

Interruttori elettronici di potenza

Interruttori elettronici di potenza

Power BJT:

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

Interruttori elettronici di potenza

Power BJT:

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

↓

Applicazioni limitate
(si preferiscono interruttori comandati in tensione)

Interruttori elettronici di potenza

Power MOS:

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

Interruttori elettronici di potenza

Power MOS:

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

↓

Applicazioni di potenza medio-piccola (< 1 kW)

Interruttori elettronici di potenza

IGBT:

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

Interruttori elettronici di potenza

IGBT:

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

↓

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

Interruttori elettronici di potenza

IGBT:

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

↓

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

↓ i_S

+ u_S -

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

Conduzione: S on

+ u_S - ⇒ + $U_{S_{on}}$ -

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

Interruttori elettronici di potenza

Caratteristiche statiche

Conduzione: S on

+ u_S - ⇒ + $U_{S_{on}}$ -

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

↓

$P_{on} > 0$

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche statiche
 Interdizione: S off

1 13

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche statiche
 Interdizione: S off

$i_{Soff} = nA + mA$

1 14

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche statiche
 Interdizione: S off

$i_{Soff} = nA + mA$

$P_{off} \approx 0$

1 15

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche

1 16

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche
 Commutazione in accensione:

on

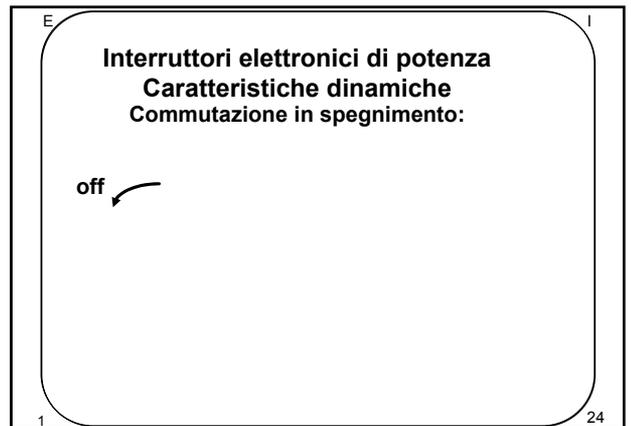
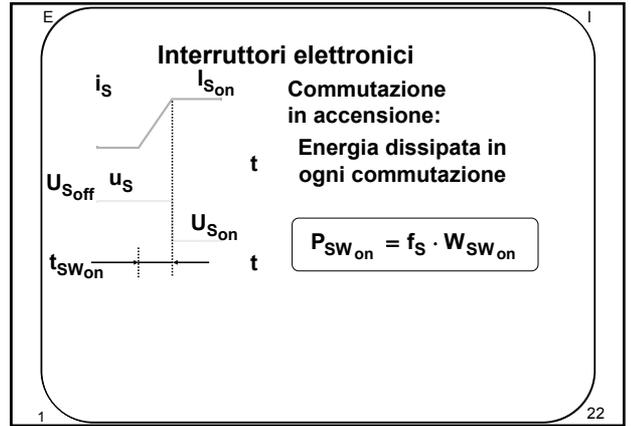
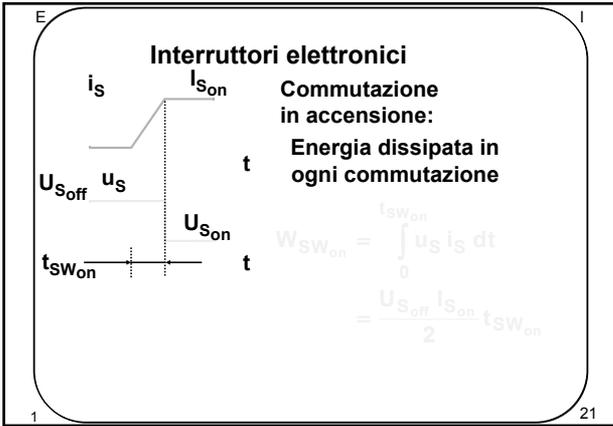
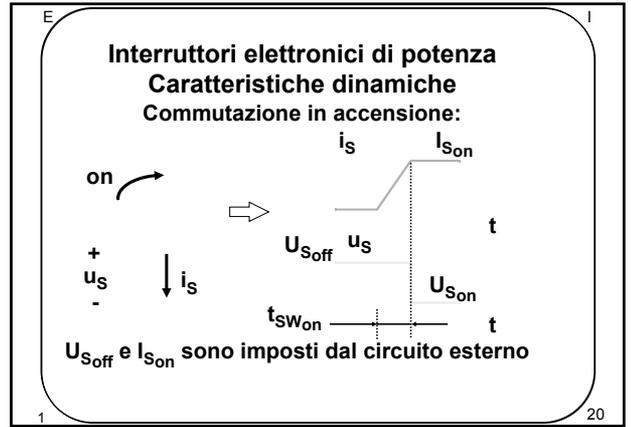
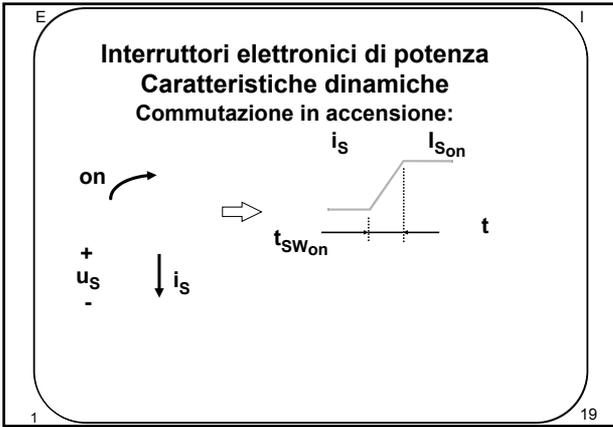
1 17

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche
 Commutazione in accensione:

on

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

1 18



Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:

off ↙

+ u_S ↓ i_S
 -

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

1 25

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:

off ↙

+ u_S ↓ i_S
 -

1 26

Interruttori elettronici di potenza
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:

off ↙

+ u_S ↓ i_S
 -

U_{Soff} e I_{Son} sono imposti dal circuito esterno

1 27

Interruttori elettronici

Commutazione in spegnimento:
Energia dissipata in ogni commutazione

$W_{SWoff} = \int_0^{t_{SWoff}} u_S i_S dt$
 $= \frac{U_{Soff} I_{Son} t_{SWoff}}{2}$

1 28

Interruttori elettronici

Commutazione in spegnimento:
Energia dissipata in ogni commutazione

$P_{SWoff} = f_S \cdot W_{SWoff}$

1 29

Interruttori elettronici

- Le perdite di commutazione sono circa proporzionali ad I_{Son} , U_{Soff} ed f_S
- Le perdite di conduzione sono circa proporzionali ad I_{Son} (ed indipendenti da f_S)
- Le perdite di interdizione sono trascurabili

1 30

Interruttori elettronici

Perdite complessive:

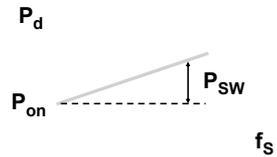
$$P_d = P_{on} + P_{off} + P_{sw_{on}} + P_{sw_{off}}$$

31

Interruttori elettronici

Perdite complessive:

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



32

Interruttore ideale

33

Interruttore ideale

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

34

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

35

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

36

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

37

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

38

Interruttore elettronico ideale Caratteristiche statiche

39

Interruttore elettronico ideale Caratteristiche statiche

Conduzione:
 $\downarrow i_S$
 $+ u_S$ S on $\Rightarrow u_S = 0$
 $-$

40

Interruttore elettronico ideale Caratteristiche statiche

Conduzione:
 $\downarrow i_S$
 $+ u_S$ S on $\Rightarrow u_S = 0$
 $-$
Interdizione:
 $\downarrow i_S$
 $+ u_S$ S off $\Rightarrow i_S = 0$
 $-$

