

# Interruttori elettronici di potenza

# Interruttori elettronici di potenza

## Power BJT:

$$U_{S_{\max}} \cong 500 \text{ V}, \quad I_{S_{\max}} \cong 100 \text{ A}, \quad t_{\text{sw}} \cong 1 \mu\text{s}$$

# Interruttori elettronici di potenza

## Power BJT:

$$U_{S_{\max}} \cong 500 \text{ V}, \quad I_{S_{\max}} \cong 100 \text{ A}, \quad t_{\text{sw}} \cong 1 \mu\text{s}$$



**Applicazioni limitate**

(si preferiscono interruttori comandati in tensione)

# Interruttori elettronici di potenza

## Power MOS:

$$U_{S_{\max}} \cong 500 \text{ V}, \quad I_{S_{\max}} \cong 50 \text{ A}, \quad t_{\text{sw}} \cong 100 \text{ ns}$$

# Interruttori elettronici di potenza

## Power MOS:

$$U_{S_{\max}} \cong 500 \text{ V}, \quad I_{S_{\max}} \cong 50 \text{ A}, \quad t_{\text{sw}} \cong 100 \text{ ns}$$



Applicazioni di potenza medio-piccola (< 1 kW)

# Interruttori elettronici di potenza

**IGBT:**

$$U_{S_{\max}} > 1 \text{ kV}, \quad I_{S_{\max}} > 1 \text{ kA}, \quad t_{\text{sw}} \cong 1 \mu\text{s}$$

# Interruttori elettronici di potenza

**IGBT:**

$$U_{S_{\max}} > 1 \text{ kV}, \quad I_{S_{\max}} > 1 \text{ kA}, \quad t_{\text{sw}} \cong 1 \mu\text{s}$$



**Attualmente usato per applicazioni di  
potenza medio-grande (< 200 kW)**

# Interruttori elettronici di potenza

**IGBT:**

$$U_{S_{\max}} > 1 \text{ kV}, \quad I_{S_{\max}} > 1 \text{ kA}, \quad t_{\text{sw}} \cong 1 \mu\text{s}$$



**Attualmente usato per applicazioni di  
potenza medio-grande (< 200 kW)**

**In futuro usato anche per applicazioni di  
potenza grande (MW)**

# Interruttori elettronici di potenza

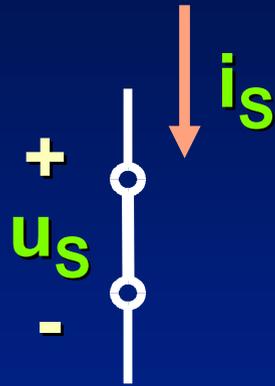
## Caratteristiche statiche

Conduzione: S on

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

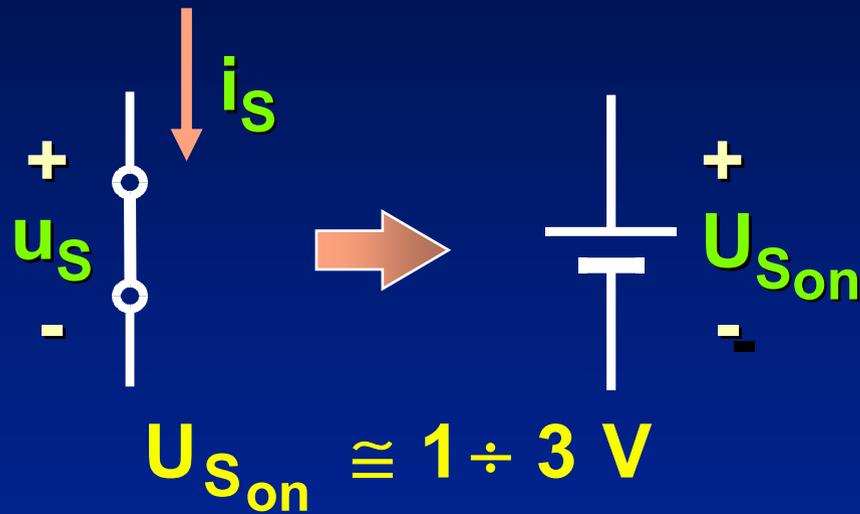
Conduzione: S on



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

Conduzione:  $S_{on}$



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

Conduzione: S on



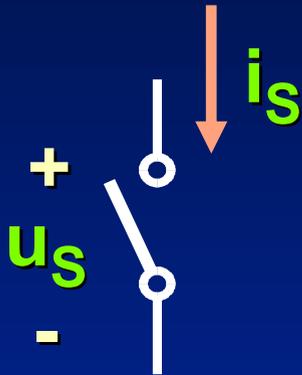
$$U_{S_{on}} \cong 1 \div 3 \text{ V}$$

$$P_{on} > 0$$

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

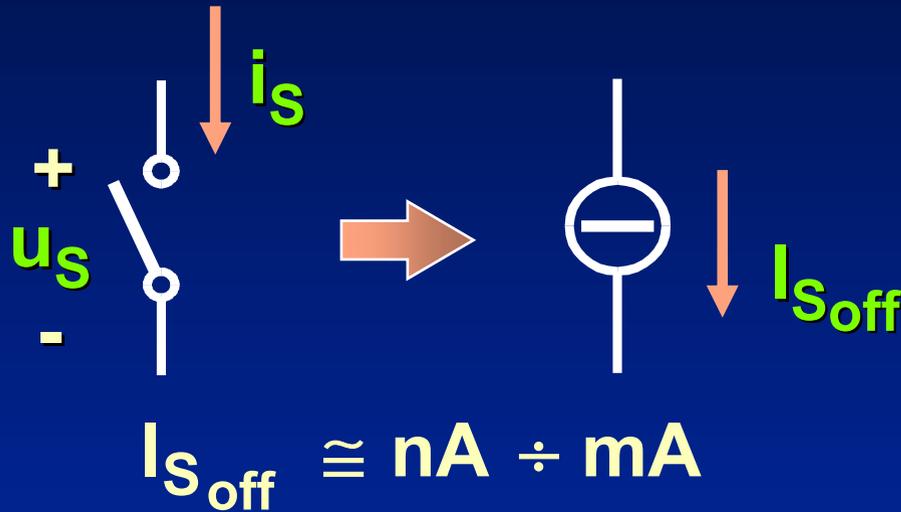
Interdizione: S off



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

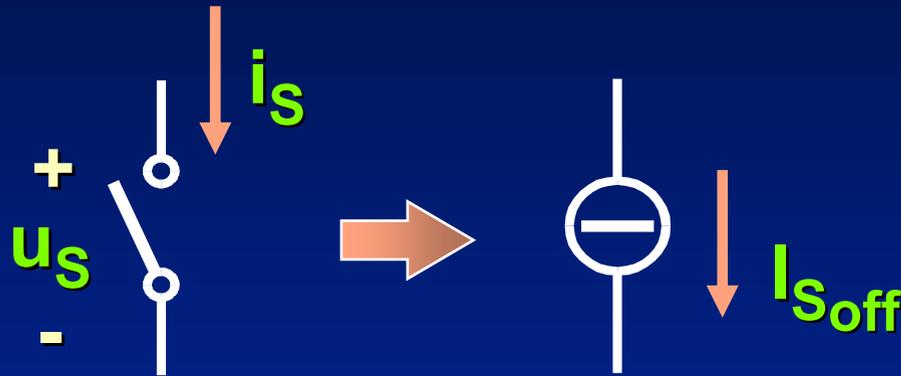
Interdizione:  $S$  off



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche statiche

Interdizione:  $S$  off



$$I_{Soff} \cong \text{nA} \div \text{mA}$$

$$P_{off} \cong 0$$

# **Interruttori elettronici di potenza**

## **Caratteristiche dinamiche**

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

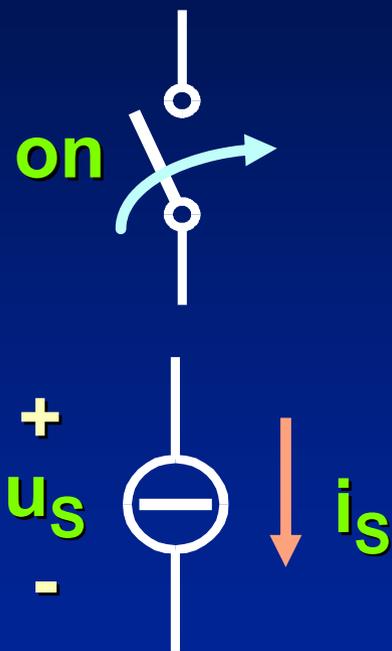
### Commutazione in accensione:



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in accensione:

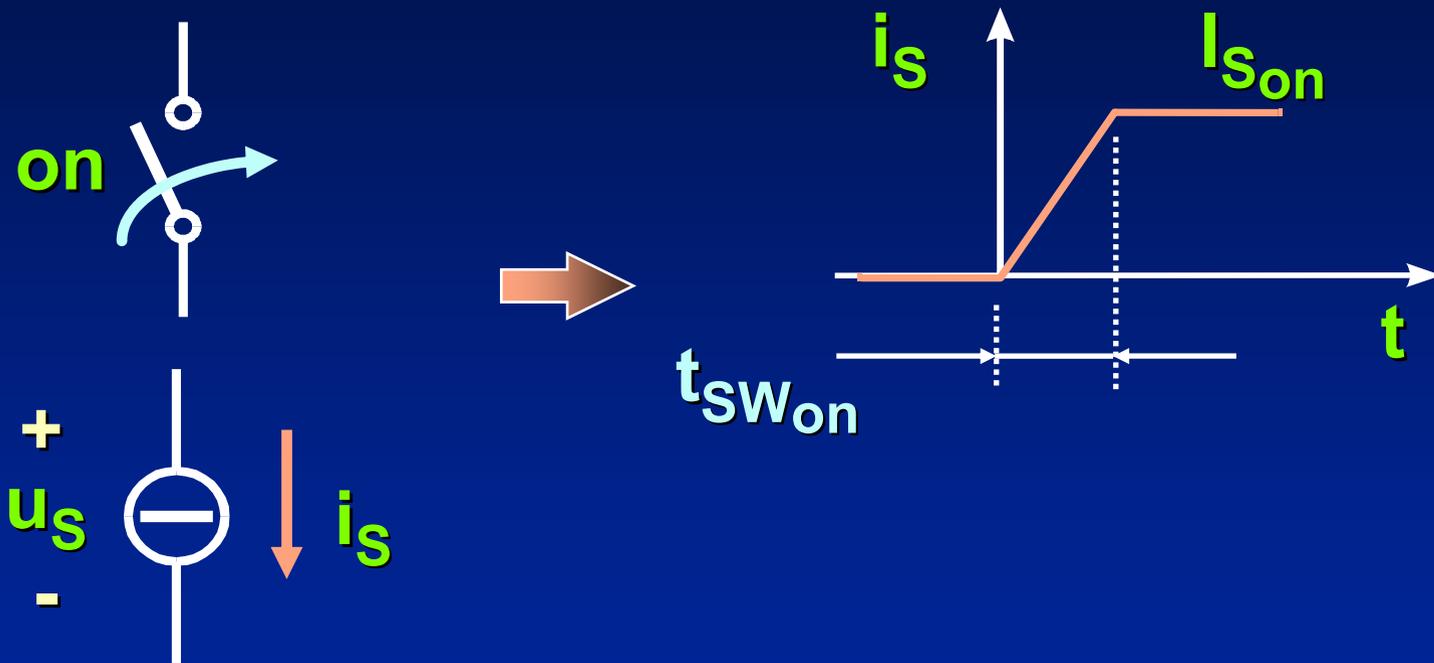


Durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa crescente

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

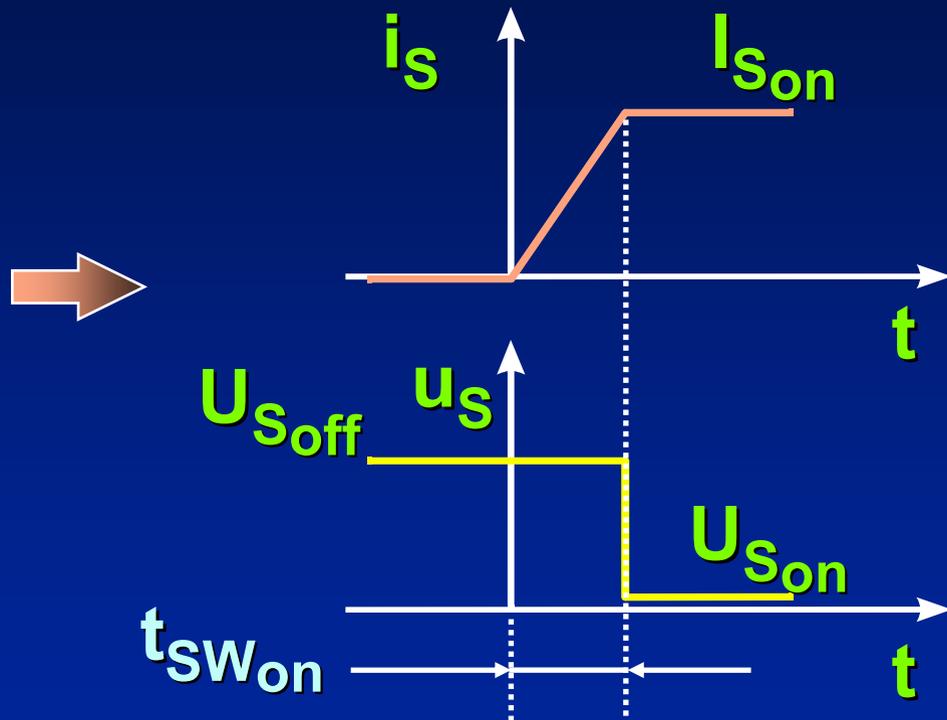
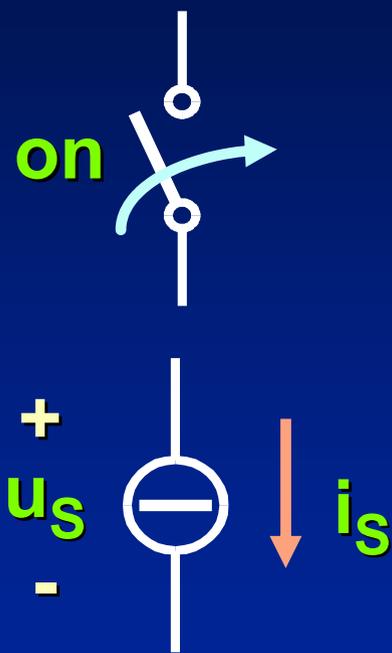
### Commutazione in accensione:



# Interruttori elettronici di potenza

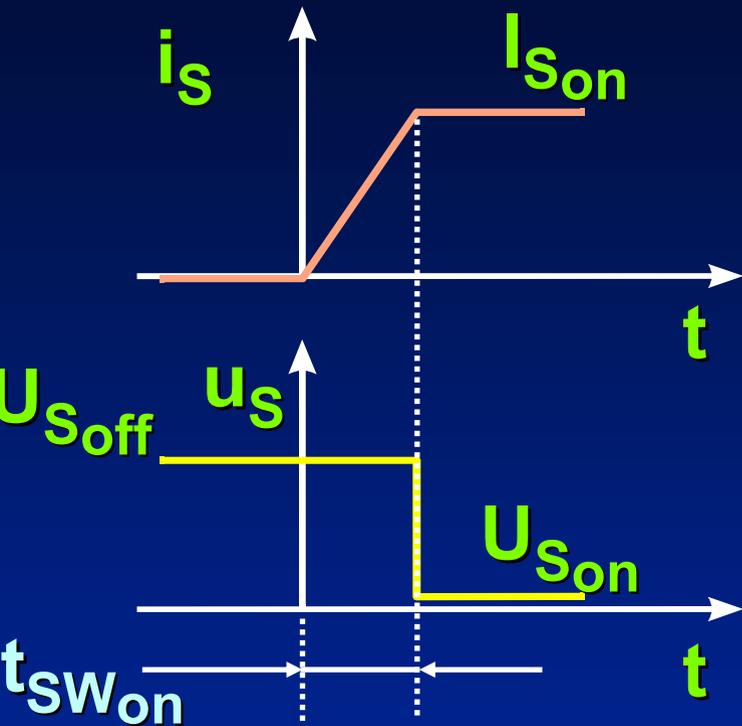
## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in accensione:



$U_{S_{off}}$  e  $I_{S_{on}}$  sono imposti dal circuito esterno

# Interruttori elettronici

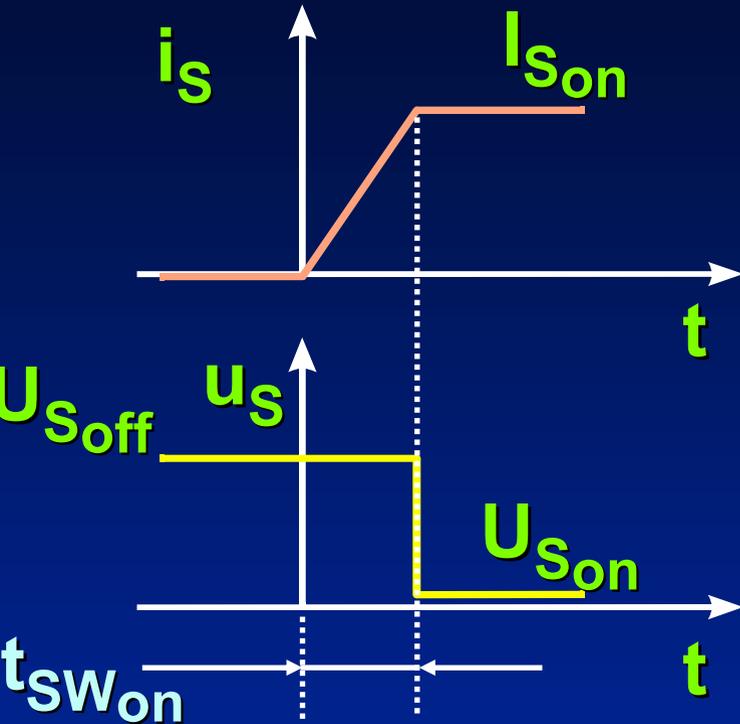


Commutazione  
in accensione:

Energia dissipata in  
ogni commutazione

$$W_{sw_{on}} = \int_0^{t_{sw_{on}}} u_s i_s dt$$
$$= \frac{U_{s_{off}} I_{s_{on}}}{2} t_{sw_{on}}$$

# Interruttori elettronici



Commutazione  
in accensione:

Energia dissipata in  
ogni commutazione

$$P_{SW_{on}} = f_s \cdot W_{SW_{on}}$$

# **Interruttori elettronici di potenza**

## **Caratteristiche dinamiche**

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

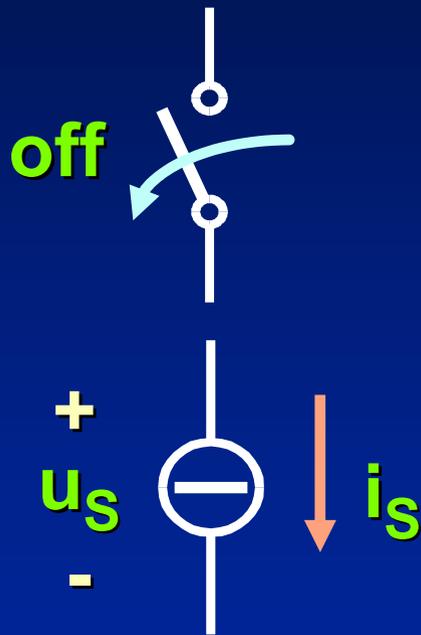
### Commutazione in spegnimento:



# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in spegnimento:

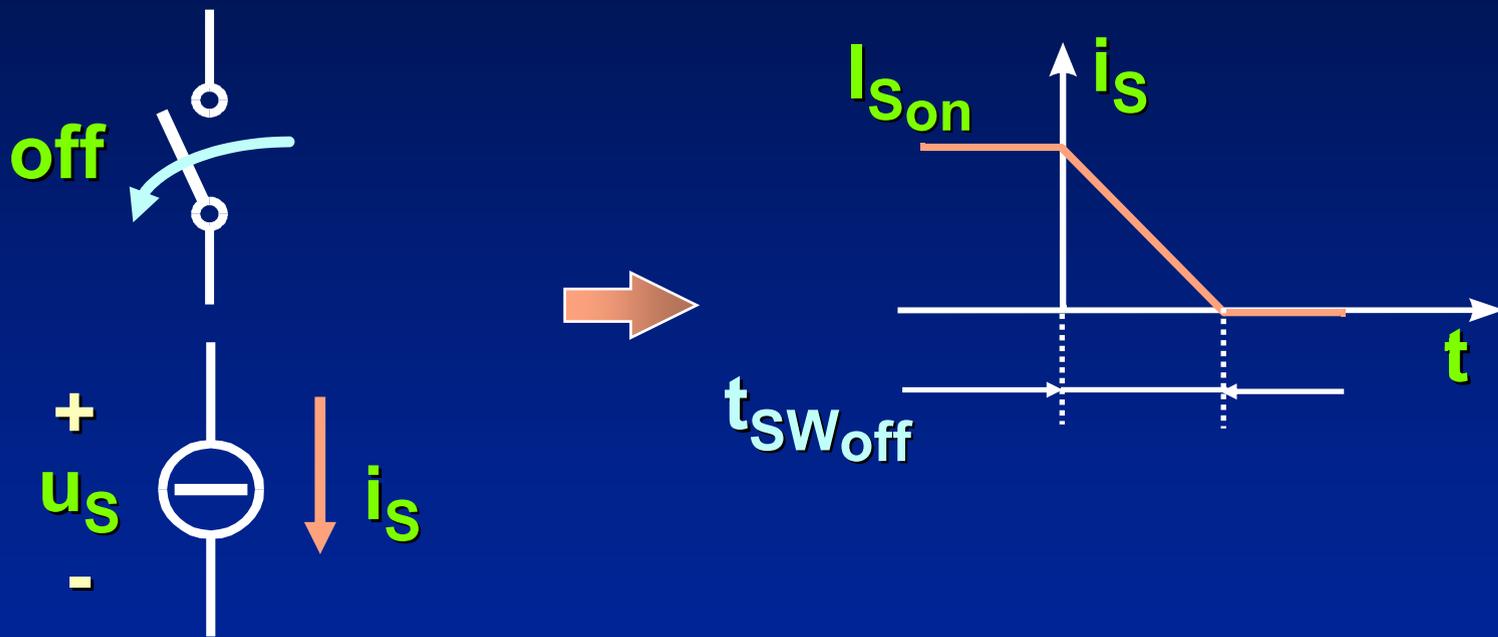


Durante la commutazione, l'interruttore elettronico è un generatore di corrente a rampa decrescente

# Interruttori elettronici di potenza

## Caratteristiche dinamiche

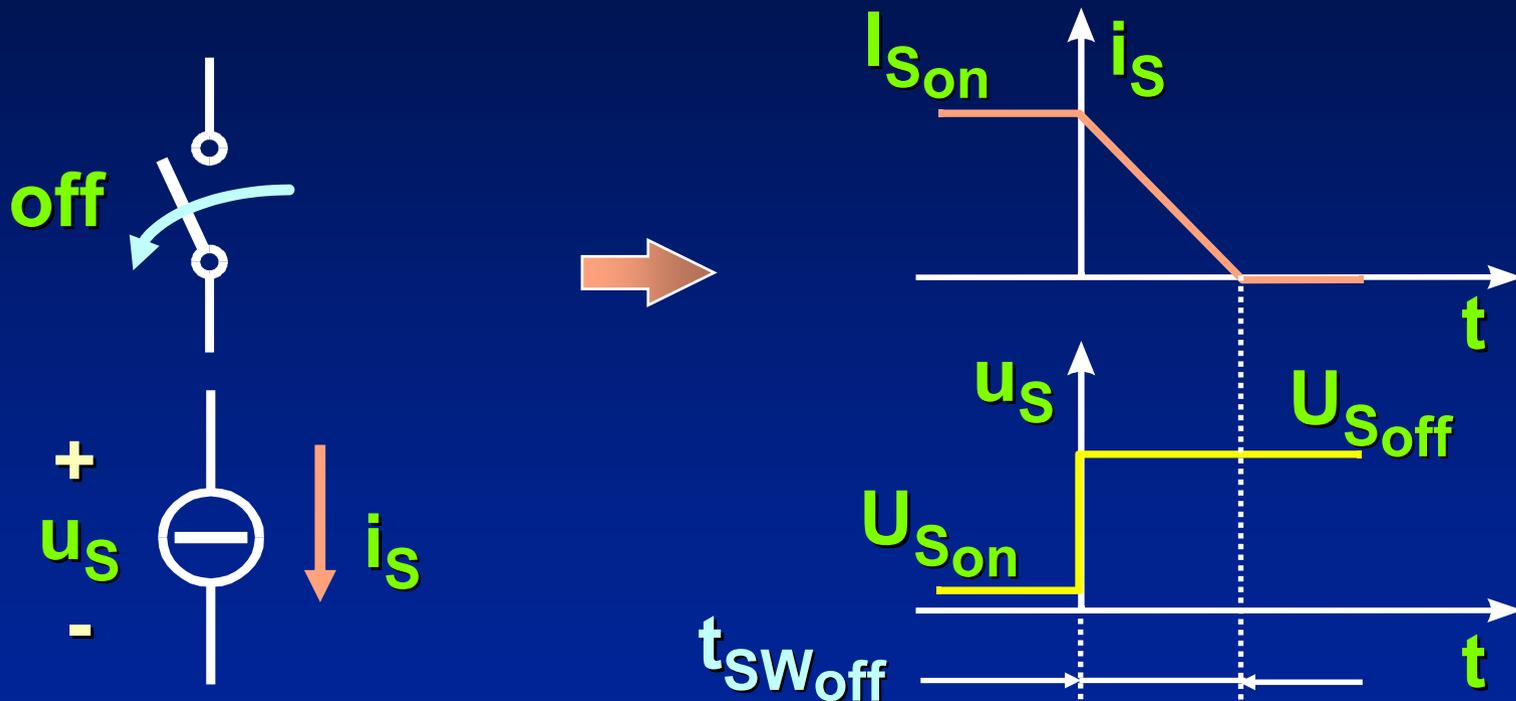
### Commutazione in spegnimento:



# Interruttori elettronici di potenza

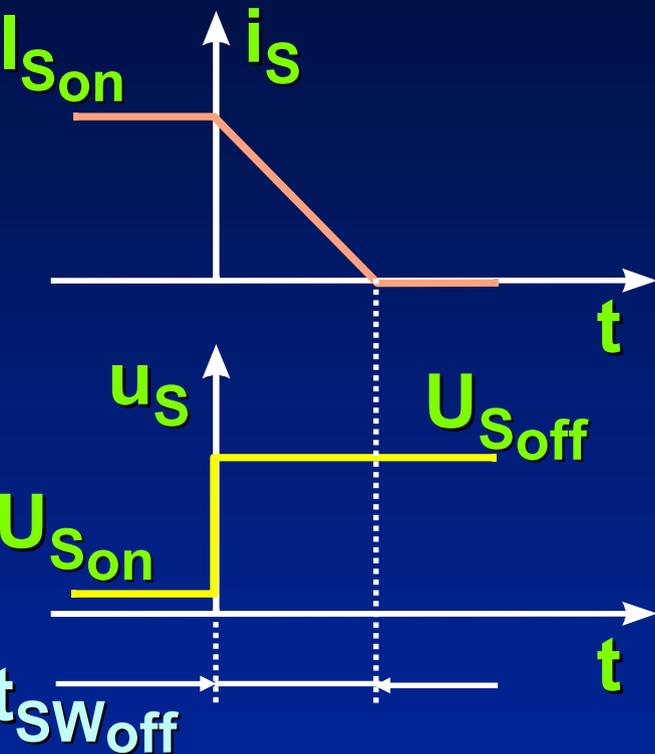
## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in spegnimento:



$U_{S_{off}}$  e  $I_{S_{on}}$  sono imposti dal circuito esterno

# Interruttori elettronici

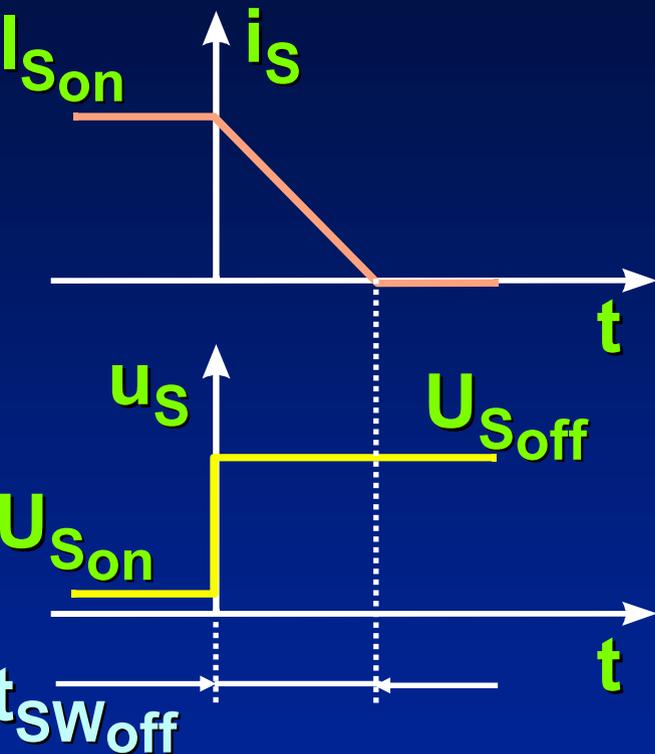


Commutazione  
in spegnimento:

Energia dissipata in  
ogni commutazione

$$W_{SW_{off}} = \int_0^{t_{sw_{off}}} u_s i_s dt$$
$$= \frac{U_{s_{off}} I_{s_{on}}}{2} t_{sw_{off}}$$

# Interruttori elettronici



Commutazione  
in spegnimento:

Energia dissipata in  
ogni commutazione

$$P_{SW_{off}} = f_s \cdot W_{SW_{off}}$$

# Interruttori elettronici

- Le perdite di commutazione sono circa proporzionali ad  $I_{S_{on}}$ ,  $U_{S_{off}}$  ed  $f_S$
- Le perdite di conduzione sono circa proporzionali ad  $I_{S_{on}}$  (ed indipendenti da  $f_S$ )
- Le perdite di interdizione sono trascurabili

# Interruttori elettronici

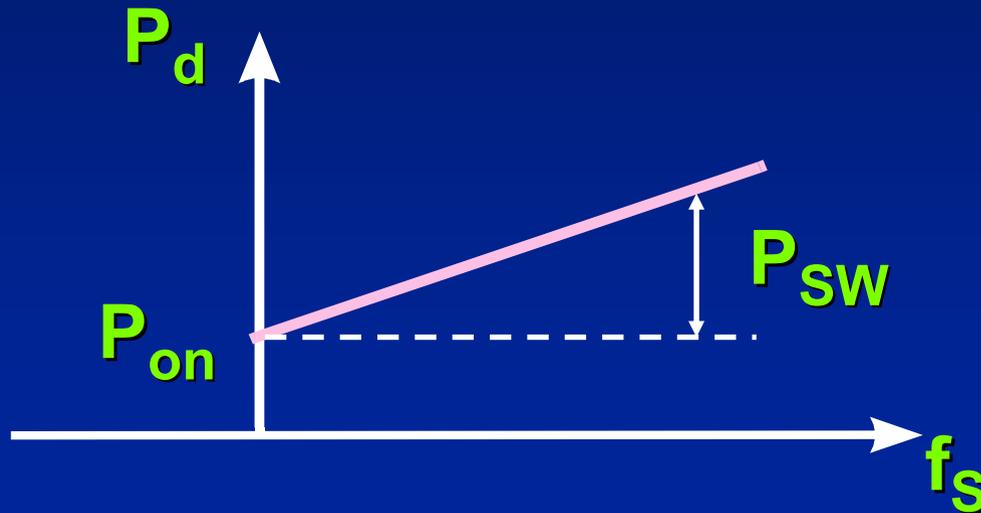
Perdite complessive:

$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{SW_{on}} + P_{SW_{off}}$$

# Interruttori elettronici

Perdite complessive:

$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{SW_{on}} + P_{SW_{off}}$$



# Interruttore ideale

# Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti

# Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
  - I tempi di commutazione degli interruttori sono infatti molto più piccoli dei tempi con cui evolvono le grandezze del circuito

# Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
  - I tempi di commutazione degli interruttori sono infatti molto più piccoli dei tempi con cui evolvono le grandezze del circuito
  - Le cadute di tensione in conduzione sono solitamente trascurabili rispetto alle tensioni in gioco nel circuito

# Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
- I circuiti vengono dunque analizzati, in prima approssimazione, assumendo interruttori ideali

# Interruttore ideale

- Dal punto di vista dell'analisi dei circuiti a commutazione, le nonidealità degli interruttori elettronici sono scarsamente influenti
- I circuiti vengono dunque analizzati, in prima approssimazione, assumendo interruttori ideali
- Gli effetti delle nonidealità (in particolare le perdite) vengono valutati in seconda approssimazione

# **Interruttore elettronico ideale**

## **Caratteristiche statiche**

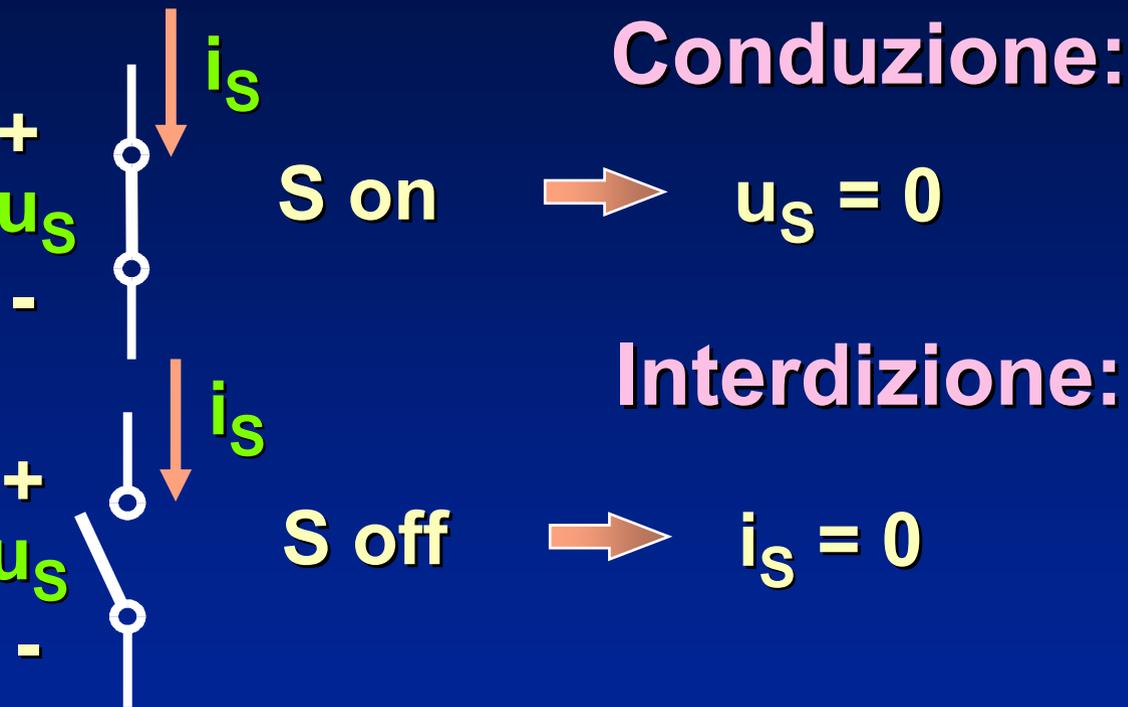
# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche statiche



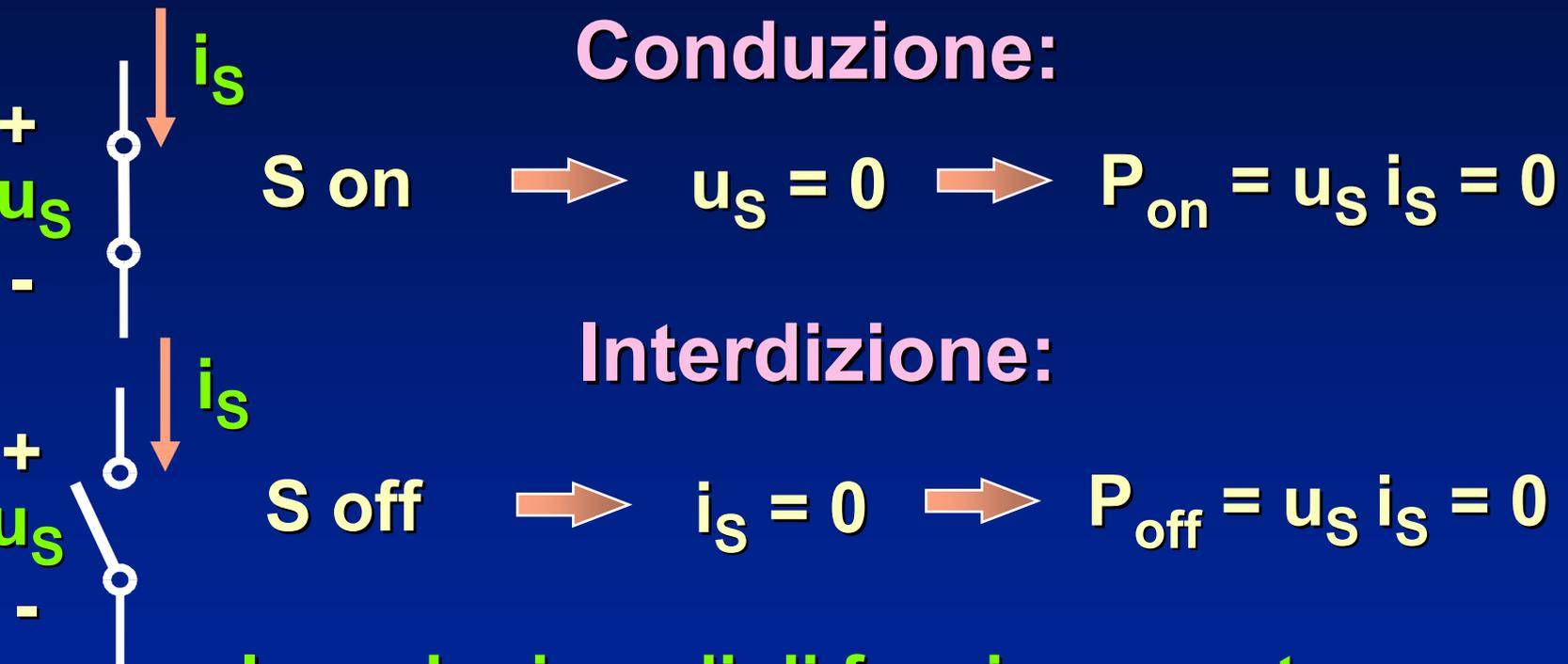
# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche statiche



# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche statiche



In ambo i modi di funzionamento  
l'interruttore non dissipa potenza

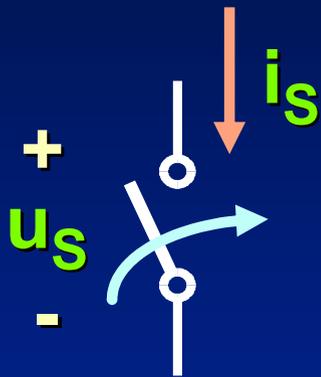
# **Interruttore elettronico ideale**

## **Caratteristiche dinamiche**

# Interruttore elettronico ideale

Caratteristiche dinamiche

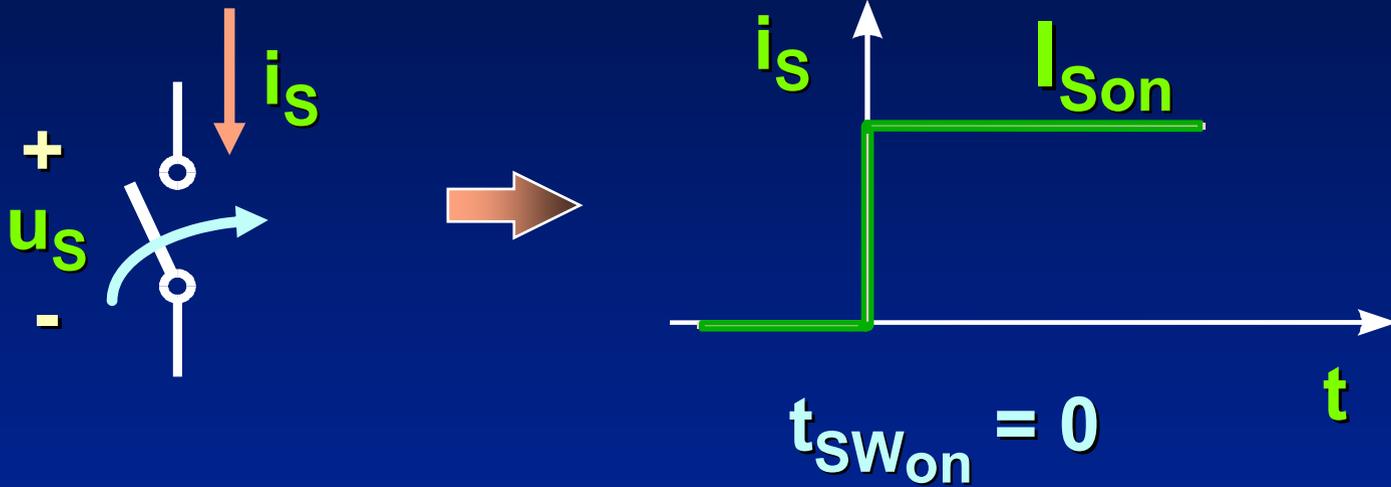
Commutazione in accensione:



# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche dinamiche

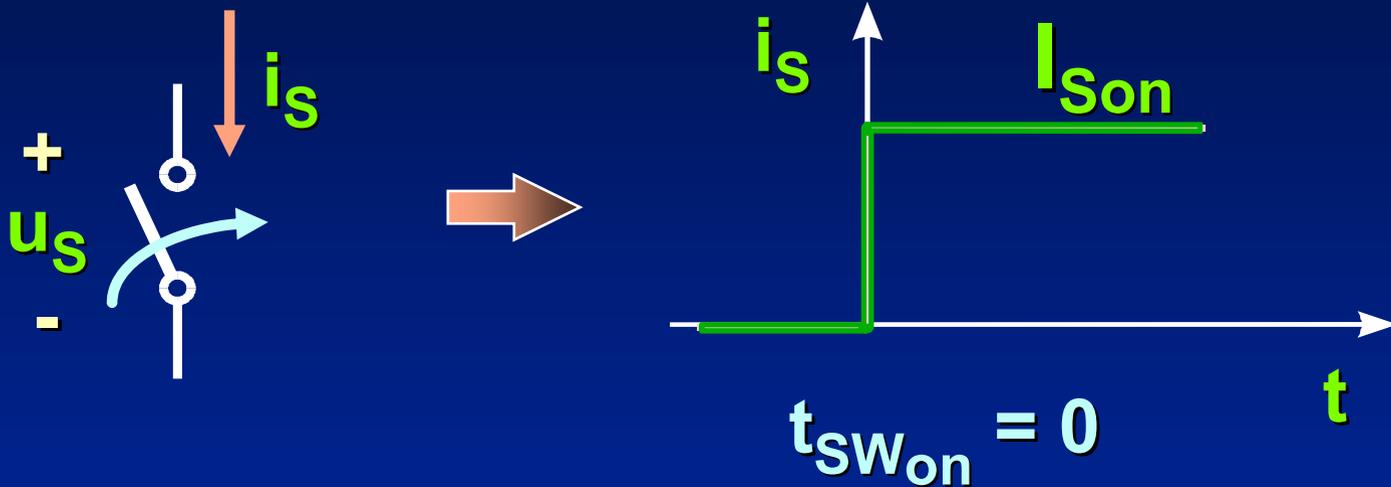
### Commutazione in accensione:



# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in accensione:

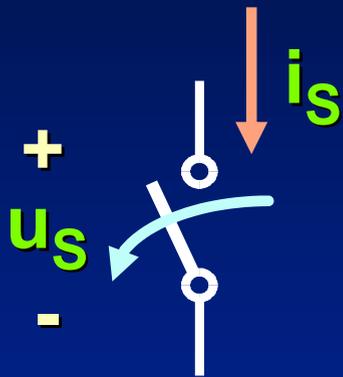


$$W_{SW_{on}} = \int_0^{t_{SW_{on}}} u_s \cdot i_s dt = 0$$

# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche dinamiche

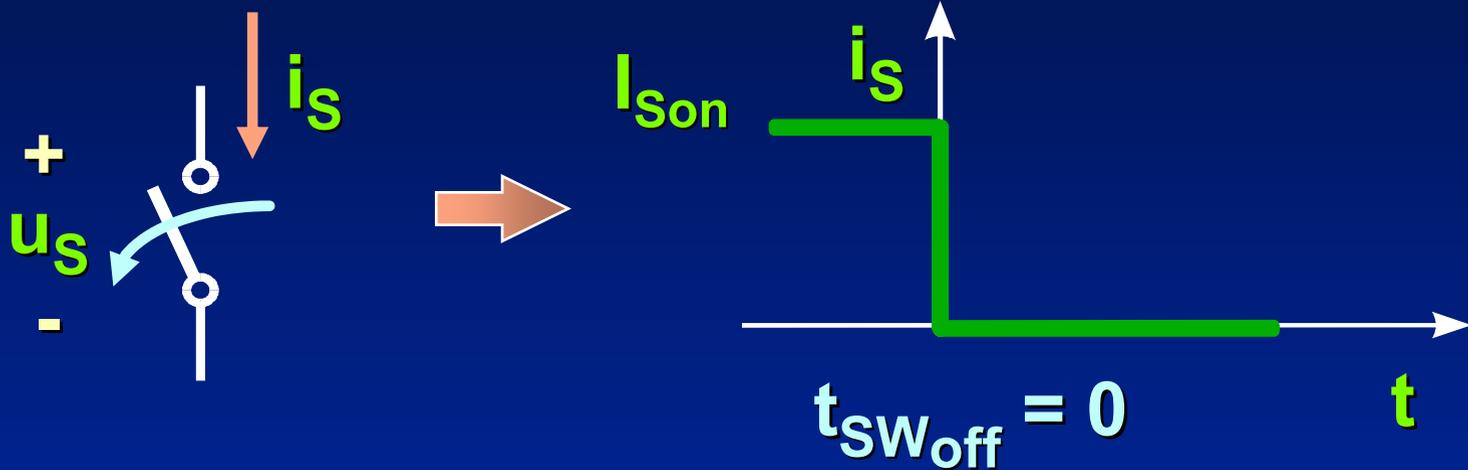
### Commutazione in spegnimento:



# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche dinamiche

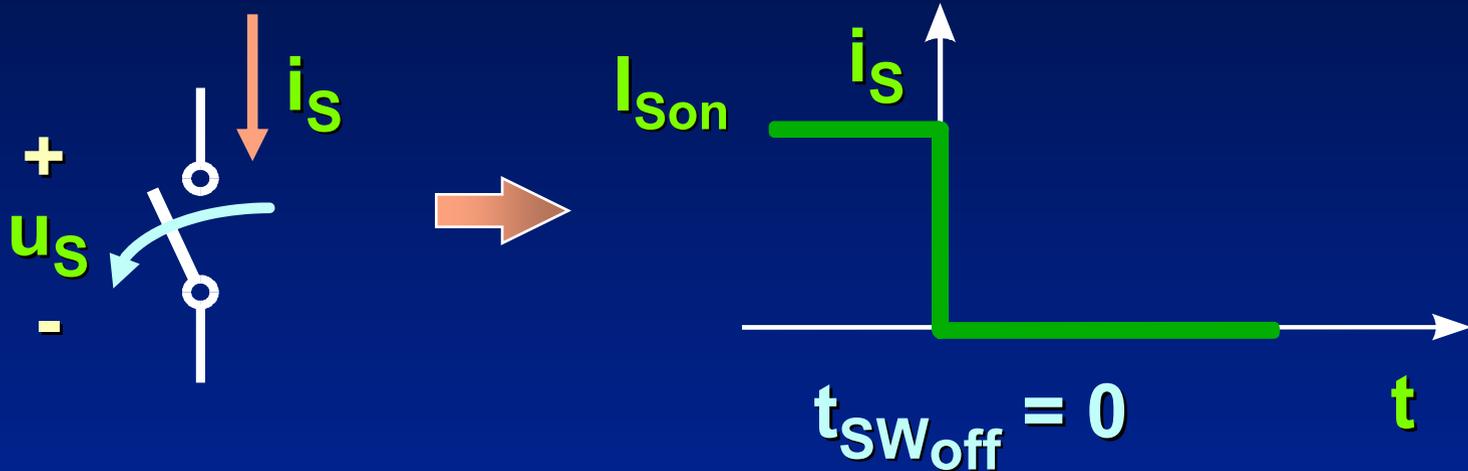
### Commutazione in spegnimento:



