
Power dissipation $T_C = 100^\circ\text{C}$

P_{tot}	255.0	W
	120.0	

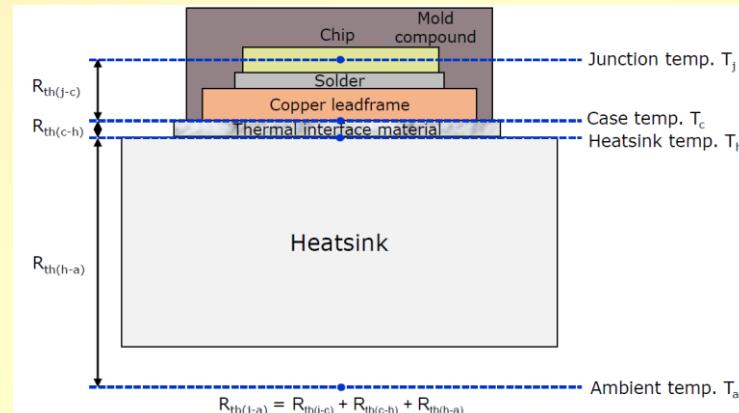
Operating junction temperature T_{vj}

Operating junction temperature T_{vj}

T_{vj}	-40...+175	°C
----------	------------	----

Thermal resistance $R_{\text{th(j-c)}}$

IGBT thermal resistance, junction - case	$R_{\text{th(j-c)}}$		0.60	K/W
Diode thermal resistance, junction - case	$R_{\text{th(j-c)}}$		1.80	K/W



Input, output and reverse transfer capacitance C_{ies} , C_{oes} and C_{res}

Input capacitance	C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{V}$, $V_{GE} = 0\text{V}$, $f = 1\text{MHz}$	-	2500	-	pF
Output capacitance	C_{oes}		-	50	-	
Reverse transfer capacitance	C_{res}		-	9	-	

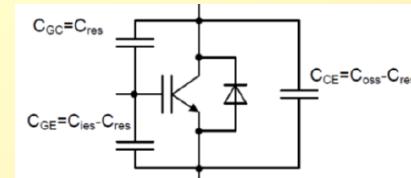
Gate charge Q_G

Gate charge	Q_G	$V_{CC} = 520\text{V}$, $I_C = 40.0\text{A}$, $V_{GE} = 15\text{V}$	-	95.0	-	nC
-------------	-------	--	---	------	---	----

Internal emitter inductance L_E

Internal emitter inductance measured 5mm (0.197 in.) from case	L_E	PG-TO220-3 PG-TO247-3	-	7.0	-	nH
--	-------	--------------------------	---	-----	---	----

Diode reverse recovery time	t_{rr}	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$, $V_R = 400\text{V}$, $I_F = 20.0\text{A}$, $dI/dt = 1000\text{A}/\mu\text{s}$	-	62	-	ns
Diode reverse recovery charge	Q_{rr}		-	0.45	-	μC
Diode peak reverse recovery current	I_{rm}		-	12.5	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b	di_{rr}/dt		-	-290	-	$\text{A}/\mu\text{s}$



$$P_{Gdr} = Q_G \cdot (V_{GE(on)} - V_{GE(off)}) \cdot f_{sw}$$

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
IGBT Characteristic, at $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$						
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 400\text{V}$, $I_C = 20.0\text{A}$, $V_{GE} = 0.0/15.0\text{V}$,	-	22	-	ns
Rise time	t_r	$R_{\text{load}} = 15.0\Omega$, $R_{\text{G(on)}} = 15.0\Omega$,	-	12	-	ns
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	$L_\sigma = 30\text{nH}$, $C_\sigma = 30\text{pF}$	-	165	-	ns
Fall time	t_f	L_σ , C_σ from Fig. E	-	13	-	ns
Turn-on energy	E_{on}	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	0.39	-	mJ
Turn-off energy	E_{off}		-	0.12	-	mJ
Total switching energy	E_{ts}		-	0.51	-	mJ