41

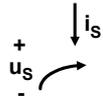
Interruttore elettronico ideale Caratteristiche statiche

Conduzione:
 $\downarrow i_S$
 $+ u_S$ S on $\Rightarrow u_S = 0 \Rightarrow P_{on} = u_S i_S = 0$
 $-$
Interdizione:
 $\downarrow i_S$
 $+ u_S$ S off $\Rightarrow i_S = 0 \Rightarrow P_{off} = u_S i_S = 0$
 $-$
In ambo i modi di funzionamento
l'interruttore non dissipa potenza

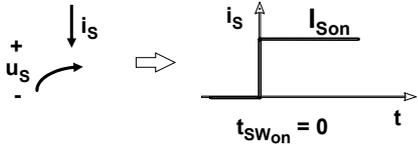
42

**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche**

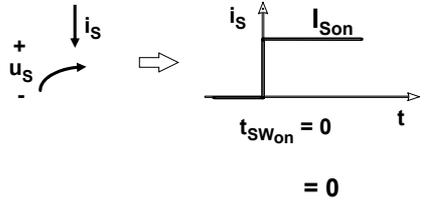
**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in accensione:**



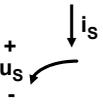
**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in accensione:**



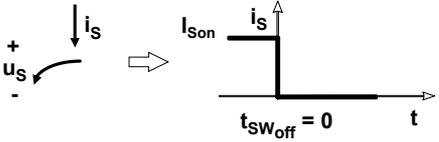
**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in accensione:**



**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:**



**Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:**



Interruttore elettronico ideale
Caratteristiche dinamiche
Commutazione in spegnimento:

$t_{sw\text{off}} = 0$
 $= 0$

1 49

Interruttori elettronici ideali

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

1 50

1.2 – Famiglie di interruttori

1 51

Interruttore ideale
Simbolo e caratteristica statica

1 52

Diodo ideale
Simbolo e caratteristica statica

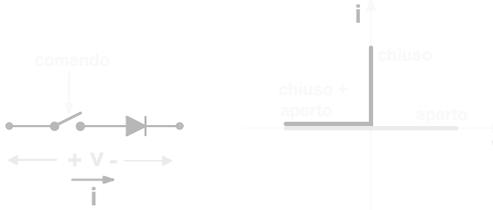
1 53

Interruttore ideale a conduzione inversa
Simbolo e caratteristica statica

1 54

Interruttore ideale a blocco inverso

Simbolo e caratteristica statica



55

1.3 - Interruttori reali a semiconduttore

56

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

57

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

58

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

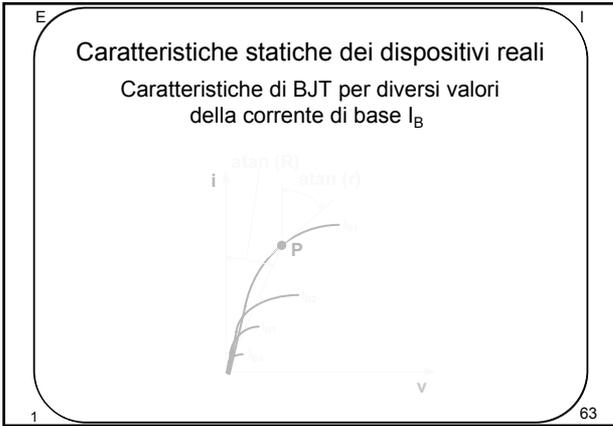
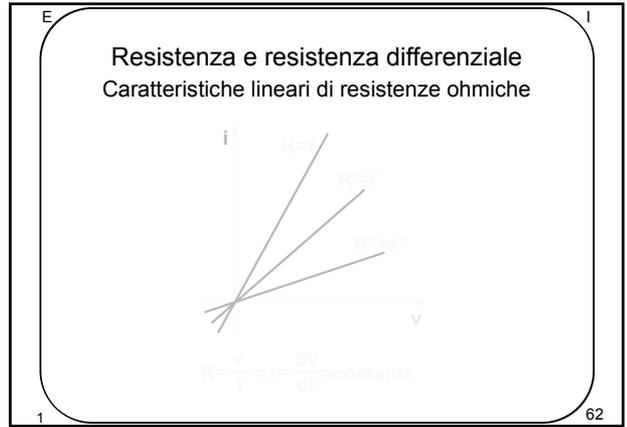
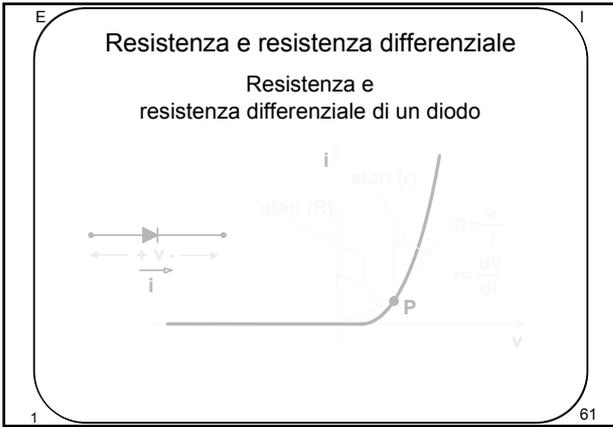
MOSFET piccole potenze ed **elevate frequenze**

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

59

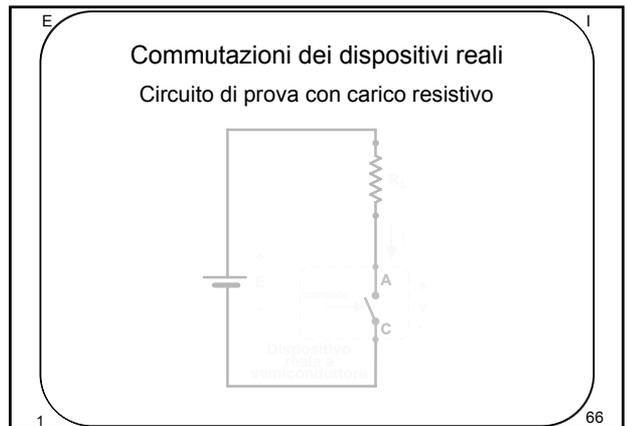
1.4 - Caratteristiche statiche dei dispositivi reali