# Interruttore elettronico ideale

## Caratteristiche dinamiche

### Commutazione in spegnimento:



$$W_{SW_{off}} = \int_0^{t_{SW_{off}}} u_s \cdot i_s dt = 0$$

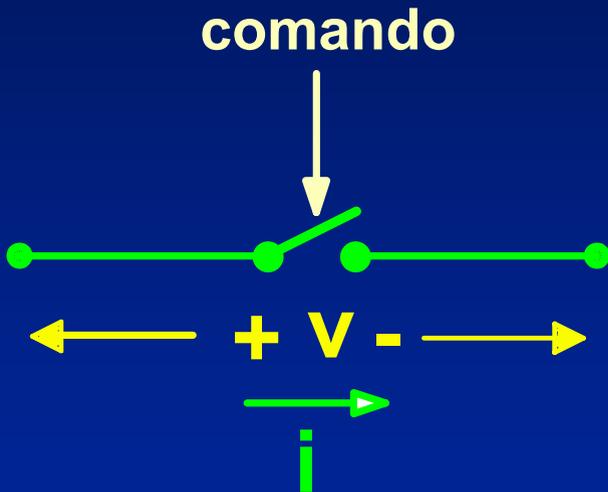
# Interruttori elettronici ideali

- **Caduta di tensione in conduzione nulla**
- **Corrente in interdizione nulla**
- **Tempi di commutazione nulli**
- **Nessuna potenza dissipata**

## **1.2 – Famiglie di interruttori**

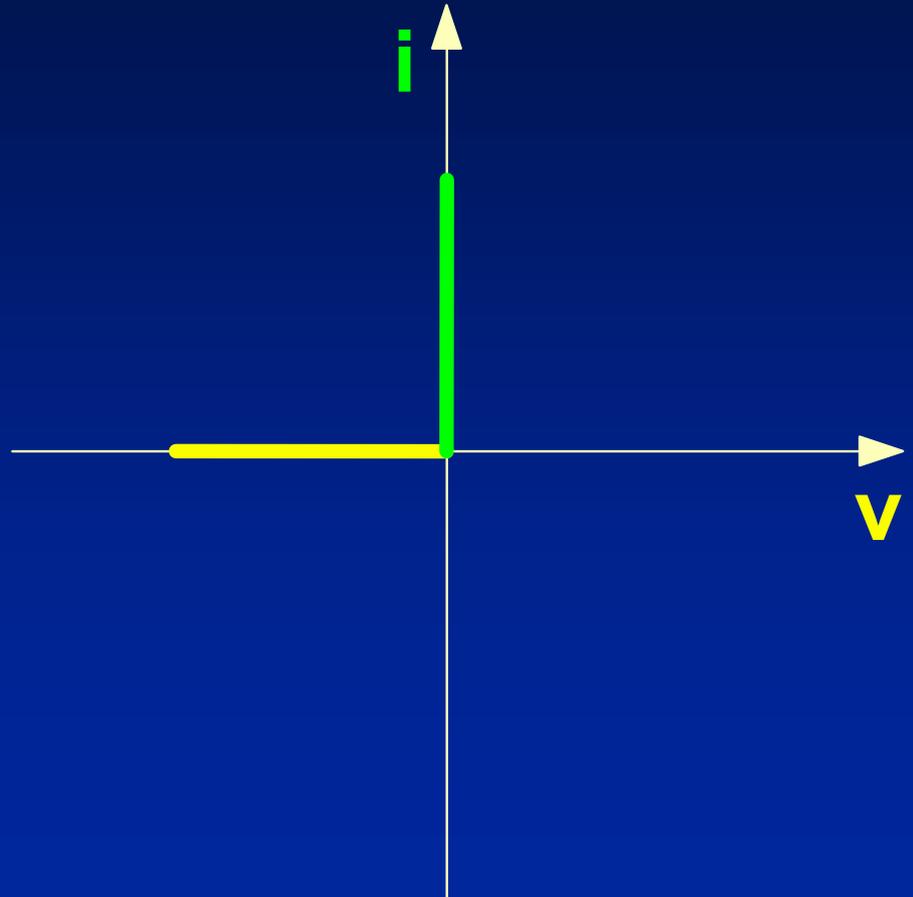
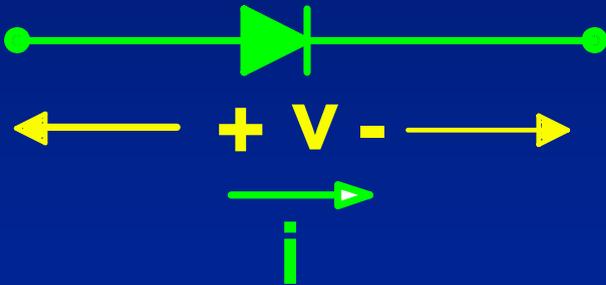
# Interruttore ideale

## Simbolo e caratteristica statica



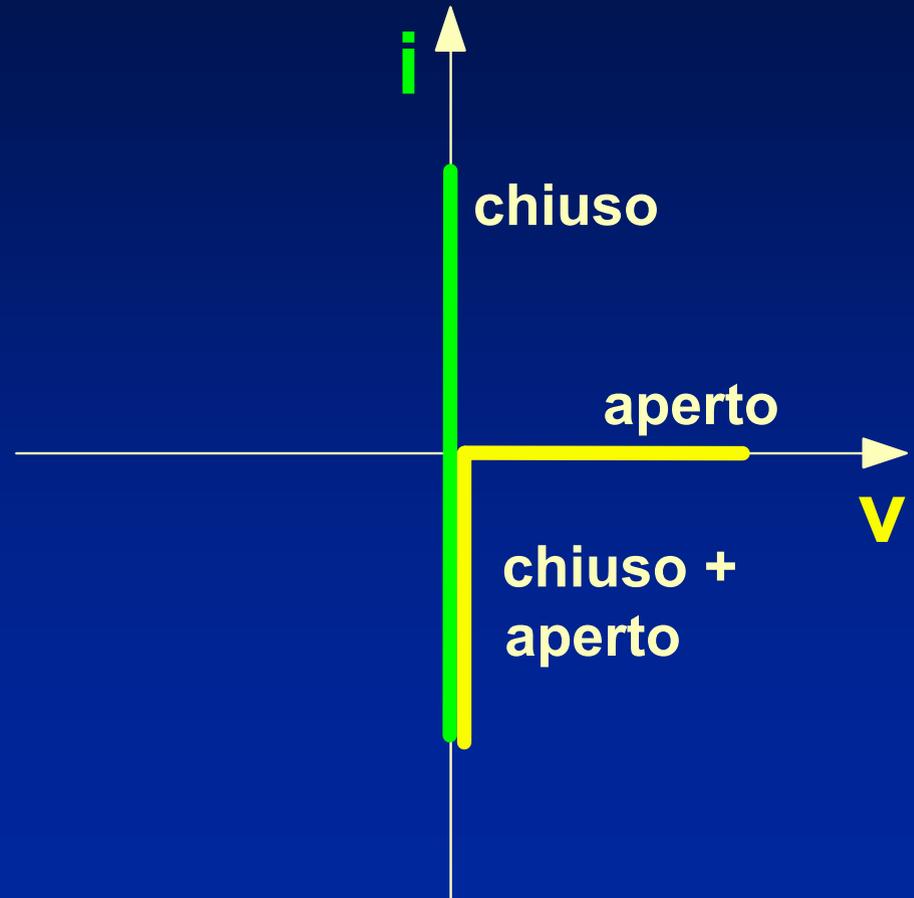
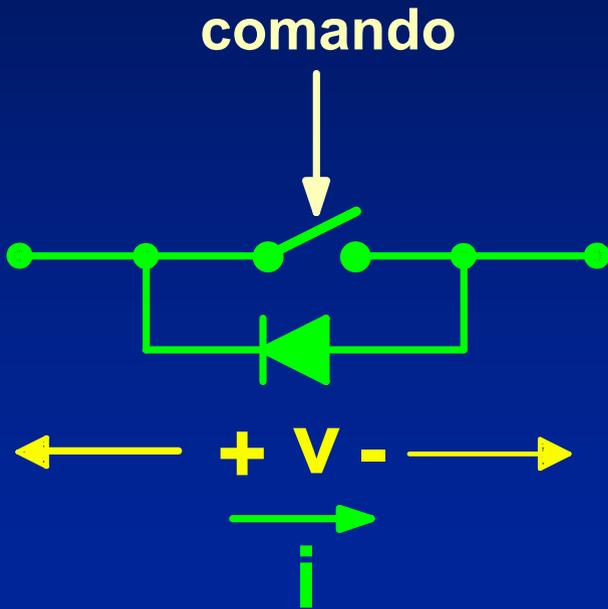
# Diodo ideale

## Simbolo e caratteristica statica



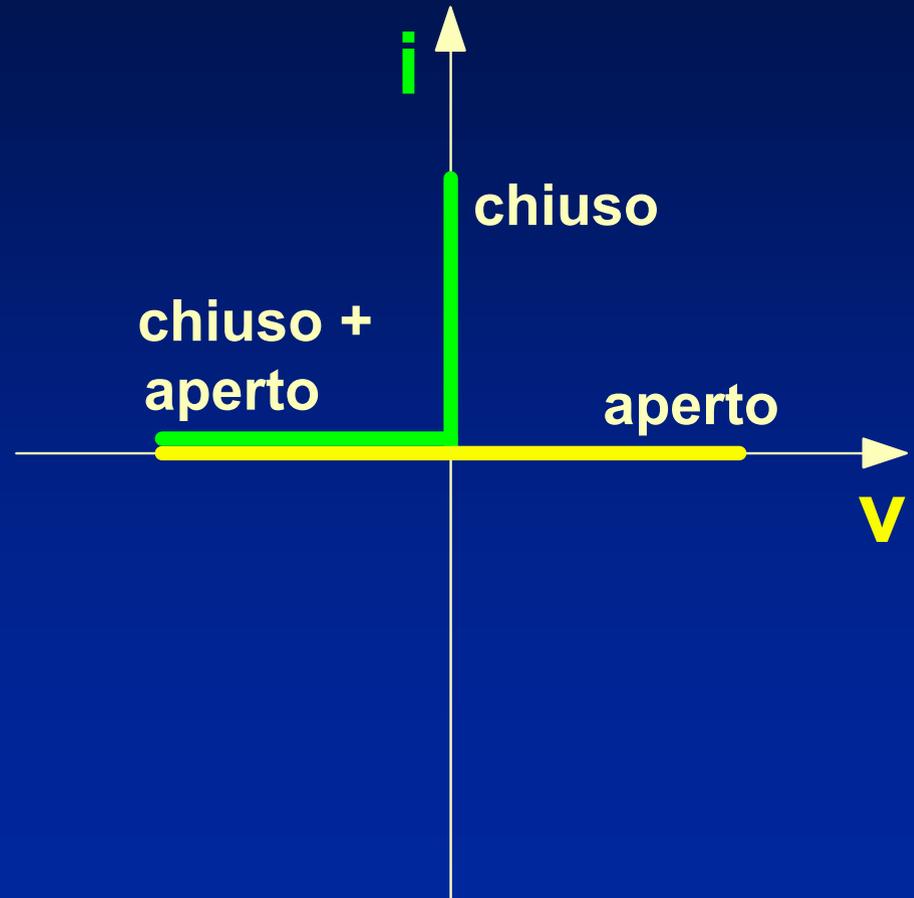
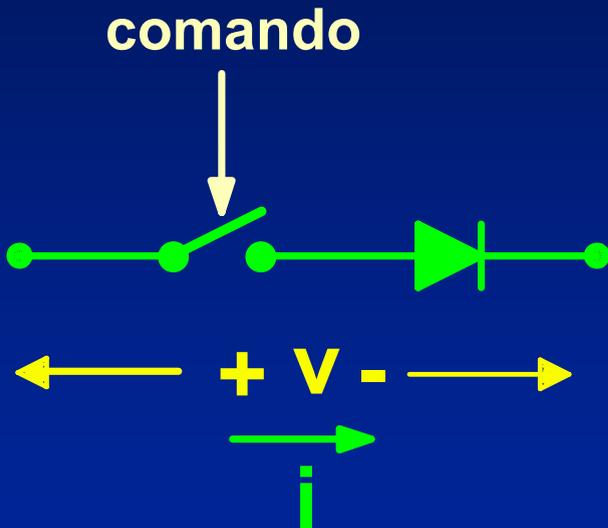
# Interruttore ideale a conduzione inversa

## Simbolo e caratteristica statica



# Interruttore ideale a blocco inverso

## Simbolo e caratteristica statica



## **1.3 - Interruttori reali a semiconduttore**

# Interruttori reali a semiconduttore

I **dispositivi attivi di commutazione a semiconduttore**, usati come **interruttori**, si discostano dal comportamento dell'interruttore ideale per molti aspetti diversi.

**Perdite di conduzione**

**Perdite di dispersione**

**Perdite di commutazione**

# Interruttori reali a semiconduttore

## In commutazione:

**tensione** e la **corrente non** passano **istantaneamente** da zero al massimo o viceversa, ma impiegano **tempi finiti** (“**tempi di commutazione**”).

**La potenza media** dissipata nelle commutazioni **non è** di solito trascurabile.

Essa costituisce il **principale** fattore che **limita** la **frequenza di operazione** degli interruttori reali

# Interruttori reali a semiconduttore

I dispositivi a semiconduttore più usati in Elettronica di potenza **Diodi di potenza e Diodi Schottky**, **MOSFET** di potenza, **Transistori Bipolari** (soprattutto Darlington), **IGBT, SCR, GTO, TRIAC.**

**Differenza principali:**

**velocità di commutazione**

**Massime tensioni, correnti e potenze** dissipabili

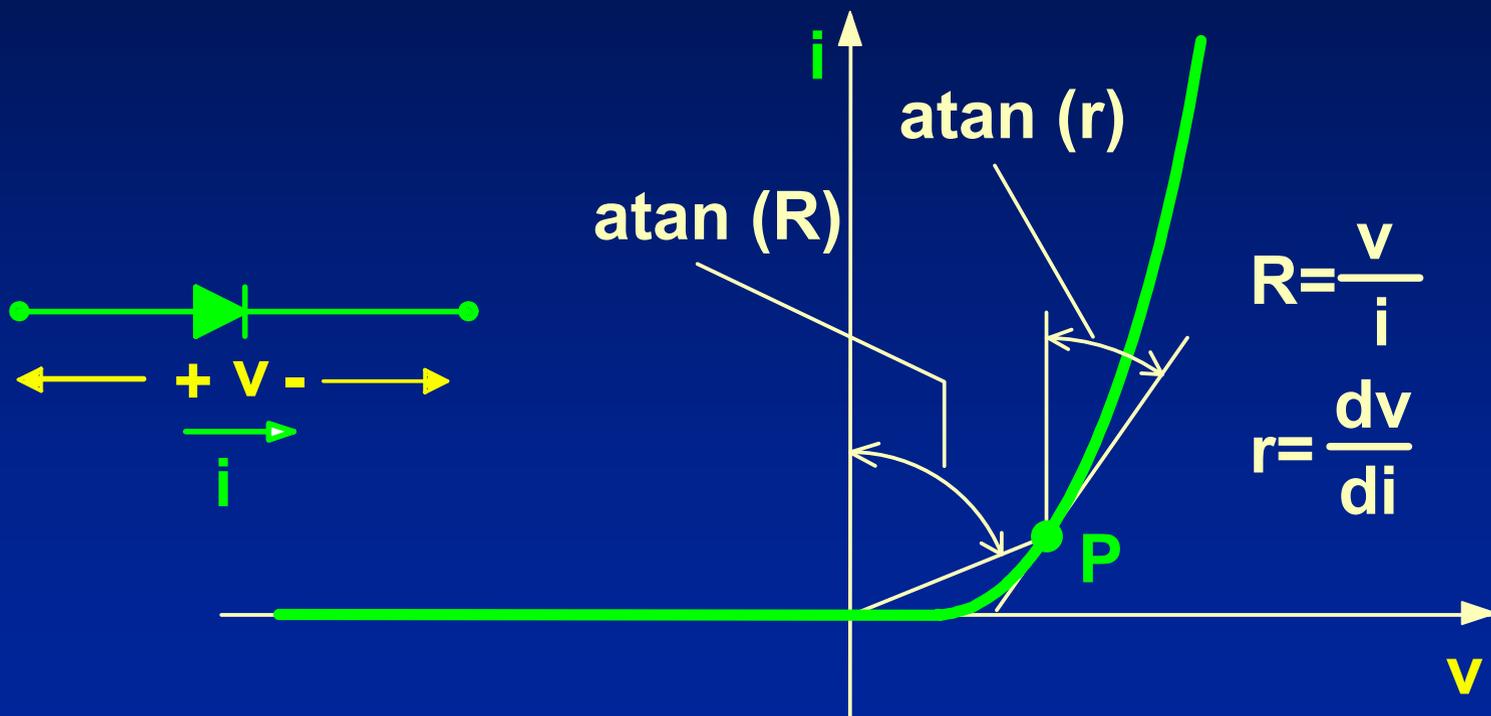
MOSFET **piccole potenze** ed **elevate frequenze**

SCR, GTO **alte potenze** e **basse frequenze**

## **1.4 - Caratteristiche statiche dei dispositivi reali**

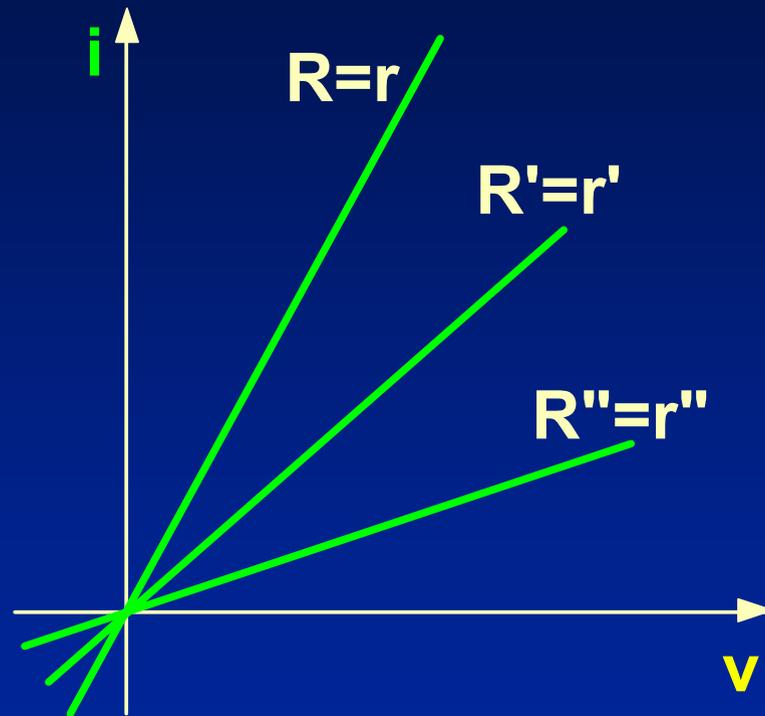
# Resistenza e resistenza differenziale

## Resistenza e resistenza differenziale di un diodo



# Resistenza e resistenza differenziale

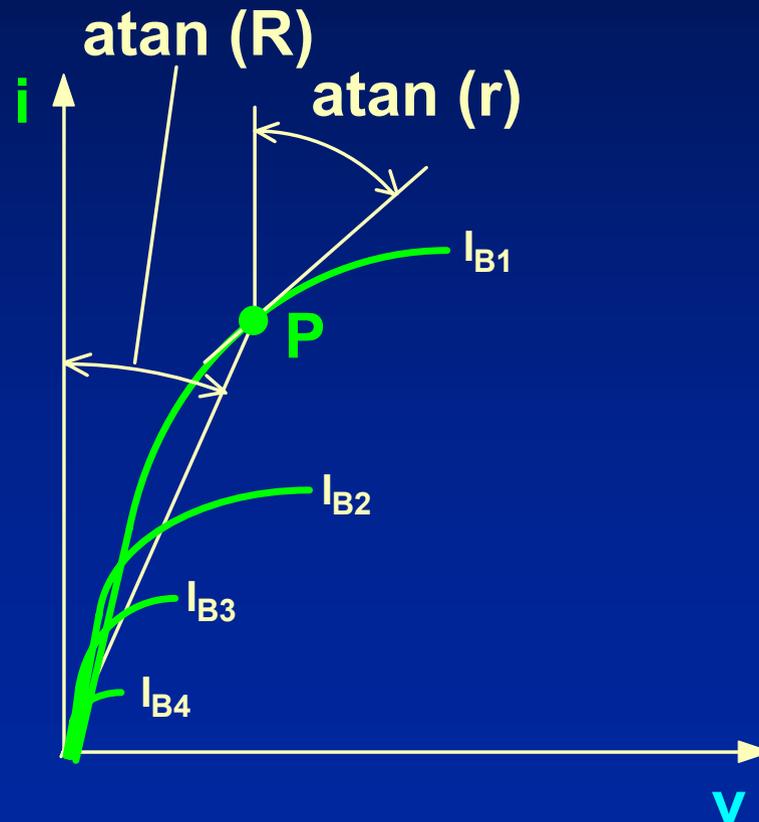
## Caratteristiche lineari di resistenze ohmiche



$$R = \frac{v}{i} = r = \frac{dv}{di} = \text{costante}$$

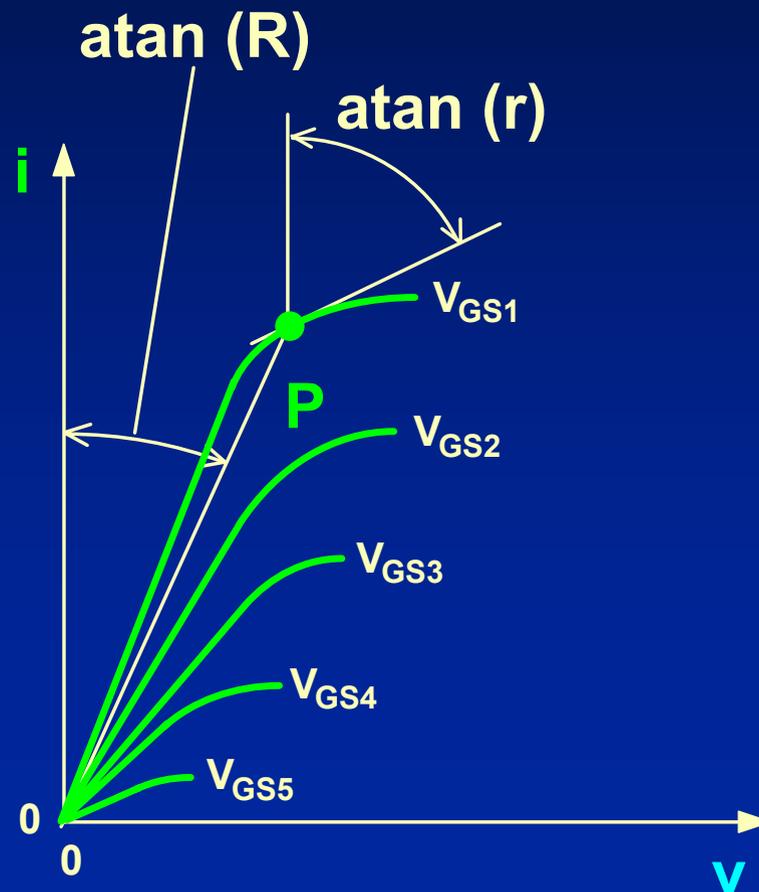
# Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

Caratteristiche di BJT per diversi valori della corrente di base  $I_B$



# Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

Caratteristiche di MOSFET per diversi valori della tensione Gate/Source  $V_{GS}$



# **1.5 - Commutazioni dei dispositivi reali**

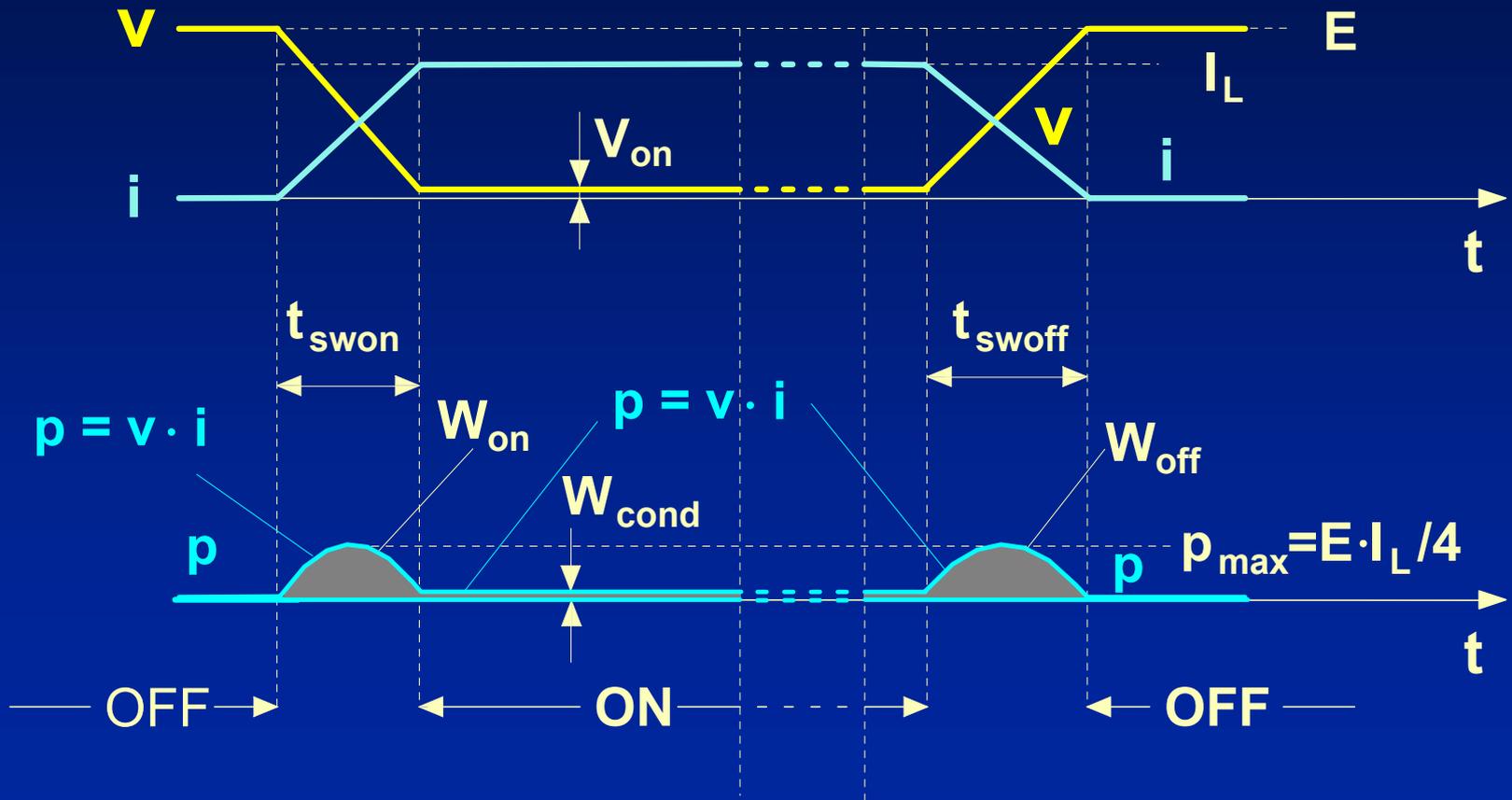
# Commutazioni dei dispositivi reali

Circuito di prova con carico resistivo



# Commutazioni dei dispositivi reali

## Commutazioni con carico resistivo



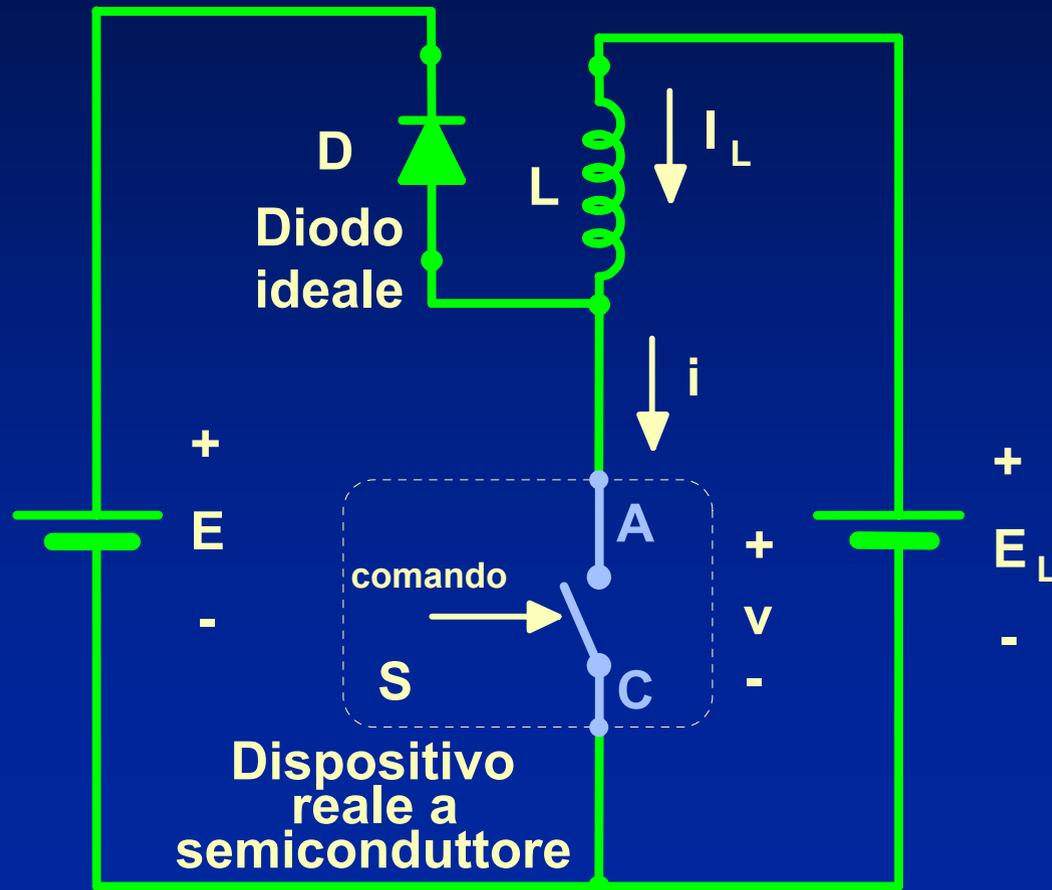
# Commutazioni dei dispositivi reali

Stati e percorsi di commutazione  
con carico resistivo



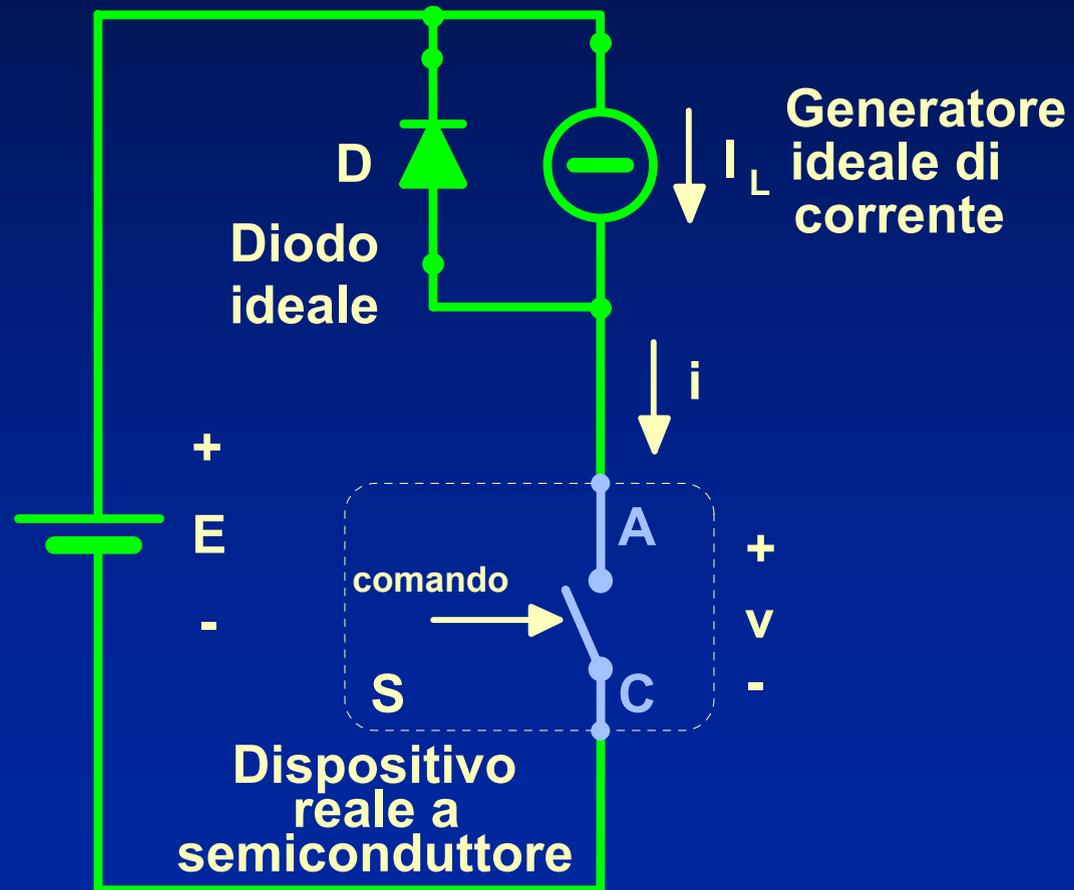
# Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

## Circuito di prova con carico induttivo



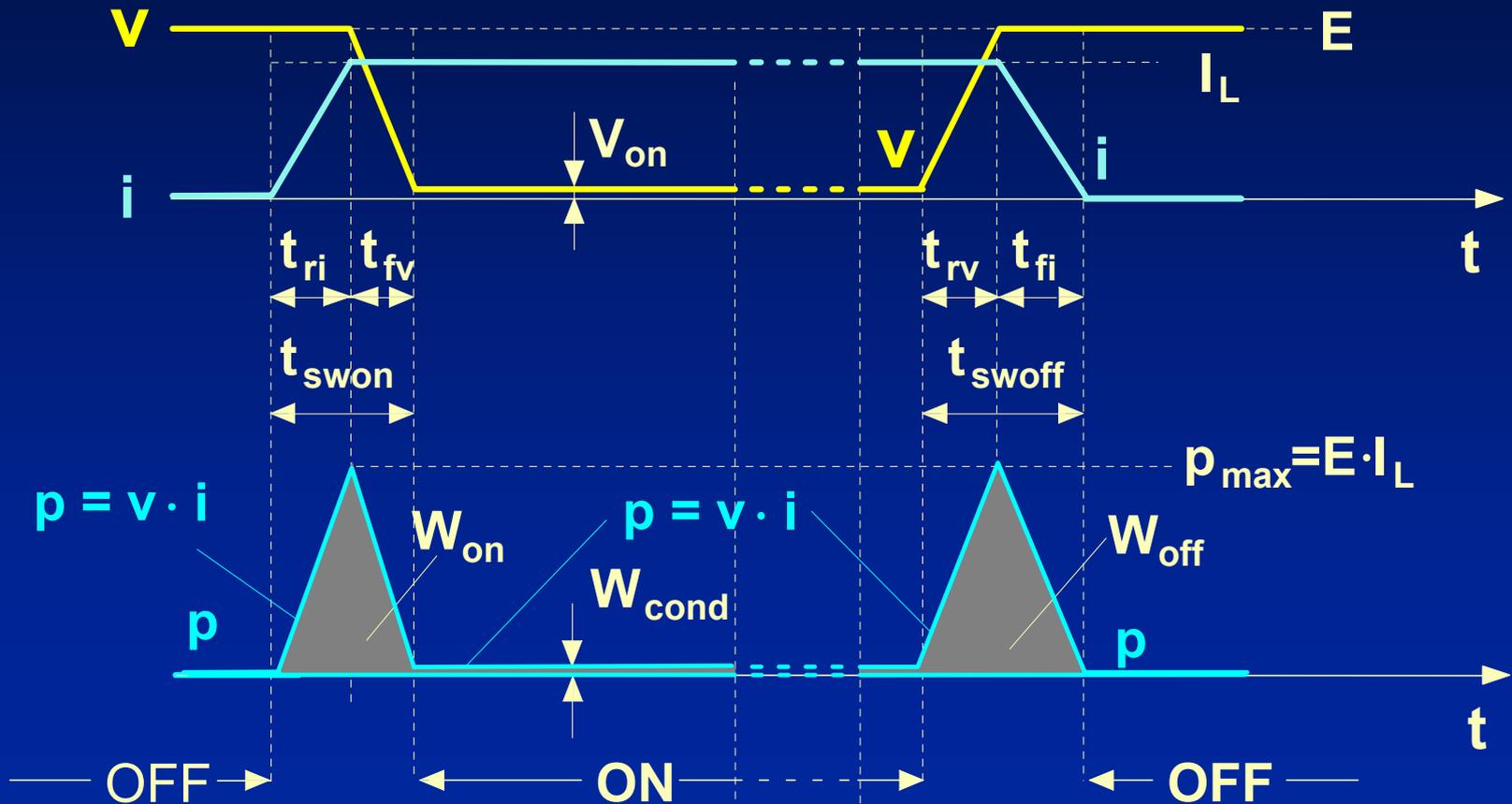
# Commutazioni dei dispositivi reali

Circuito di prova con carico di tipo induttivo  
con generatore ideale di corrente



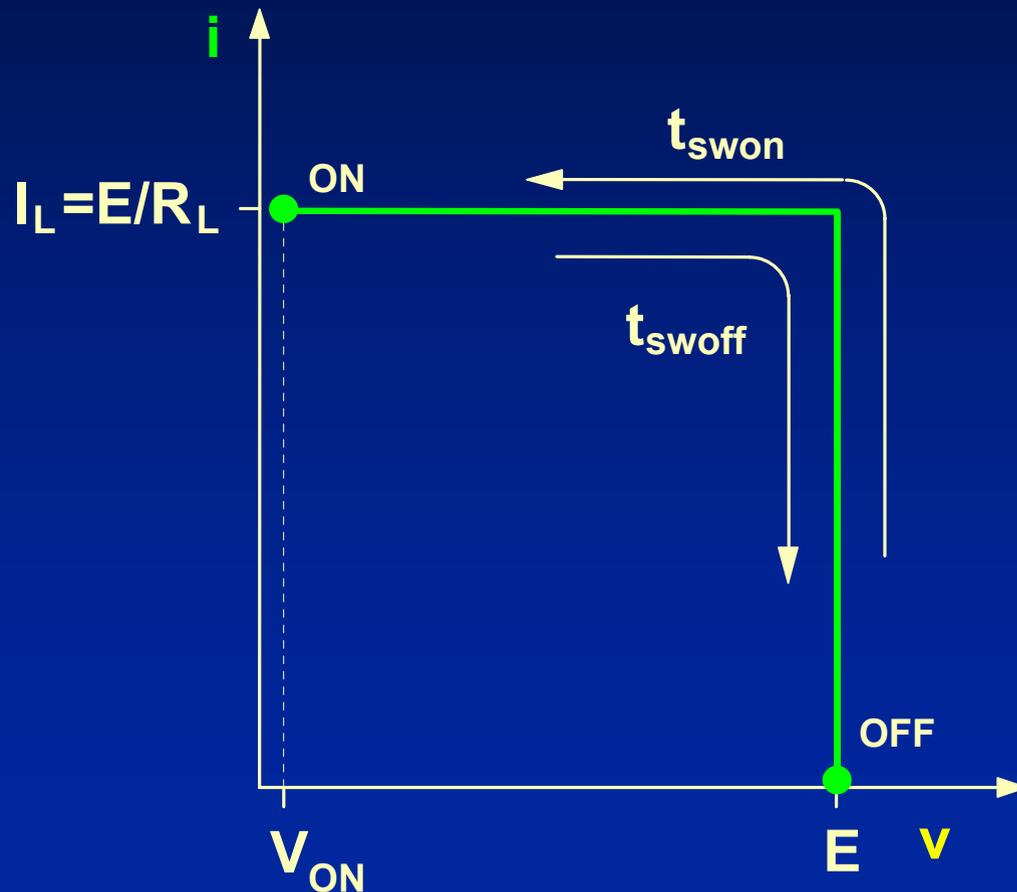
# Commutazioni dei dispositivi reali

## Commutazioni con carico di tipo induttivo



# Commutazioni dei dispositivi reali

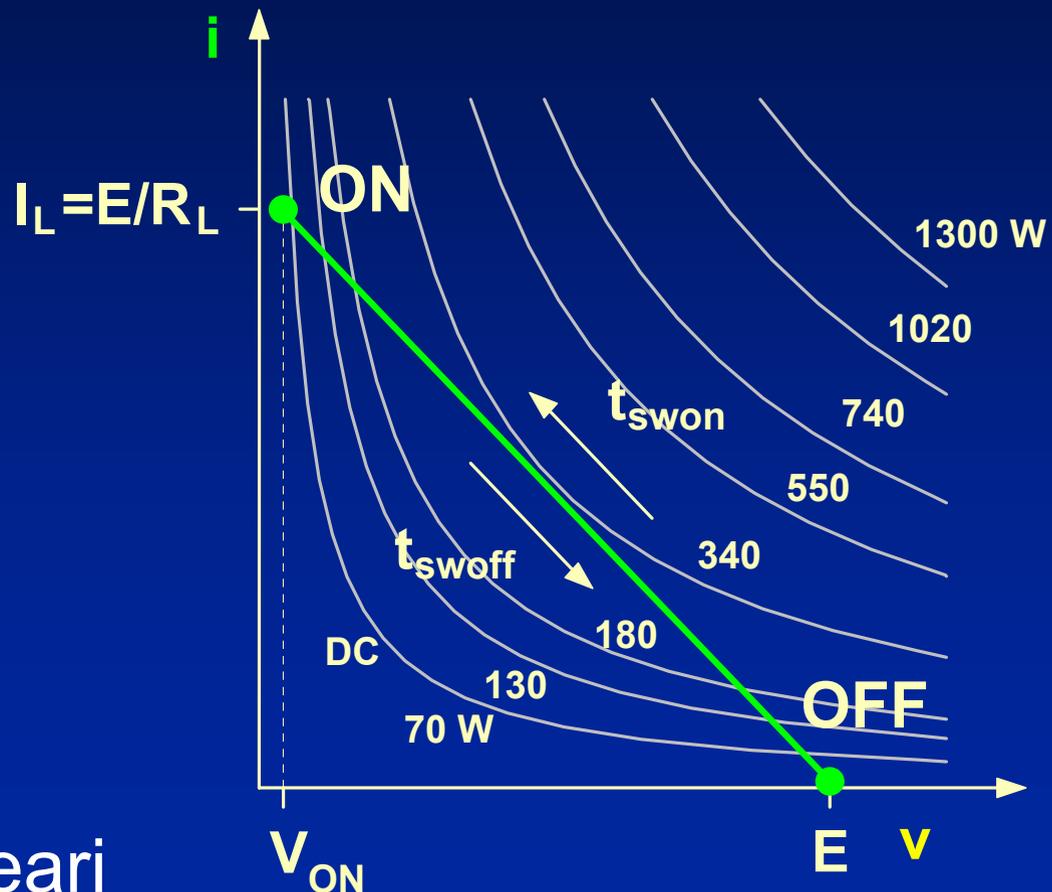
Stati e percorsi di commutazione  
con carico di tipo induttivo



# 1.6 - SOA

# Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

Stati e percorsi di commutazione  
con carico resistivo con curve a potenza costante