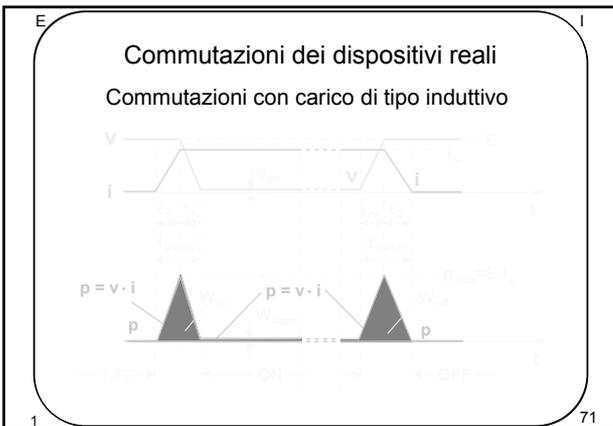
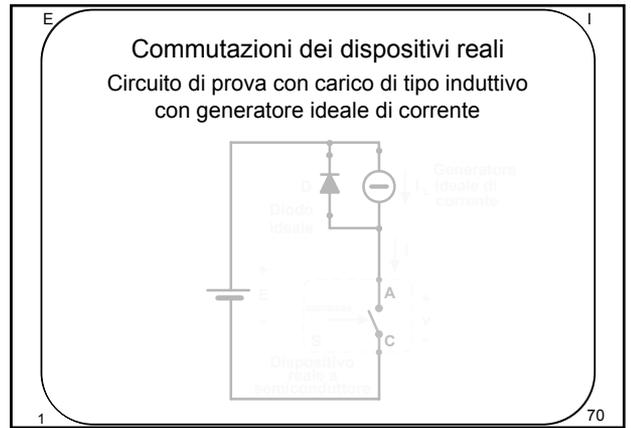
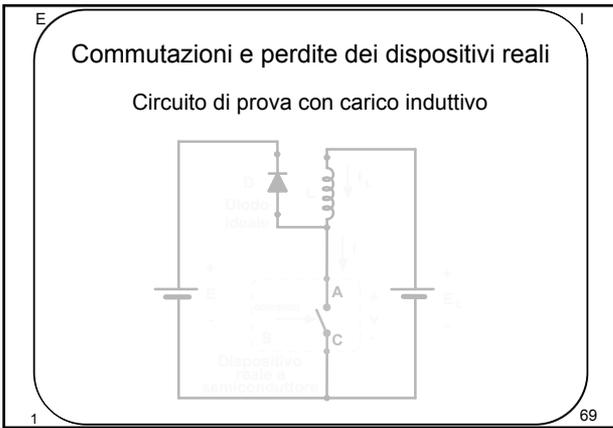
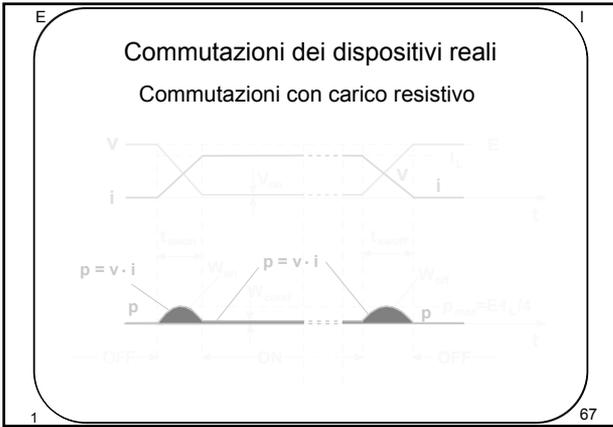
60



1.5 - Commutazioni dei dispositivi reali

65

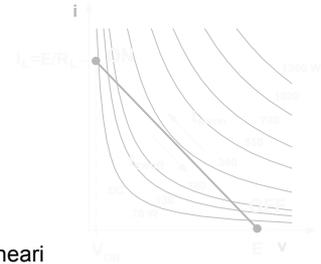




1.6 - SOA

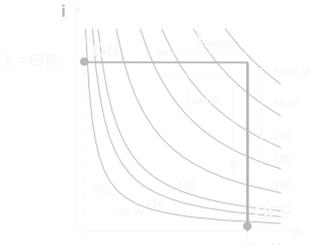
Commutazioni e perdite dei dispositivi reali

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



Coordinate lineari

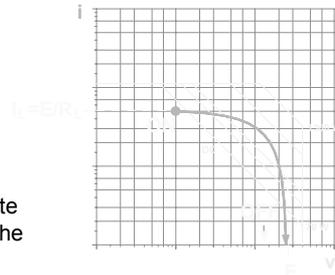
Commutazioni e perdite dei dispositivi reali
Stati e percorsi di commutazione
con carico di tipo induttivo e curve a potenza costante



Coordinate lineari

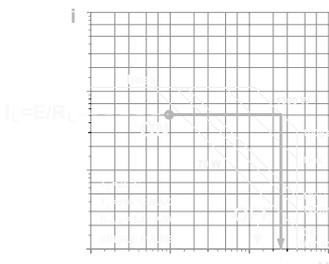
SOA

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



Coordinate
logaritmiche

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



Coordinate
logaritmiche

SOA

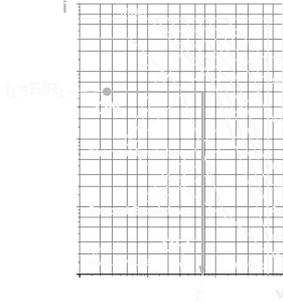
Limiti dei dispositivi a semiconduttore:

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



79

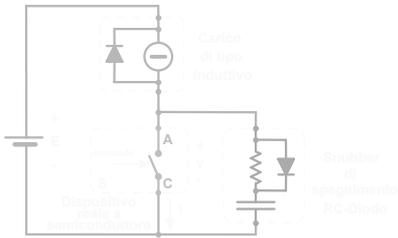
1.7 - SNUBBER

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

80

Snubber RC-Diodo

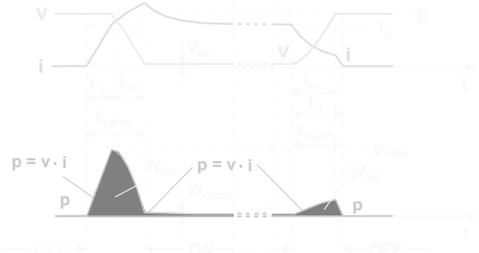
Circuito di prova con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento (turn-off) RC-Diodo



81

Snubber RC-Diodo

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

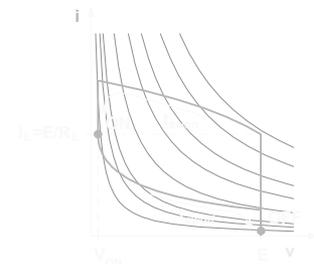


potenza dissipata e dv/dt allo spegnimento ridotte ma aumento della corrente all'accensione

82

Snubber RC-Diodo

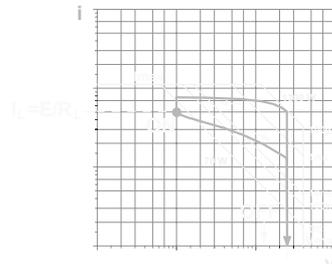
Commutazioni con carico di tipo induttivo con snubber di spegnimento RC-Diodo



83

Snubber RC-Diodo

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



84

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.

1 85

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

1 86

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

1 87

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

1 88

Snubber

Vantaggi:
 riduzione delle dissipazioni
 per evitare stati pericolosi durante le commutazioni.

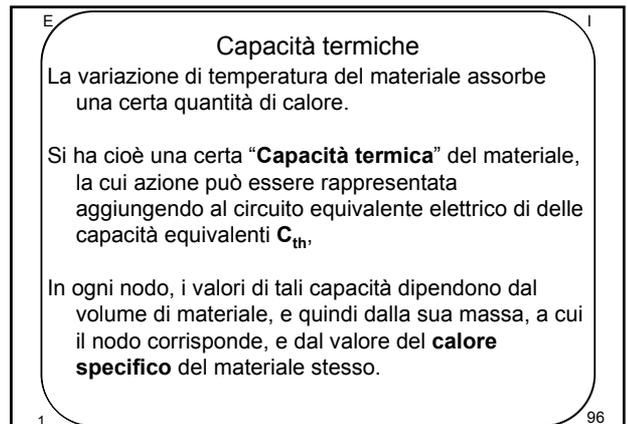
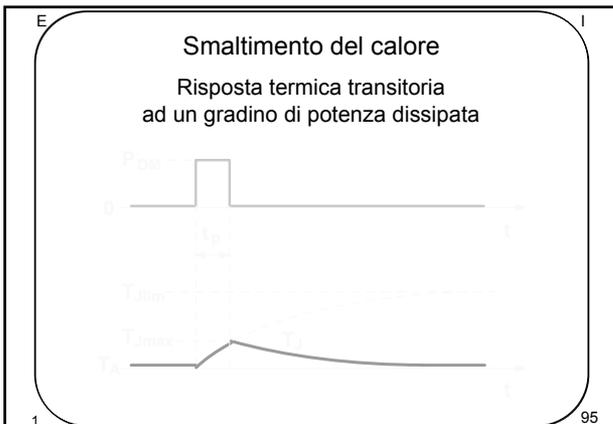
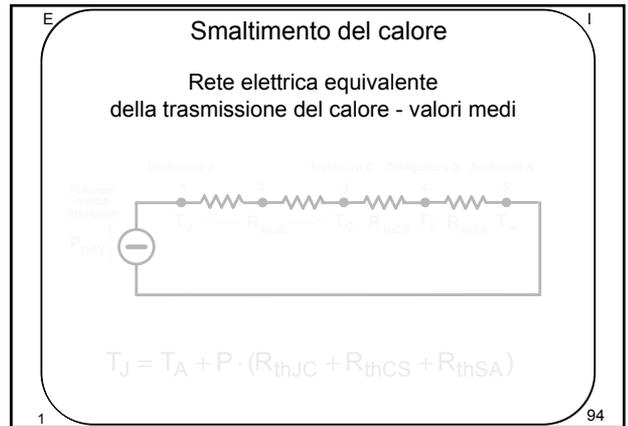
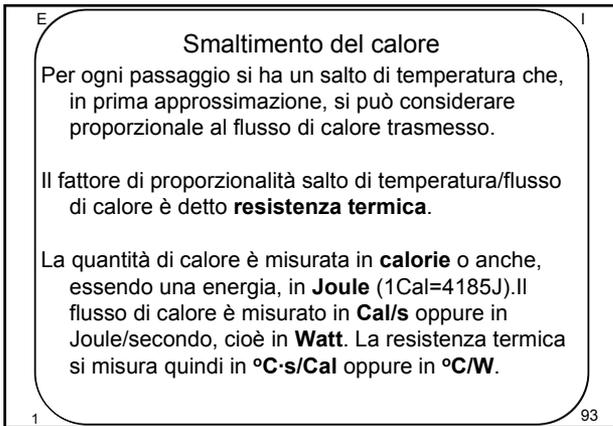
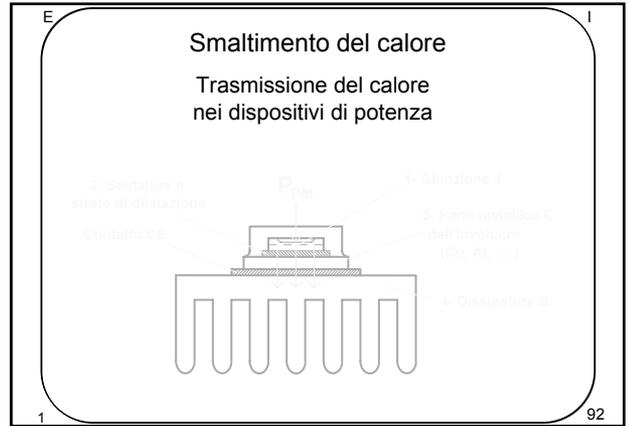
Svantaggi:
 richiedono notevoli complicazioni circuitali che
 comportano aggravii di costi e, in molti casi,
 riduzioni di affidabilità.

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

1 89

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

1 90



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"

97

Capacità termiche

Rete elettrica equivalente transitoria
riferita all'involucro - valori massimi

98

Smaltimento del calore

Risposta termica ad una serie periodica
di impulsi di potenza dissipata

99

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

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

1

Diodi di potenza

Diodi di potenza al silicio a giunzione pn

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

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

Correnti nominali \bar{I} 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**).

1

Diodi di potenza

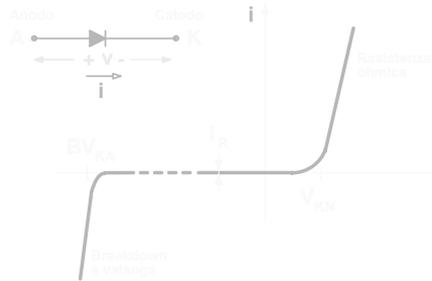
Se la tensione inversa supera un valore limite BV_{KA} (tensione di "**Breakdown**"), si ha la scarica a valanga e la corrente inversa aumenta bruscamente.

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** — **perdite** di conduzione molto **ridotte**.

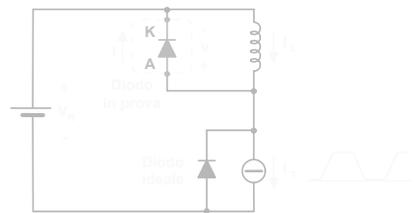
Tempi di commutazione molto **ridotti** rispetto ai corrispondenti diodi al silicio di potenza a giunzione pn.

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, $T_C=25^\circ\text{C}$ (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	$I_{F(AV)}$	30 A
($T_C=117^\circ\text{C}$)		

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 $^\circ\text{C}$

Diodi di potenza: Caratteristiche

Esempio di specificazione:

caratteristiche **garantite**

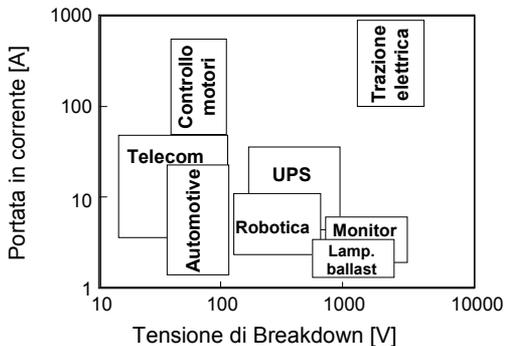
V_F at $I_F=30\text{ A}, T_C=25^\circ\text{C}$	Max	1.8 V
V_F at $I_F=30\text{ A}, T_C=150^\circ\text{C}$	Max	1.6 V
I_R at $V_R=800\text{ V}, T_C=25^\circ\text{C}$	Max	500 μA
I_R at $V_R=800\text{ V}, T_C=150^\circ\text{C}$	Max	1 mA
t_{rr} at $I_F=1\text{ A}, di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	Max	110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

valori indicativi:

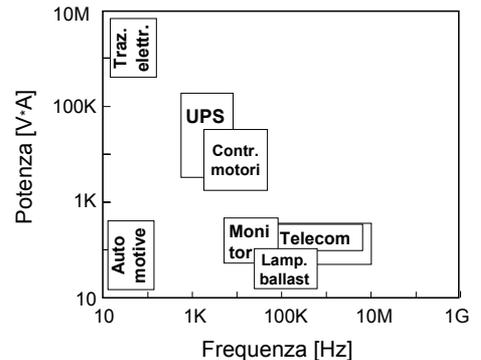
t_{rr} at $I_F=30\text{ A}, di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	150 ns
t_{ri} at $I_F=30\text{ A}, di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	90 ns
t_{rd} at $I_F=30\text{ A}, di_F/dt=100\text{ A}/\mu\text{s}$	Typ	45 ns

CAMPI DI APPLICAZIONE DEI DISPOSITIVI DI POTENZA

SETTORI DI APPLICAZIONE ELETTRONICA DI POTENZA



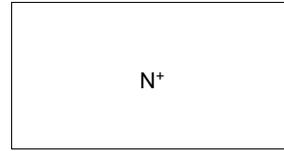
SETTORI DI APPLICAZIONI ELETTRONICA DI POTENZA



PROCESSO DI FABBRICAZIONE BIPOLARI DI POTENZA

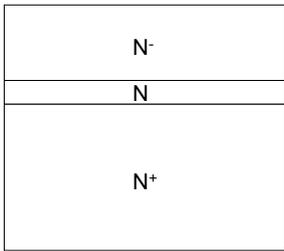
TECNOLOGIA PLANARE

Substrato N⁺



$X_{N^+} \sim 600 \mu\text{m}$
 $\rho \sim 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$

Crescita epitassiale strati N e N⁻



Bassa Tensione ~ 100 V

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

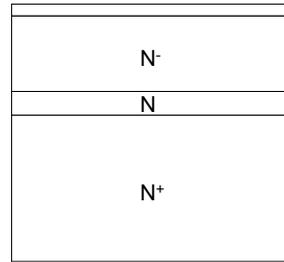
$\rho \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$