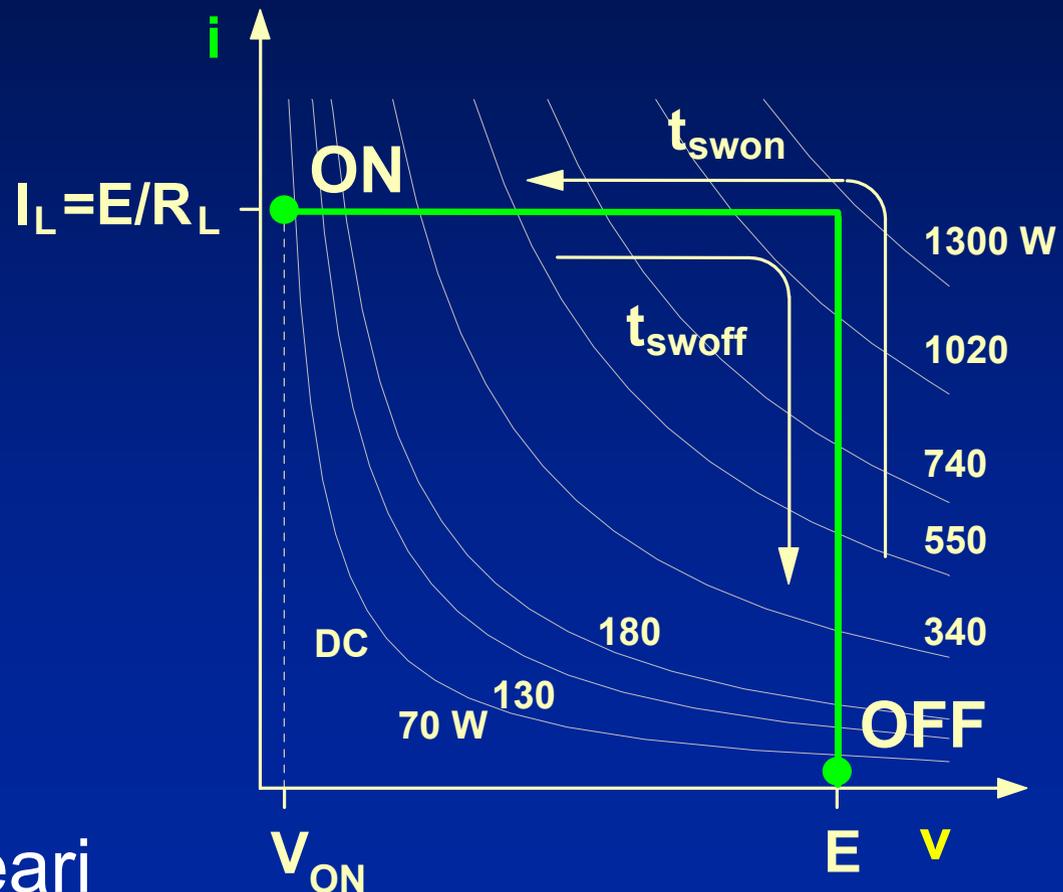


Coordinate lineari

# Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

Stati e percorsi di commutazione

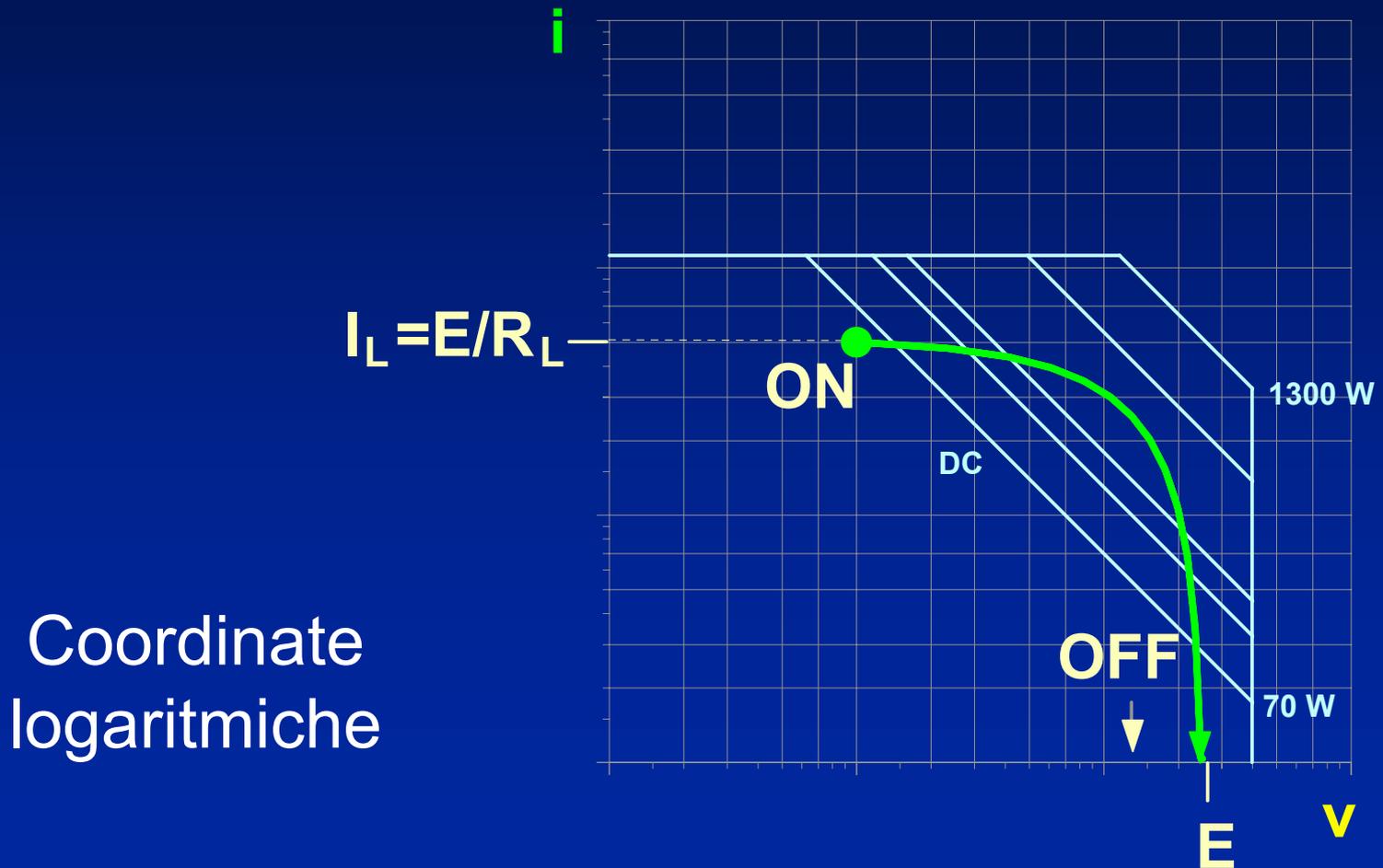
con carico di tipo induttivo e curve a potenza costante



Coordinate lineari

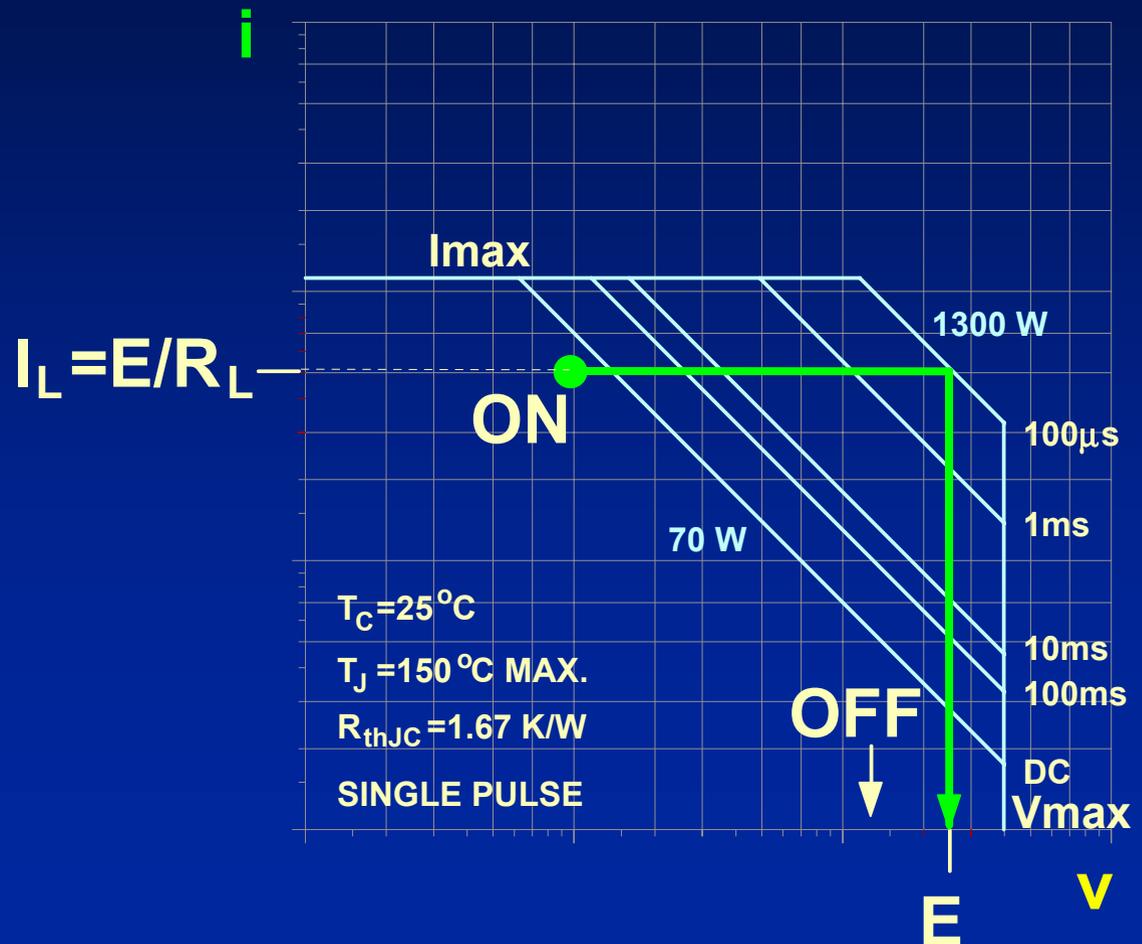
# SOA

Stati e percorsi di commutazione  
con carico resistivo e curve a potenza costante



# SOA

Stati e percorsi di commutazione  
con carico di tipo induttivo e curve a potenza costante



Coordinate  
logaritmiche

# SOA

**Limiti dei dispositivi a semiconduttore:**

**potenza dissipata**

**tensioni e correnti istantanee massime**

**“Breakdown secondario”**

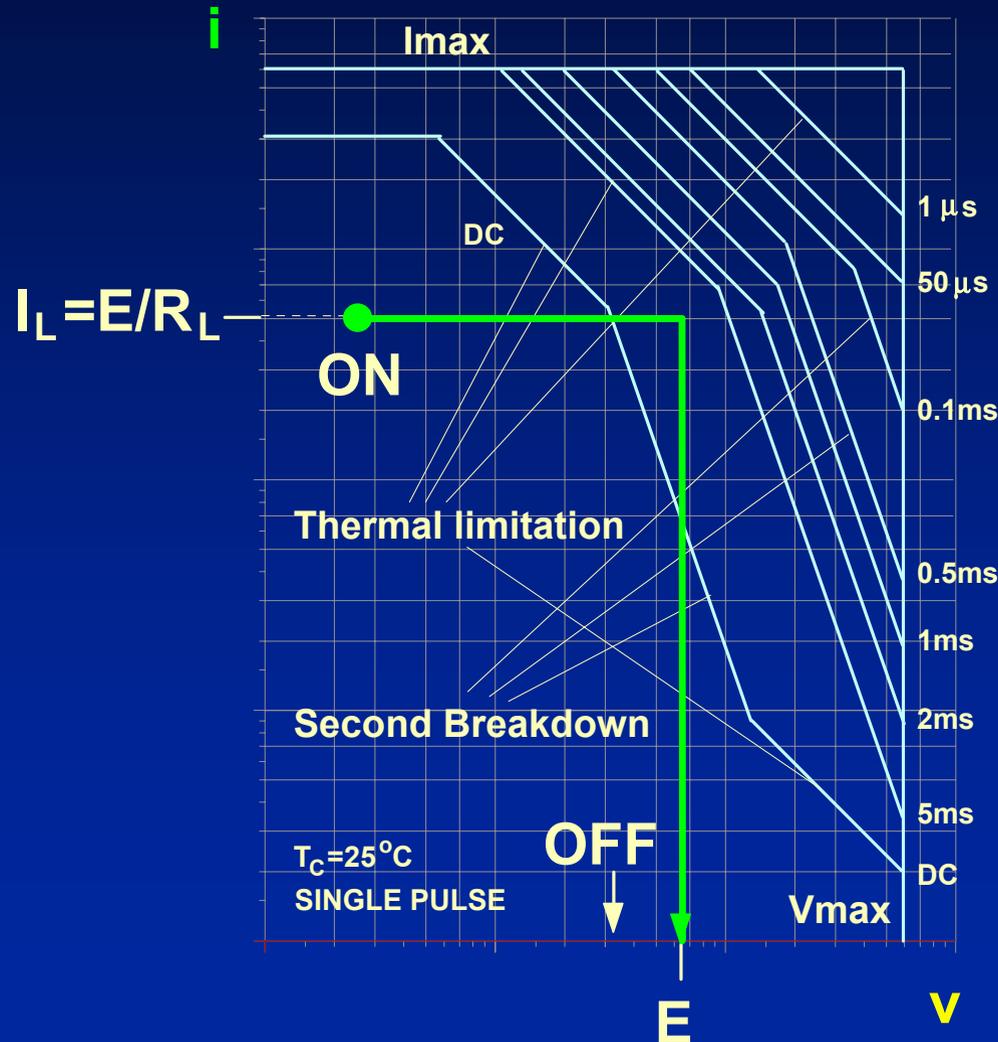
Rappresentazione sul piano **v-i** dei limiti:

**“Area di Operazione Sicura”**

indicata in inglese con **SOA**, Safe Operating Area

# SOA

Fig.1.6.5. Stati e percorsi di commutazione carico induttivo - SOA con Breakdown Secondario



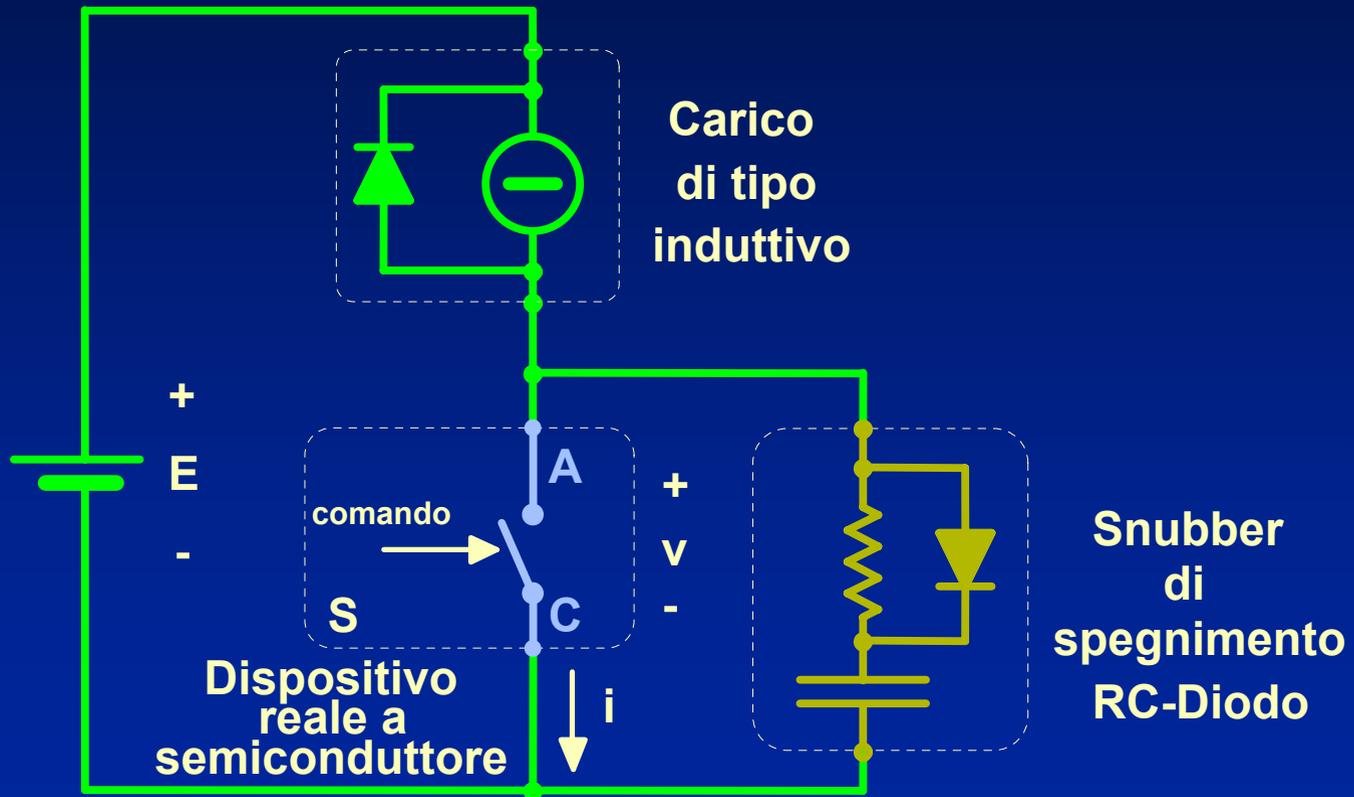
## 1.7 - SNUBBER

Scopi:

- ridurre le **perdite** nel dispositivo
- limitare le **velocità di variazione** delle tensioni e/o correnti

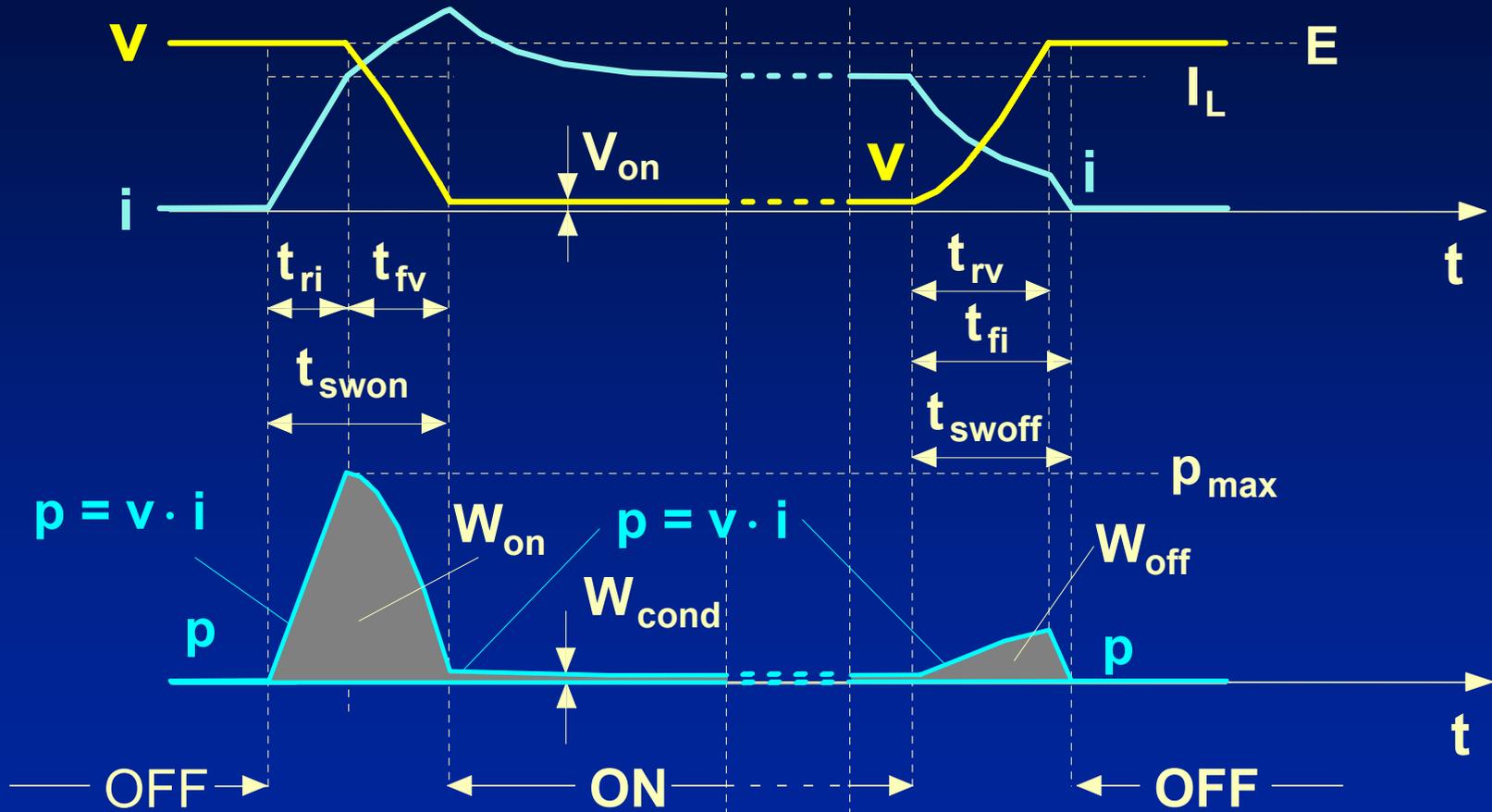
# Snubber RC-Diodo

Circuito di prova con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento (turn-off) RC-Diodo



# Snubber RC-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento RC-Diodo

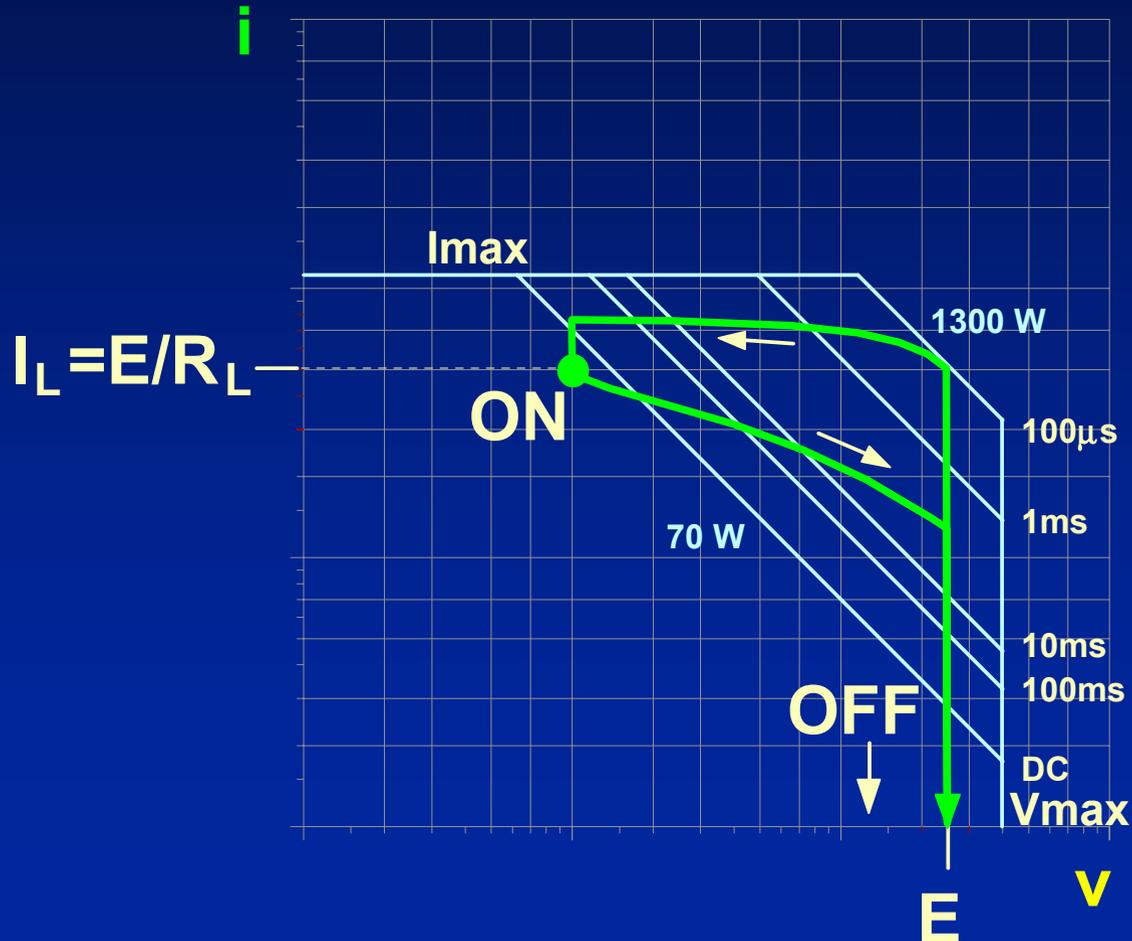


potenza dissipata e  $dv/dt$  allo spegnimento ridotte  
ma aumento della corrente all'accensione



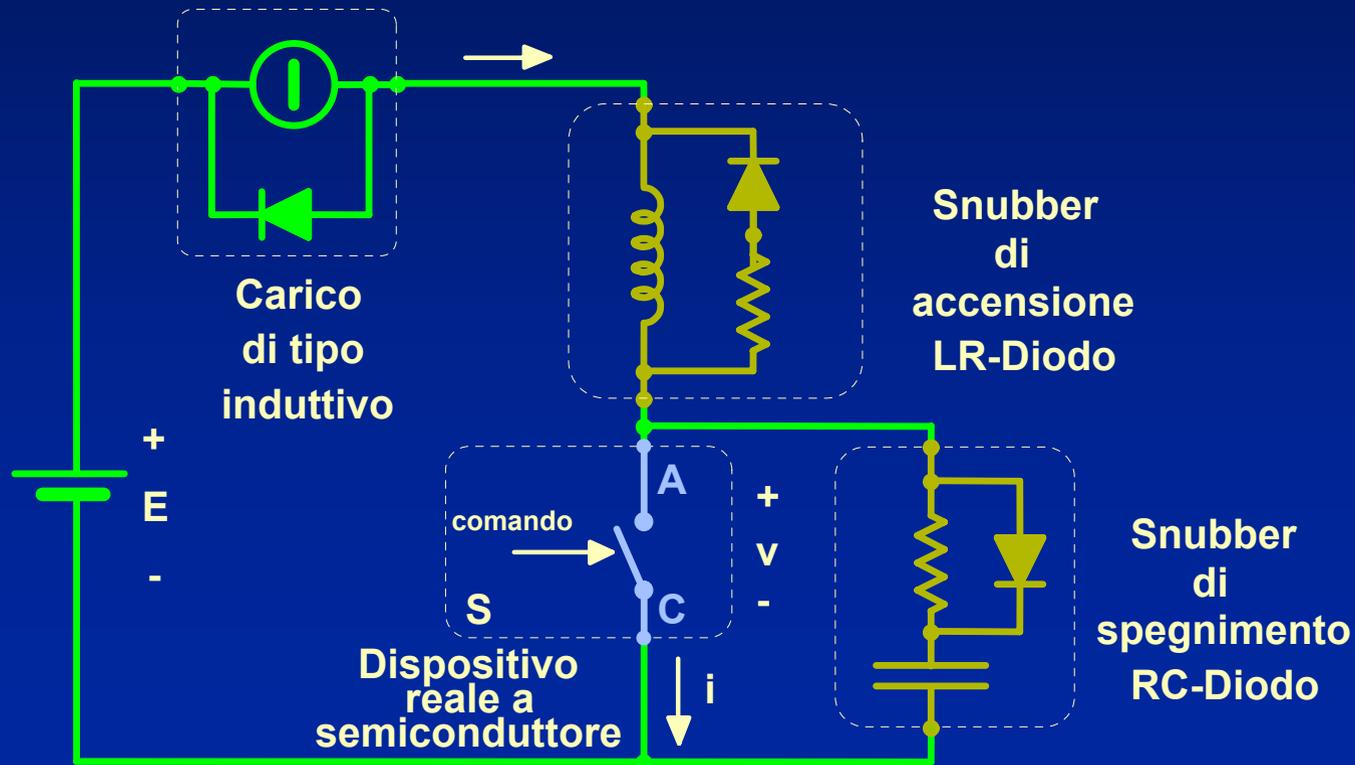
# Snubber RC-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento RC-Diodo



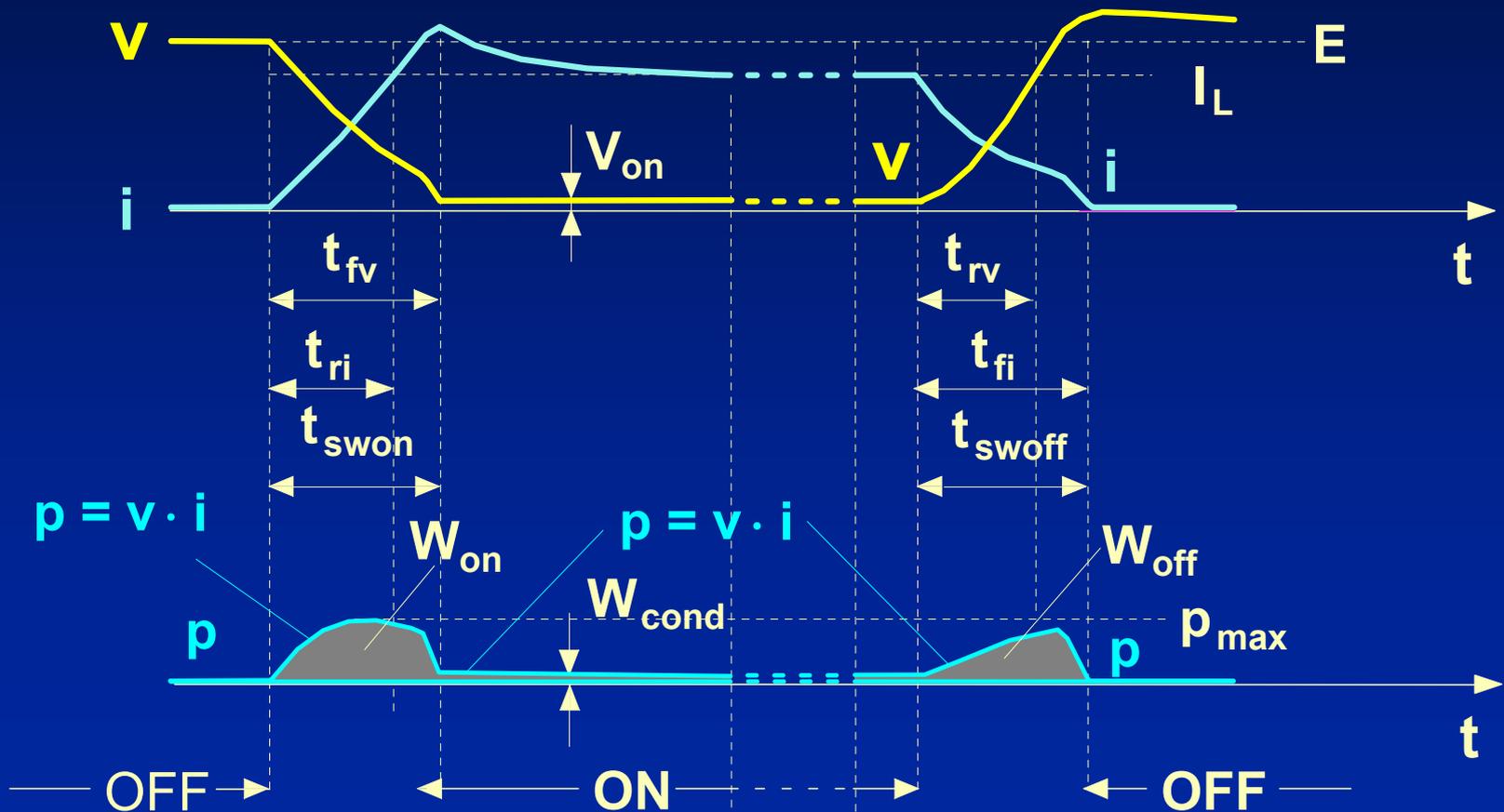
# Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento RC-Diodo e di accensione RL- Diodo che limita la velocità di crescita della corrente del dispositivo all'accensione.



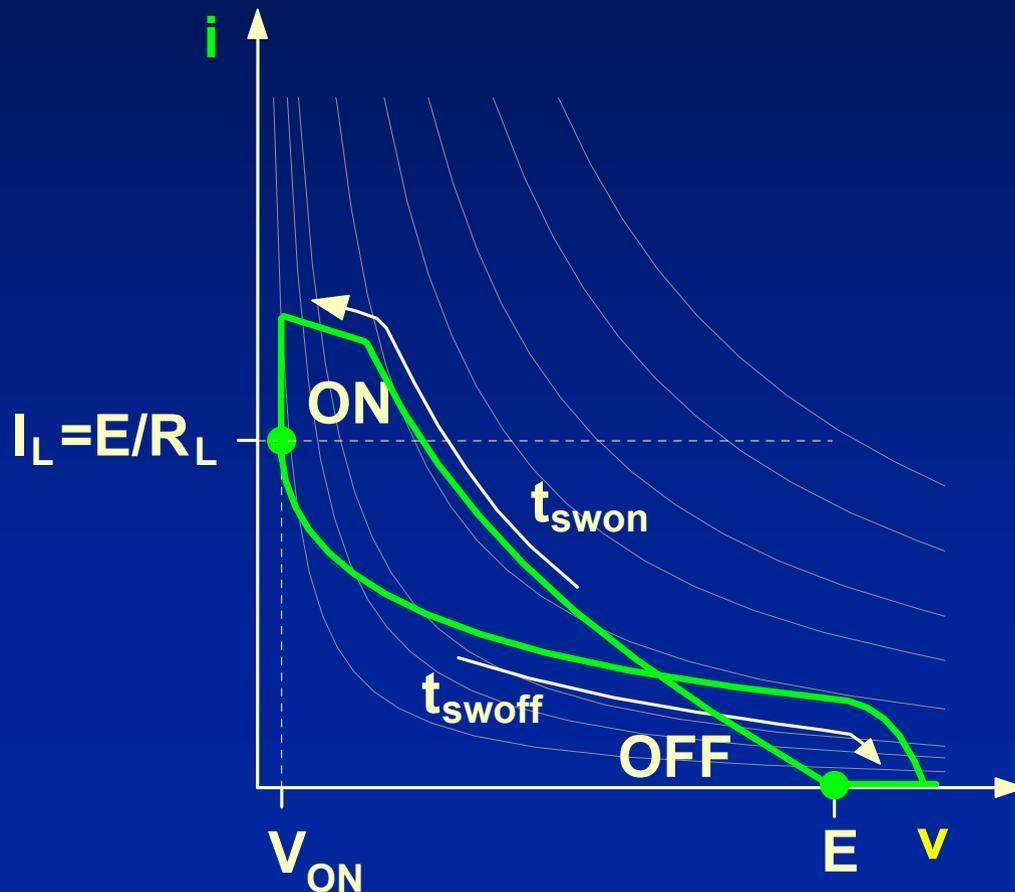
# Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento RC-Diodo  
e di accensione RL-Diodo



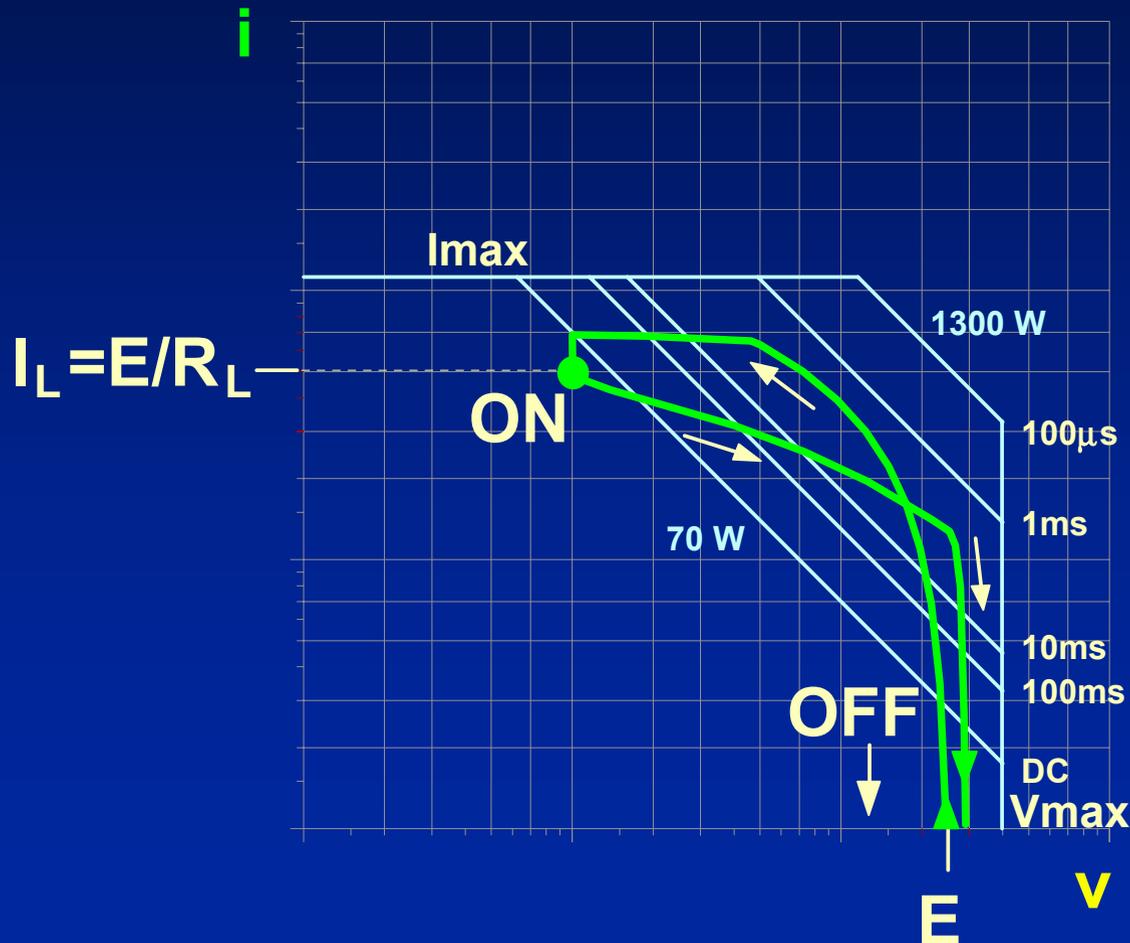
# Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento RC-Diodo  
e di accensione RL-Diodo



# Snubber RC-Diodo e RL-Diodo

Commutazioni con carico di tipo induttivo  
con snubber di spegnimento RC-Diodo  
e di accensione RL-Diodo



# Snubber

## Vantaggi:

riduzione delle dissipazioni  
per evitare stati pericolosi durante le commutazioni.

## Svantaggi:

richiedono notevoli complicazioni circuitali che comportano aggravii di costi e, in molti casi, riduzioni di affidabilità.

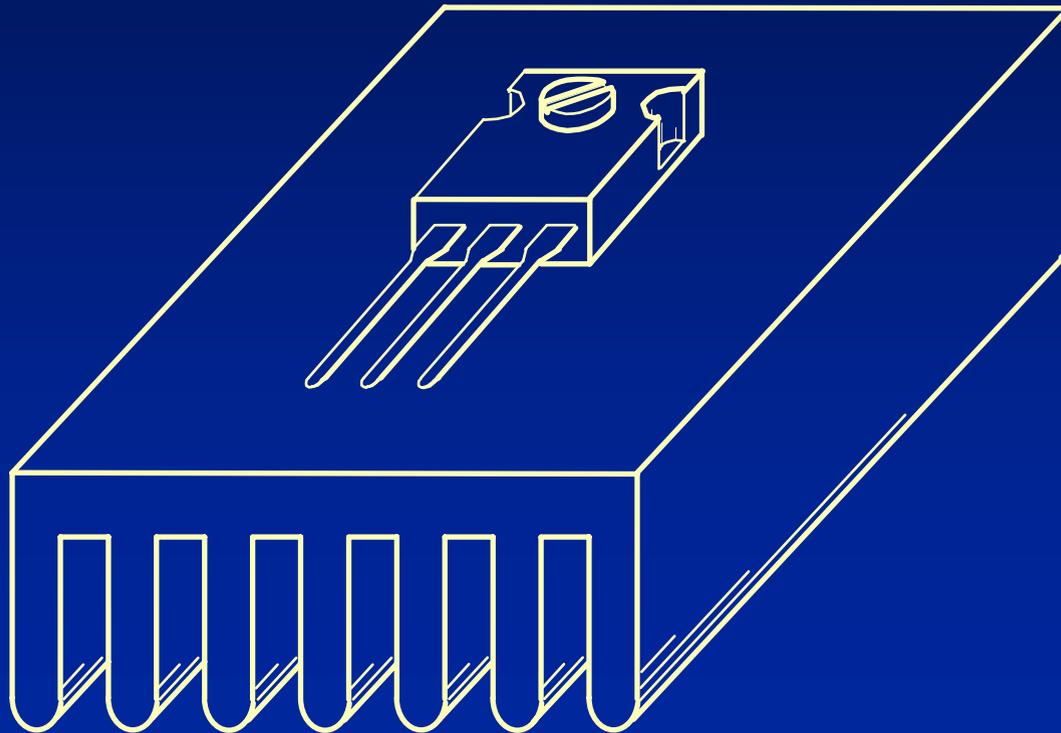
## Tendenza attuale:

evitarne l'impiego, anche perchè si sono avuti notevoli miglioramenti nelle prestazioni (soprattutto la velocità) dei dispositivi.

# **1.8 - Smaltimento del calore, Resistenze ed Impedenze termiche**

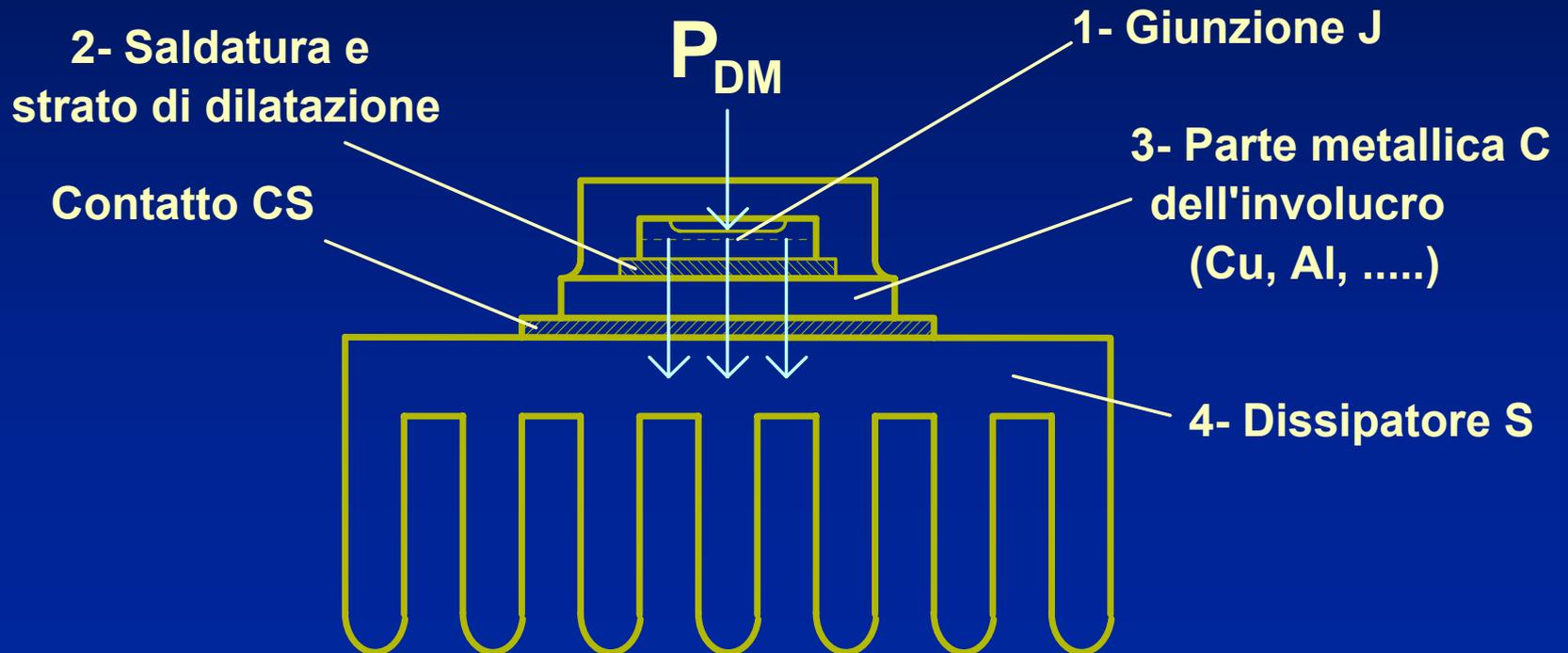
# Smaltimento del calore

Dispositivo di potenza  
montato su dissipatore



# Smaltimento del calore

Trasmissione del calore  
nei dispositivi di potenza



# Smaltimento del calore

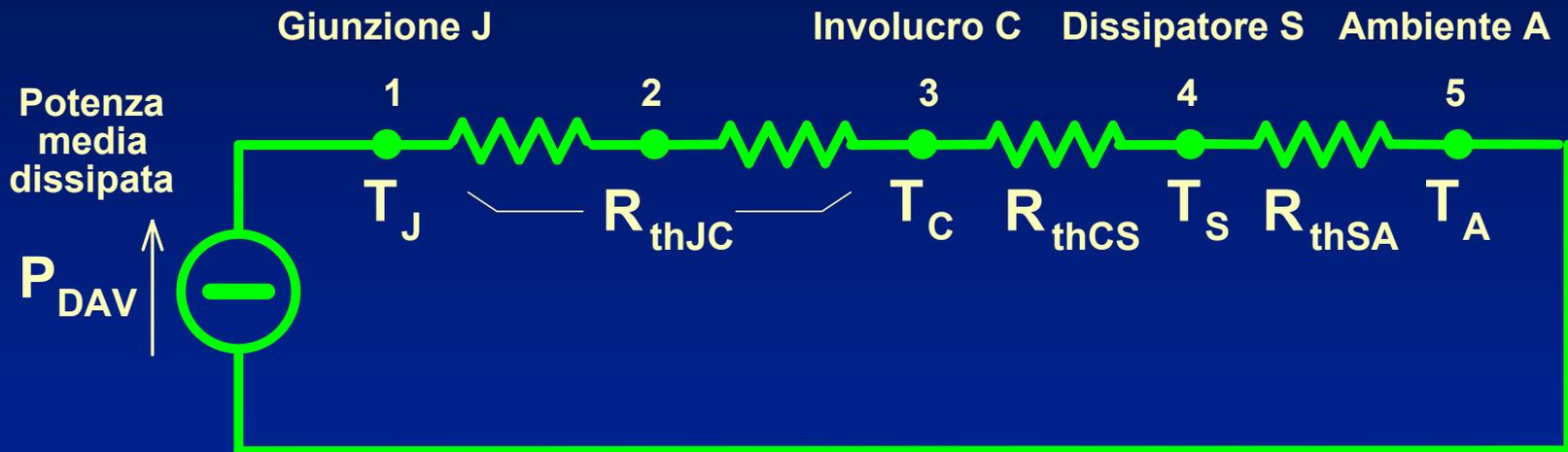
Per ogni passaggio si ha un salto di temperatura che, in prima approssimazione, si può considerare proporzionale al flusso di calore trasmesso.

Il fattore di proporzionalità salto di temperatura/flusso di calore è detto **resistenza termica**.

La quantità di calore è misurata in **calorie** o anche, essendo una energia, in **Joule** ( $1\text{Cal}=4185\text{J}$ ). Il flusso di calore è misurato in **Cal/s** oppure in Joule/secondo, cioè in **Watt**. La resistenza termica si misura quindi in  **$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}/\text{Cal}$**  oppure in  **$^{\circ}\text{C}/\text{W}$** .