Alta Tensione ~ 1000 V

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

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

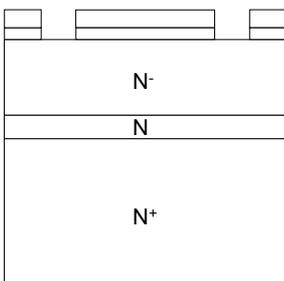
Ossidazione iniziale



SiO₂

$X_{\text{ossido}} \sim 1 \mu\text{m}$

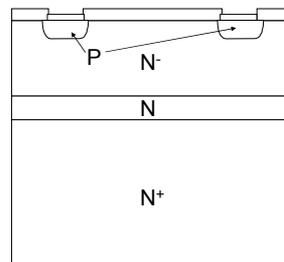
Fotolitografia



Photoresist

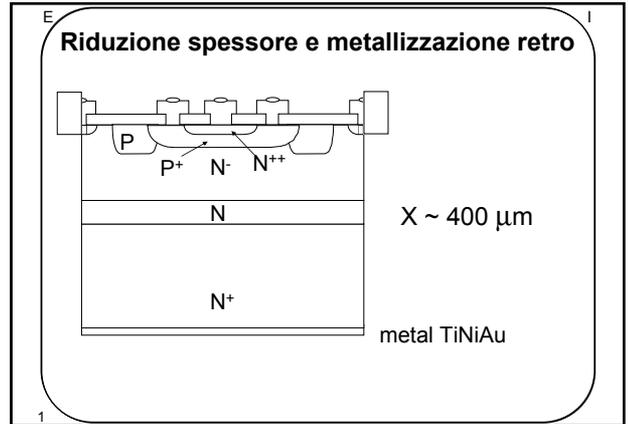
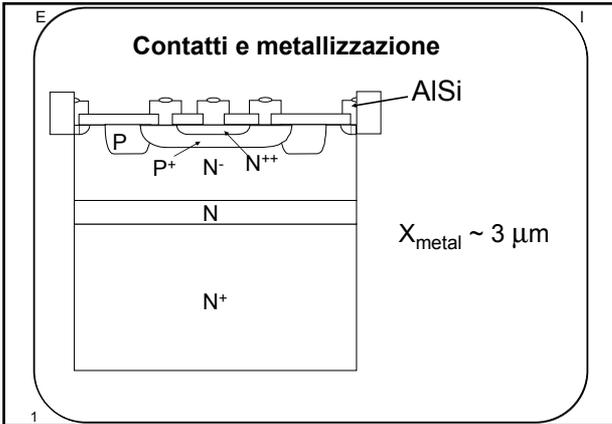
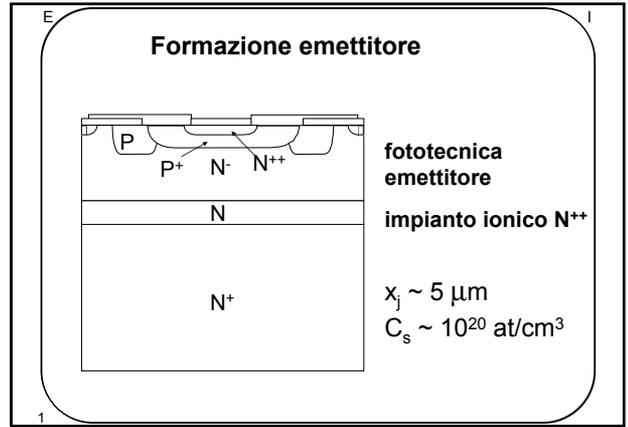
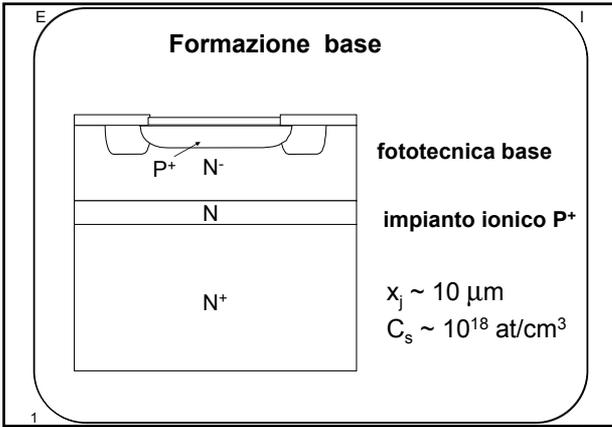
Mascheratura
e attacco

Formazione anello di bordo

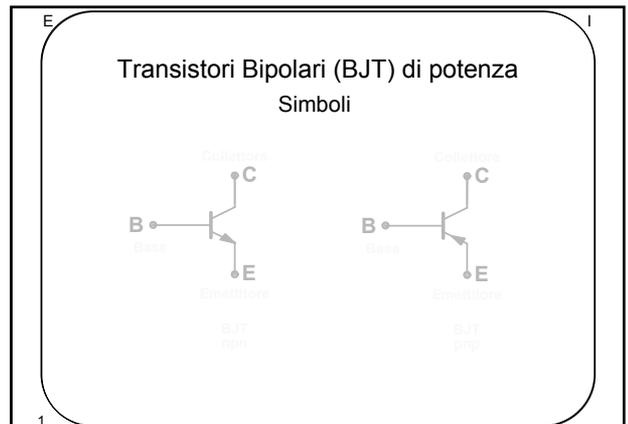


impianto ionico P
(boro o alluminio)

diffusione in
ambiente ossidante

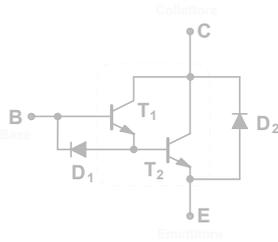


1.5 - Transistori Bipolari (connessione Darlington)



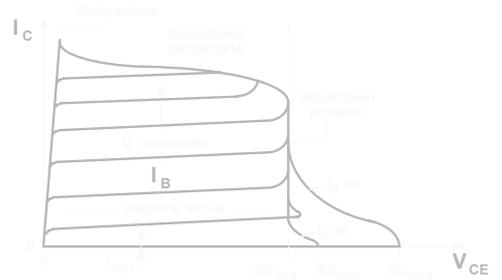
Transistori Bipolari npn di potenza in connessione Darlington

Simbolo



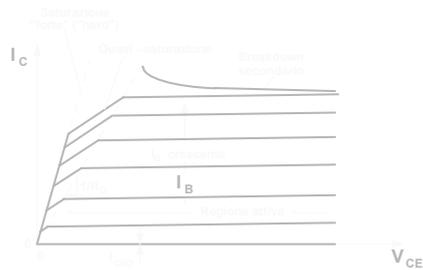
BJT di potenza: Caratteristiche statiche

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



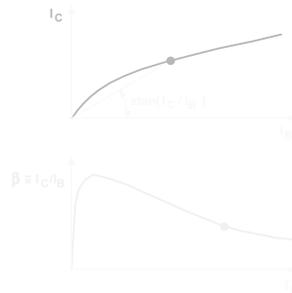
BJT di potenza: Caratteristiche statiche

Caratteristiche statiche (I_C , V_{CE}) param. I_B
Diagramma espanso nella zona di saturazione



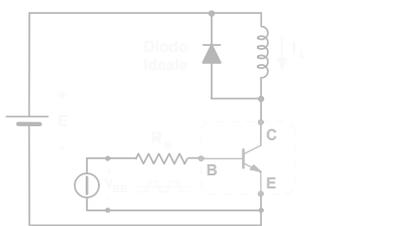
BJT di potenza: Caratteristiche statiche

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



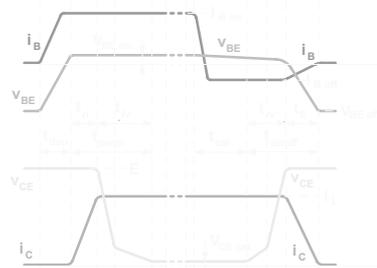
BJT di potenza: Commutazioni

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 ($T_C=25^\circ\text{C}$)	
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_{tot} 150 W
Junction temperature	T_J -65,+150 W
Insulation voltage ($t=1\text{ mn}$)	V_{ins} 2500 V_{RMS}
Screw torque (mounting terminals)	15 kg · cm
Junction-case thermal resistance	$R_{th(j-c)}$ 0.83 $^\circ\text{C/W}$