# Smaltimento del calore

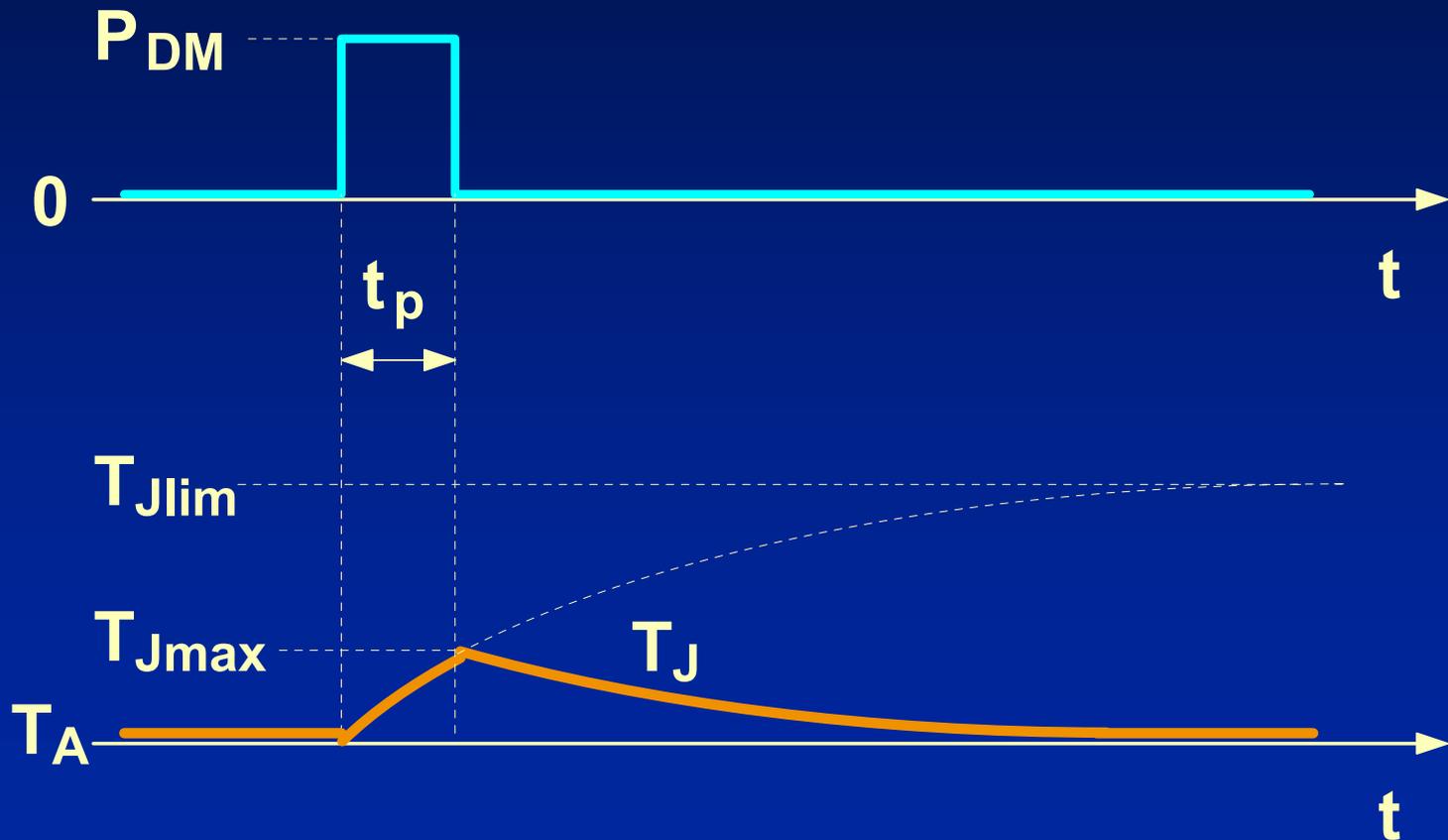
Rete elettrica equivalente  
della trasmissione del calore - valori medi



$$T_J = T_A + P \cdot (R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA})$$

# Smaltimento del calore

Risposta termica transitoria  
ad un gradino di potenza dissipata



# Capacità termiche

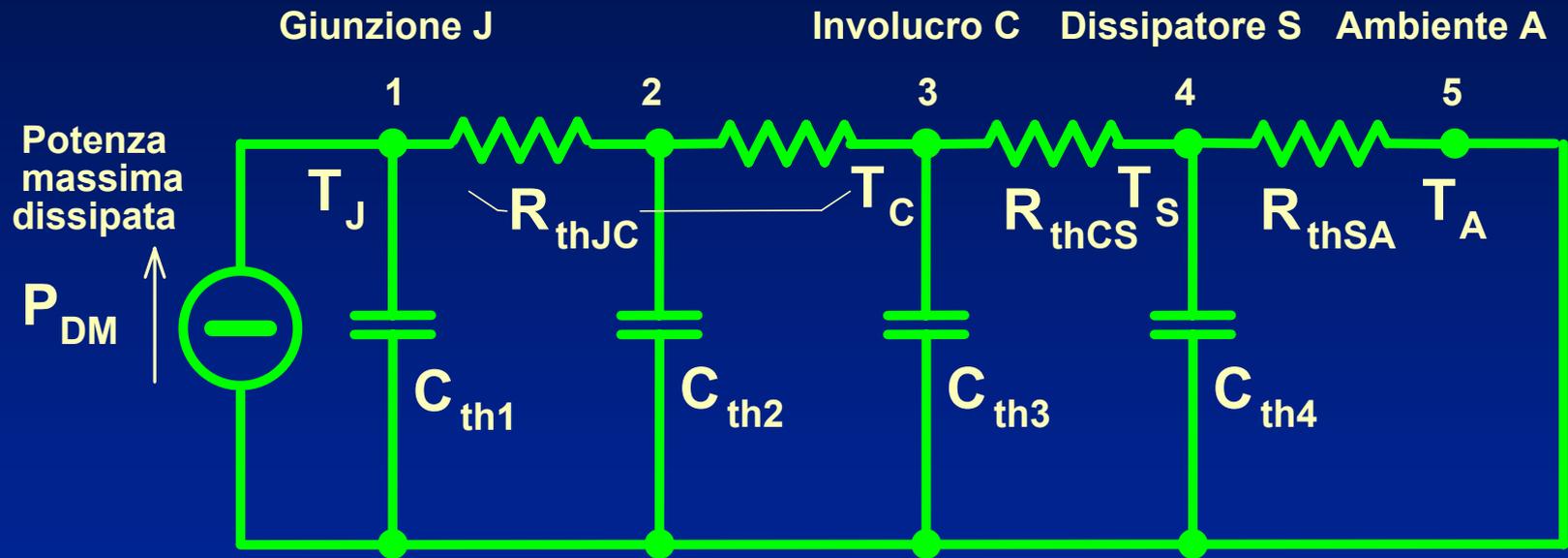
La variazione di temperatura del materiale assorbe una certa quantità di calore.

Si ha cioè una certa “**Capacità termica**” del materiale, la cui azione può essere rappresentata aggiungendo al circuito equivalente elettrico di delle capacità equivalenti  $C_{th}$ ,

In ogni nodo, i valori di tali capacità dipendono dal volume di materiale, e quindi dalla sua massa, a cui il nodo corrisponde, e dal valore del **calore specifico** del materiale stesso.

# Capacità termiche

Rete elettrica equivalente transitoria della trasmissione del calore - valori massimi

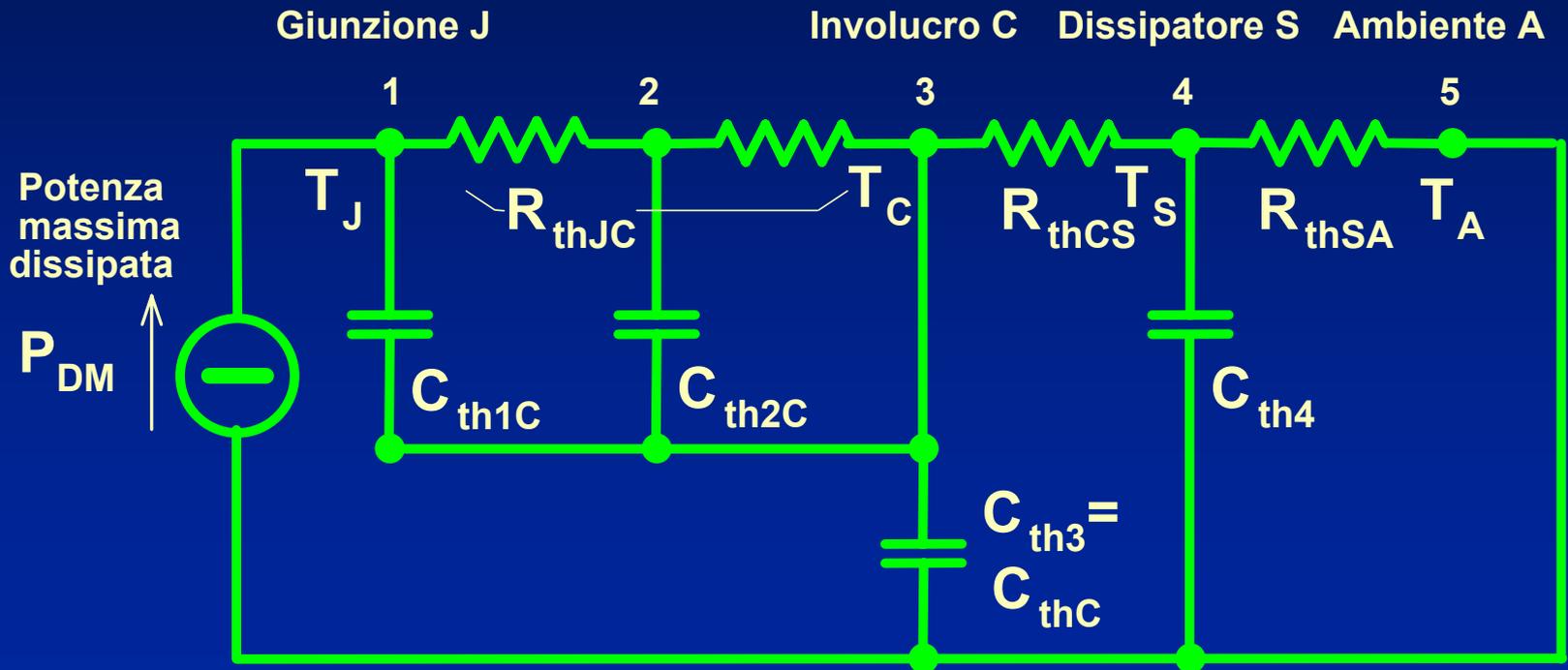


$$T_{Jmax} = T_A + P_{DM} \cdot Z_{th}(t_p)$$

$Z_{th}$  → “impedenza termica transitoria”

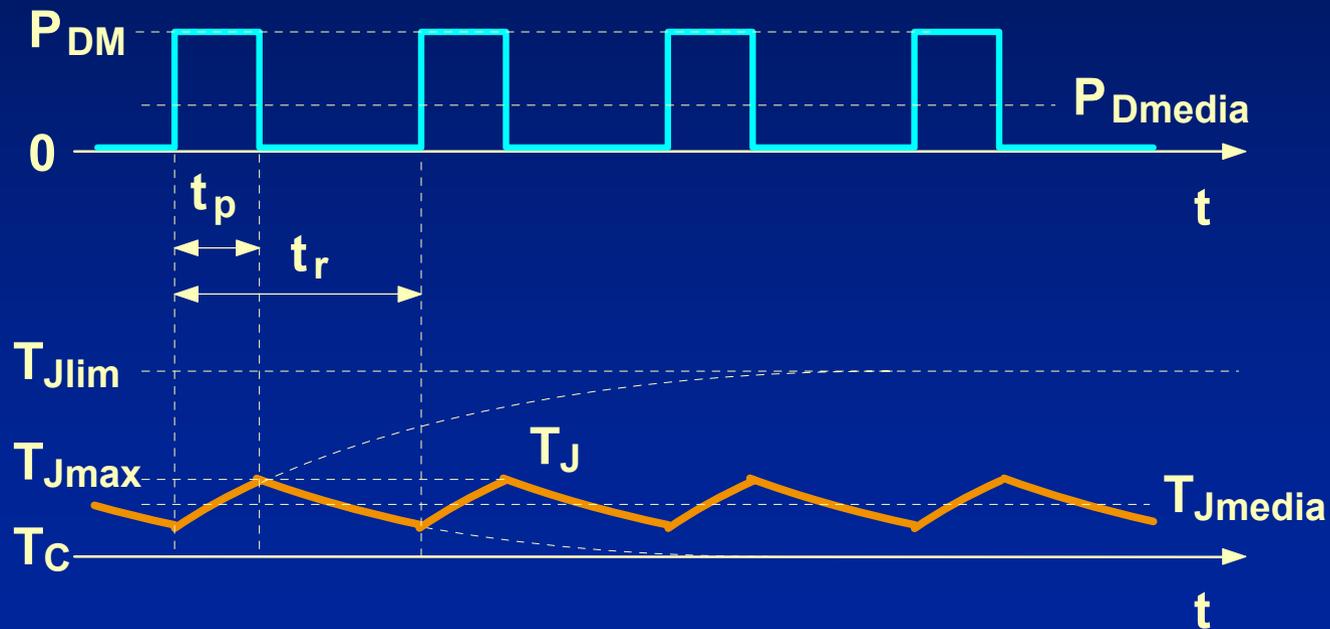
# Capacità termiche

Rete elettrica equivalente transitoria riferita all'involucro - valori massimi



# Smaltimento del calore

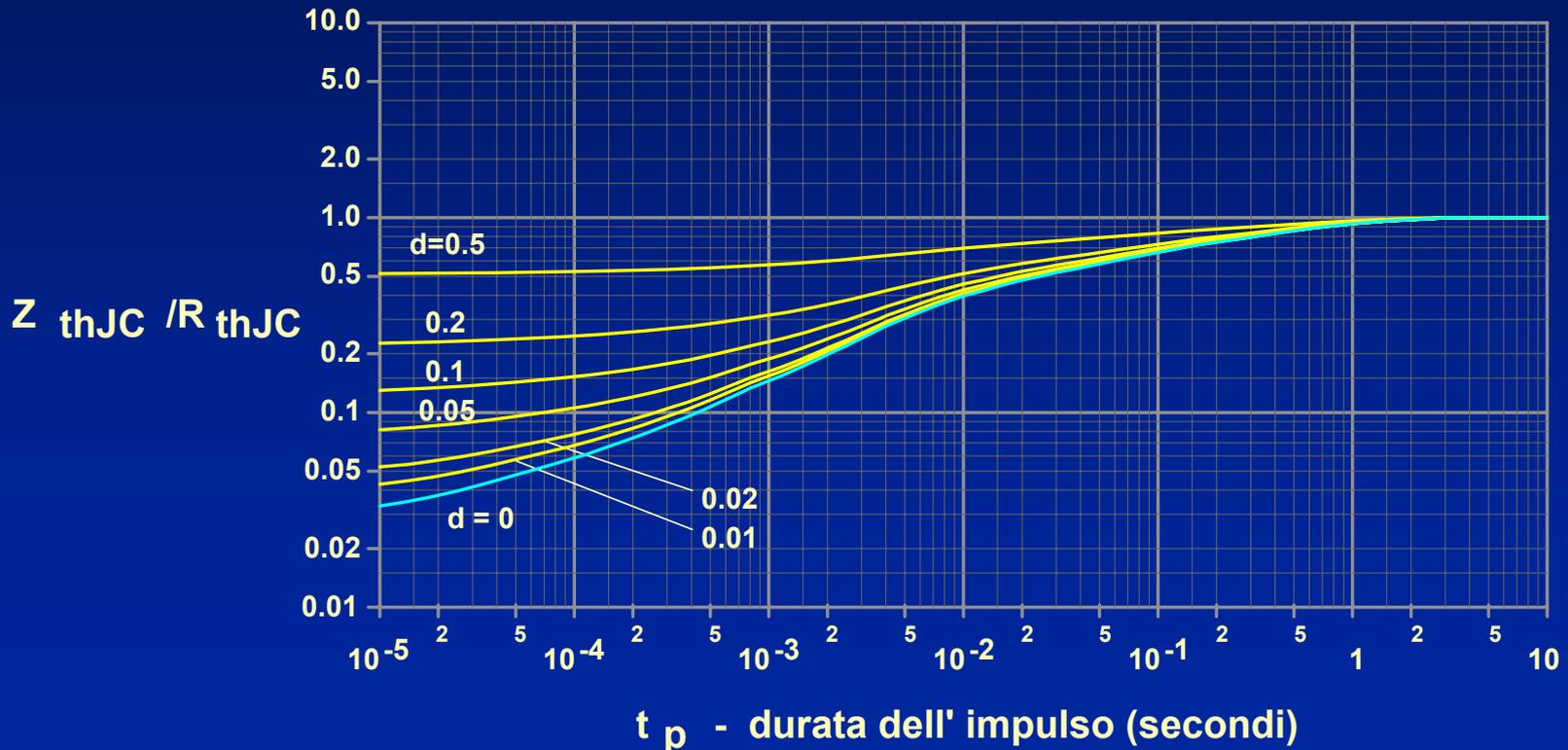
Risposta termica ad una serie periodica di impulsi di potenza dissipata



# Smaltimento del calore

Andamento tipico di impedenze termiche  $Z_{thJC}$   
per diversi valori del duty-cycle  $d$

Valori normalizzati alla resistenza termica  $R_{thJC}$



## **1.4 - Diodi di potenza e diodi Schottky**

# Diodi di potenza

Diodi di potenza al silicio a giunzione pn

Valori tipici di  $V_{KN} \rightarrow$  **0.7÷1.2 V**,

Valori di resistenze tali da mantenere le cadute alla corrente nominale a **1÷2.2 V**.

Correnti nominali  $\rightarrow$  da pochi **A** fino a **1000÷2000 A**.

Corrente inversa di fuga  $I_R$  molto piccola rispetto alla corrente nominale  $I_{FN}$

( $I_{FN}/I_R$  maggiore di **20000÷40000**).

# Diodi di potenza

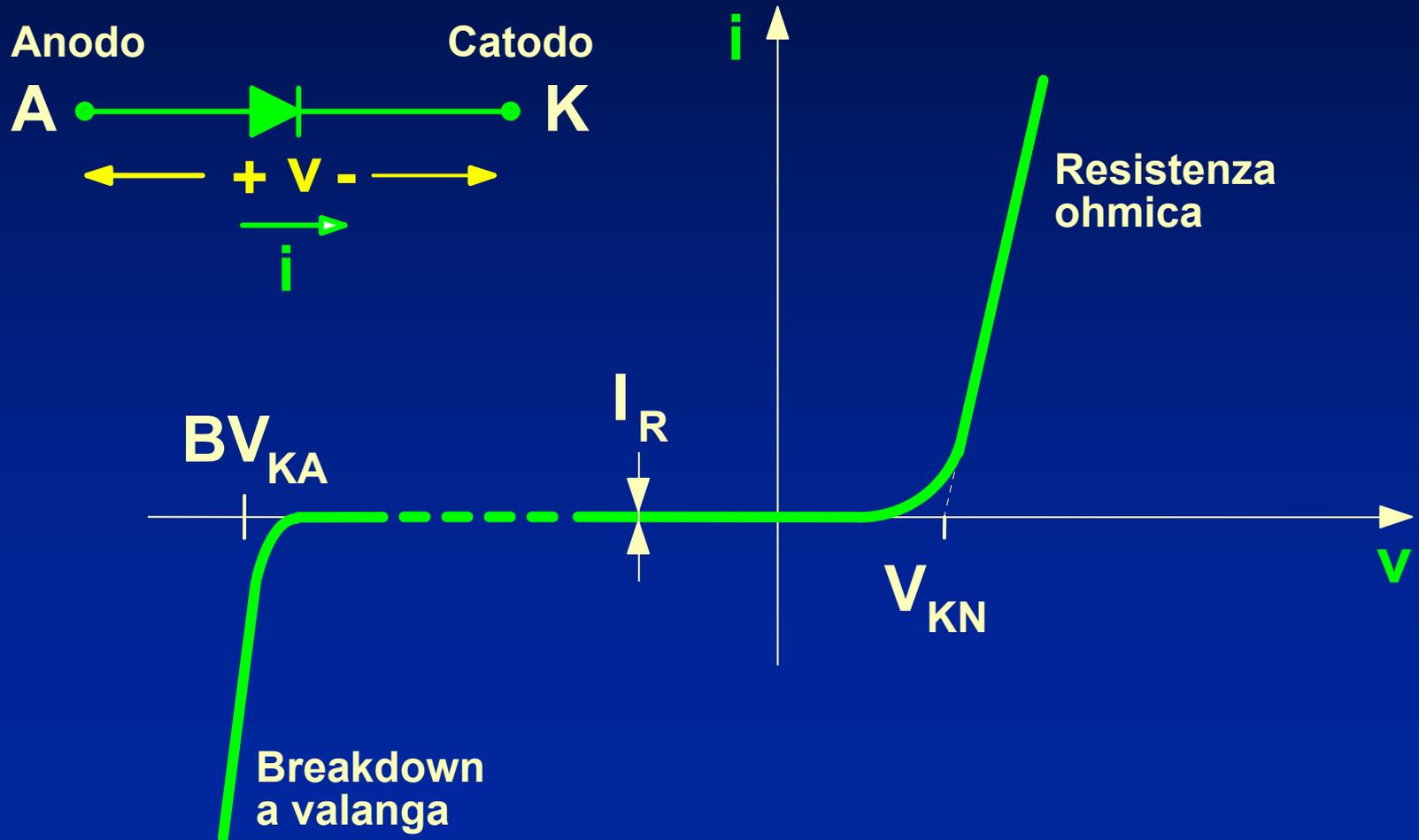
Se la tensione inversa supera un valore limite  $BV_{KA}$  (tensione di “**Breakdown**”), si ha la scarica a valanga e la corrente inversa aumenta bruscamente.

I valori di  $BV_{KA}$  variano molto da un dispositivo all'altro e possono andare da poche decine di Volt fino a **2000 V**.

Alcuni diodi (a “**valanga controllata**”) sono costruiti in modo da poter **sopportare**, entro dati limiti di corrente, tensione e di durata, le condizioni di breakdown.

# Diodi di potenza

## Simbolo e caratteristica statica



# Diodi di potenza Schottky

**Caduta** in conduzione diretta ridotta rispetto ai diodi a giunzione pn.

$V_{KN}$  è tipicamente di **0.3-0.4 V**  $\rightarrow$  **perdite** di conduzione molto **ridotte**.

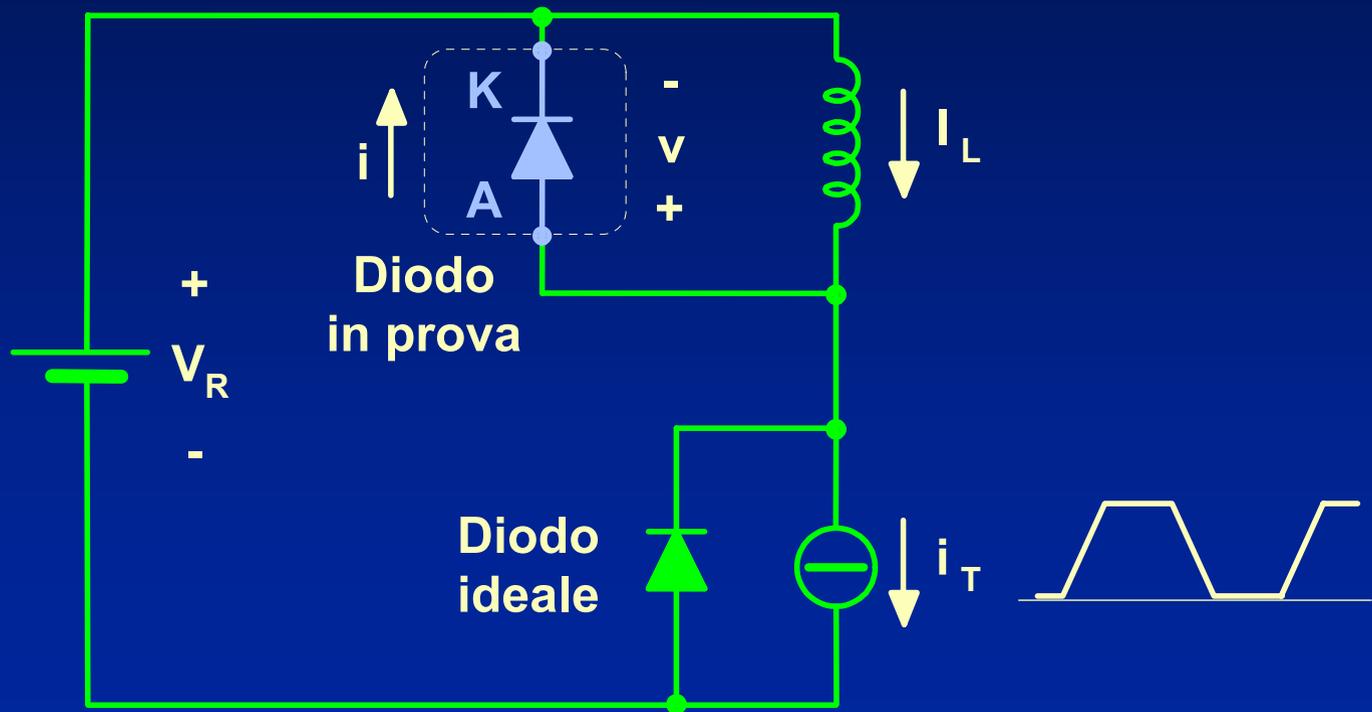
**Tempi di commutazione** molto **ridotti** rispetto ai corrispondenti diodi al silicio di potenza a giunzione pn.

Per contro, la massima **tensione** inversa di **breakdown**  $BV_{KA}$  è minore.

I limiti massimi reperibili non superano **200 V**.

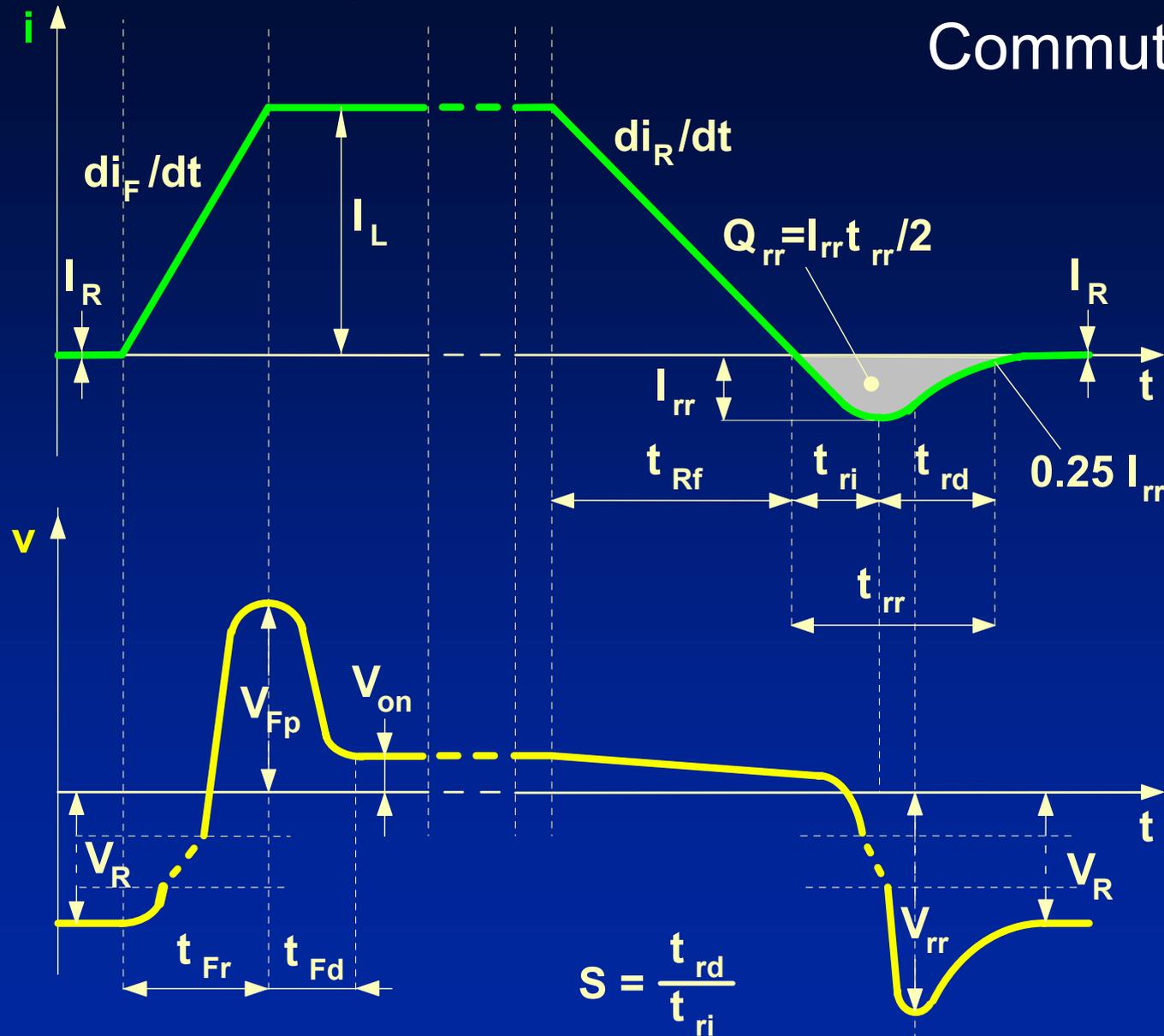
# Diodi di potenza: Commutazioni

Circuito di prova per le forme d'onda e per i tempi di commutazione



# Diodi di potenza: Commutazioni

## Commutazioni



# Diodi di potenza: Specifiche

Per un **diodo di potenza**, come per gli altri dispositivi, il costruttore **specifica** tre tipi di dati:

- “**limiti massimi assoluti**” (“**absolute maximum ratings**”) valori che **non devono** essere superati per non danneggiare il componente.
- “**caratteristiche**” (“**characteristics**”) che comprendono **sia** valori **minimi e/o massimi**, in ben precise condizioni di funzionamento e di temperatura, che si **garantisce** non vengano superati, **sia** valori tipici.
- “**curve tipiche**” (“**typical performance curves**”) che mostrano l’influenza delle variazioni delle condizioni di funzionamento sui vari parametri del dispositivo.

# Diodi di potenza: Limiti Massimi

Per un diodo di potenza, un esempio di specificazione dei limiti massimi assoluti può essere:

- Absolute maximum ratings,  $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

Peak repetitive reverse voltage	$V_{RRM}$	1000 V
Working peak reverse voltage	$V_{RWM}$	1000 V
DC blocking voltage	$V_R$	1000 V
Average rectified forward current ( $T_C=117\text{ }^\circ\text{C}$ )	$I_{F(AV)}$	30 A

# Diodi di potenza: Limiti Massimi

Repetitive peak surge current (square wave, 20 kHz)	$I_{FSM}$	60 A
Nonrepetitive peak surge current (halfwaave, 1 phase, 60 hz)	$I_{FNRSM}$	300 A
Maximum power dissipation	$P_D$	125 W
Avalanche energy	$E_{AVL}$	20 mJ
Operating and storage temperature	$T_{STG}, T_J$	-65 to +125 °C

# Diodi di potenza: Caratteristiche

Esempio di specificazione:

caratteristiche **garantite**

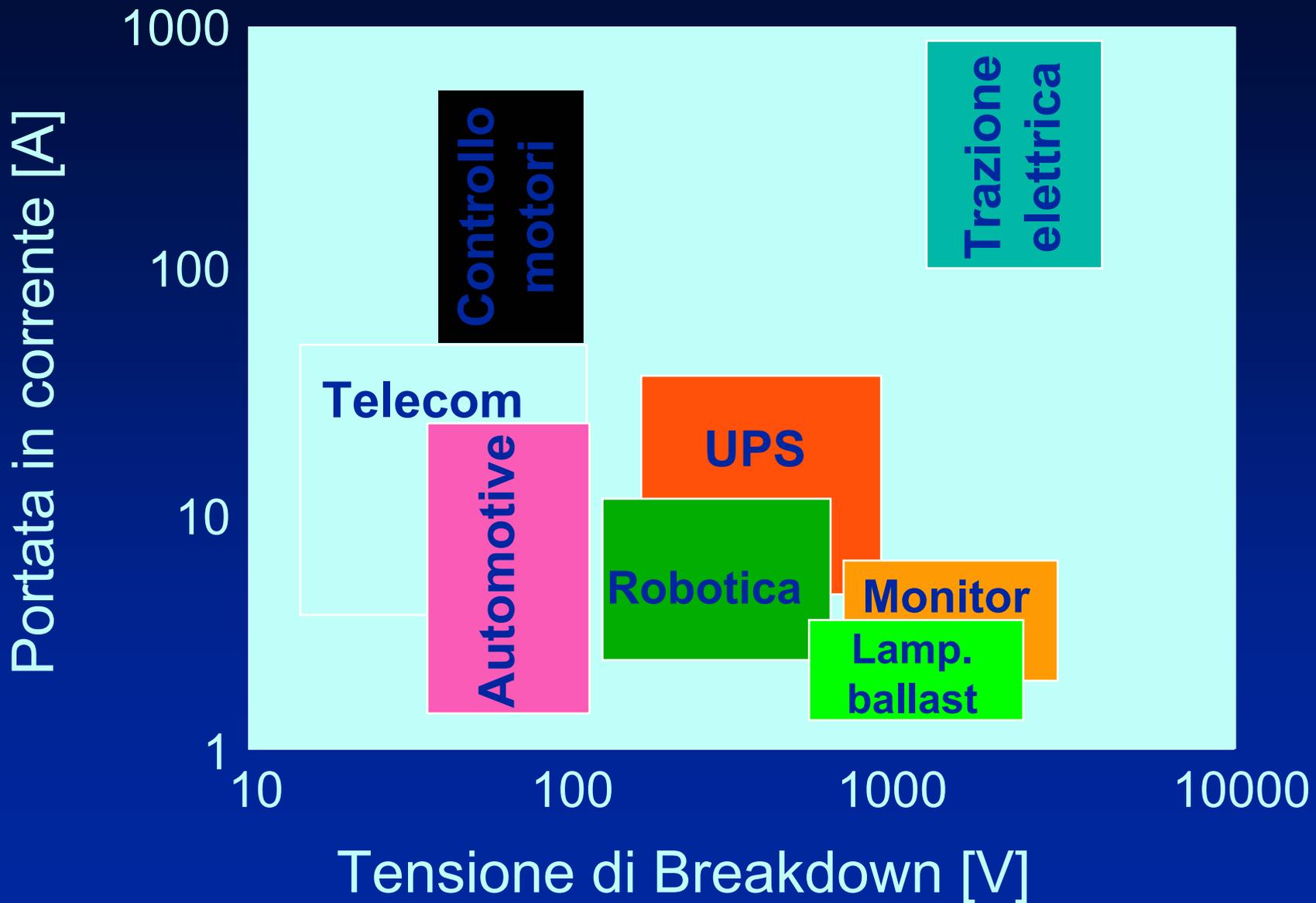
$V_F$	at $I_F = 30 \text{ A}$ , $T_C = 25 \text{ °C}$	Max	1.8 V
$V_F$	at $I_F = 30 \text{ A}$ , $T_C = 150 \text{ °C}$	Max	1.6 V
$I_R$	at $V_R = 800 \text{ V}$ , $T_C = 25 \text{ °C}$	Max	500 $\mu\text{A}$
$I_R$	at $V_R = 800 \text{ V}$ , $T_C = 150 \text{ °C}$	Max	1 mA
$t_{rr}$	at $I_F = 1 \text{ A}$ , $di_F/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$	Max	110 ns
$R_{\theta JC}$		Max	1.2 $\text{°C}/\text{W}$

valori indicativi:

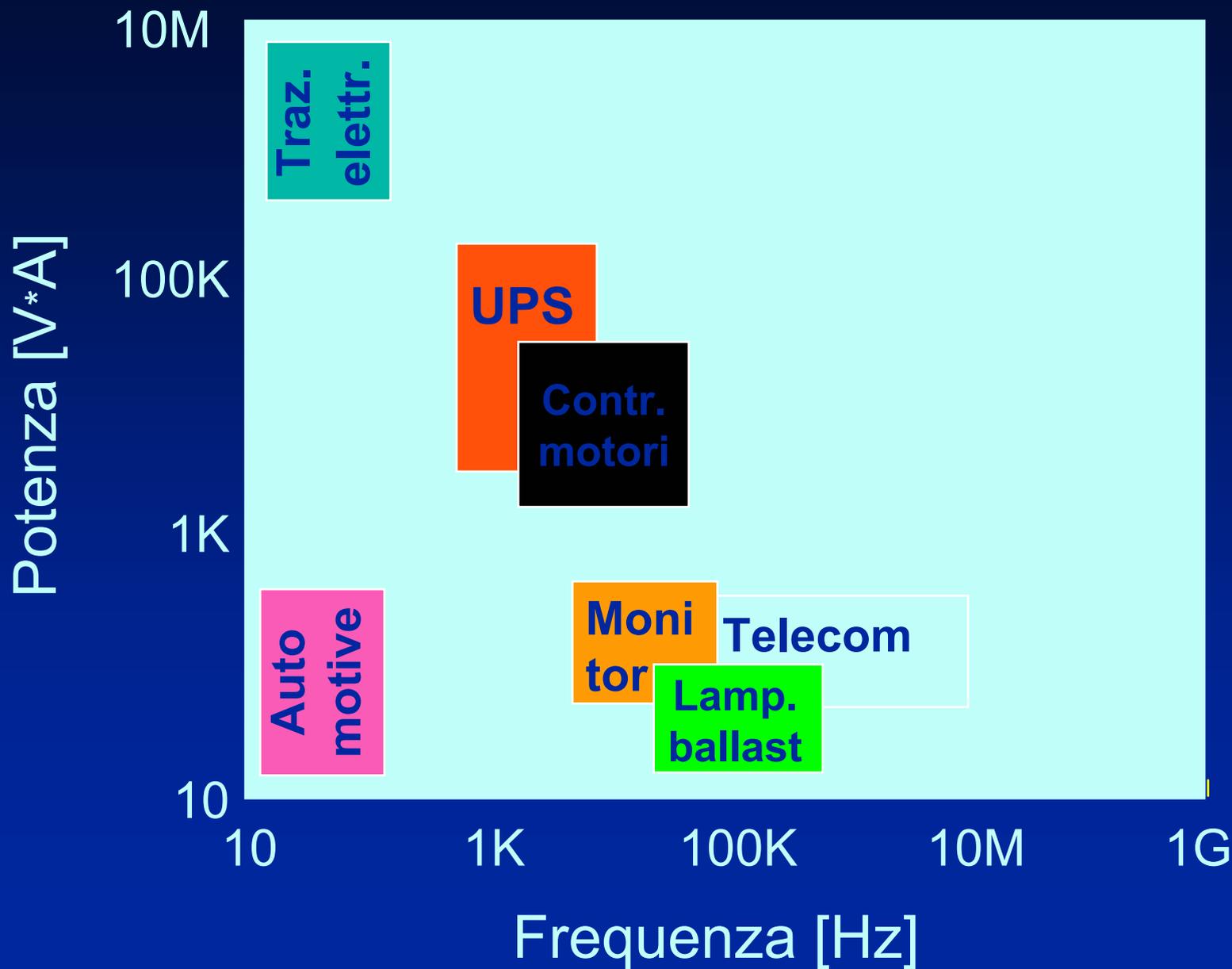
$t_{rr}$	at $I_F = 30 \text{ A}$ , $di_F/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	150 ns
$t_{ri}$	at $I_F = 30 \text{ A}$ , $di_F/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	90 ns
$t_{rd}$	at $I_F = 30 \text{ A}$ , $di_F/dt = 100 \text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	45 ns

# **CAMPI DI APPLICAZIONE DEI DISPOSITIVI DI POTENZA**

# SETTORI DI APPLICAZIONE ELETTRONICA DI POTENZA



# SETTORI DI APPLICAZIONI ELETTRONICA DI POTENZA



# **PROCESSO DI FABBRICAZIONE BIPOLARI DI POTENZA**

**TECNOLOGIA PLANARE**

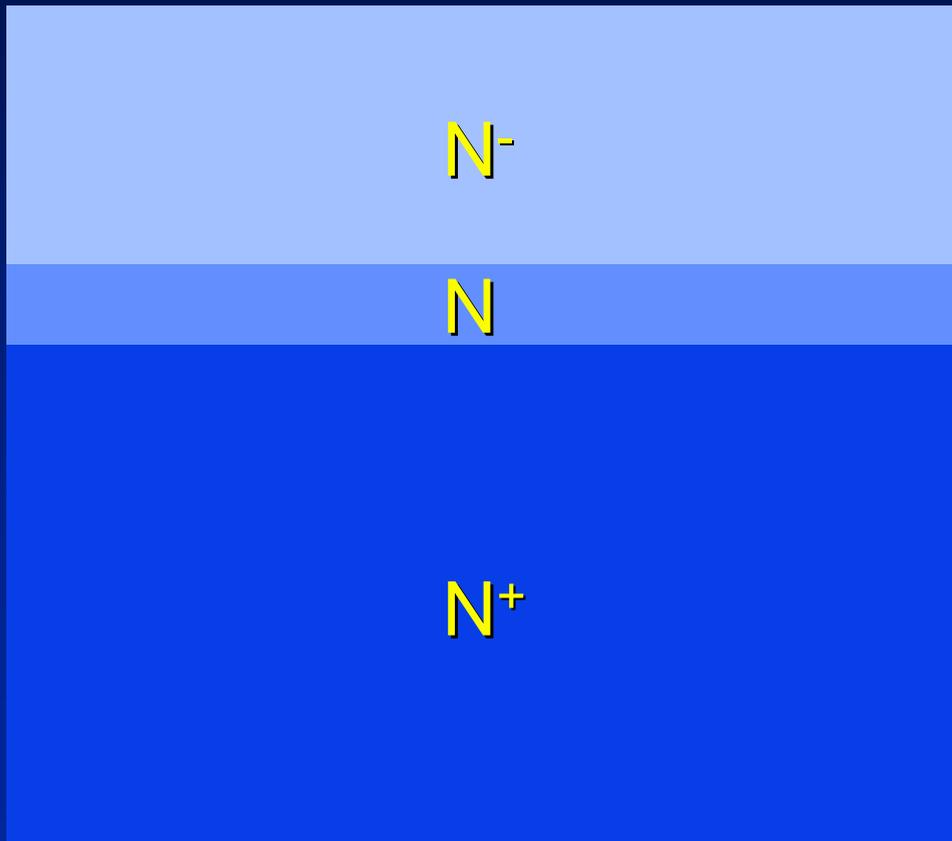
# Substrato N<sup>+</sup>

N<sup>+</sup>

$$X_{N^+} \sim 600 \mu\text{m}$$

$$\rho \sim 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$$

# Crescita epitassiale strati N e N<sup>-</sup>



Bassa Tensione ~ 100 V

$$X_{N^-} \sim 15 \mu\text{m}$$

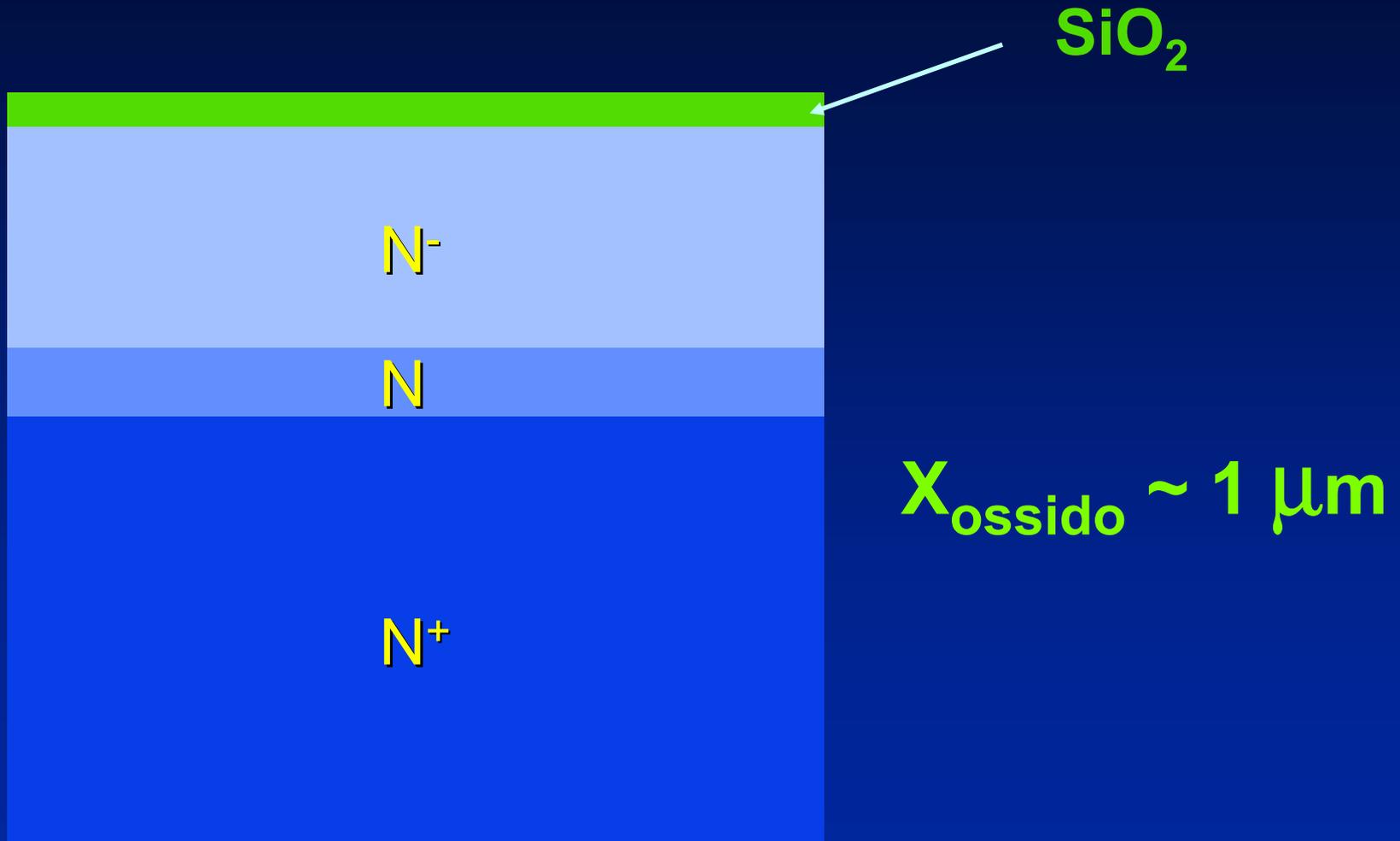
$$\rho \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$$