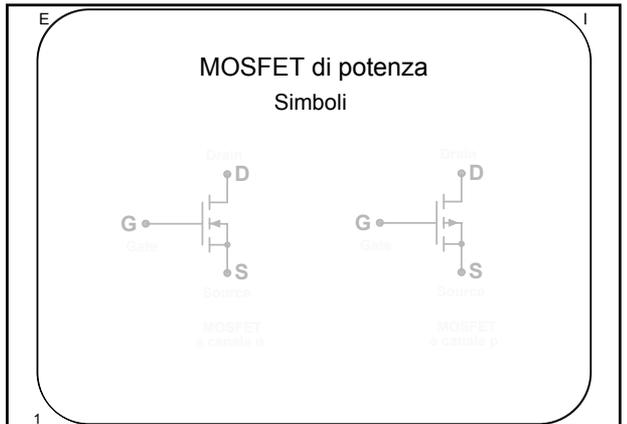
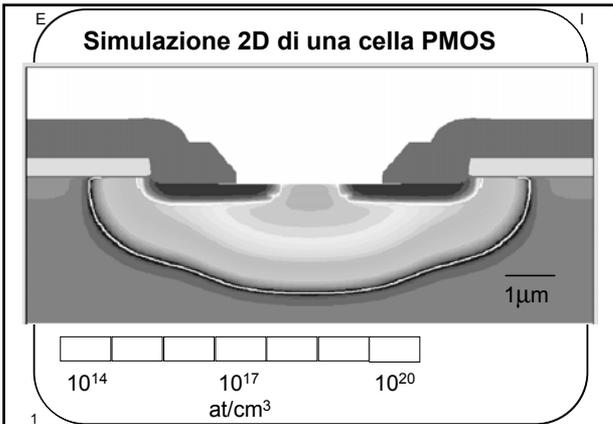
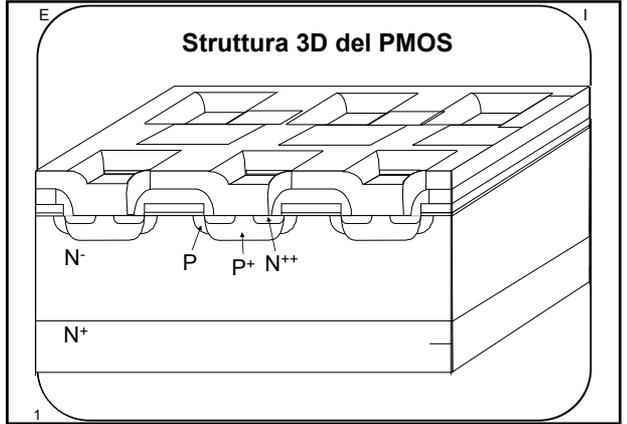
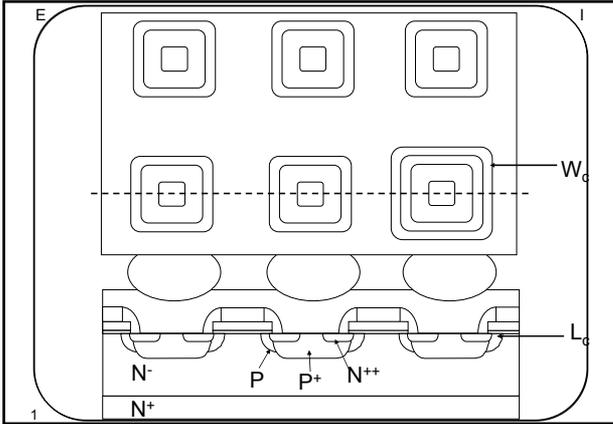
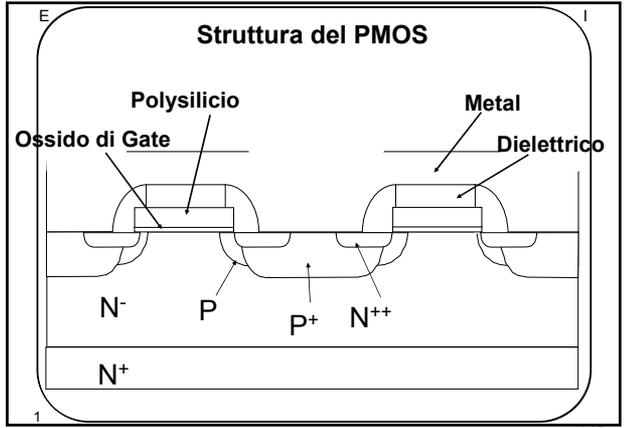
BJT di potenza: Caratteristiche	
Per un BJT di potenza, un esempio di specificazione delle caratteristiche garantite e tipiche può essere:	
OFF CHARACTERISTICS	
$BV_{CEO\text{ sus}}$ @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_B=0\text{ A}$, $I_C=0.2\text{ A}$, $L=25\text{ mH}$	Min 450 V
$BV_{EBO\text{ sus}}$ @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_C=0\text{ A}$, $I_E=100\text{ mA}$	Min 7 V Max 30 V
I_{CEX} @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CE}=V_{CEX}$, $V_{BE}=-2.5\text{ V}$	Max 0.4 mA
I_{CEX} @ $T_J=125^\circ\text{C}$, $V_{CE}=V_{CEX}$, $V_{BE}=-2.5\text{ V}$	Max 4 mA

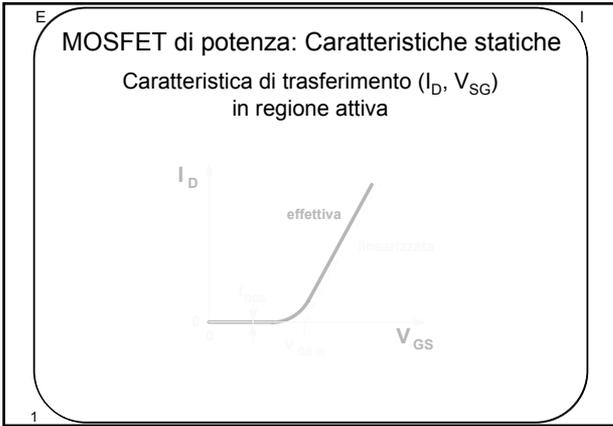
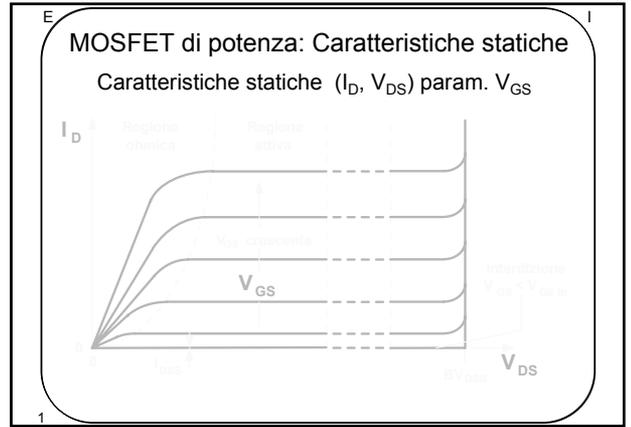
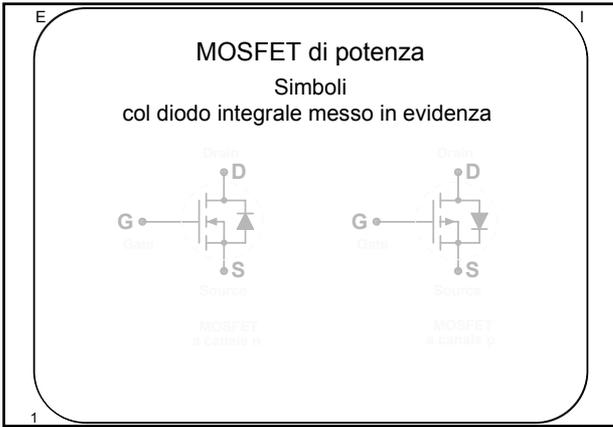
BJT di potenza: Caratteristiche	
I_{CER} @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CE}=V_{CEX}$, $R_{BE}=5\ \Omega$	Max 1 mA
I_{CER} @ $T_J=125^\circ\text{C}$, $V_{CE}=V_{CEX}$, $R_{BE}=5\ \Omega$	Max 8 mA
I_{EBO} @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_C=0\text{ A}$, $V_{BE}=-5\text{ V}$	Max 2 mA
ON CHARACTERISTICS	
$V_{CE\text{ sat}}$ @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_B=4\text{ A}$, pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ d<2%	Max 1.5 V
$V_{CE\text{ sat}}$ @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_C=30\text{ A}$, $I_B=8\text{ A}$, pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ d<2%	Max 3.5 V
$V_{BE\text{ sat}}$ @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_B=4\text{ A}$, pulsed $t_p<300\mu\text{s}$ d<2%	Max 1.6 V

BJT di potenza: Caratteristiche	
DYNAMIC CHARACTERISTICS	
f_T @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $f=1\text{ MHz}$, $I_C=1\text{ A}$, $V_{CE}=10\text{ V}$	Typ 5 MHz
C_{22b} @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $f=1\text{ MHz}$, $V_{CE}=10\text{ V}$	Typ 500 pF
SWITCHING CHARACTERISTICS	
- Switching times on resistive load	
t_{on} @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=150\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$	Typ 0.55 μs Max 1 μs
t_s @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=150\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$	Typ 1.5 μs Max 3 μs

BJT di potenza: Caratteristiche	
t_f @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=150\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{B1}=-I_{B2}=4\text{ A}$	Typ 0.3 μs Max 0.8 μs
- Switching times on inductive load	
t_s @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=300\text{ V}$, $V_{BB}=-5\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{Bend}=4\text{ A}$, $L_B=1.5\mu\text{H}$	Typ 3.5 μs
t_s @ $T_J=100^\circ\text{C}$, $V_{CC}=300\text{ V}$, $V_{BB}=-5\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{Bend}=4\text{ A}$, $L_B=1.5\mu\text{H}$	Max 5 μs
t_f @ $T_J=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=300\text{ V}$, $V_{BB}=-5\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{Bend}=4\text{ A}$, $L_B=1.5\mu\text{H}$	Typ 0.08 μs
t_f @ $T_J=100^\circ\text{C}$, $V_{CC}=300\text{ V}$, $V_{BB}=-5\text{ V}$, $I_C=20\text{ A}$, $I_{Bend}=4\text{ A}$, $L_B=1.5\mu\text{H}$	Max 0.4 μs

1.6 - MOSFET di potenza



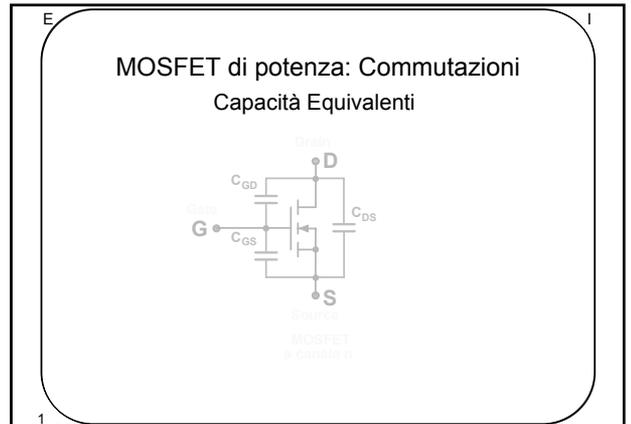
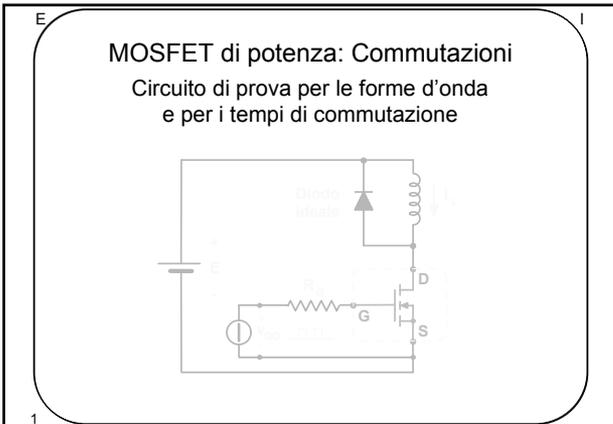


MOSFET di potenza: Applicazioni

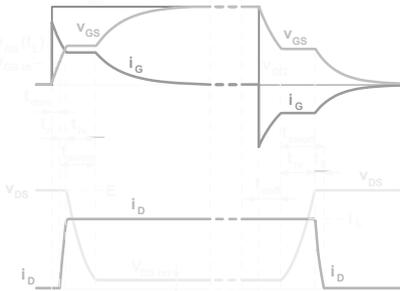
Caratteristiche dei MOSFET di potenza, usati come **interuttori a conduzione inversa**:

- 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



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 ($T_C=25\text{ °C}$)	P_{D25}	280 W
Linear Derating Factor	DF	2.2 W / °C
Gate to Source Voltage	V_{GS}	± 20 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 °C
Soldering Temperature (for 10 s, 1.6 mm from case)		300 °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} @ $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$	Min.	600 V
---	------	-------

MOSFET di potenza: Caratteristiche

$\Delta BV_{DSS}/\Delta T_J$ @ $T_J=25\text{ °C}$, $I_D=1\text{ mA}$ Typ	0.83 V / °C
$R_{DS(on)}$ @ $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=9.6\text{ A}$ (4)	Max 0.40 Ω
$V_{GS(th)}$ @ $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$	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 μA
I_{DSS} @ $V_{DS}=480\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_J=125\text{ °C}$	Max 500 μA
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 A, V _{DS} =360 V, V _{GS} =10 V	Max 210 nC
Q_{GS}	@ as above	Max 26 nC
Q_{GD}	@ as above	Max 110 nC
t_{d(on)}	@ E=300 V, I _D =16 A, R _G =4.5 Ω, R _D =18 Ω	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

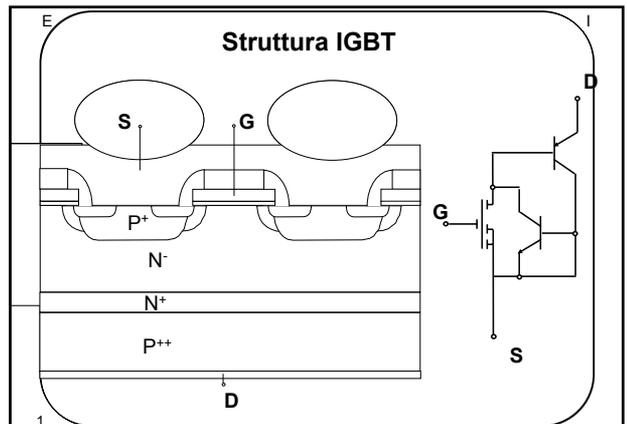
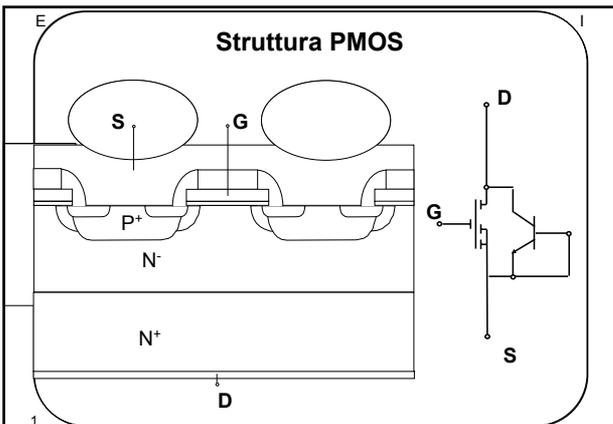
- Source-Drain (Body Diode) Ratings and Characteristics