Alta Tensione ~ 1000 V

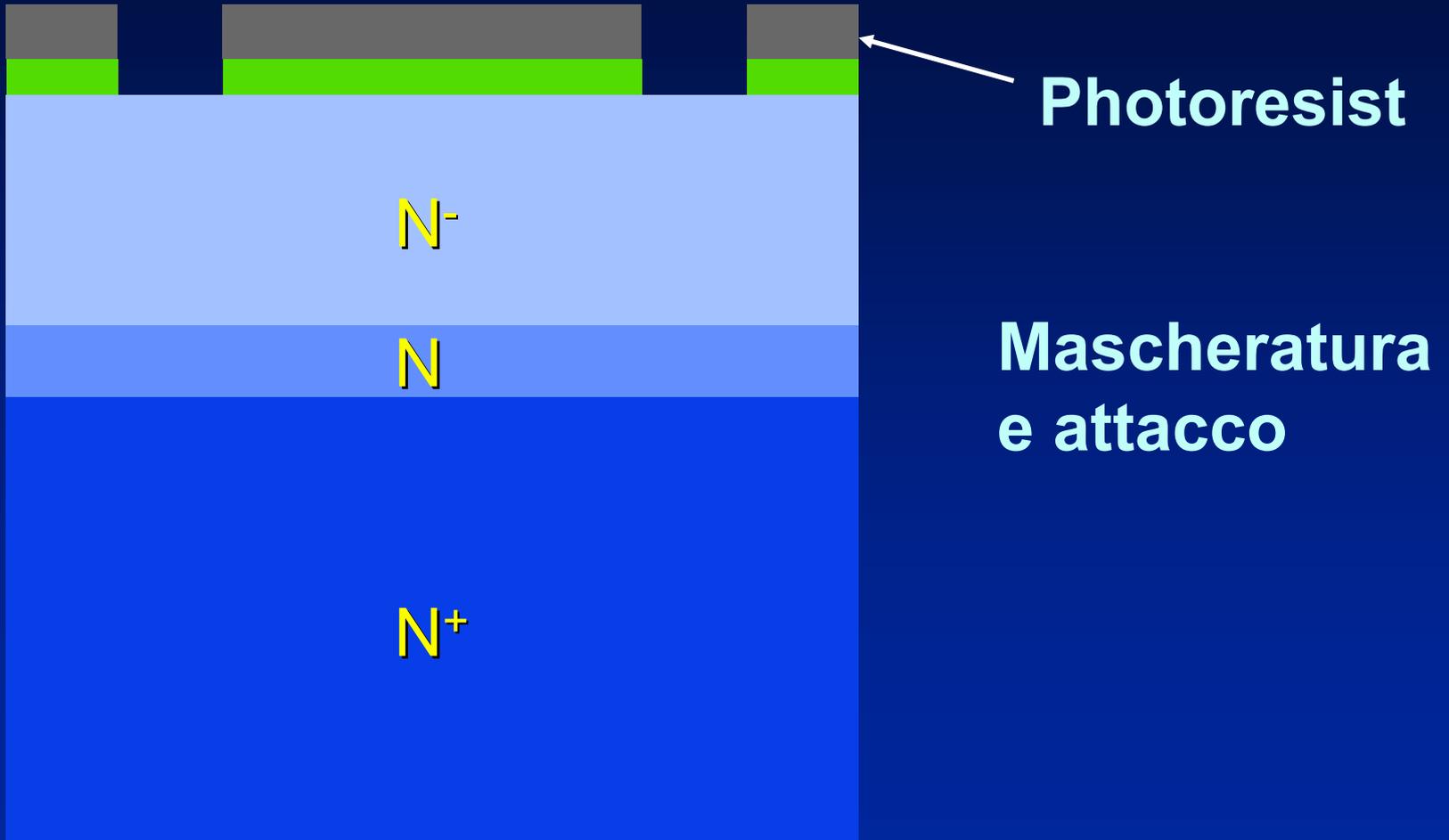
$$X_{N^-} \sim 80 \mu\text{m}$$

$$\rho \sim 80 \Omega \cdot \text{cm}$$

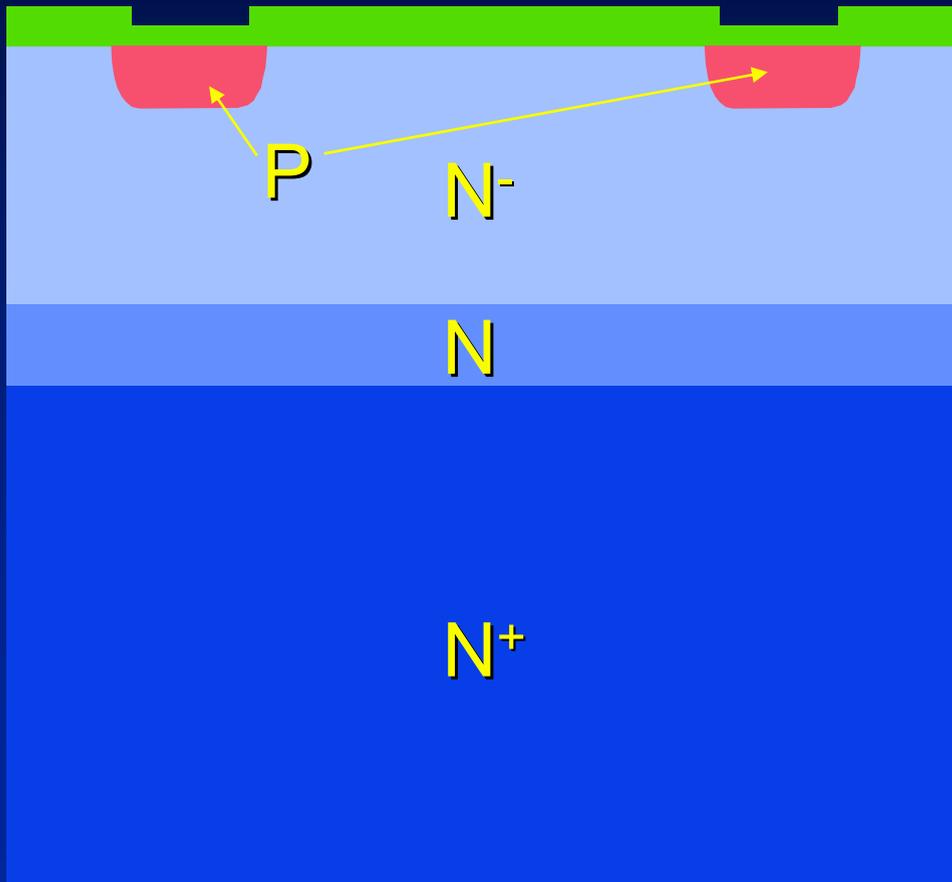
# Ossidazione iniziale



# Fotolitografia



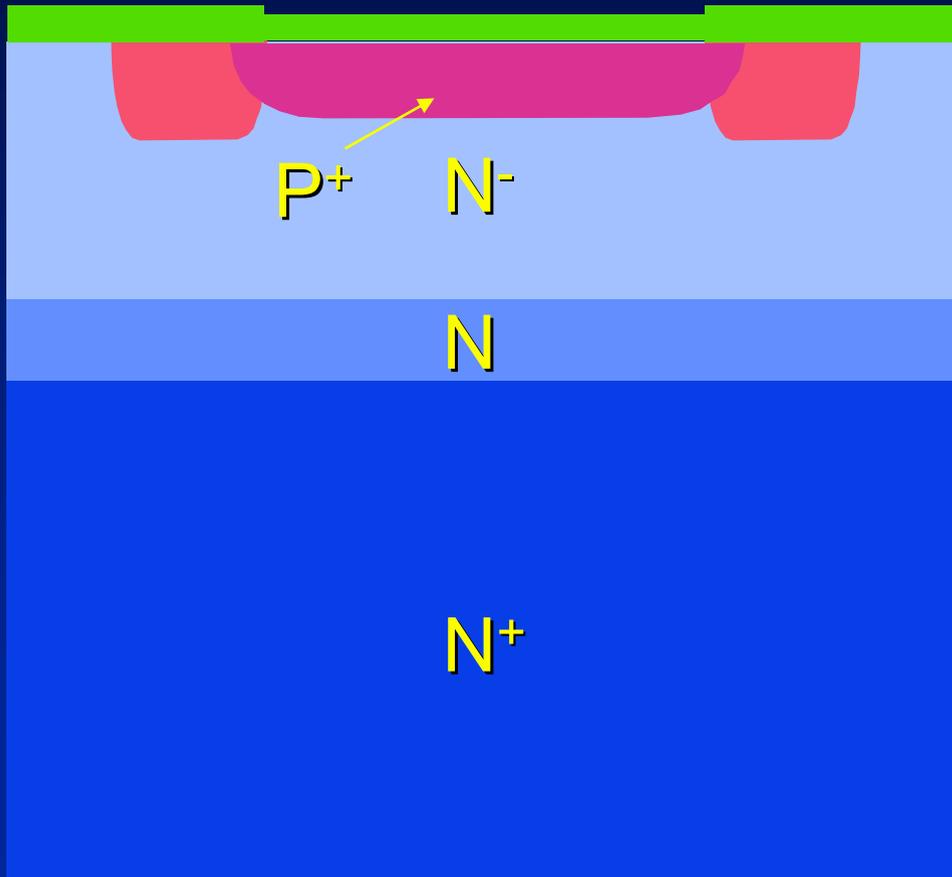
# Formazione anello di bordo



impianto ionico P  
(boro o alluminio)

diffusione in  
ambiente ossidante

# Formazione base



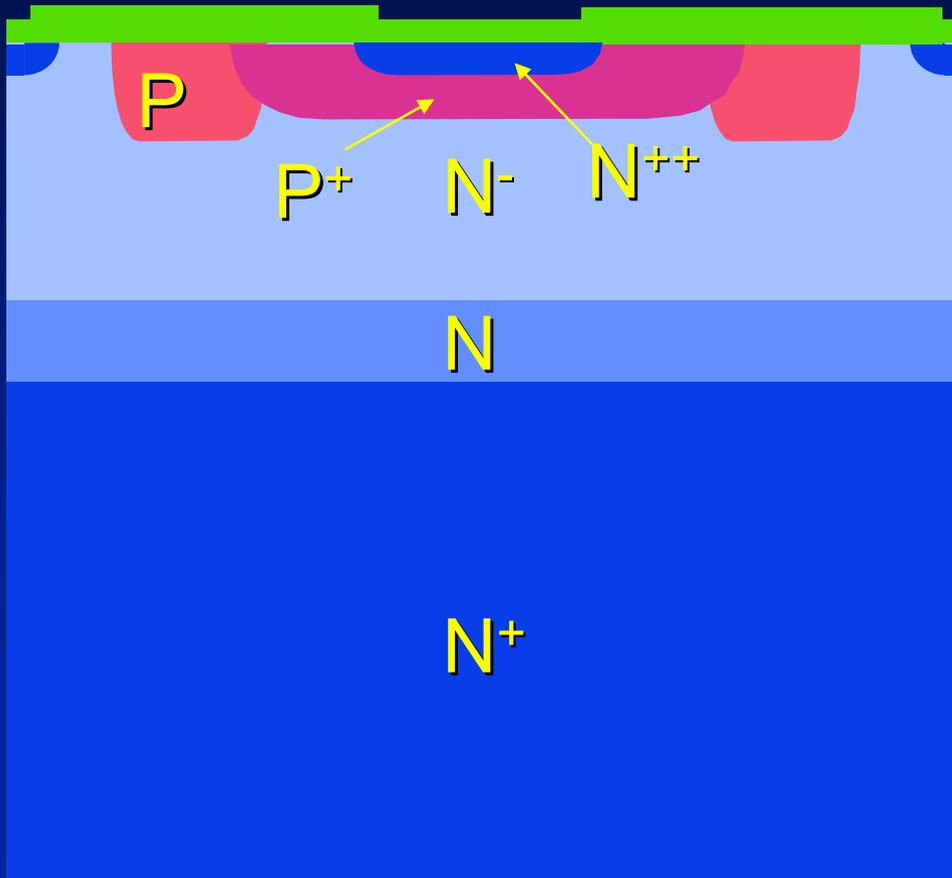
fototecnica base

impianto ionico  $P^+$

$$x_j \sim 10 \mu\text{m}$$

$$C_s \sim 10^{18} \text{ at/cm}^3$$

# Formazione emettitore



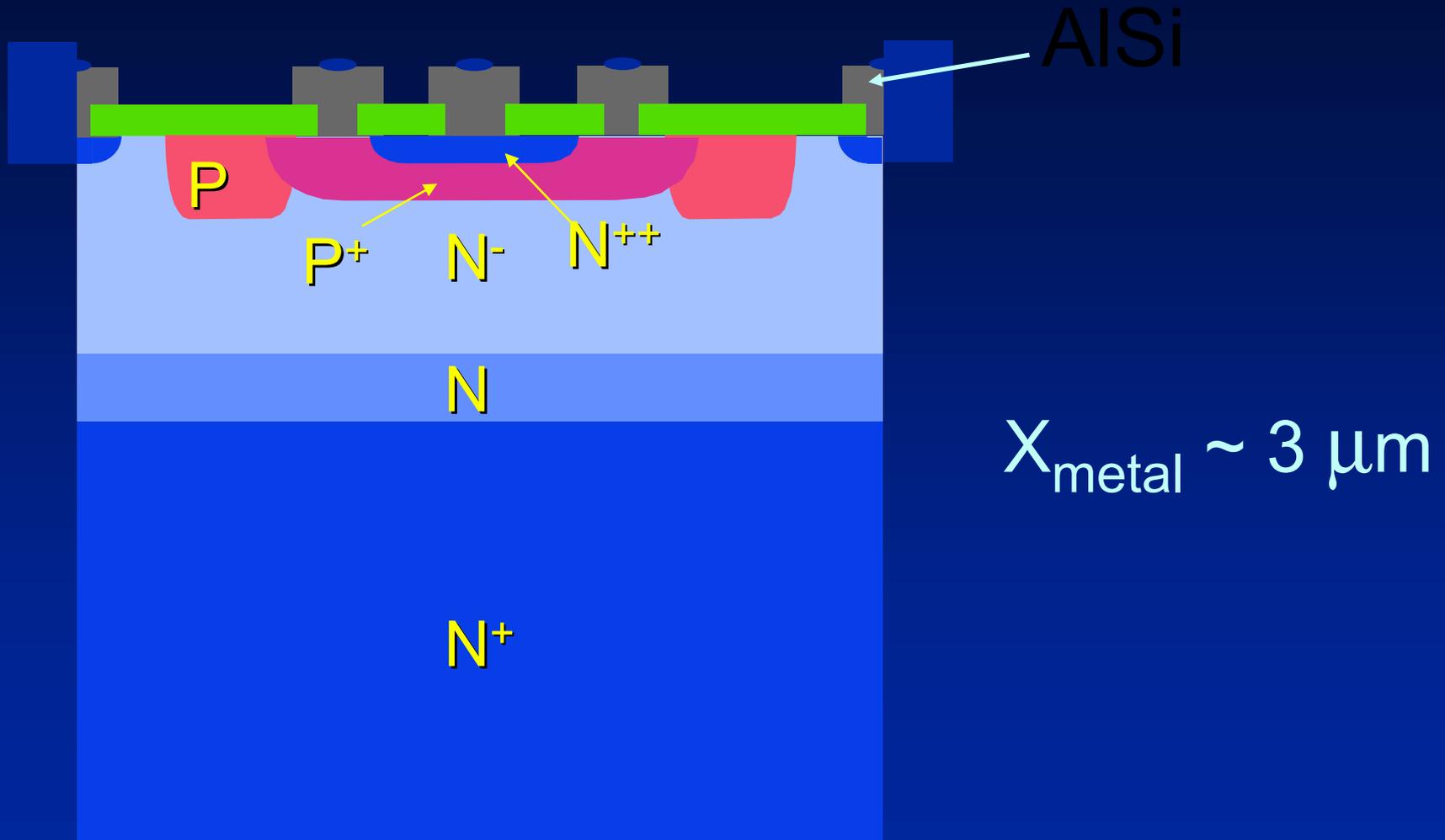
fototecnica  
emettitore

impianto ionico  $N^{++}$

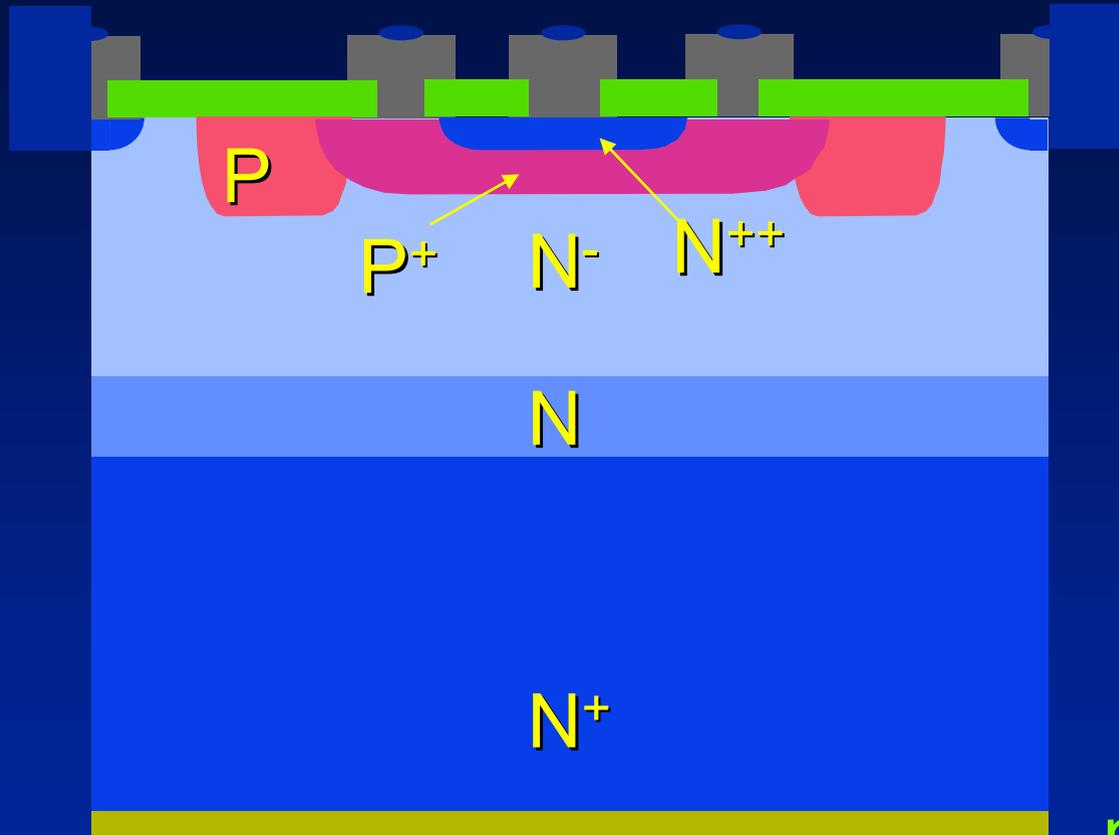
$x_j \sim 5 \mu\text{m}$

$C_s \sim 10^{20} \text{ at/cm}^3$

# Contatti e metallizzazione



# Riduzione spessore e metallizzazione retro



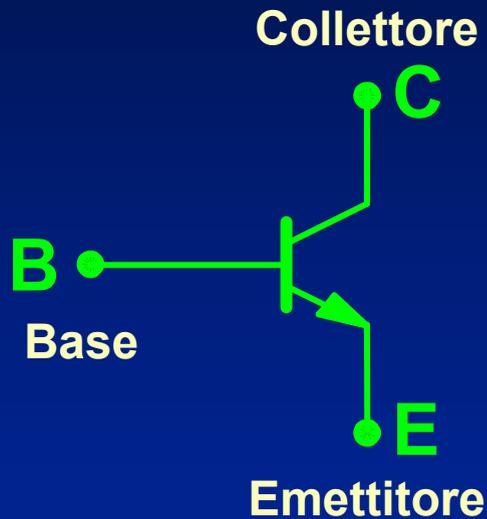
X ~ 400  $\mu\text{m}$

metal TiNiAu

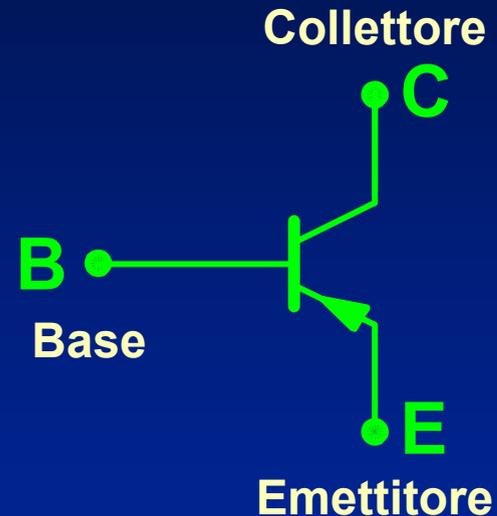
# **1.5 - Transistori Bipolari (connessione Darlington)**

# Transistori Bipolari (BJT) di potenza

## Simboli



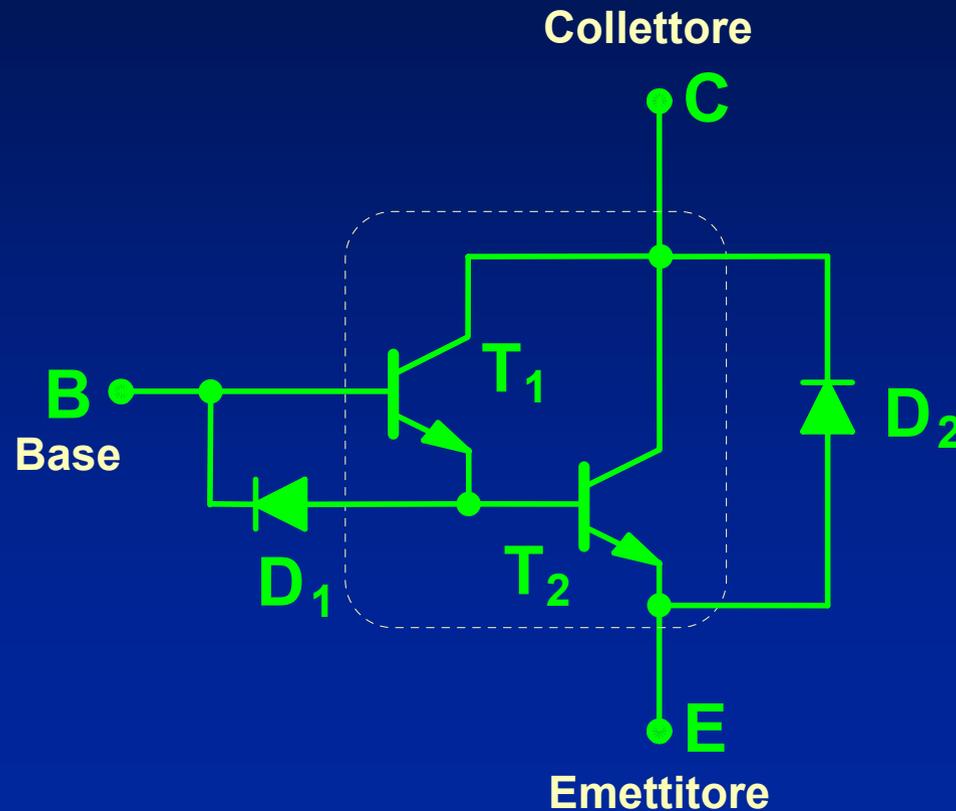
BJT  
nnp



BJT  
pnp

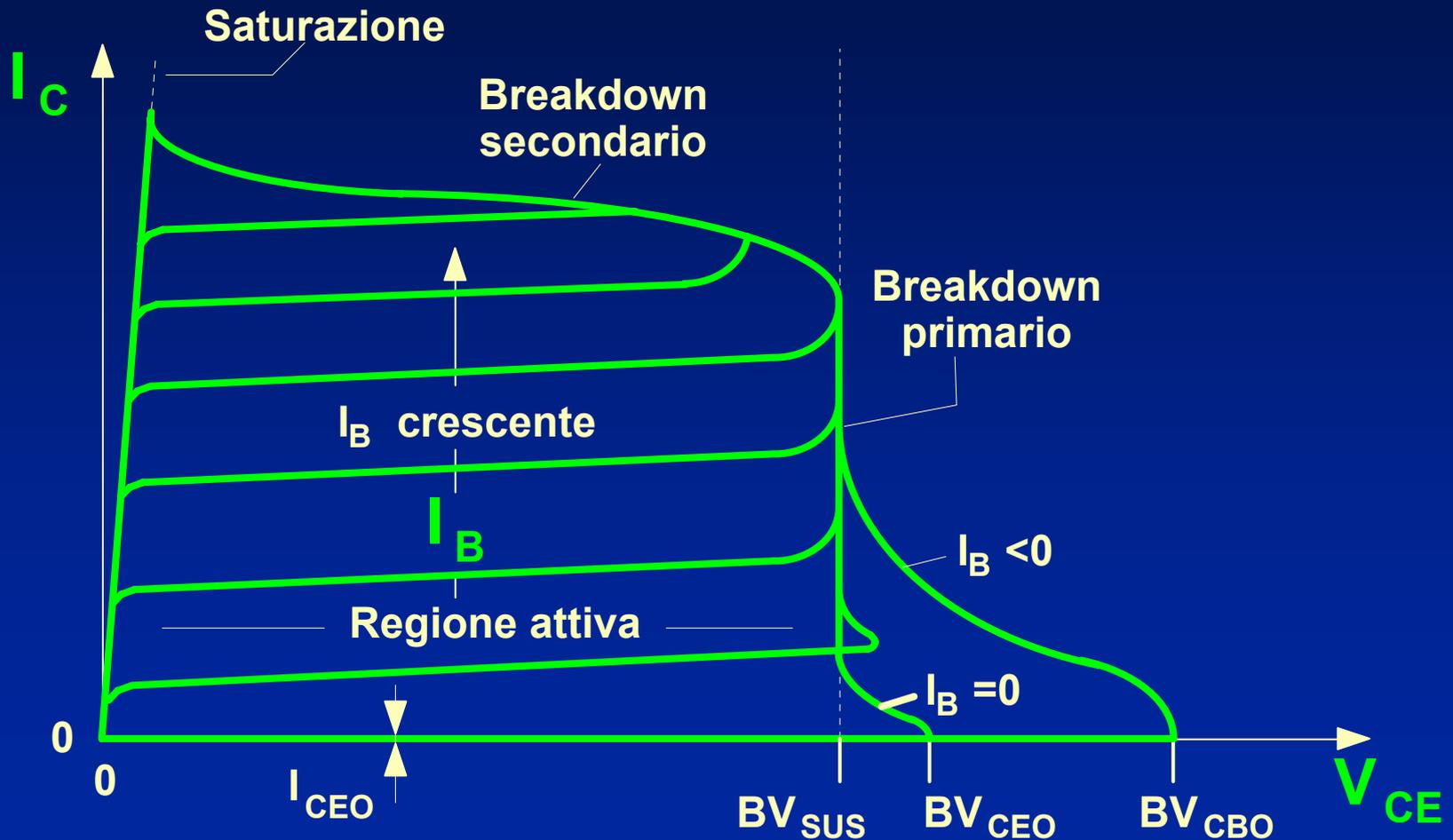
# Transistori Bipolari npn di potenza in connessione Darlington

## Simbolo



# BJT di potenza: Caratteristiche statiche

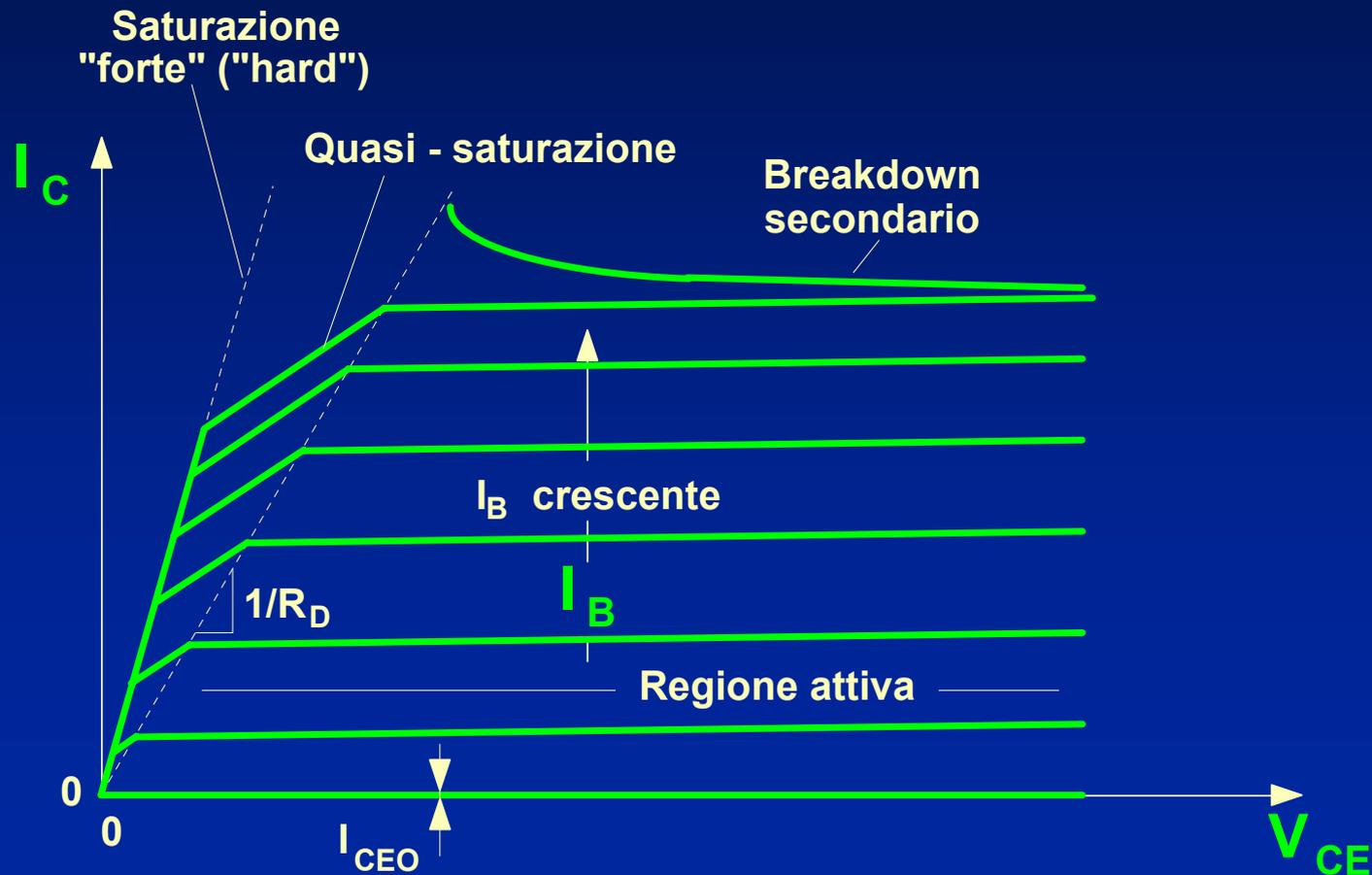
Caratteristiche statiche ( $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) param.  $I_B$



# BJT di potenza: Caratteristiche statiche

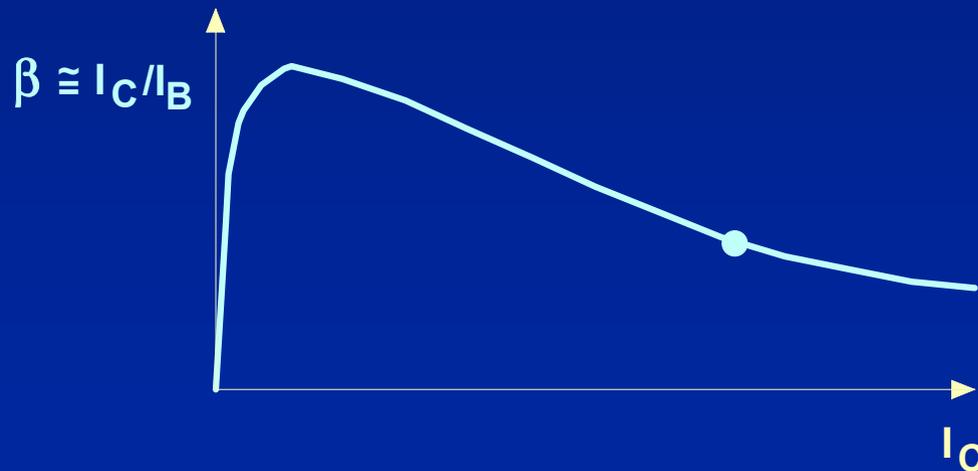
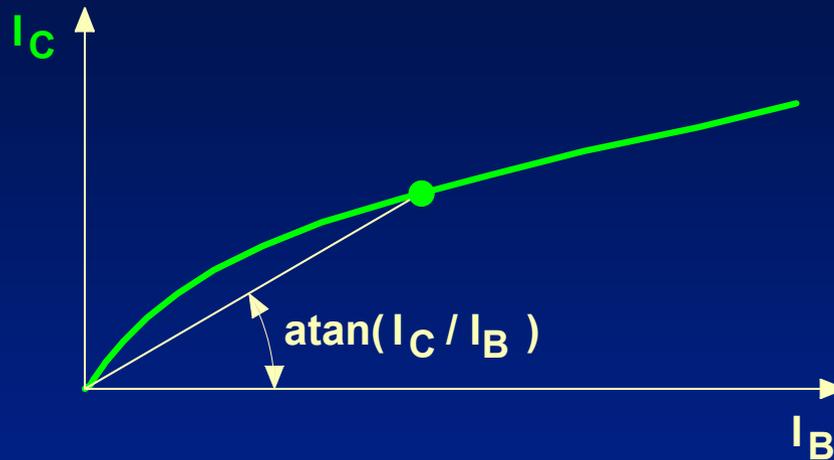
Caratteristiche statiche ( $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) param.  $I_B$

Diagramma espanso nella zona di saturazione



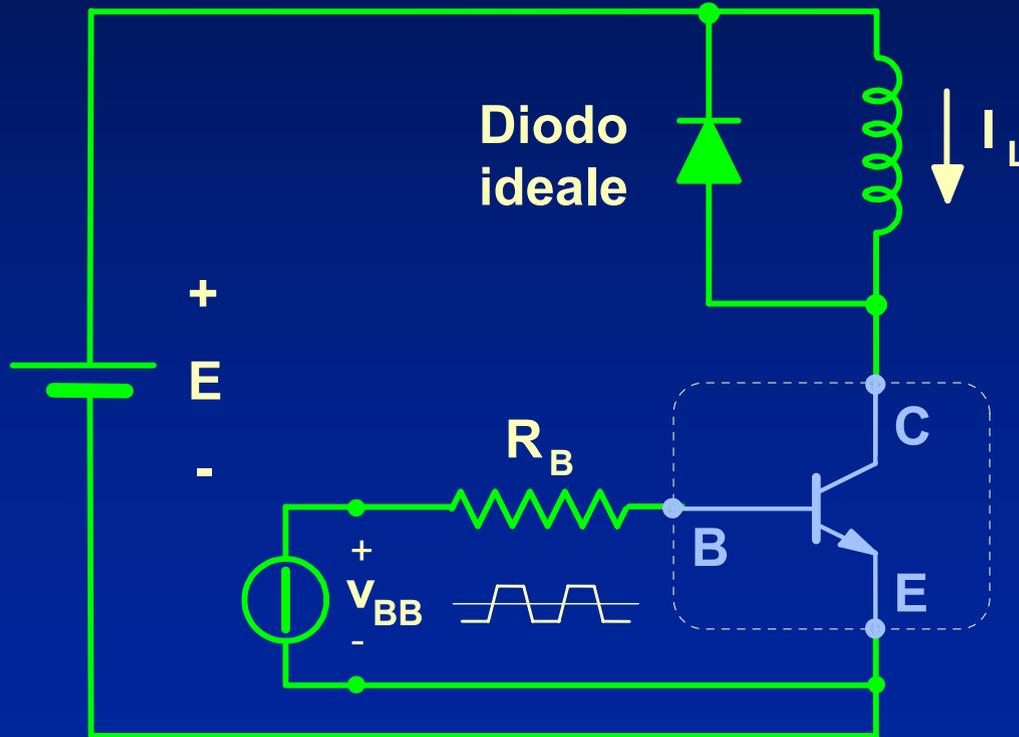
# BJT di potenza: Caratteristiche statiche

Guadagno di corrente  $\beta = I_C / I_B$  in zona attiva



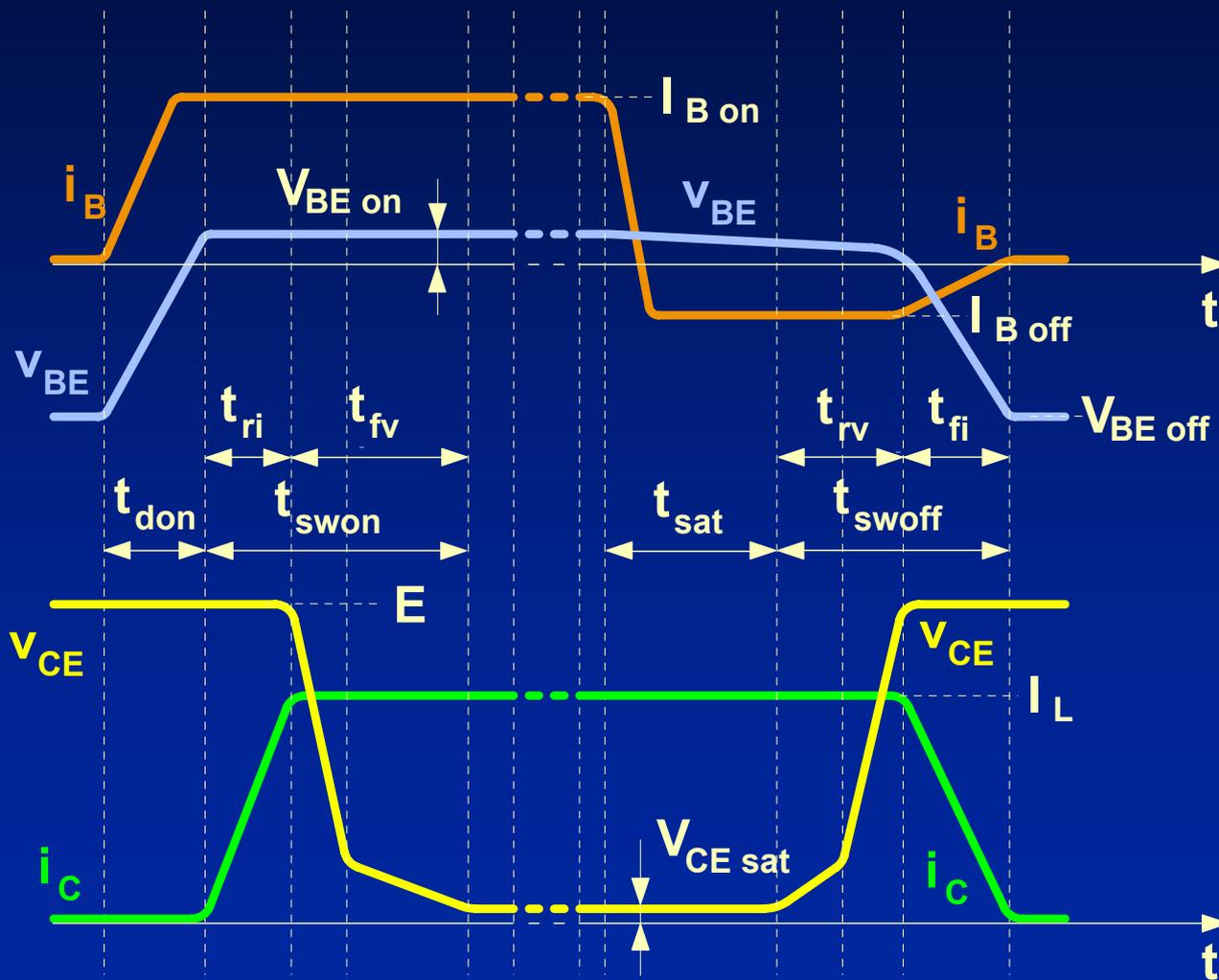
# BJT di potenza: Commutazioni

Circuito di prova per le forme d'onda e per i tempi di commutazione



# BJT di potenza: Commutazioni

## Commutazioni



# BJT di potenza: Limiti Massimi Assoluti

Per un BJT di potenza, un esempio di specificazione dei limiti massimi assoluti può essere:

- Absolute maximum ratings ( $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ )

Collector-emitter voltage  $V_{CEO}$  450 V

Collector-emitter voltage

( $V_{BE} = -2.5\text{ V}$ )  $V_{CEX}$  700 V

Emitter-base voltage  $V_{EBO}$  7 V

Collector current  $I_C$  30 A

Collector current ( $t_p \leq 5\text{ms}$ )  $I_{CM}$  60 A

Base current  $I_B$  8 A

Base current ( $t_p \leq 5\text{ms}$ )  $I_{BM}$  30 A

# BJT di potenza: Limiti Massimi Assoluti

Power dissipation	$P_{\text{tot}}$	150 W
Junction temperature	$T_j$	-65,+150 W
Insulation voltage ( $t=1$ mn)	$V_{\text{ins}}$	2500 V <sub>RMS</sub>
Screw torque (mounting terminals)		15 kg ·cm
Junction-case thermal resistance	$R_{\text{th (j-c)}}$	0.83 °C/W

# BJT di potenza: Caratteristiche

Per un BJT di potenza, un esempio di specificazione delle caratteristiche **garantite** e **tipiche** può essere:

## OFF CHARACTERISTICS

<b><math>BV_{CEO\text{ sus}}</math></b> @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_B=0\text{ A}$ , $I_C=0.2\text{ A}$ , $L=25\text{ mH}$	Min	450 V
<b><math>BV_{EBO\text{ sus}}</math></b> @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_C=0\text{ A}$ , $I_E=100\text{ mA}$	Min	7 V
	Max	30 V
<b><math>I_{CEX}</math></b> @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CE}=V_{CEX}$ , $V_{BE}=-2.5\text{ V}$	Max	0.4 mA
<b><math>I_{CEX}</math></b> @ $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CE}=V_{CEX}$ , $V_{BE}=-2.5\text{ V}$	Max	4 mA

# BJT di potenza: Caratteristiche

$I_{\text{CER}}$ @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{\text{CE}}=V_{\text{CEX}}$ , $R_{\text{BE}}=5\ \Omega$	Max	1 mA
$I_{\text{CER}}$ @ $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{\text{CE}}=V_{\text{CEX}}$ , $R_{\text{BE}}=5\ \Omega$	Max	8 mA
$I_{\text{EBO}}$ @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_{\text{C}}=0\text{ A}$ , $V_{\text{BE}}=-5\text{ V}$	Max	2 mA

## ON CHARACTERISTICS

$V_{\text{CE sat}}$ @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_{\text{C}}=20\text{ A}$ , $I_{\text{B}}=4\text{ A}$ , pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ $d<2\%$	Max	1.5 V
$V_{\text{CE sat}}$ @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_{\text{C}}=30\text{ A}$ , $I_{\text{B}}=8\text{ A}$ , pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ $d<2\%$	Max	3.5 V
$V_{\text{BE sat}}$ @ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $I_{\text{C}}=20\text{ A}$ , $I_{\text{B}}=4\text{ A}$ , pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ $d<2\%$	Max	1.6 V

# BJT di potenza: Caratteristiche

## DYNAMIC CHARACTERISTICS

$f_T$  @  $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $f=1\text{ MHz}$ ,  $I_C=1\text{ A}$ ,

$V_{CE}=10\text{ V}$

Typ

5 MHz

$C_{22b}$  @  $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $f=1\text{ MHz}$ ,

$V_{CE}=10\text{ V}$

Typ

500 pF

## SWITCHING CHARACTERISTICS

- Switching times on resistive load

$t_{on}$  @  $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC}=150\text{ V}$ ,  $I_C=20\text{ A}$ ,

$I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$

Typ

0.55  $\mu\text{s}$

Max

1  $\mu\text{s}$

$t_s$  @  $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC}=150\text{ V}$ ,  $I_C=20\text{ A}$ ,

$I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$

Typ

1.5  $\mu\text{s}$

Max

3  $\mu\text{s}$

# BJT di potenza: Caratteristiche

$t_f$	@ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=150\text{ V}$ , $I_C=20\text{ A}$ , $I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$	Typ	0.3 $\mu\text{s}$
		Max	0.8 $\mu\text{s}$

- Switching times on inductive load

$t_s$	@ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=300\text{ V}$ , $V_{BB}=-5\text{ V}$ , $I_C=20\text{ A}$ , $I_{B\text{end}}=4\text{ A}$ , $L_B=1.5\mu\text{H}$	Typ	3.5 $\mu\text{s}$
-------	--	-----	-------------------

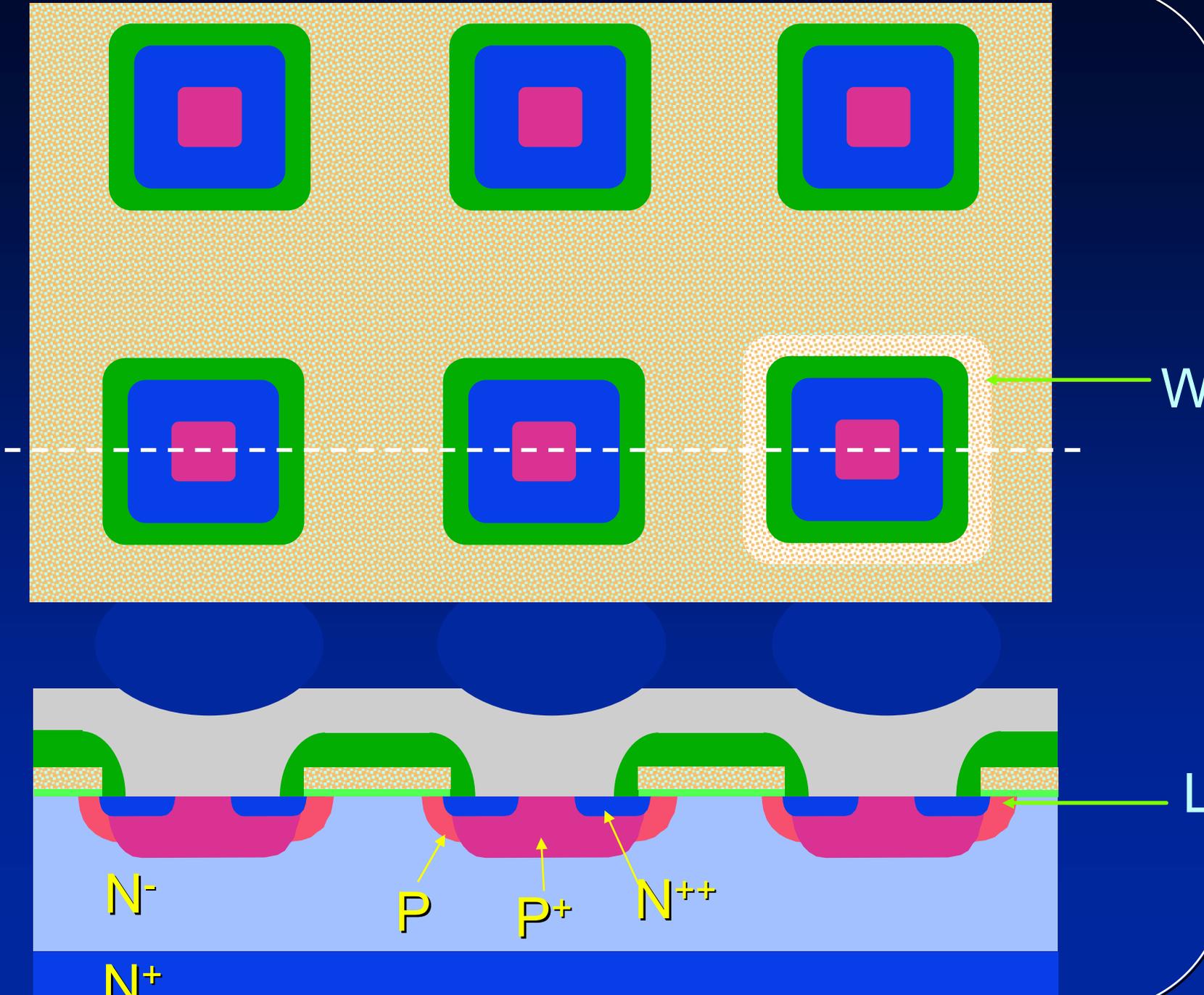
$t_s$	@ $T_j=100\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=300\text{ V}$ , $V_{BB}=-5\text{ V}$ , $I_C=20\text{ A}$ , $I_{B\text{end}}=4\text{ A}$ , $L_B=1.5\mu\text{H}$	Max	5 $\mu\text{s}$
-------	---	-----	-----------------

$t_f$	@ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=300\text{ V}$ , $V_{BB}=-5\text{ V}$ , $I_C=20\text{ A}$ , $I_{B\text{end}}=4\text{ A}$ , $L_B=1.5\mu\text{H}$	Typ	0.08 $\mu\text{s}$
-------	--	-----	--------------------

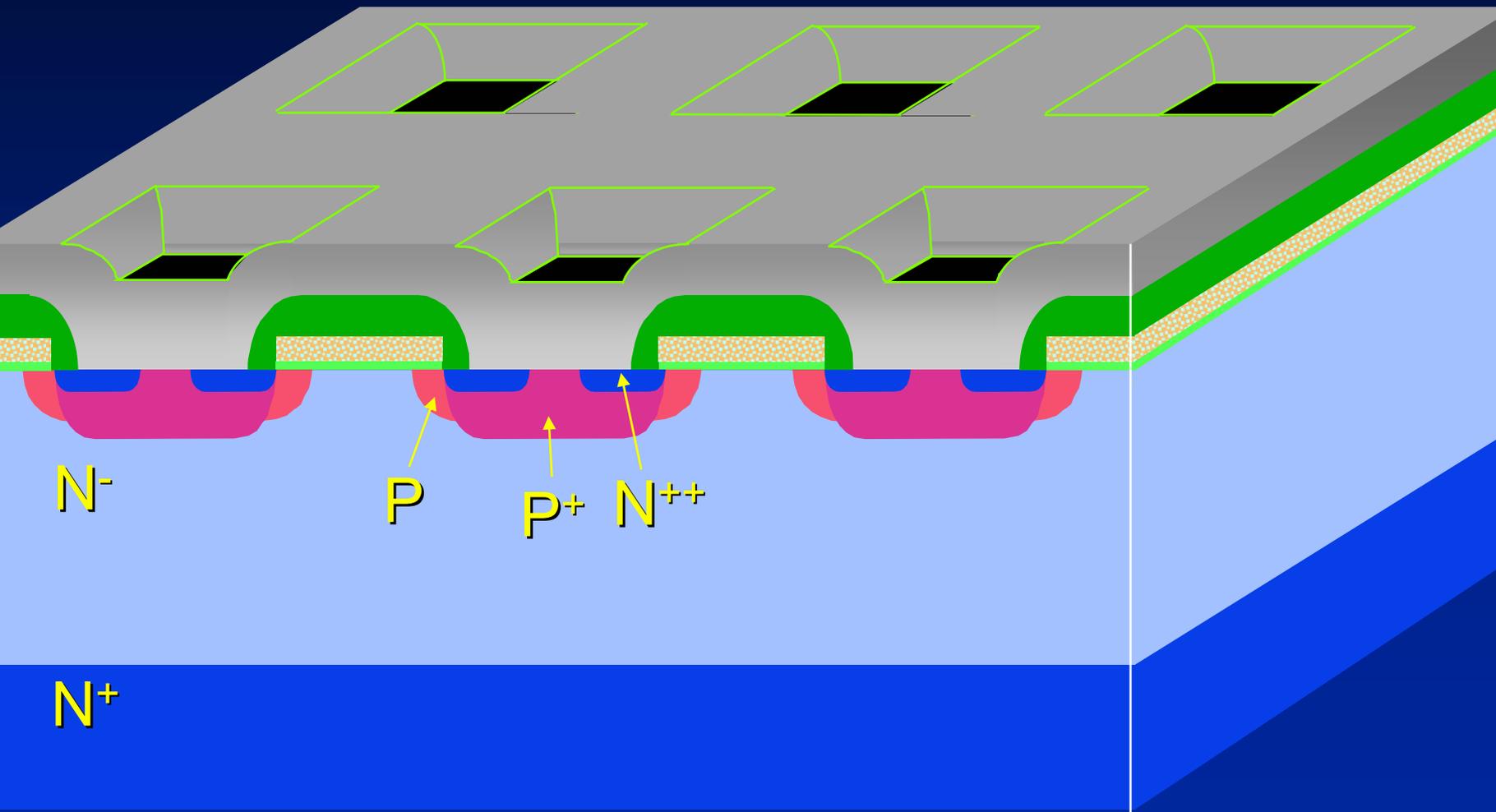
$t_f$	@ $T_j=100\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=300\text{ V}$ , $V_{BB}=-5\text{ V}$ , $I_C=20\text{ A}$ , $I_{B\text{end}}=4\text{ A}$ , $L_B=1.5\mu\text{H}$	Max	0.4 $\mu\text{s}$
-------	---	-----	-------------------

# 1.6 - MOSFET di potenza

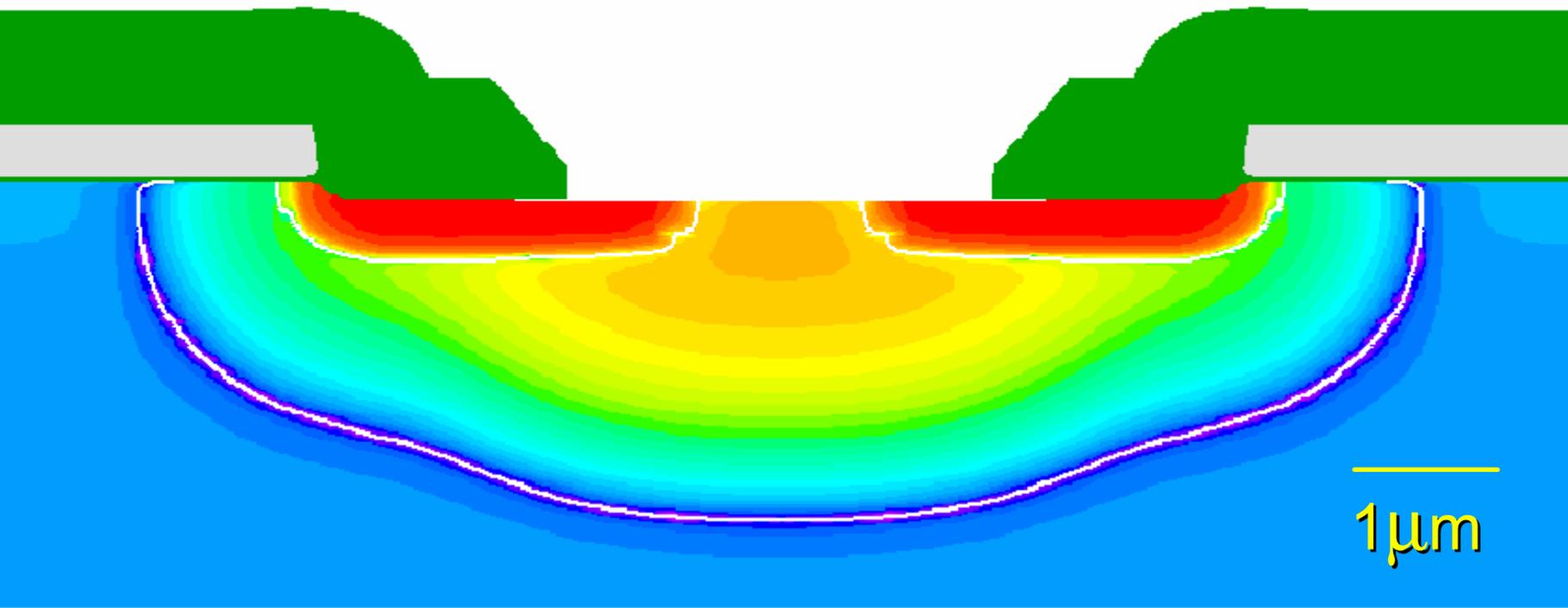




# Struttura 3D del PMOS



# Simulazione 2D di una cella PMOS



10<sup>14</sup>

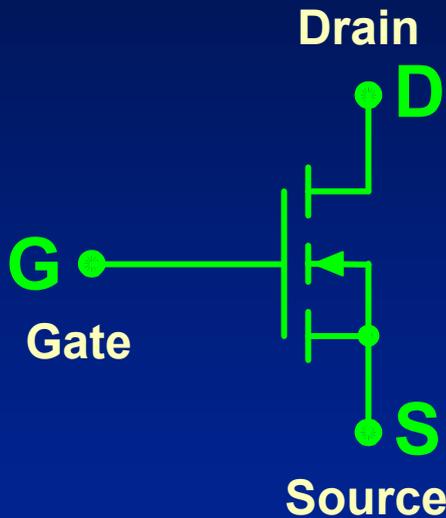
10<sup>17</sup>

10<sup>20</sup>

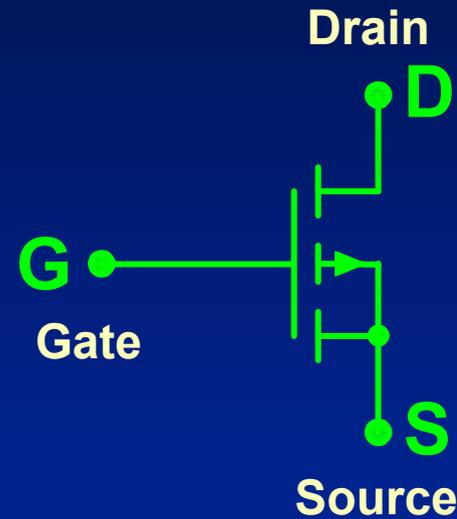
at/cm<sup>3</sup>

# MOSFET di potenza

## Simboli



MOSFET  
a canale n

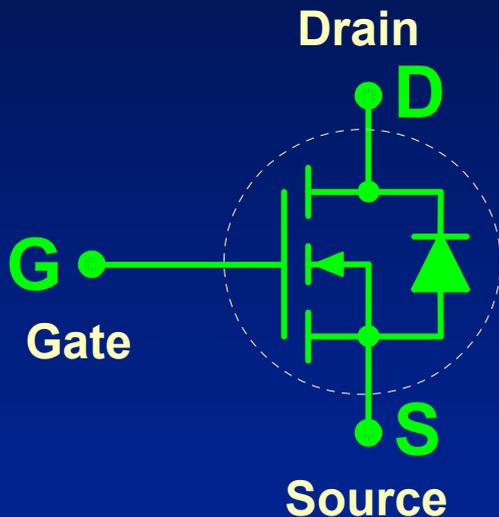


MOSFET  
a canale p

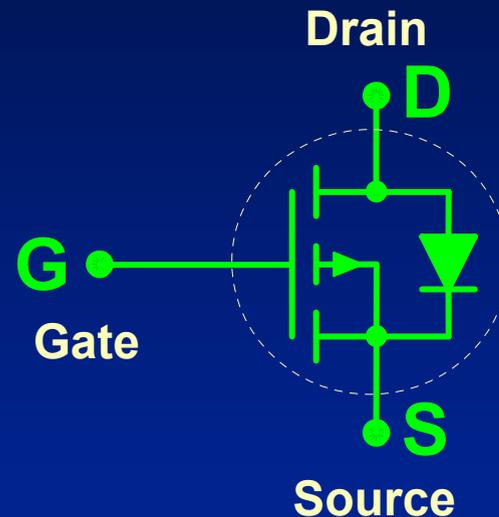
# MOSFET di potenza

## Simboli

col diodo integrale messo in evidenza



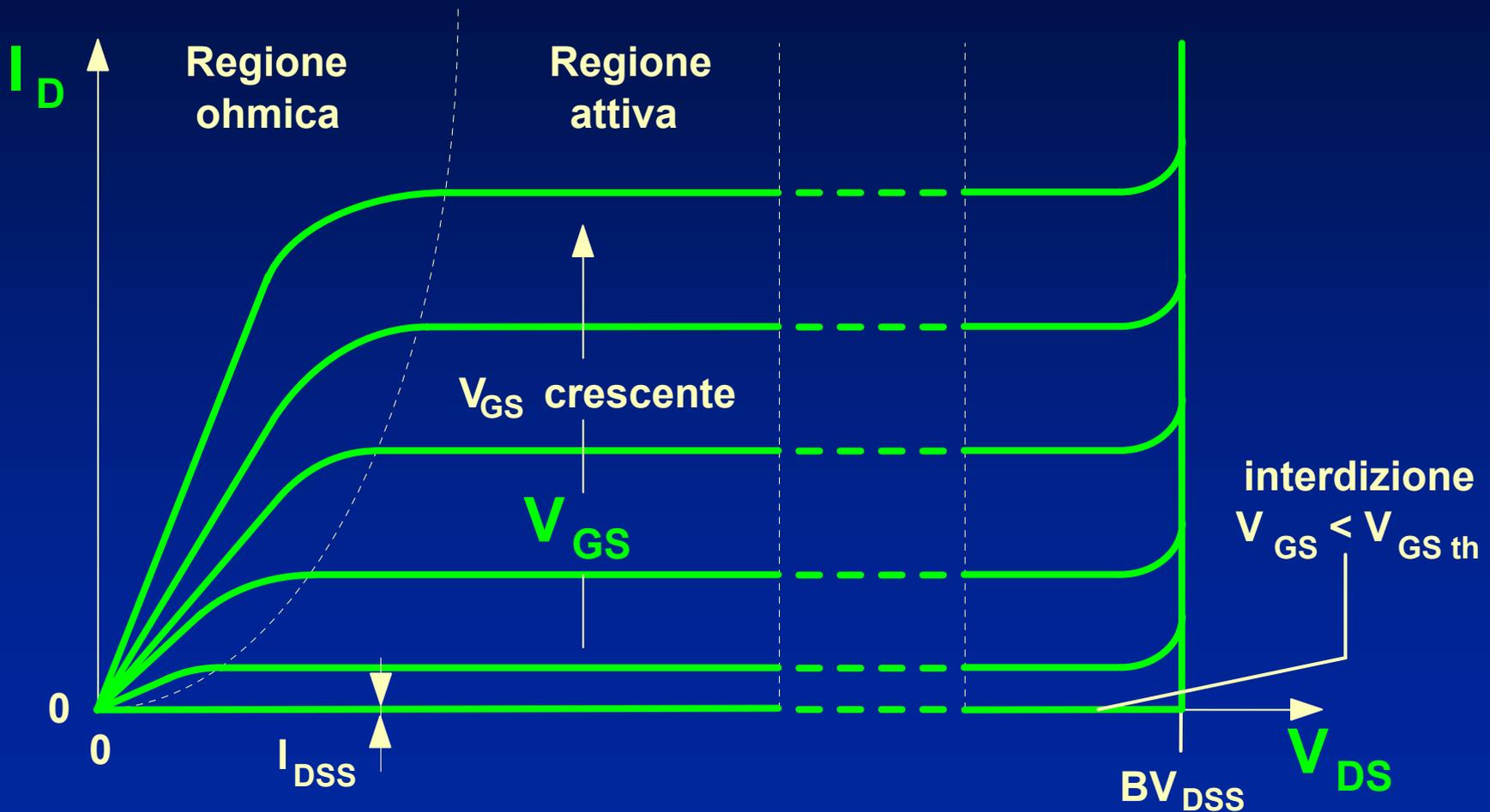
**MOSFET  
a canale n**



**MOSFET  
a canale p**

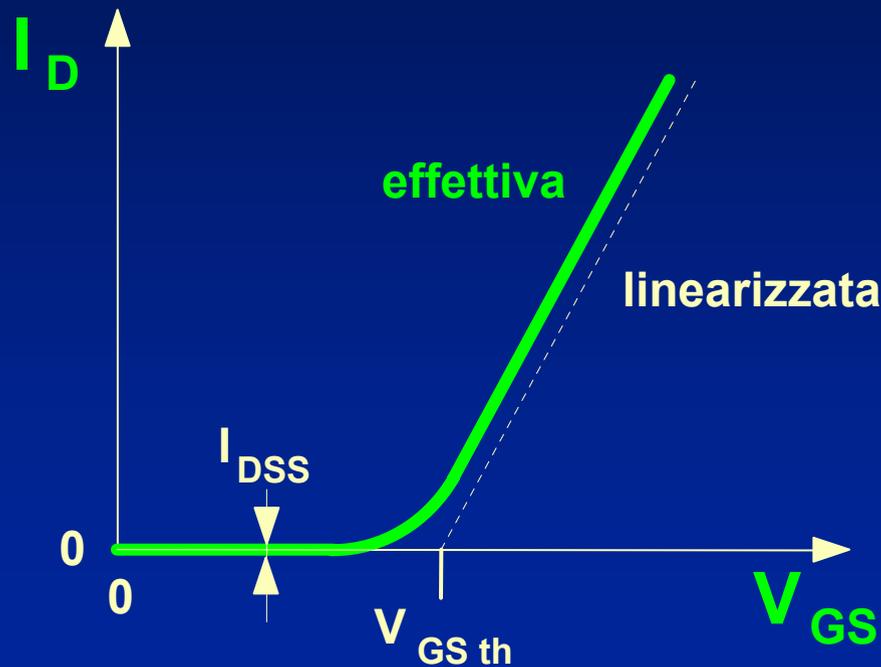
# MOSFET di potenza: Caratteristiche statiche

Caratteristiche statiche ( $I_D$ ,  $V_{DS}$ ) param.  $V_{GS}$



# MOSFET di potenza: Caratteristiche statiche

Caratteristica di trasferimento ( $I_D$ ,  $V_{SG}$ )  
in regione attiva



# MOSFET di potenza: Applicazioni

Caratteristiche dei MOSFET di potenza, usati come **interruttori a conduzione inversa:**

Pilotaggio molto semplice;

**intrinsecamente più veloci** degli altri dispositivi di potenza ma un pò **più costosi** e più sensibili alle **sovratensioni**.

**Cadute in conduzione** maggiori, specie con dispositivi per **alte tensioni**.

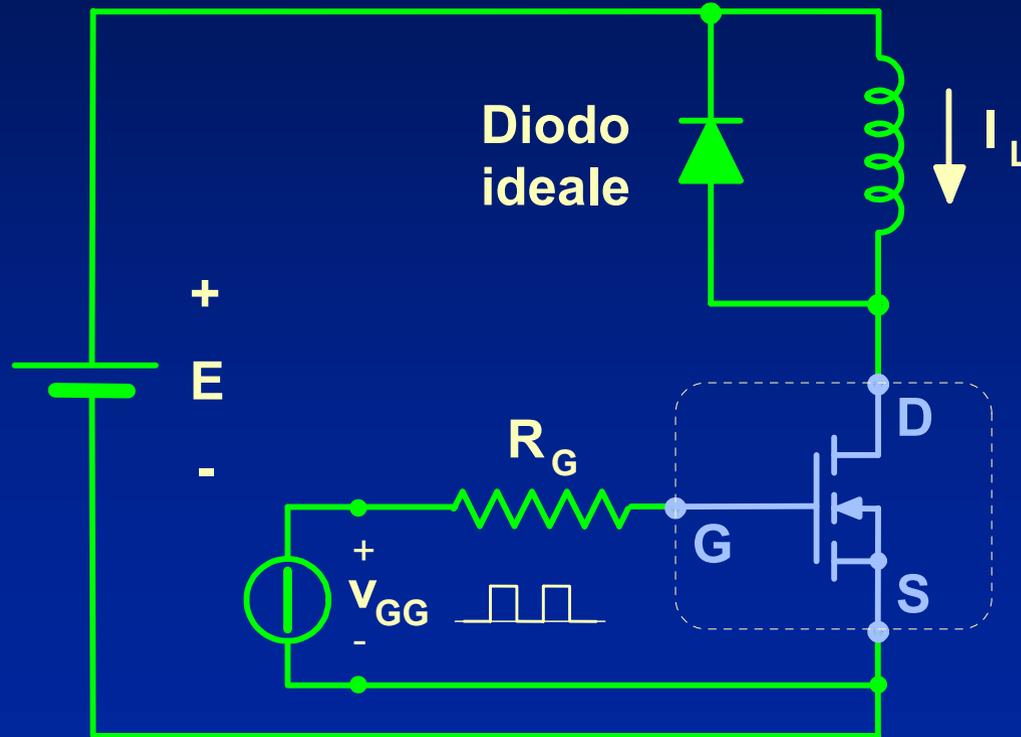
Limiti di correnti e tensioni

da **pochi** Ampere fino a **100 A**

da **poche** decine di Volt fino a circa **1500 V**.

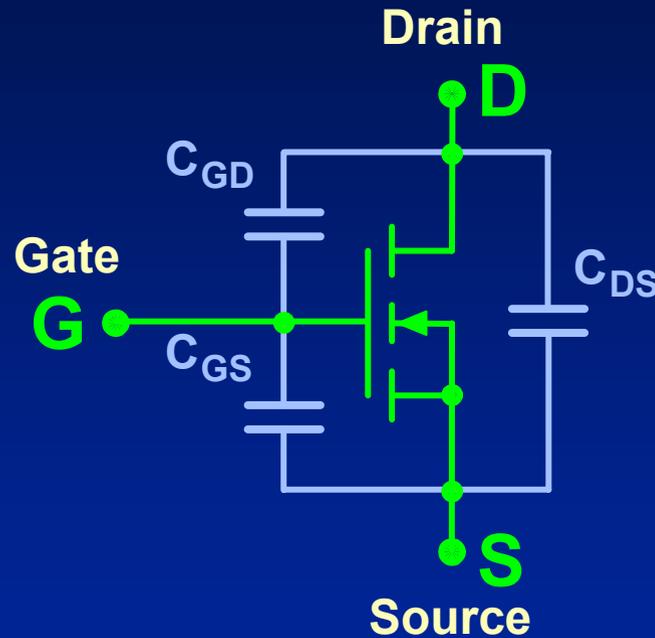
# MOSFET di potenza: Commutazioni

Circuito di prova per le forme d'onda  
e per i tempi di commutazione



# MOSFET di potenza: Commutazioni

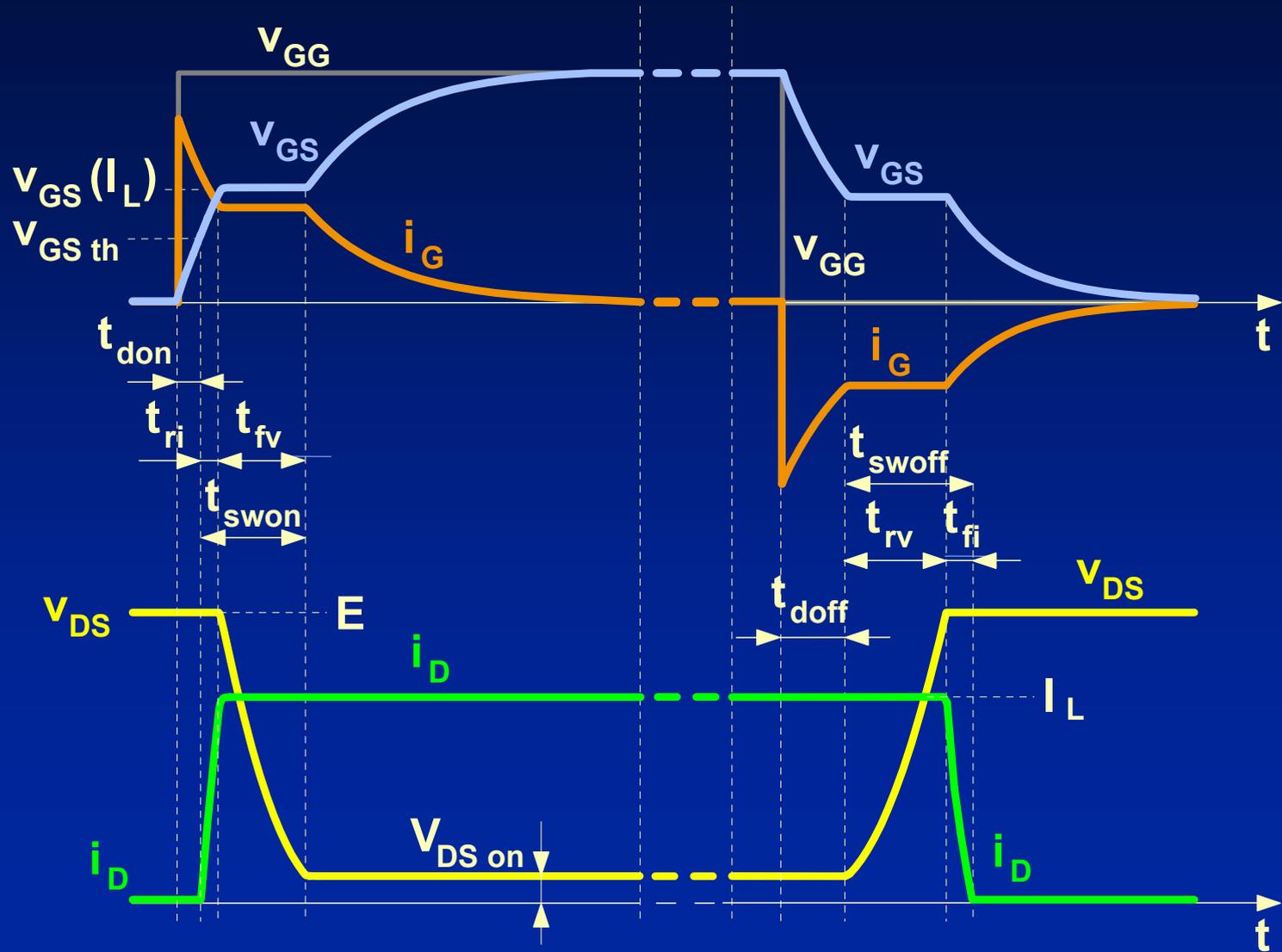
## Capacità Equivalenti



**MOSFET**  
a canale n

# MOSFET di potenza: Commutazioni

## Commutazioni



# MOSFET di potenza: Specifiche

Anche per i **MOSFET di potenza** si **specificano** tre tipi di dati: **limiti massimi assoluti** (**absolute maximum ratings**), **caratteristiche** (**characteristics**), **curve tipiche** (**typical performance curves**) (si vedano le definizioni date trattando dei diodi di potenza).

# MOSFET di potenza: Limiti Massimi

Per un MOSFET di potenza, un esempio di specificazione dei limiti massimi assoluti può essere:

- Absolute maximum ratings

Continuous Drain Current

( $V_{GS}=10\text{ V}$ ,  $T_C=25\text{ °C}$ )

$I_D$  16 A

Continuous Drain Current

( $V_{GS}=10\text{ V}$ ,  $T_C=100\text{ °C}$ )

$I_D$  10 A

Pulsed Drain Current

(repetitive rating) (1)

$I_{DM}$  64 A

# MOSFET di potenza: Limiti Massimi

Power Dissipation ( $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ )	$P_{D25}$	280 W
Linear Derating Factor	$DF$	2.2 W / $^\circ\text{C}$
Gate to Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20\text{ V}$
Single Pulse Avalanche Energy(2)	$E_{AS}$	1000 mJ
Avalanche Current (1)	$I_{AR}$	16 A
Repetitive Avalanche Energy (1)	$E_{AR}$	28 mJ
Peak Diode Recovery dv/dt (3)	$dv/dt$	3.0 V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{STG}$	-55/+150 $^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (for 10 s, 1.6 mm from case)		300 $^\circ\text{C}$
Mounting Torque (6-32 or M3 screw)		1.1 Nm

# MOSFET di potenza: Caratteristiche

Per un MOSFET di potenza, un esempio di specificazione delle caratteristiche **garantite** e **tipiche** può essere:

## - Thermal resistance

$R_{\theta JC}$	Junction to Case	Max	0.45 °C /W
$R_{\theta CS}$	Case to Sink, Flat, Greased Surface	Typ	0.24 °C /W
$R_{\theta JA}$	Junction to Ambient	Max	40 °C /W

## - Electrical characteristics @ $T_C=25\text{ °C}$ (unless otherwise specified)

$BV_{DSS}$	@ $V_{GS}=0V, I_D=250\text{ }\mu A$	Min.	600 V
------------	-------------------------------------	------	-------

# MOSFET di potenza: Caratteristiche

$\Delta BV_{DSS}/\Delta T_J$	@ $T_J=25\text{ }^\circ\text{C}, I_D=1\text{ mA}$	Typ	0.83 V/ $^\circ\text{C}$
$R_{DS(on)}$	@ $V_{GS}=10\text{ V}, I_D=9.6\text{ A}$ (4)	Max	0.40 $\Omega$
$V_{GS(th)}$	@ $V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\text{ }\mu\text{A}$	Min/Max	2/4 V
$g_{fs}$	(Forward transconductance)		
	@ $V_{DS}=50\text{ V}, I_D=9.6\text{ A}$ (4)	Min	13 S
$I_{DSS}$	@ $V_{DS}=600\text{ V}, V_{GS}=0\text{ V}$	Max	100 $\mu\text{A}$
$I_{DSS}$	@ $V_{DS}=480\text{ V},$ $V_{GS}=0\text{ V}, T_J=125\text{ }^\circ\text{C}$	Max	500 $\mu\text{A}$
$I_{GSS}$	Gate to Source Forward Leakage		
	@ $V_{GS}=20\text{ V}$	Max	100 nA
$I_{GSS}$	Gate to Source Reverse Leakage		
	@ $V_{GS}= -20\text{ V}$	Max	-100 nA

# MOSFET di potenza: Caratteristiche

$Q_G$	@ $I_D=16\text{ A}$ , $V_{DS}=360\text{ V}$ , $V_{GS}=10\text{ V}$	Max 210 nC
$Q_{GS}$	@ as above	Max 26 nC
$Q_{GD}$	@ as above	Max 110 nC
$t_{d(on)}$	@ $E=300\text{ V}$ , $I_D=16\text{ A}$ , $R_G=4.5\ \Omega$ , $R_D=18\ \Omega$	Typ 19 ns
$t_r$	@ as above	Typ 54 ns
$t_{d(off)}$	@ as above	Typ 110 ns
$t_f$	@ as above	Typ 56 ns
$L_D$		Typ 5 nH
$L_S$		Typ 13 nH

# MOSFET di potenza: Caratteristiche

$C_{ISS}$	@ $V_{GS}=0$ V, $V_{DS}=25$ V, f=1 MHz	Typ 3900 pF
$C_{OSS}$	@ as above	Typ 440 pF
$C_{RSS}$	@ as above	Typ 98 pF

## – Source-Drain (Body Diode) Ratings and Characteristics

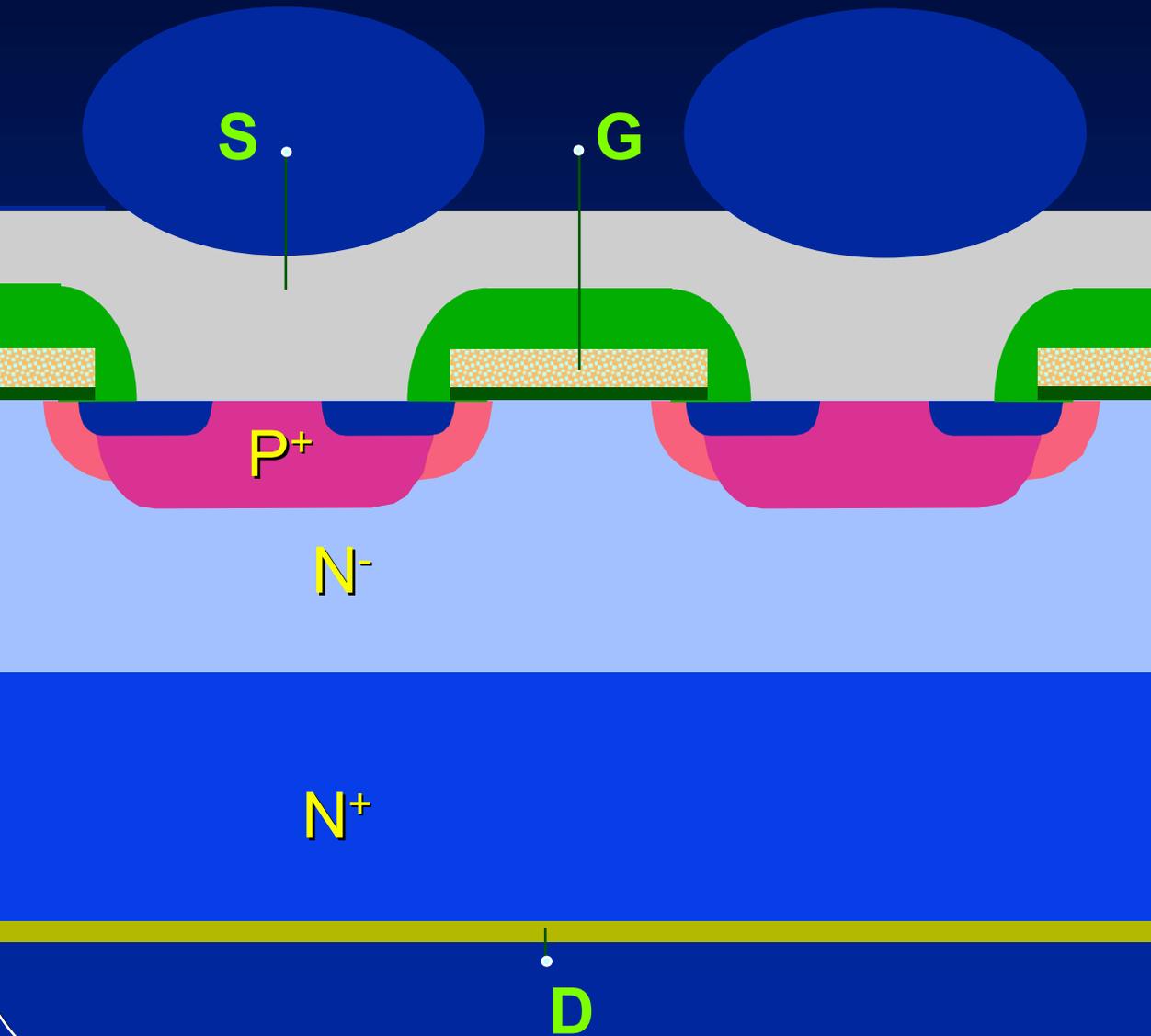
$I_S$	Continuous Source Current	Max 16 A
$I_{SM}$	Pulsed Source Current	Max 64 A
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage @ $V_{GS}=0$ V, $I_S=16$ A, $T_J=25$ °C	Max 1.8 V

# MOSFET di potenza: Caratteristiche

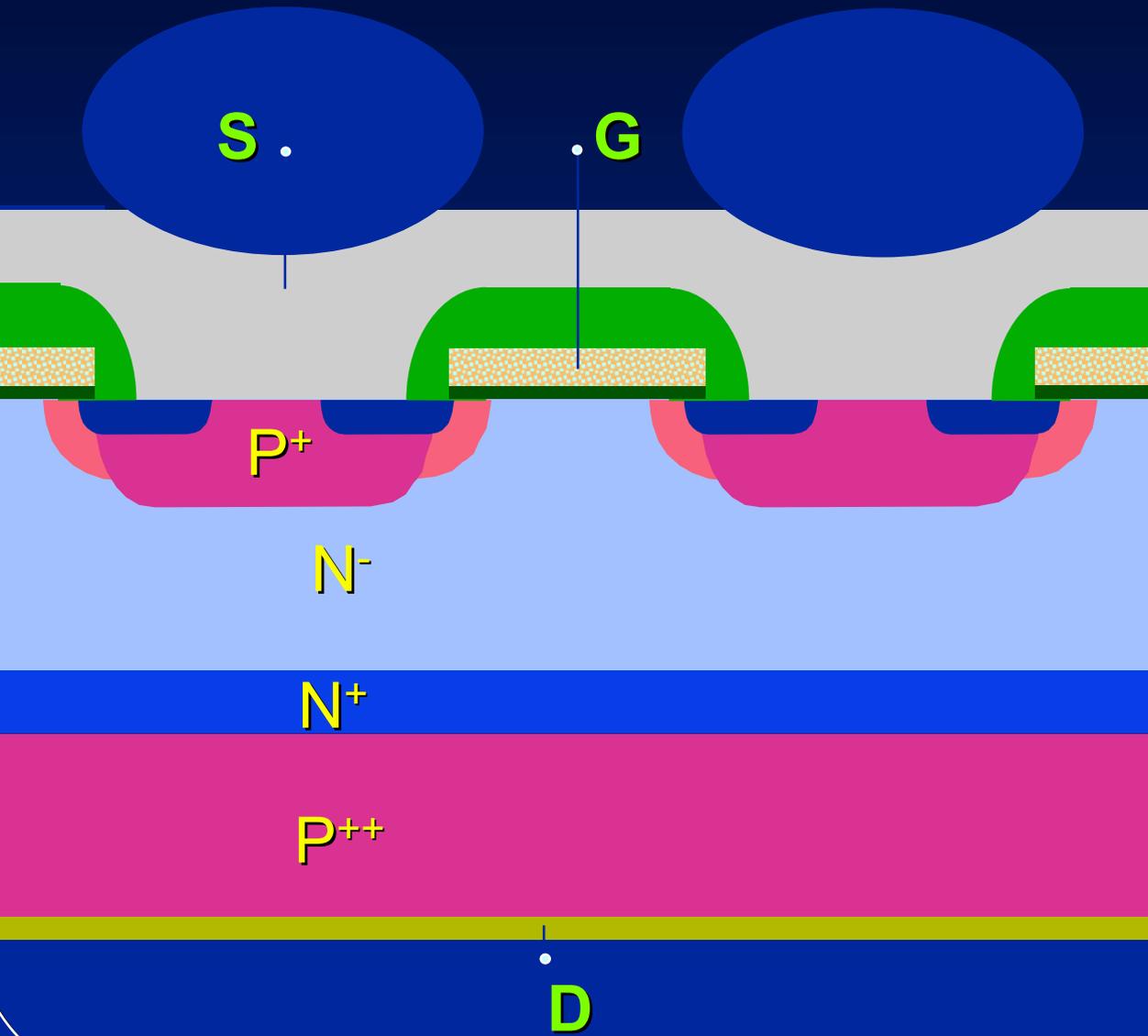
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time @ $I_S=16$ A, $T_J=25$ °C, $di/dt=100$ A/ $\mu$ s	Max 920 ns Typ 610 ns
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge @ as above	Max 9.9 $\mu$ C Typ 6.6 $\mu$ C
$t_{on}$	Forward Turn-On Time: intrinsic turn-on time is negligible, turn on is dominated by $L_S+L_D$	

# 1.7 - IGBT

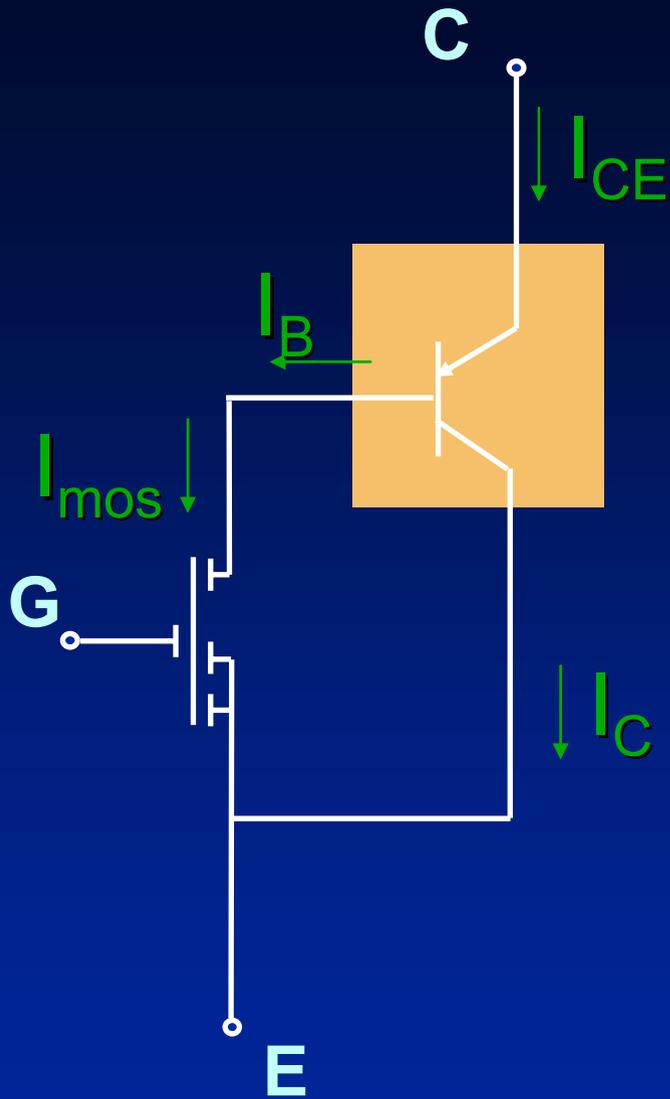
# Struttura PMOS



# Struttura IGBT

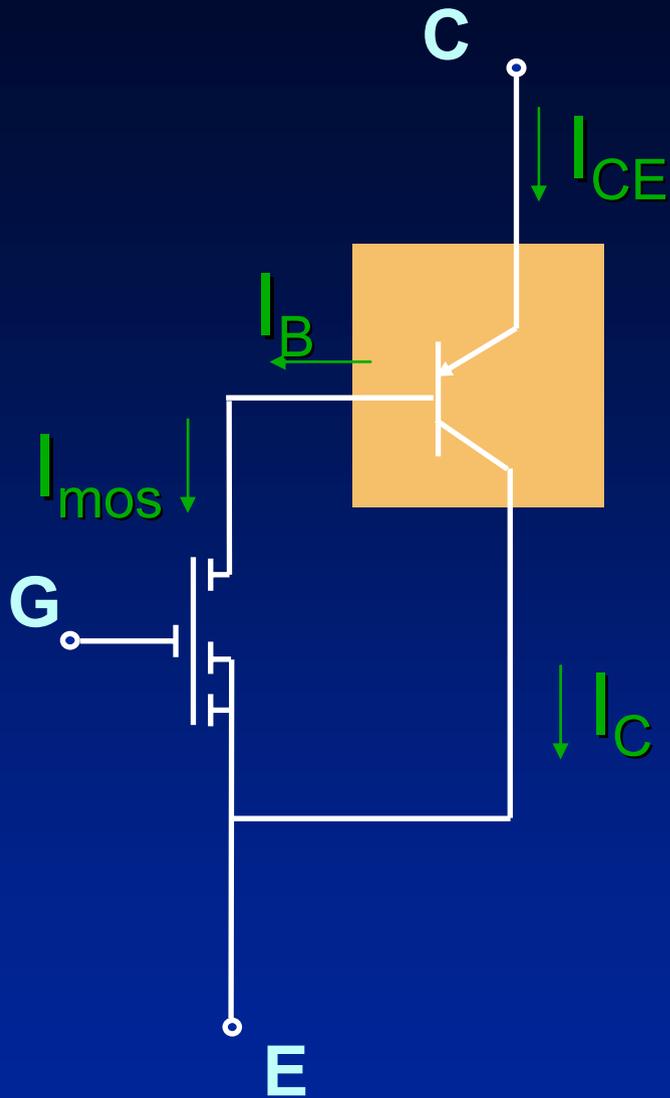






$$\beta_{PNP} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_{mos}}$$

$$I_{CE} = I_C + I_{mos}$$



$$\beta_{PNP} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_{mos}}$$

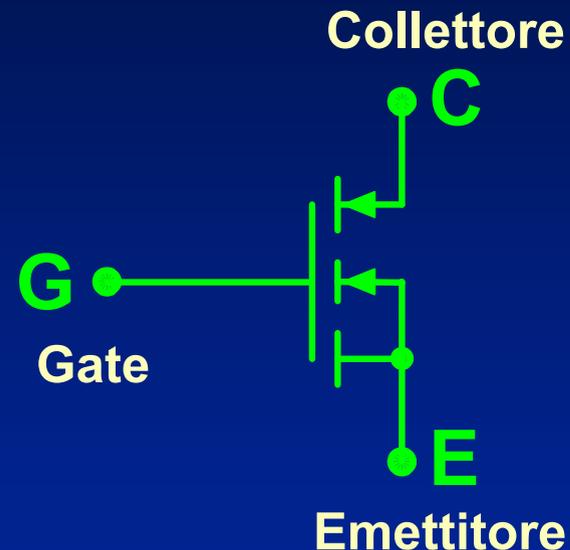
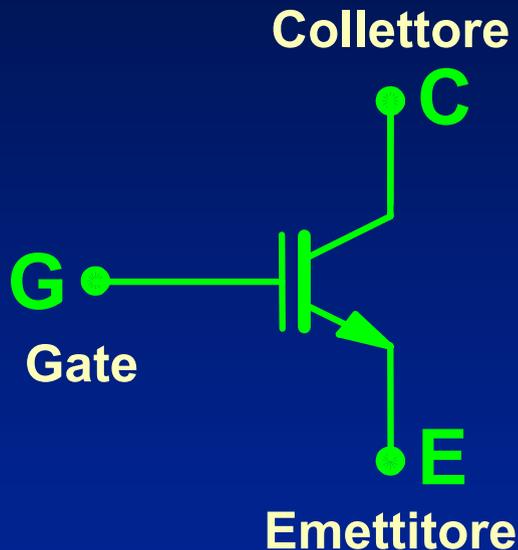
$$I_{CE} = I_C + I_{mos}$$

$$I_{CE} = I_{mos} (1 + \beta_{PNP})$$

- L'IGBT é un dispositivo a conduzione “mista”
- Le caratteristiche di uscita sono determinate dal guadagno del PNP (bassa resistenza di uscita alle alte tensioni)
- Le caratteristiche di ingresso sono analoghe a quelle dei MOS di potenza (pilotaggio in tensione)

# IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

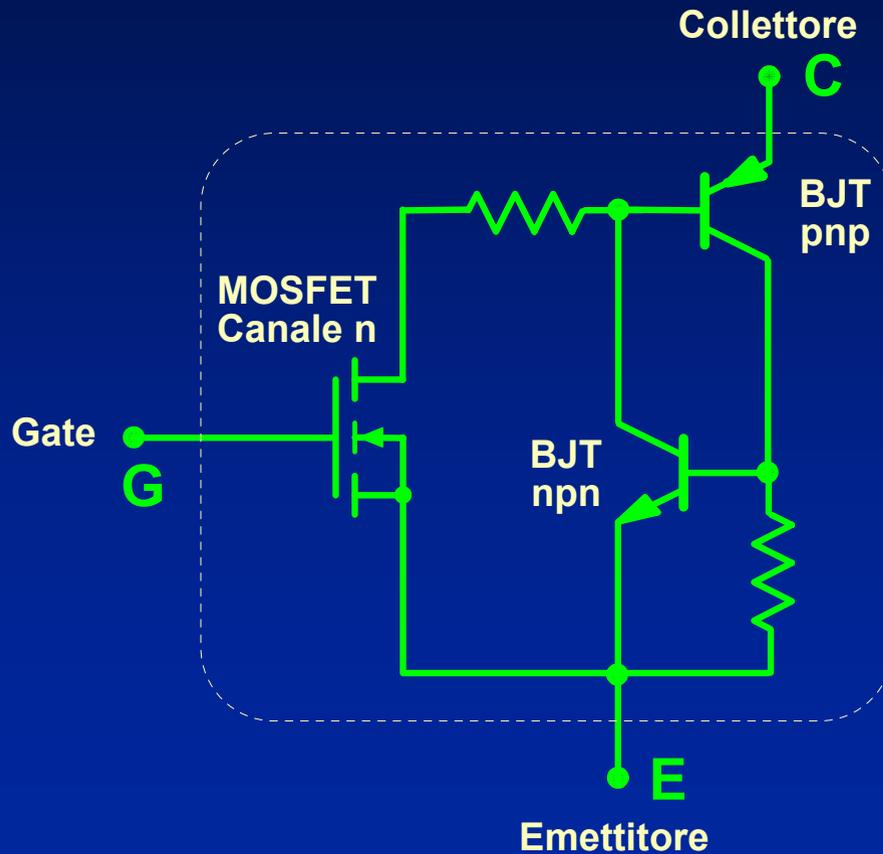
## Simboli



Simboli alternativi di  
IGBT  
a canale n

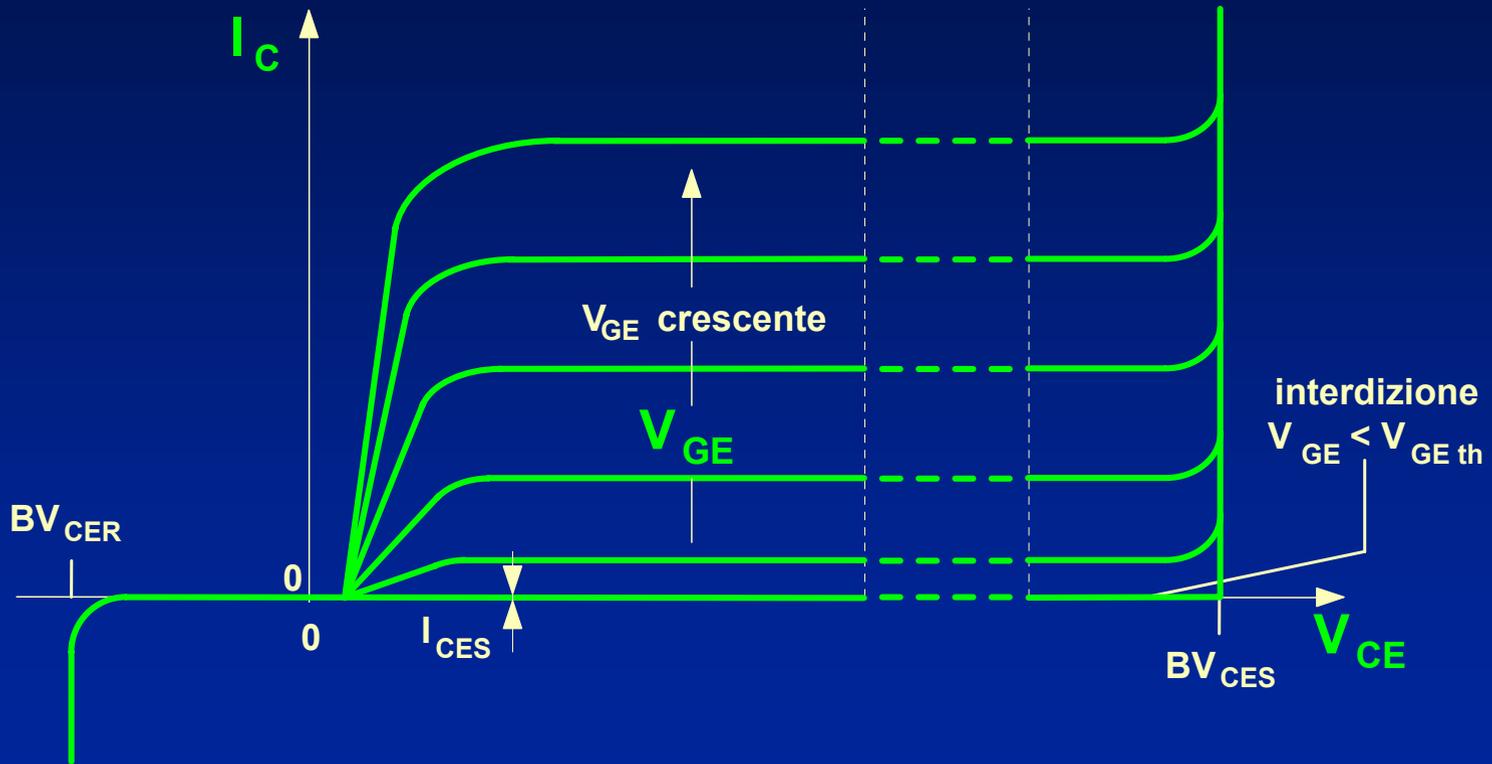
# IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

## Struttura interna equivalente



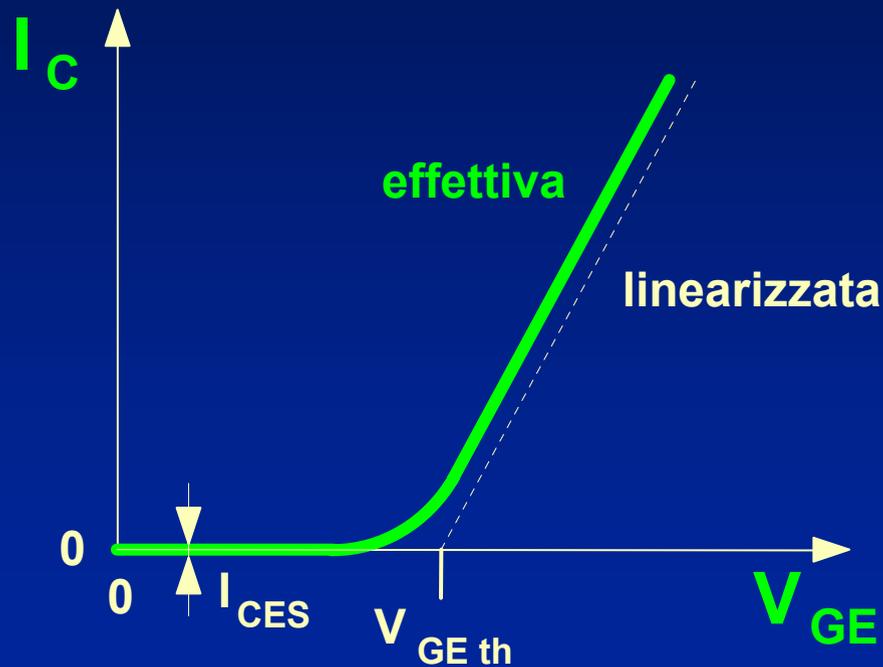
# IGBT

Caratteristiche statiche ( $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) param.  $V_{GE}$



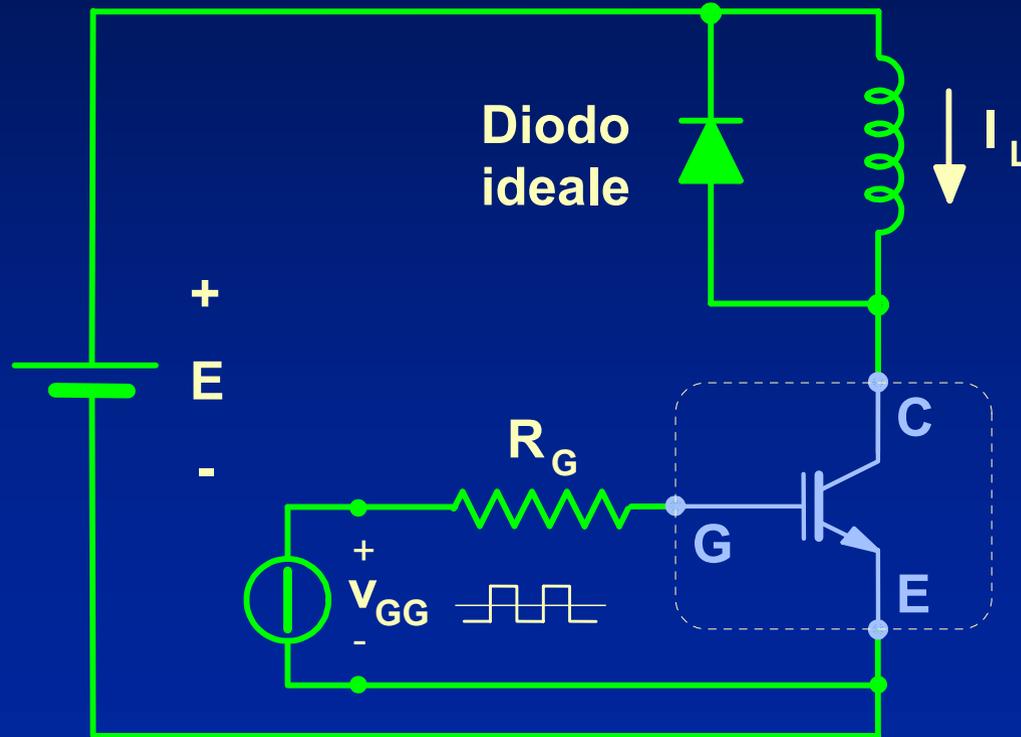
# IGBT

Caratteristica di trasferimento ( $I_D$ ,  $V_{SG}$ )  
in regione attiva



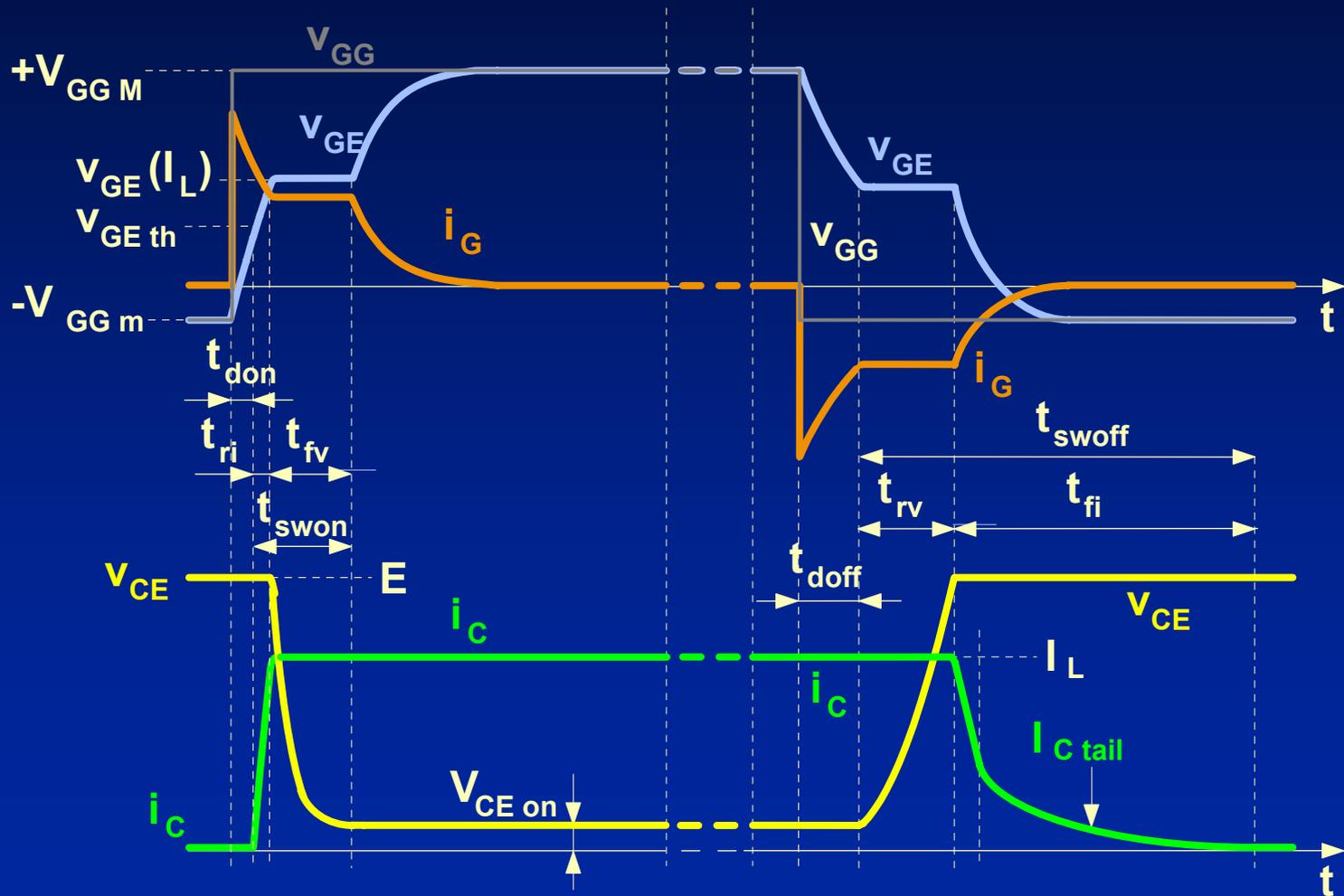
# IGBT

Circuito di prova per le forme d'onda  
e per i tempi di commutazione



# IGBT

## Commutazioni



# IGBT: Specifiche

Anche per gli **IGBT** si **specificano** tre tipi di dati: **limiti massimi assoluti (absolute maximum ratings)**, **caratteristiche (characteristics)**, **curve tipiche (typical performance curves)** (si vedano le definizioni date trattando dei diodi di potenza).

# IGBT: Limiti Massimi

Per un IGBT con diodo in antiparallelo contenuto nello stesso involucro, un esempio di specificazione dei limiti massimi assoluti può essere:

## - Absolute maximum ratings

Collector-emitter voltage (gate shorted)

( $V_{GE}=0$  V,  $T_J=25$  °C to  $150$  °C )  $V_{CES}$  1000 V

Collector-gate voltage ( $R_{GE}=1$  M $\Omega$ ,

$T_J=25$  °C to  $150$  °C )  $V_{CGR}$  1000 V

Gate-emitter voltage (collector shorted)

continuous ( $V_{CE}=0$  V)  $V_{GES}$   $\pm 20$  V

Gate-emitter voltage (collector shorted)

transient ( $V_{CE}=0$  V)  $V_{GES}$   $\pm 30$  V

# IGBT: Limiti Massimi

Per un IGBT con diodo in antiparallelo contenuto nello stesso involucro, un esempio di specificazione dei limiti massimi assoluti può essere:

## - Absolute maximum ratings

Collector-emitter voltage (gate shorted)

( $V_{GE}=0$  V,  $T_J=25$  °C to 150 °C )  $V_{CES}$  1000 V

Collector-gate voltage ( $R_{GE}=1$  M $\Omega$ ,

$T_J=25$  °C to 150 °C )  $V_{CGR}$  1000 V

Gate-emitter voltage (collector shorted)

continuous ( $V_{CE}=0$  V)  $V_{GES}$   $\pm 20$  V

Gate-emitter voltage (collector shorted)

transient ( $V_{CE}=0$  V)  $V_{GES}$   $\pm 30$  V

# IGBT: Limiti Massimi

Continuous Drain Current

( $V_{GS}=10\text{ V}$ ,  $T_C=25\text{ °C}$ )  $I_D$  16 A

Continuous Drain Current

( $V_{GS}=10\text{ V}$ ,  $T_C=100\text{ °C}$ )  $I_D$  10 A

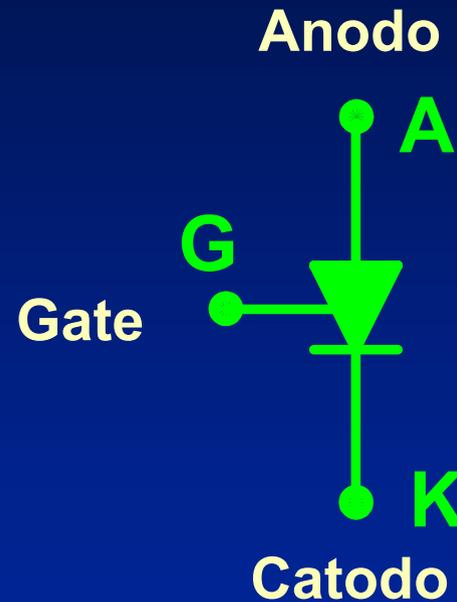
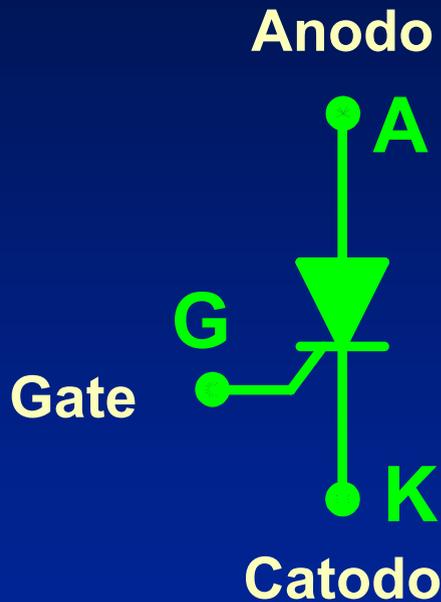
Pulsed Drain Current

(repetitive rating) (1)  $I_{DM}$  64 A

# 1.8 - SCR

# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

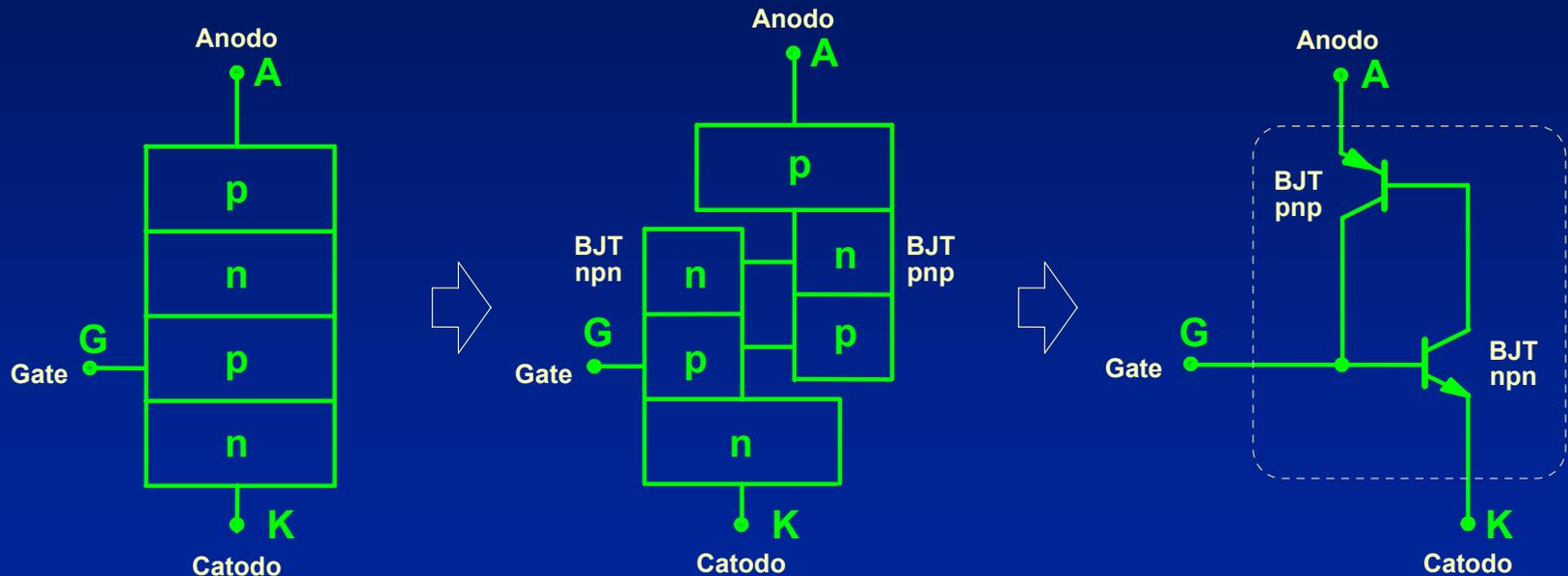
## Simboli



Simboli alternativi dell'SCR

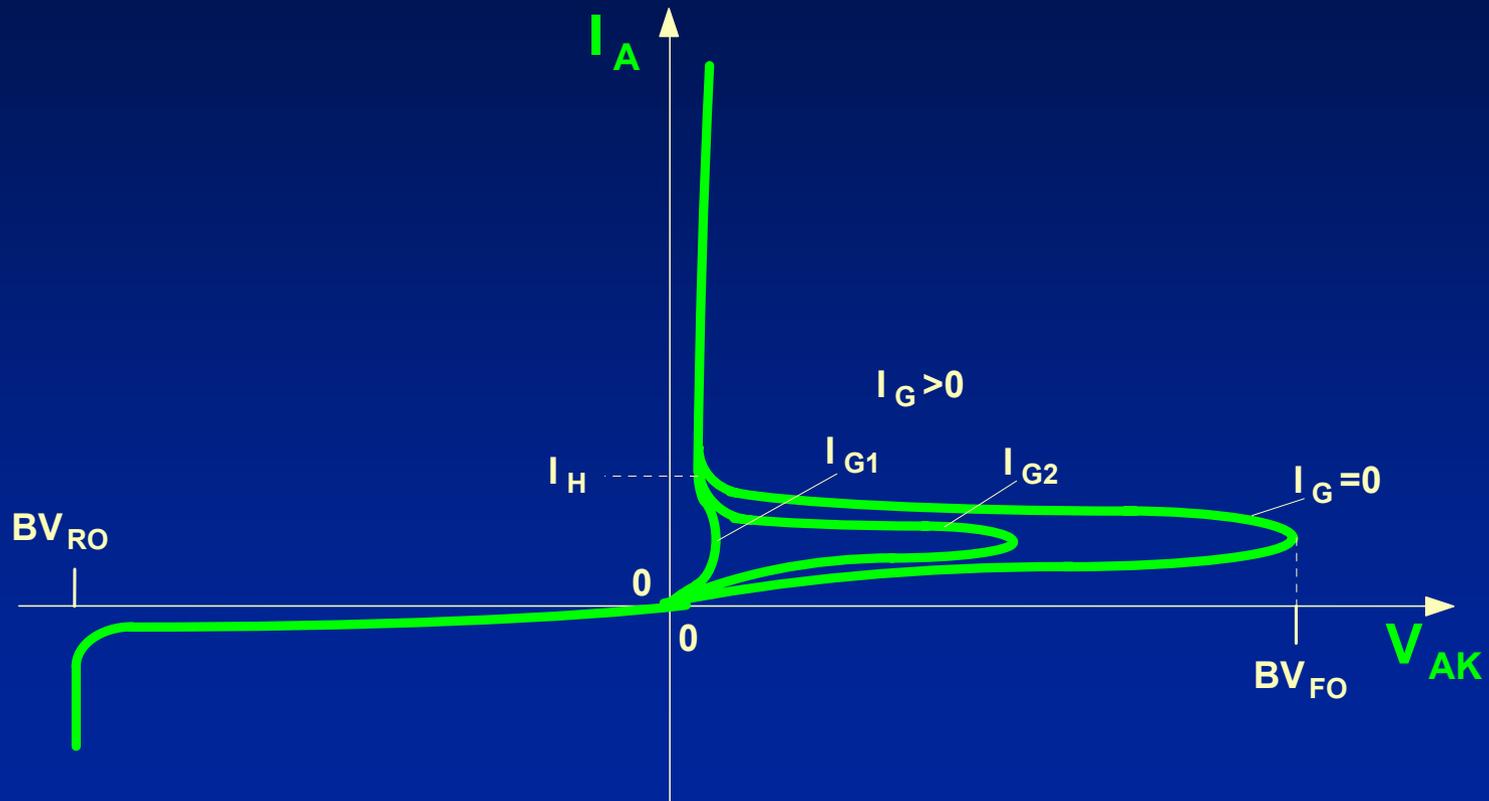
# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Schema interno equivalente  
derivato dalla struttura a quattro strati pnpn



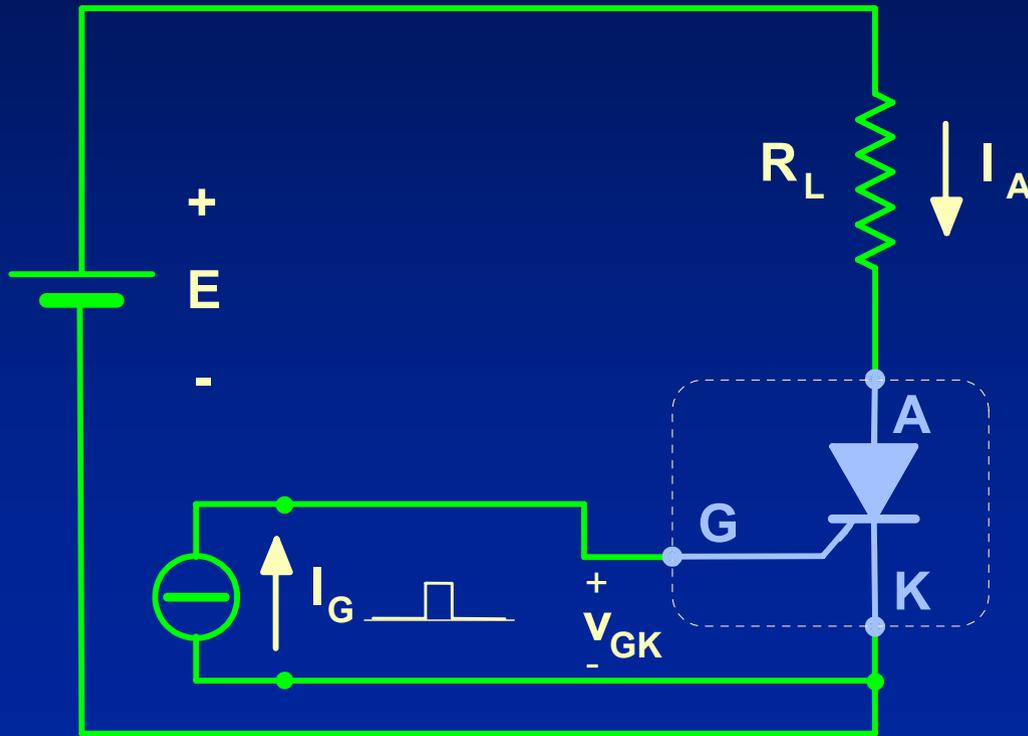
# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Caratteristiche statiche ( $I_A$ ,  $V_{AK}$ ) param.  $I_G$



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

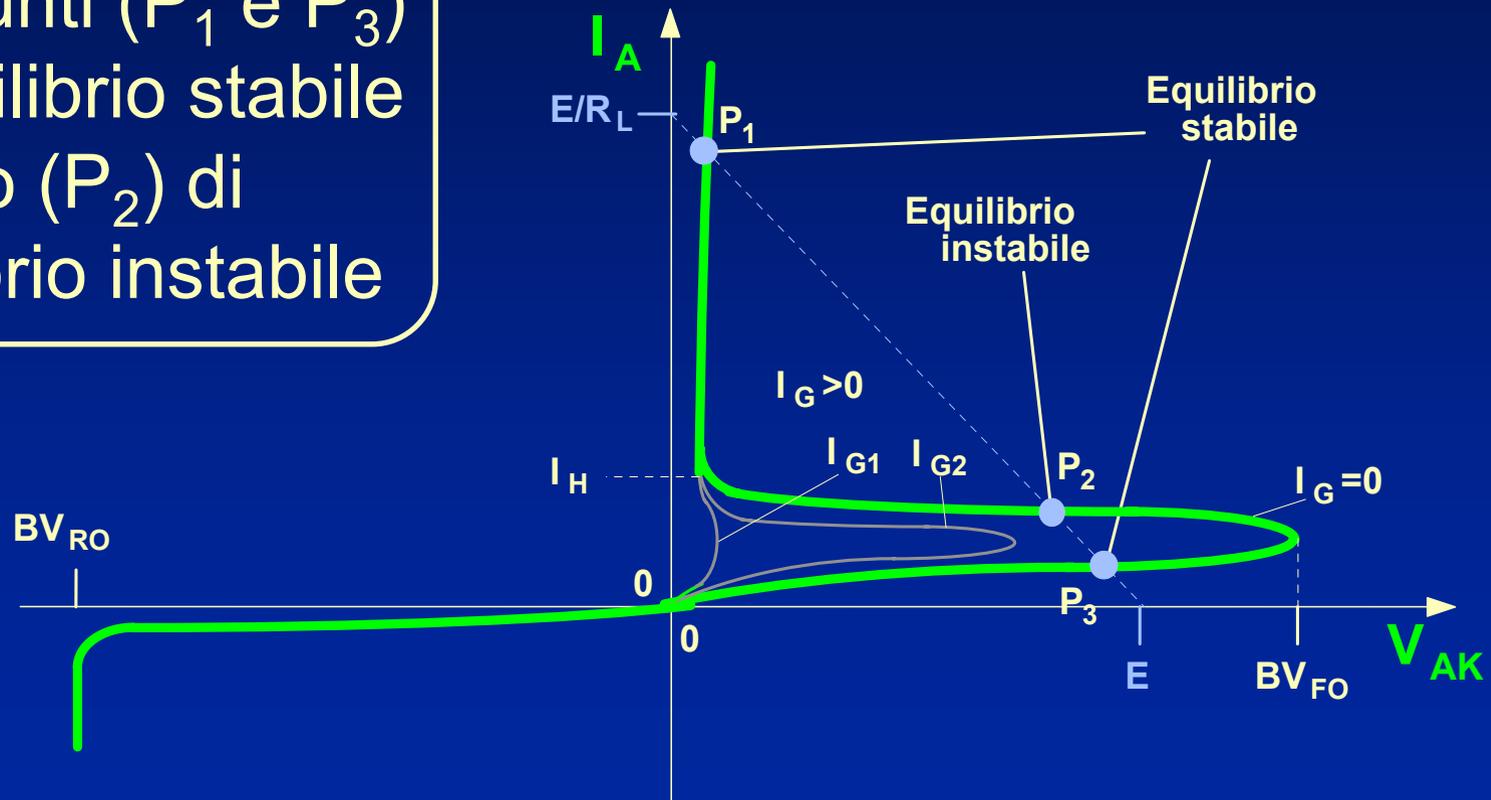
Circuito di prova per illustrare l'innesco ed il comportamento bistabile



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Punti di equilibrio con  $I_G = 0$

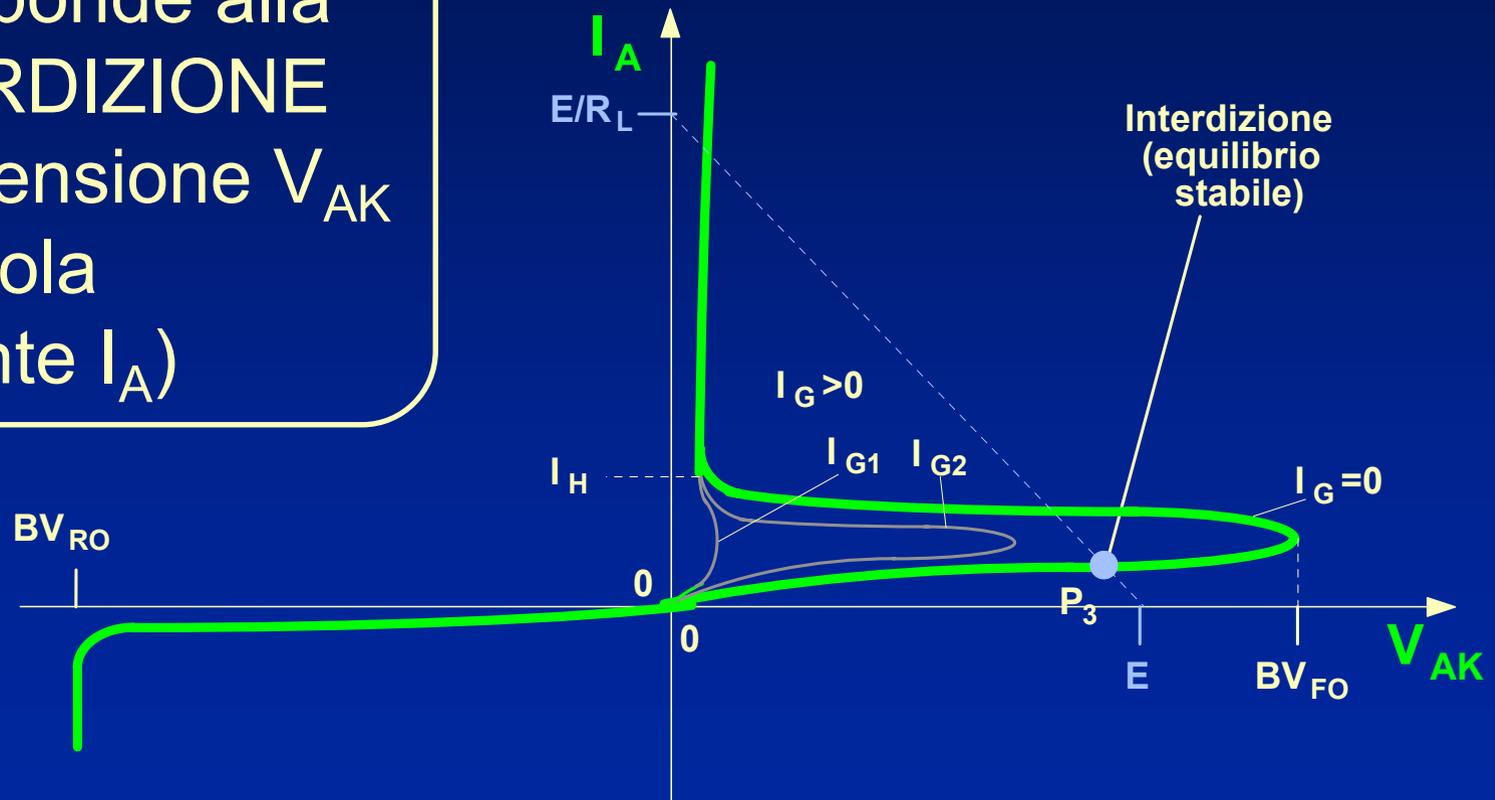
Con  $I_G = 0$  vi sono due punti ( $P_1$  e  $P_3$ ) di equilibrio stabile ed uno ( $P_2$ ) di equilibrio instabile



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Condizione di interdizione  $P_3$  ( $I_G = 0$ )

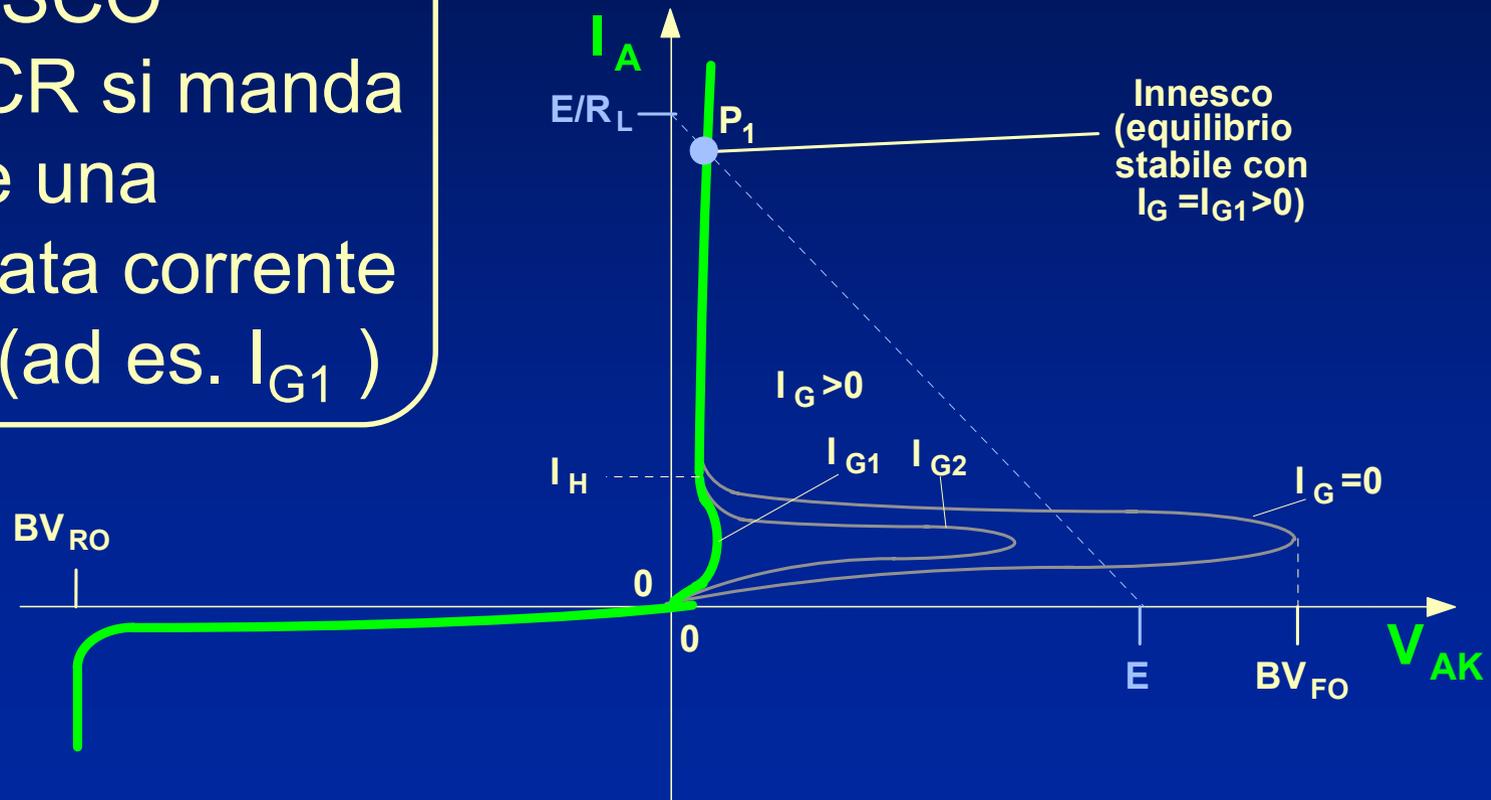
Il punto  $P_3$   
corrisponde alla  
**INTERDIZIONE**  
(alta tensione  $V_{AK}$   
e piccola  
corrente  $I_A$ )



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Innesco (con  $I_G = I_{G1} > 0$ )

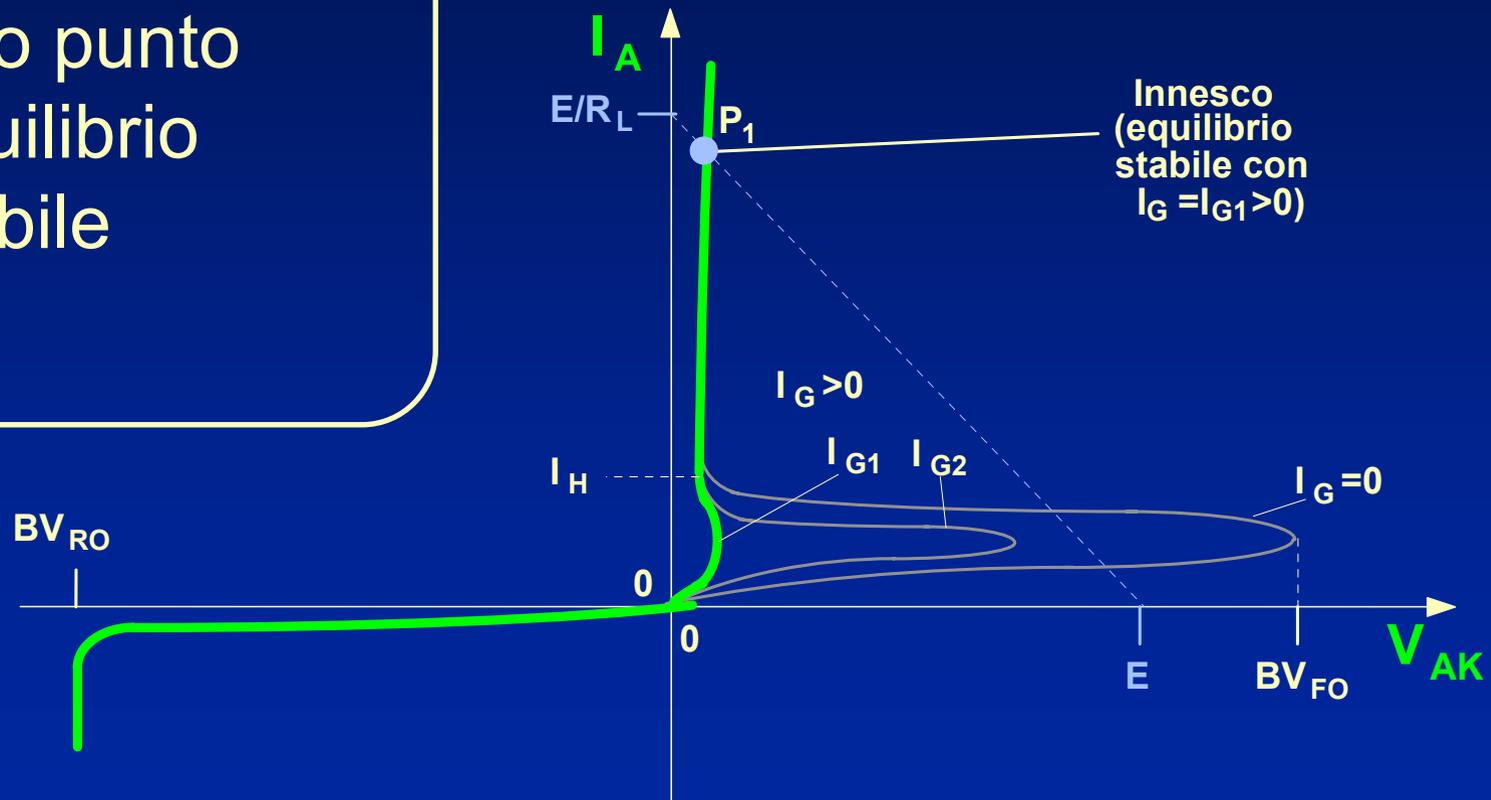
Per causare l'INNESCO dell'SCR si manda in gate una adeguata corrente  $I_G > 0$  (ad es.  $I_{G1}$ )



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Innesco (con  $I_G = I_{G1} > 0$ )

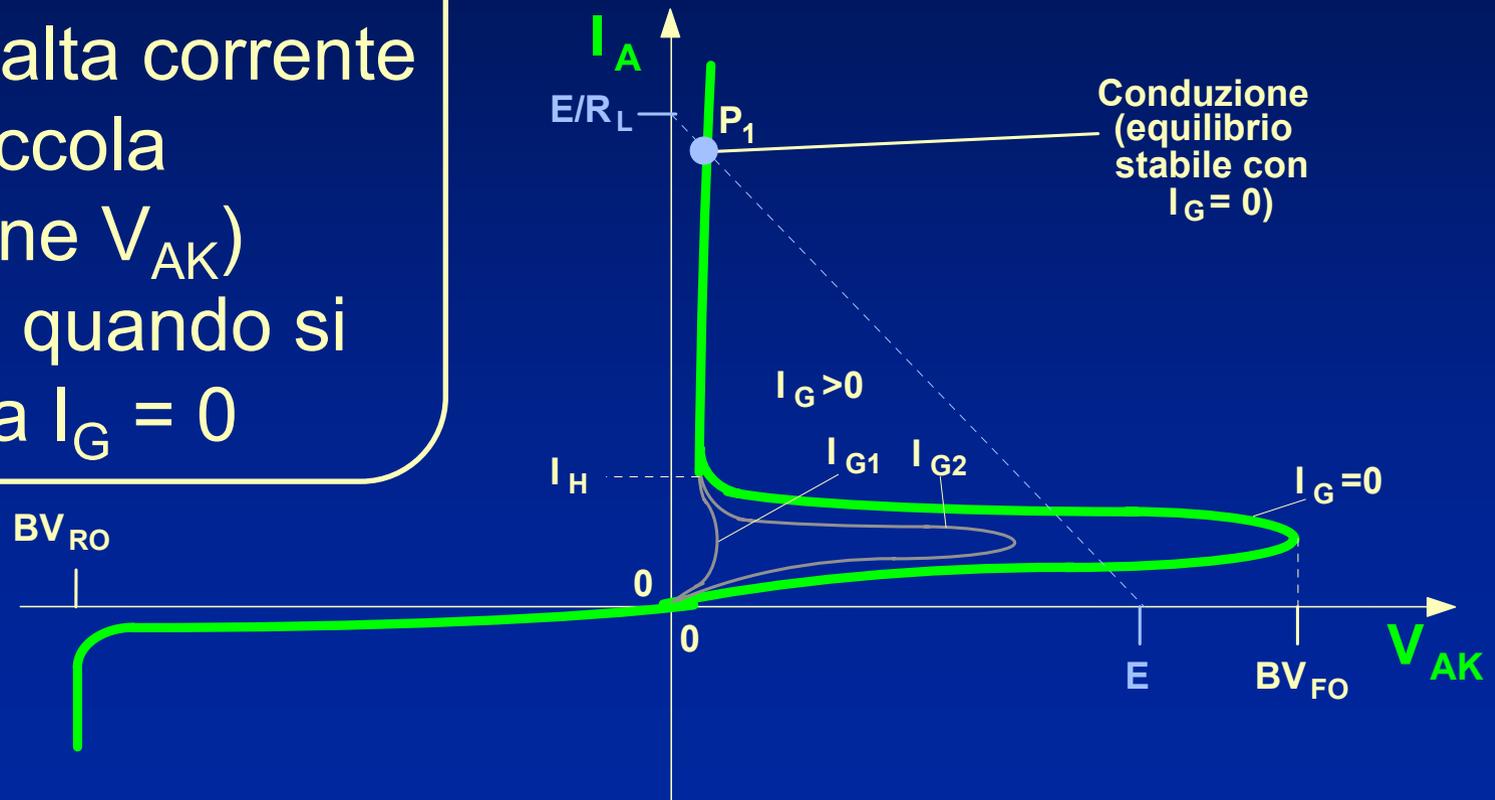
In tali condizioni,  
l'unico punto  
di equilibrio  
possibile  
è  $P_1$



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

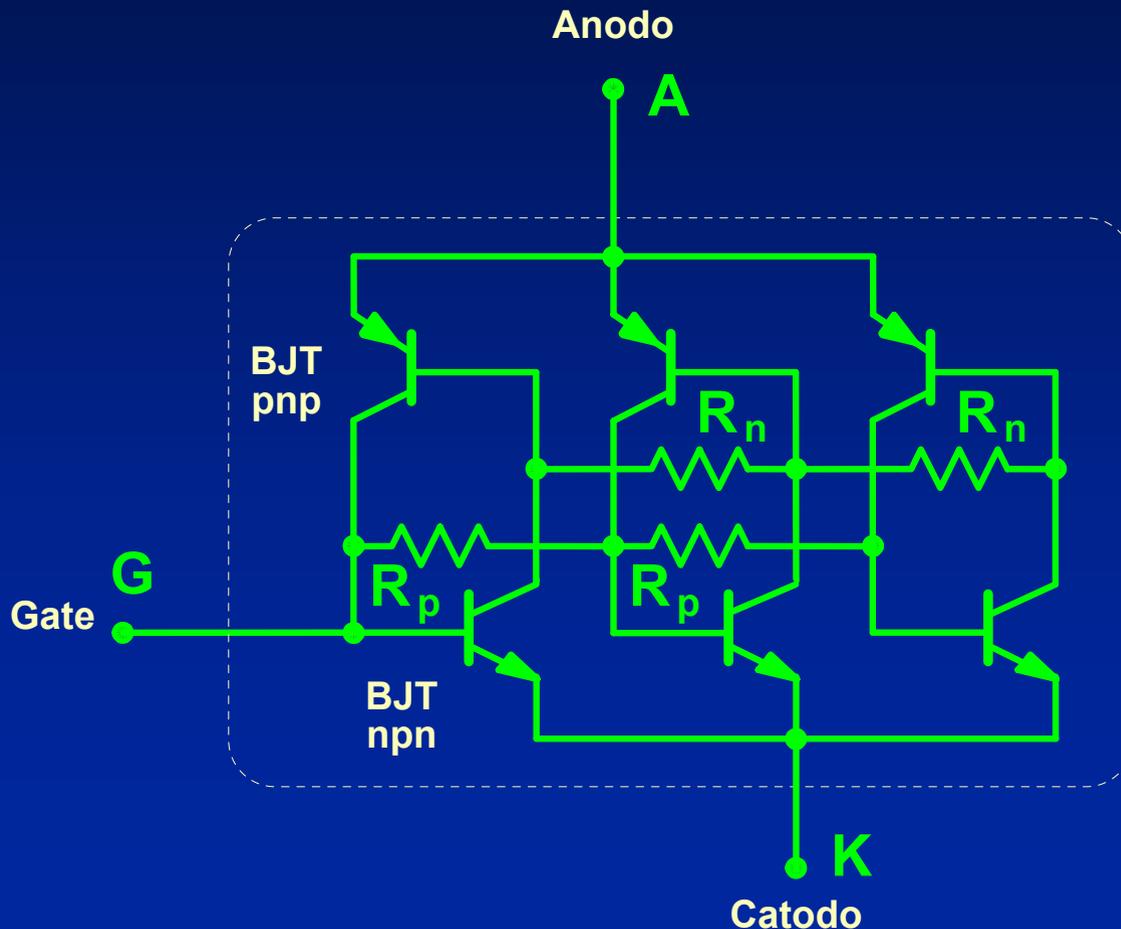
Condizione di conduzione  $P_1$  ( $I_G = 0$ )

L'SCR rimane in CONDUZIONE, in  $P_1$  (alta corrente  $I_A$  e piccola tensione  $V_{AK}$ ) anche quando si torna a  $I_G = 0$



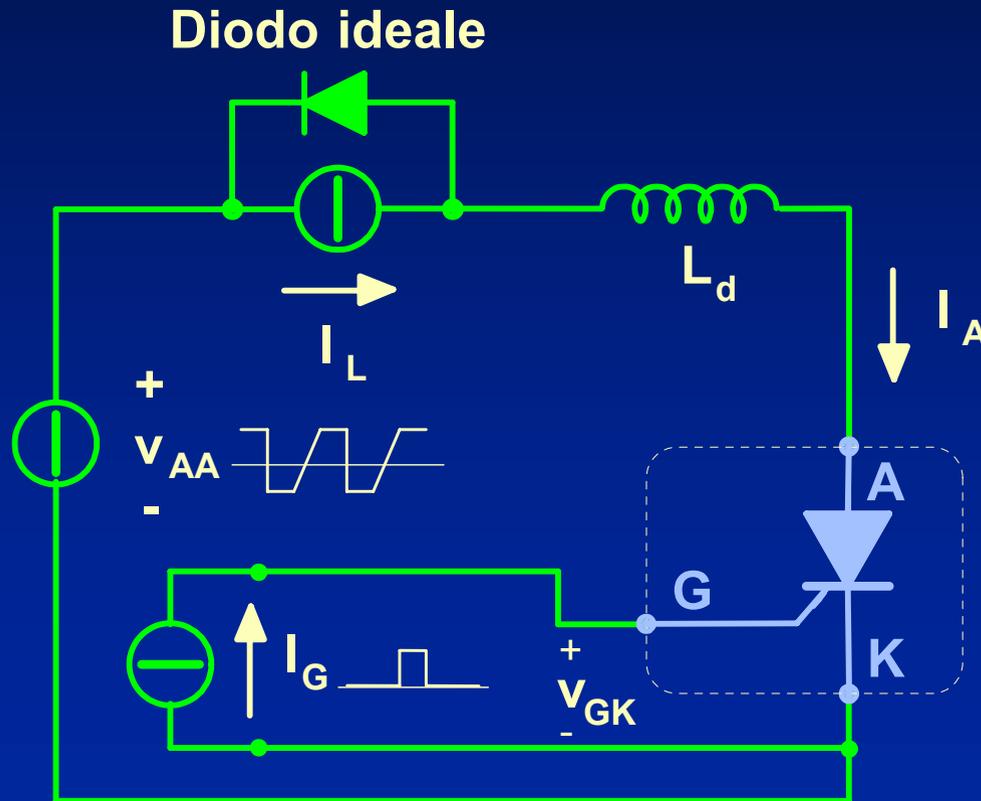
# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Schema interno equivalente di principio corrispondente alla struttura distribuita dell'SCR



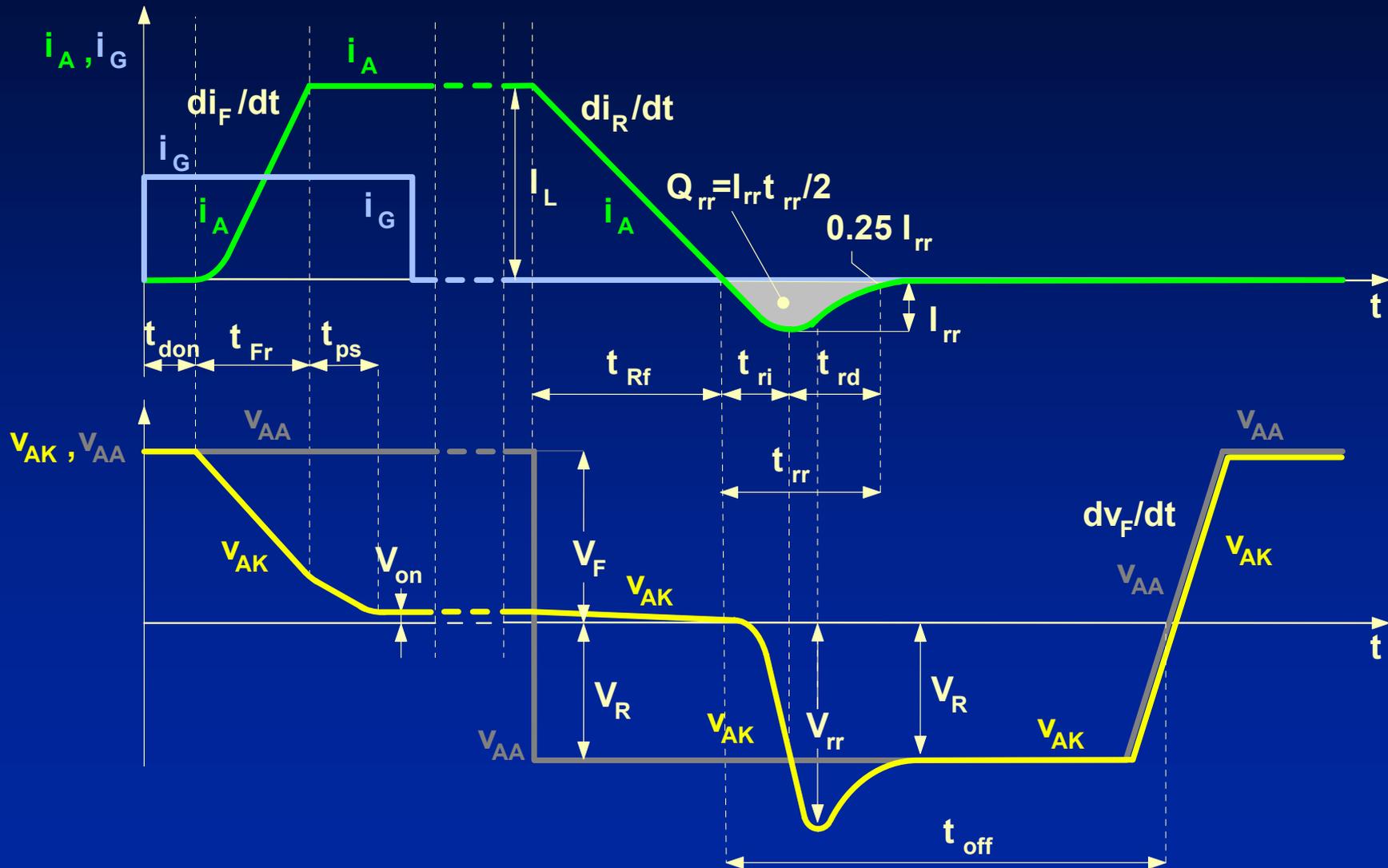
# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Circuito di prova per le forme d'onda e per i tempi di commutazione



# SCR (Silicon Controlled Rectifier)

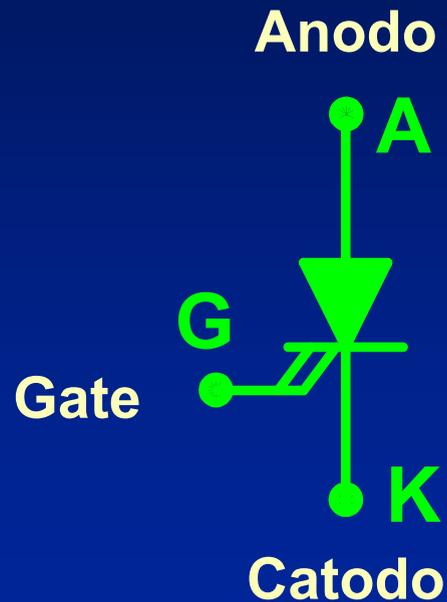
## Commutazioni



# 1.9 - GTO

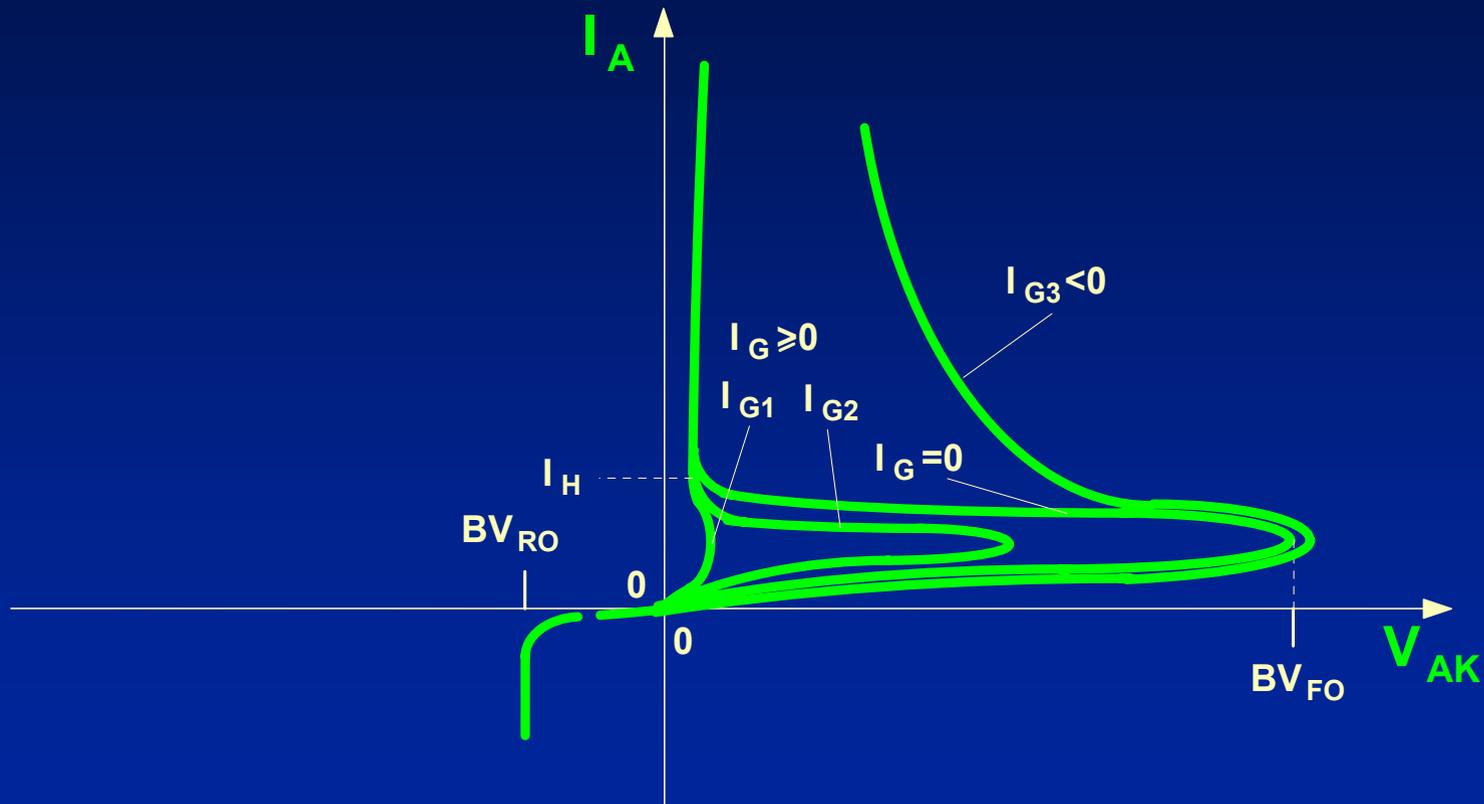
# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Simbolo



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

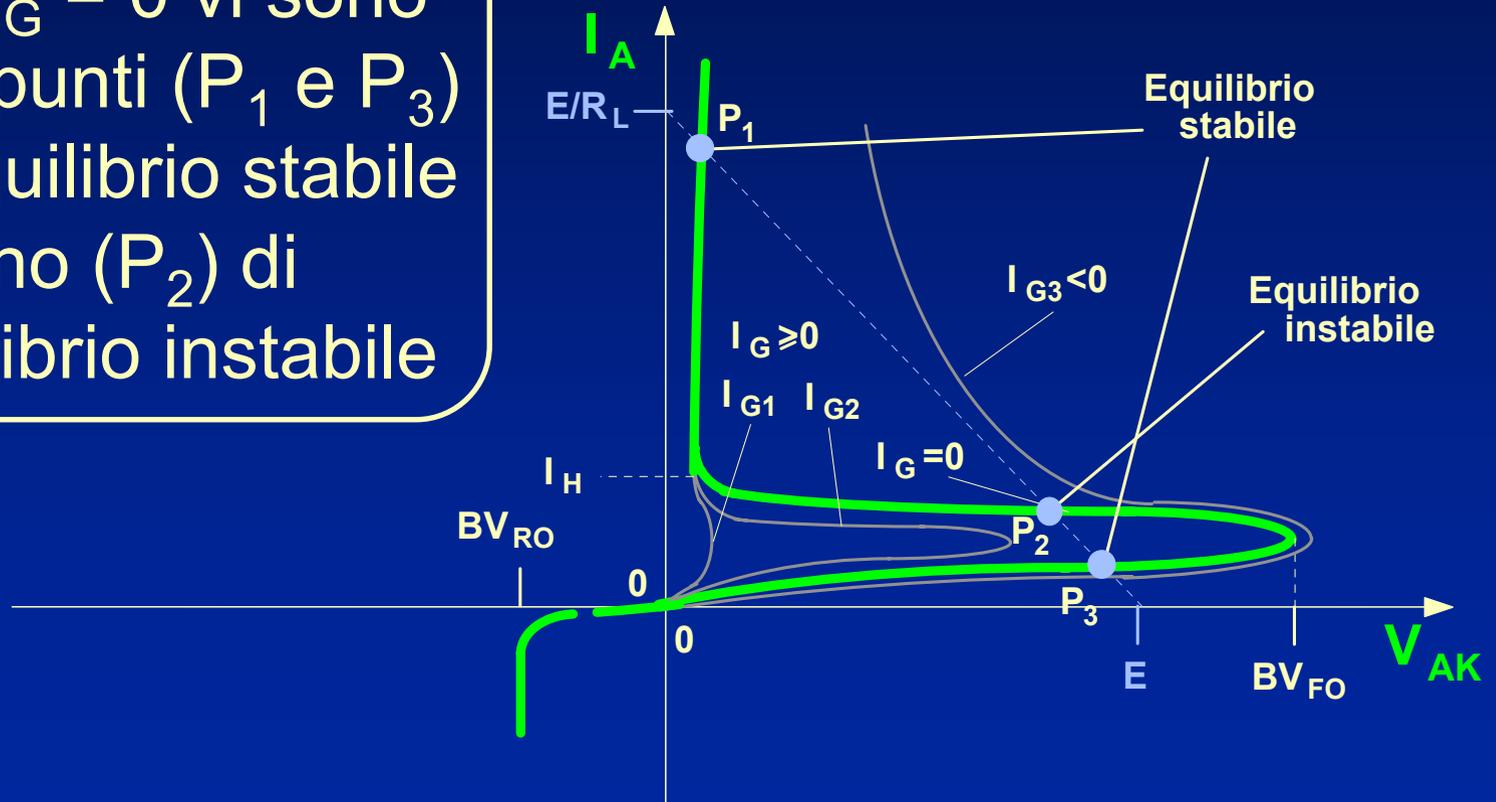
Caratteristiche statiche ( $I_A$ ,  $V_{AK}$ ) param.  $I_G$



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Punti di equilibrio con  $I_G = 0$

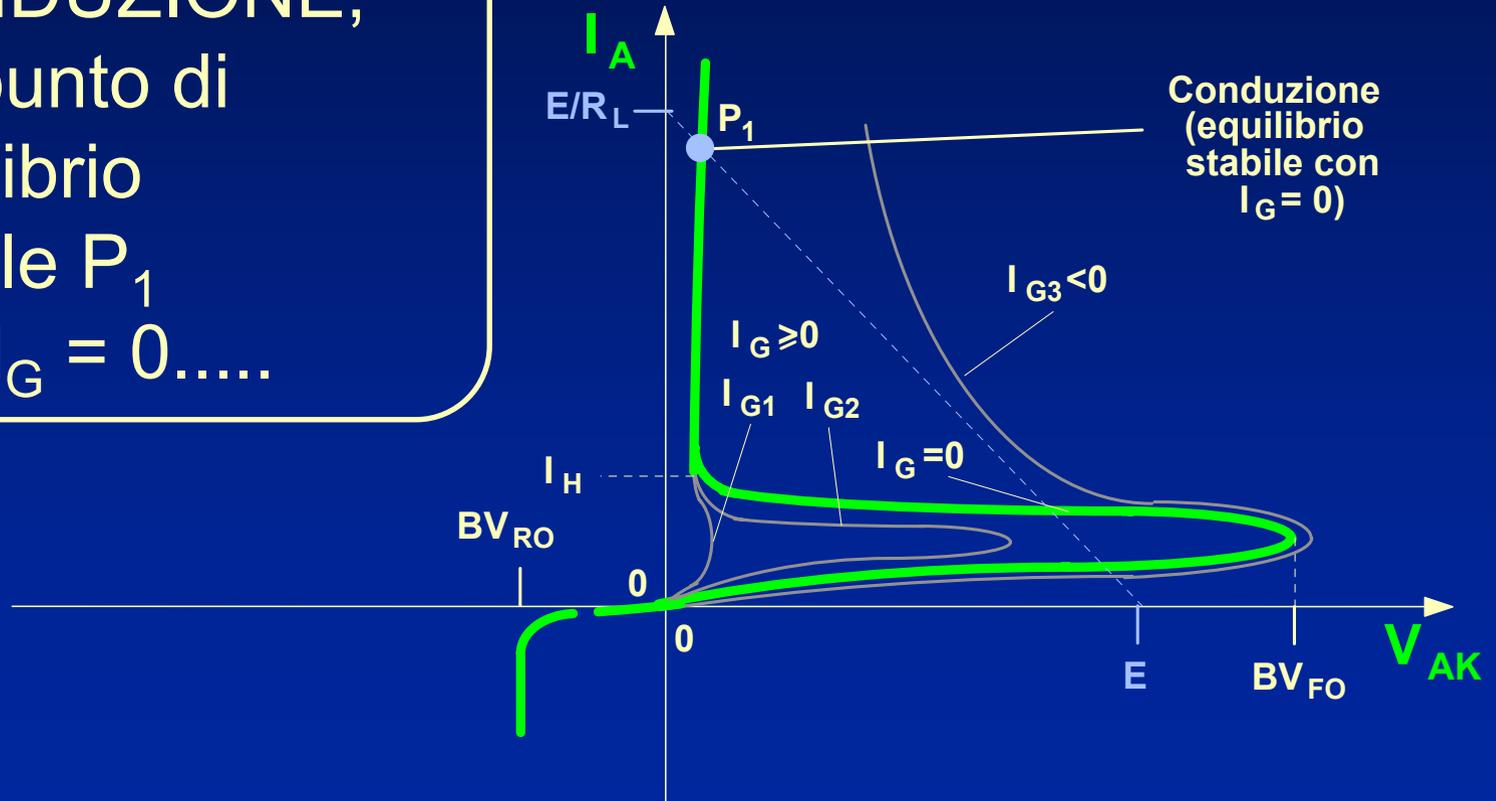
Come per l'SCR, con  $I_G = 0$  vi sono due punti ( $P_1$  e  $P_3$ ) di equilibrio stabile ed uno ( $P_2$ ) di equilibrio instabile



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Condizione di conduzione  $P_1$  ( $I_G = 0$ )

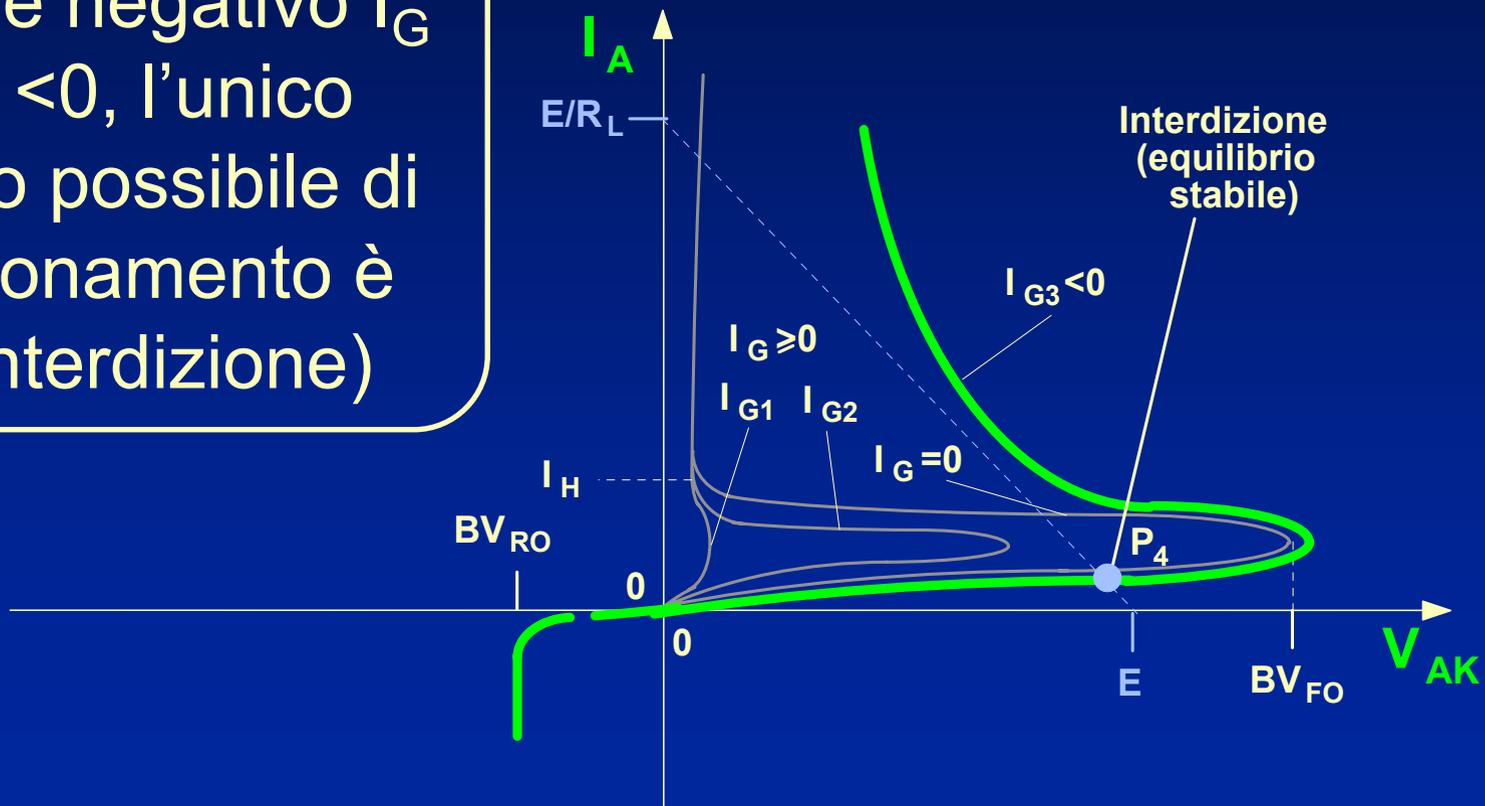
Se il GTO è in  
CONDUZIONE,  
nel punto di  
equilibrio  
stabile  $P_1$   
con  $I_G = 0$ .....



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Spegnimento mediante comando  $I_G = I_{G3} < 0$

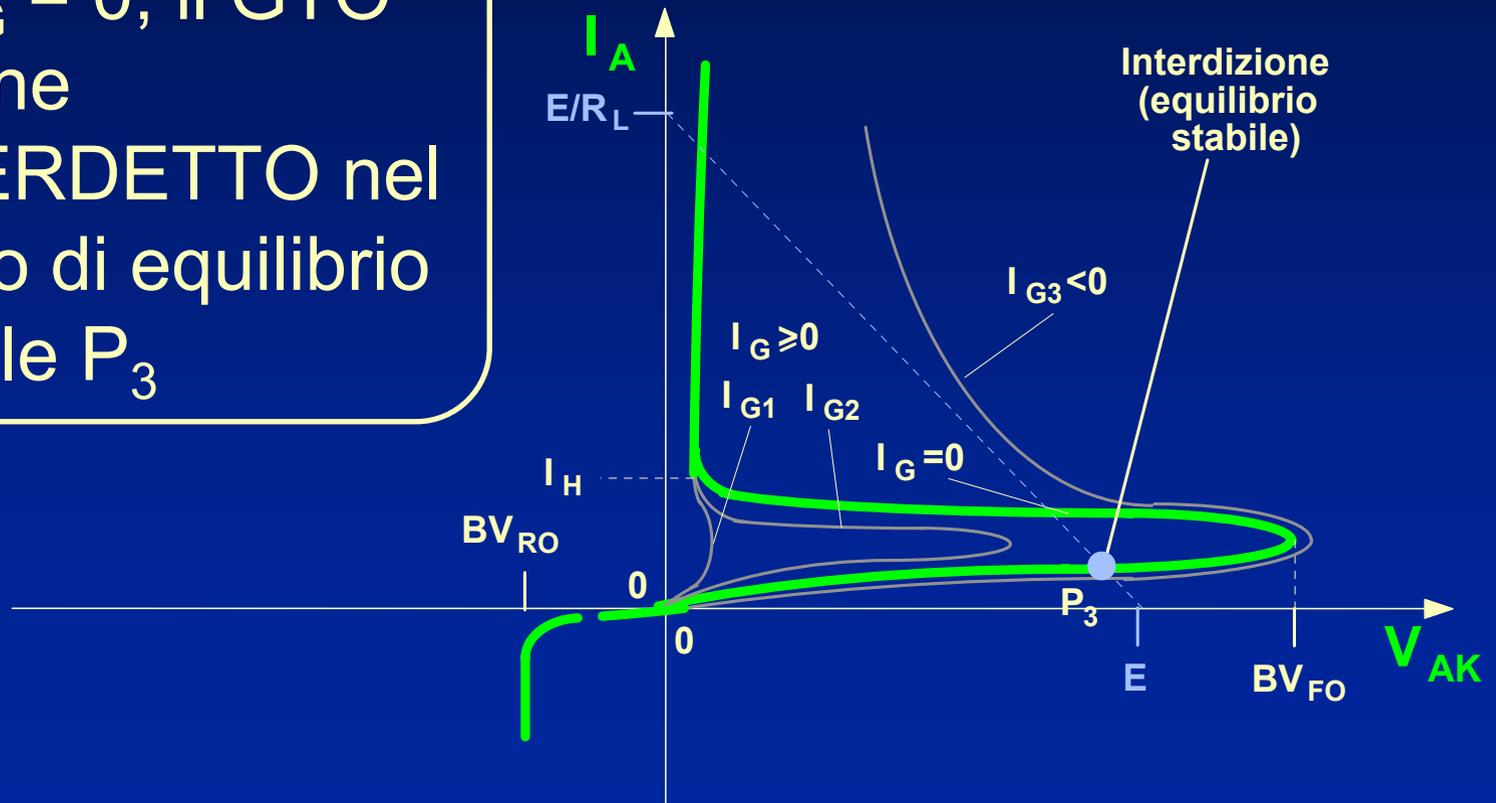
portando  $I_G$  ad un valore negativo  $I_G = I_{G3} < 0$ , l'unico punto possibile di funzionamento è  $P_4$  (interdizione)



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

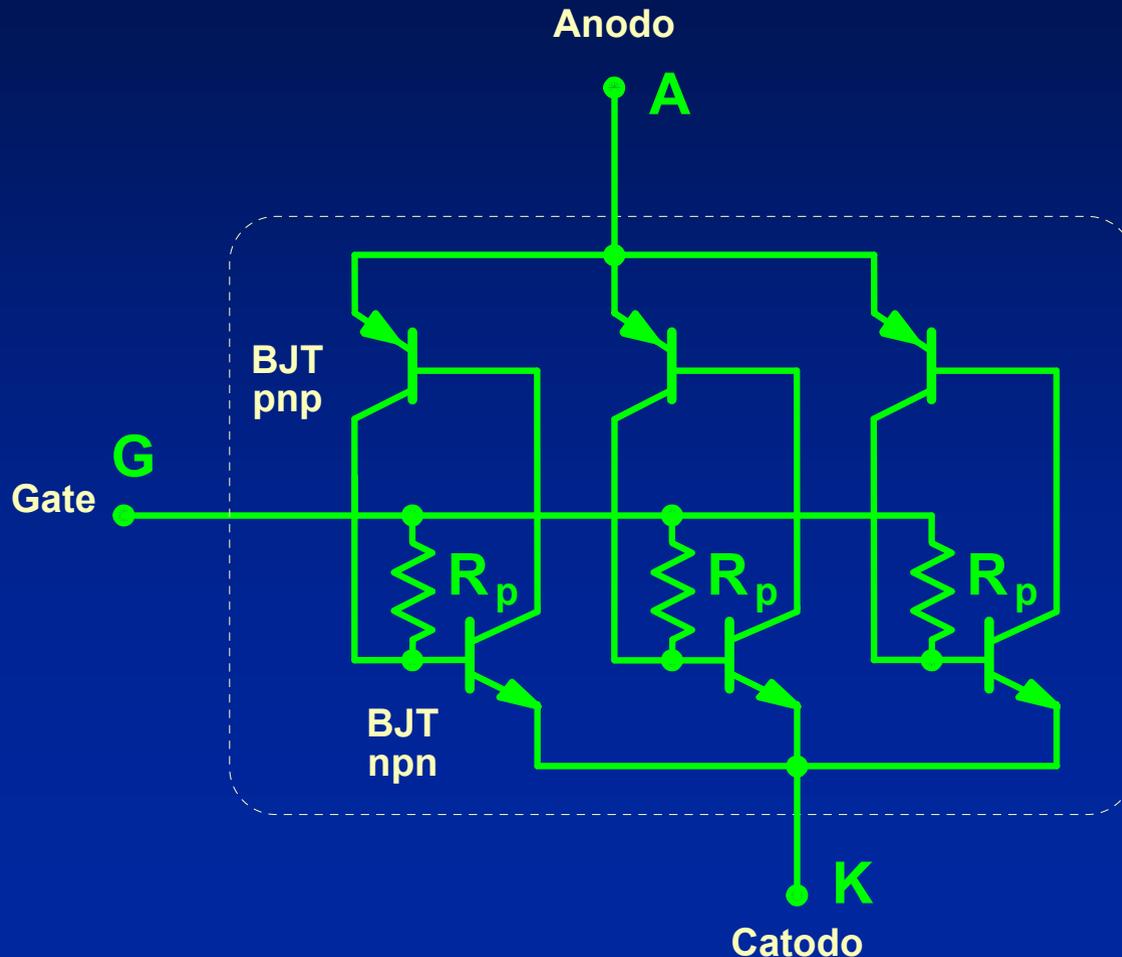
Condizione di interdizione  $P_3$  ( $I_G = 0$ )

Quando si torna ad  $I_G = 0$ , il GTO rimane **INTERDETTO** nel punto di equilibrio stabile  $P_3$



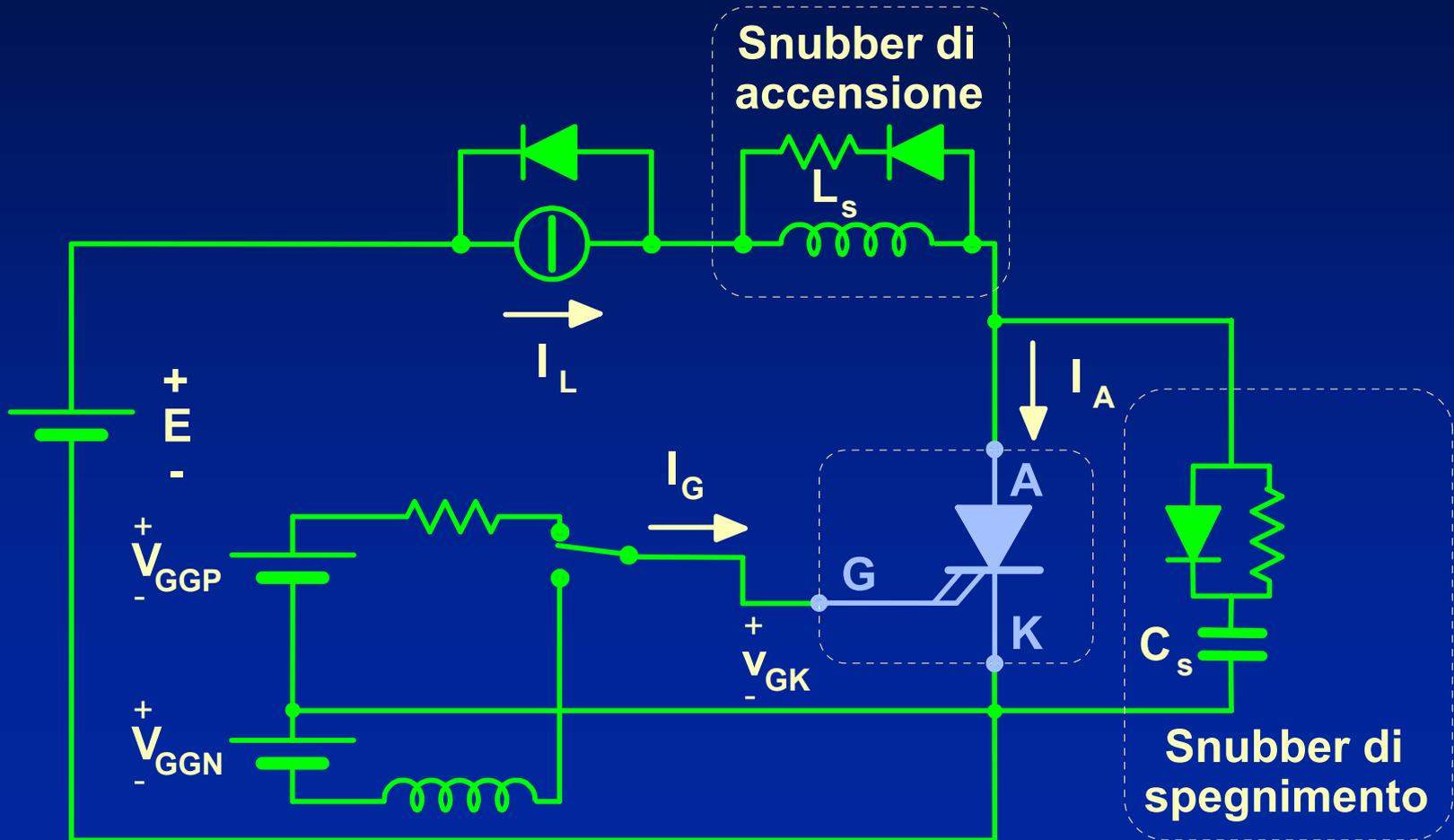
# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Schema interno equivalente di principio corrispondente alla struttura distribuita del GTO



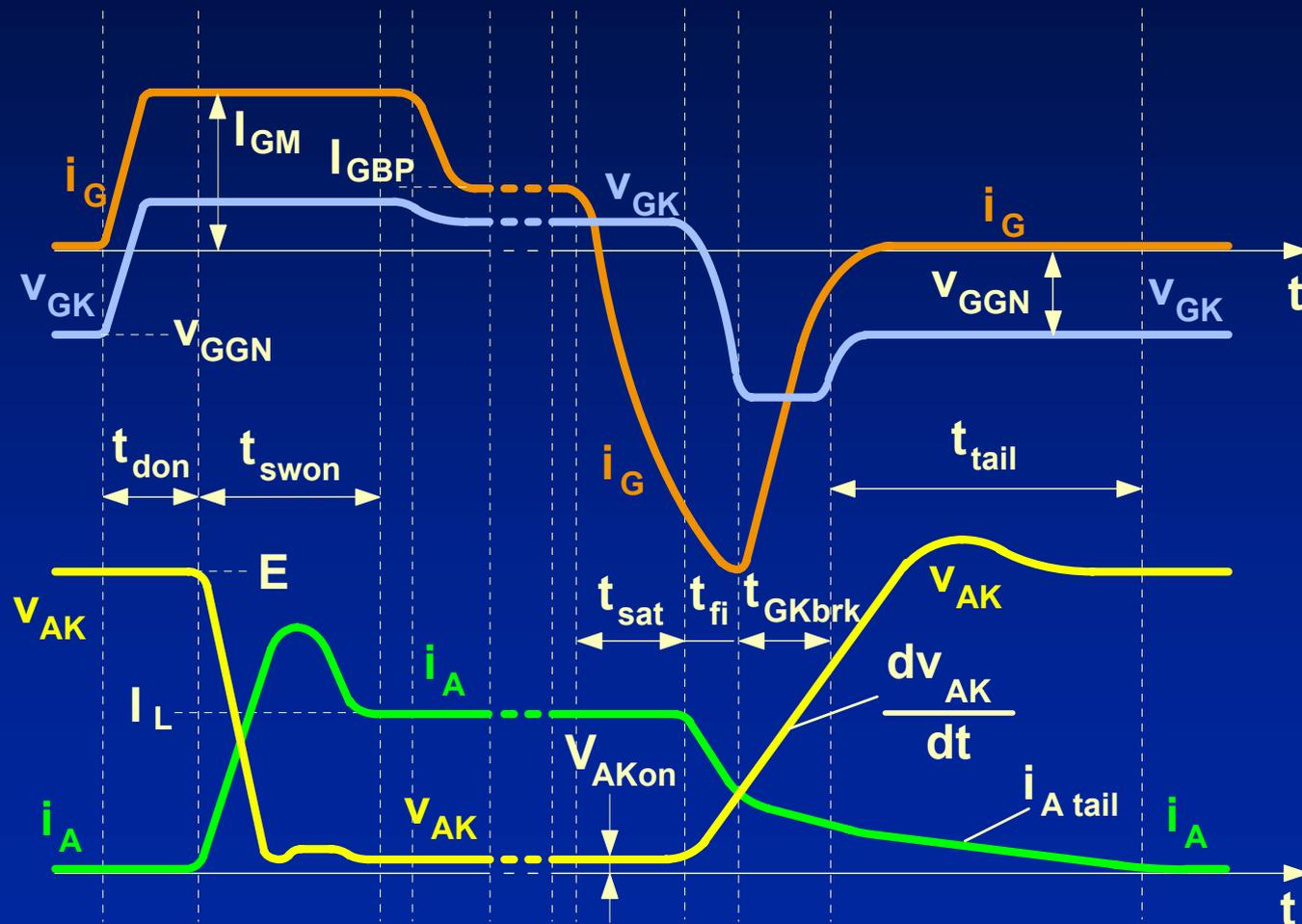
# GTO (Gate Turn Off thyristor)

Circuito di prova per le forme d'onda  
e per i tempi di commutazione



# GTO (Gate Turn Off thyristor)

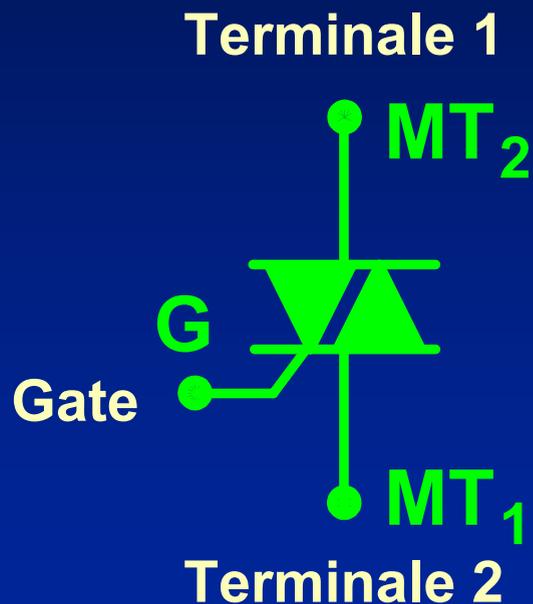
## Commutazioni



# 1.10 - TRIAC

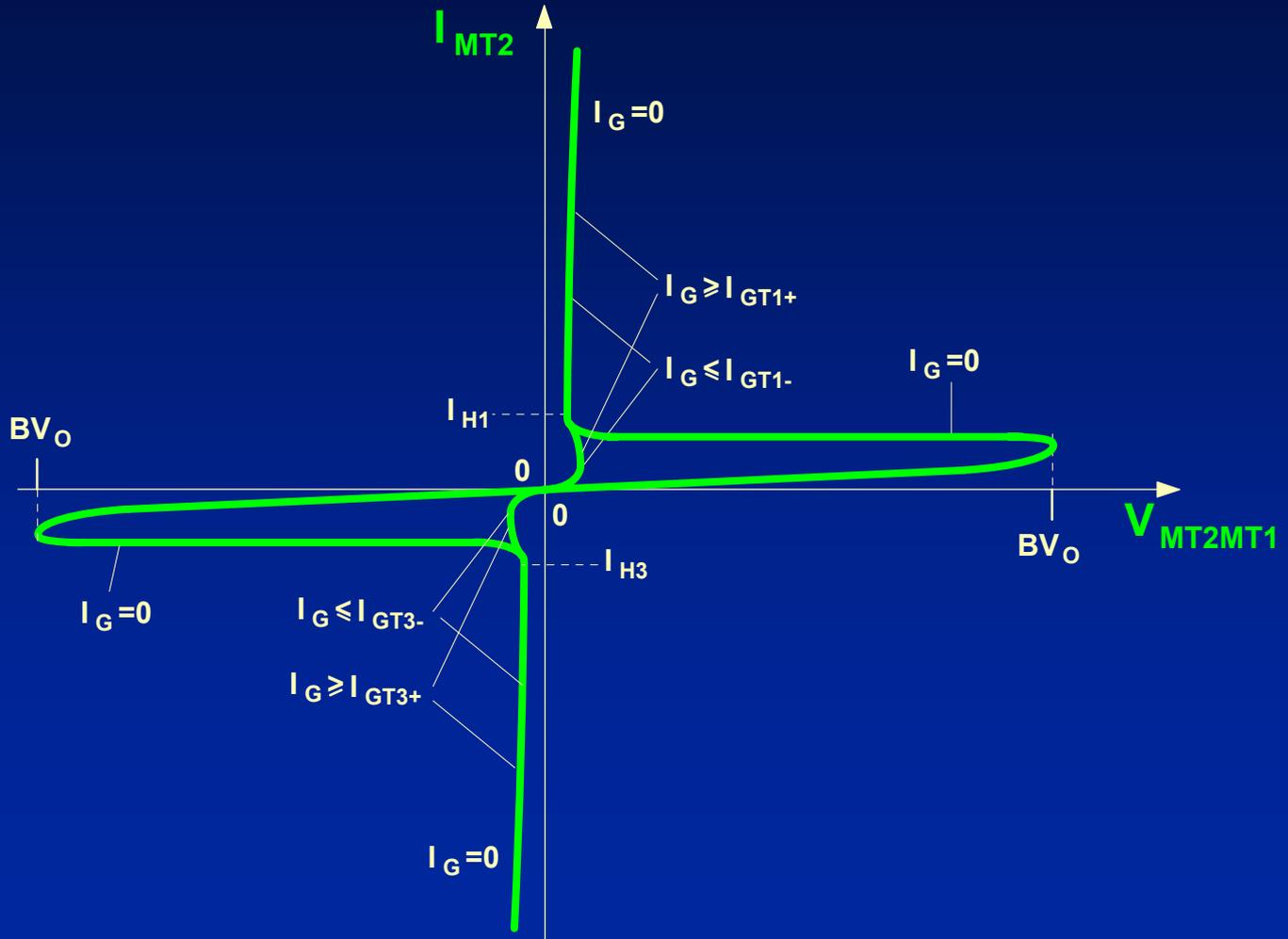
# TRIAC (Triode AC thyristor)

Simbolo



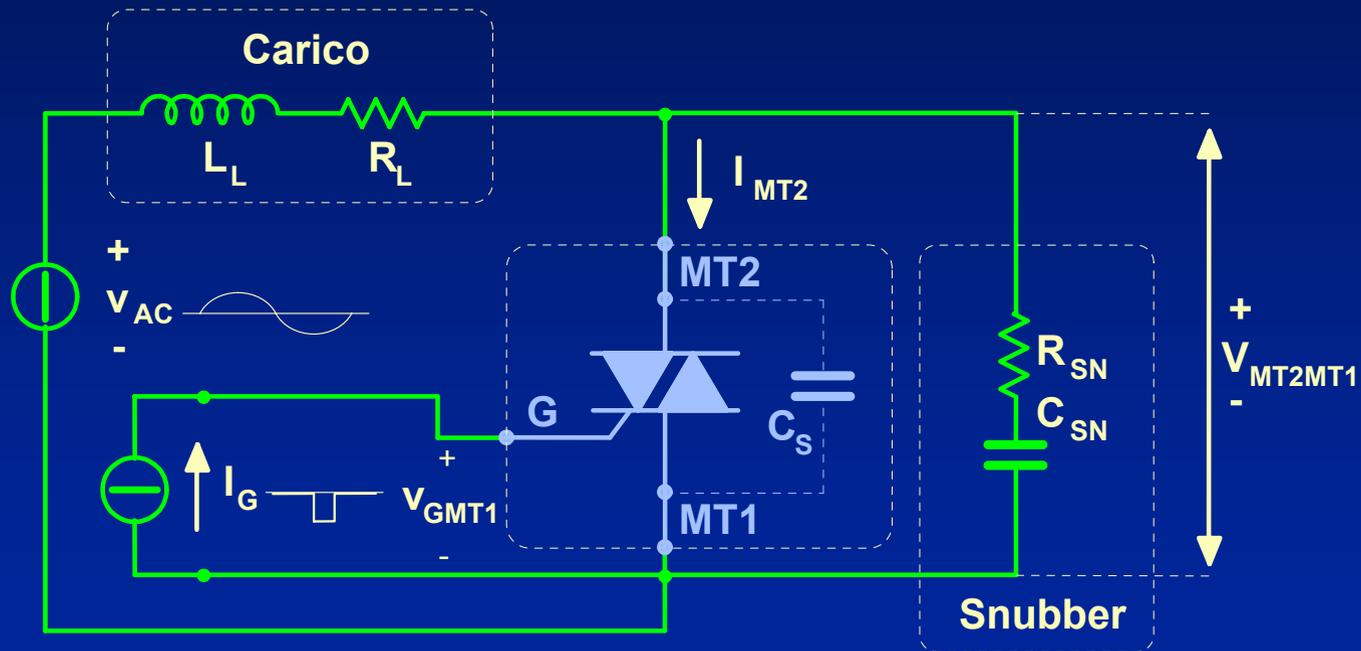
# TRIAC (Triode AC thyristor)

Caratteristiche statiche  
( $I_{MT2}$ ,  $V_{MT2MT1}$ ) param.  $I_G$



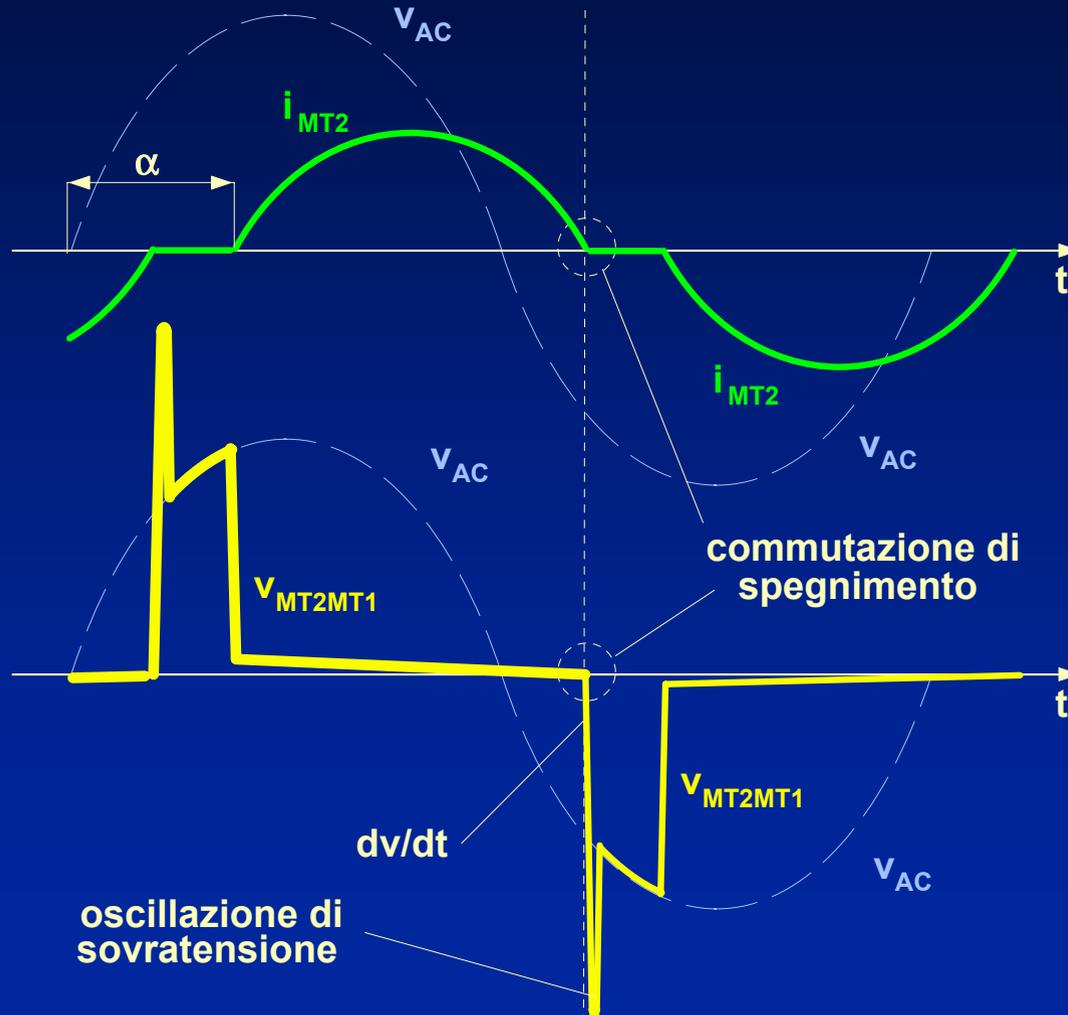
# TRIAC (Triode AC thyristor)

Circuito di applicazione tipica  
in Corrente Alternata con carico Induttivo-Resistivo



# TRIAC (Triode AC thyristor)

Andamenti tipici di corrente e tensione con carico Induttivo-Resistivo in CA



# TRIAC (Triode AC thyristor)

## Commutazione allo spegnimento