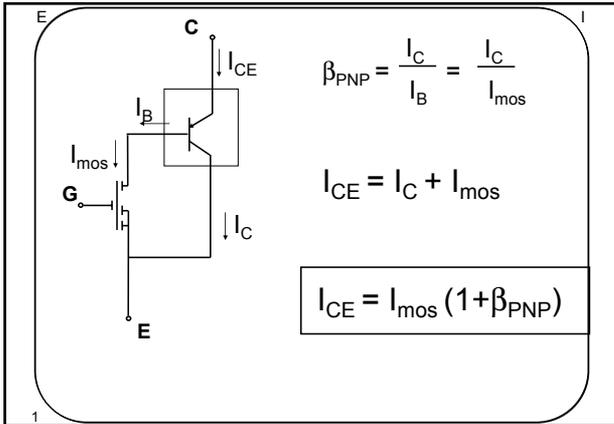
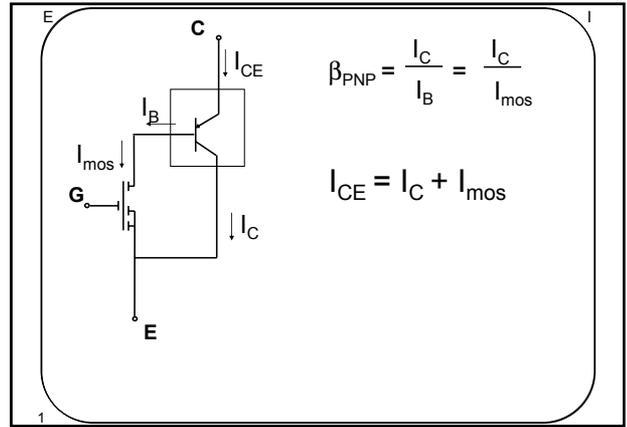
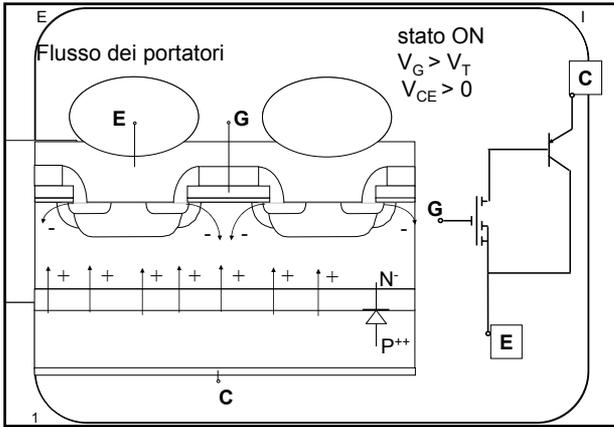
I_S	Continuous Source Current	Max 16 A
I_{SM}	Pulsed Source Current	Max 64 A
V_{SD}	Diode Forward Voltage @ V _{GS} =0 V, I _S =16 A, T _J =25 °C	Max 1.8 V

MOSFET di potenza: Caratteristiche

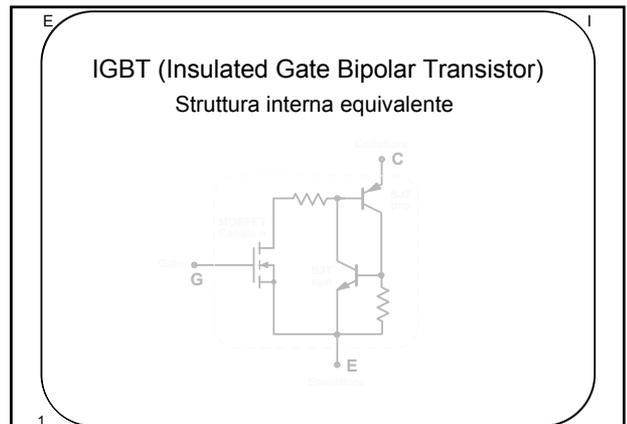
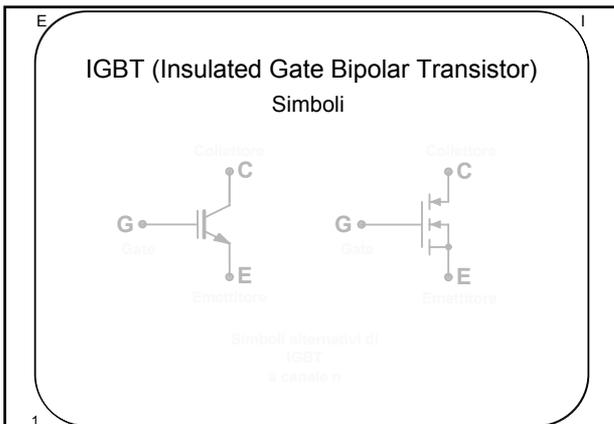
t_{rr}	Reverse Recovery Time @ I _S =16 A, T _J =25 °C, di/dt=100 A/μs	Max 920 ns Typ 610 ns
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge @ as above	Max 9.9 μC Typ 6.6 μC
t_{on}	Forward Turn-On Time: intrinsic turn-on time is negligible, turn on is dominated by L _S +L _D	

1.7 - IGBT



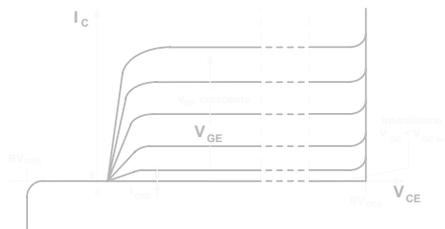


- L'IGBT é un dispositivo a conduzione "mista"
- Le caratteristiche di uscita sono determinate dal guadagno del PNP (bassa resistenza di uscita alle alte tensioni)
- Le caratteristiche di ingresso sono analoghe a quelle dei MOS di potenza (pilotaggio in tensione)



IGBT

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



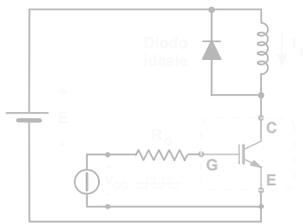
IGBT

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



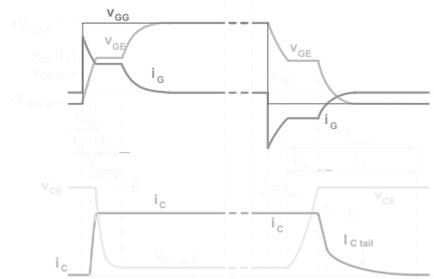
IGBT

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 Ω ,
 $T_J=25$ °C to 150 °C) V_{CGR} 1000 V
- Gate-emitter voltage (collector shorted)
continuous ($V_{CE}=0$ V) V_{GES} ± 20 V
- Gate-emitter voltage (collector shorted)
transient ($V_{CE}=0$ V) V_{GES} ± 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) ($V_{GE}=0\text{ V}$, $T_J=25\text{ °C to }150\text{ °C}$)	V_{CES}	1000 V
Collector-gate voltage ($R_{GE}=1\text{ M}\Omega$, $T_J=25\text{ °C to }150\text{ °C}$)	V_{CGR}	1000 V
Gate-emitter voltage (collector shorted) continuous ($V_{CE}=0\text{ V}$)	V_{GES}	$\pm 20\text{ V}$
Gate-emitter voltage (collector shorted) transient ($V_{CE}=0\text{ V}$)	V_{GES}	$\pm 30\text{ V}$

IGBT: Limiti Massimi

Continuous Drain Current

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

Continuous Drain Current

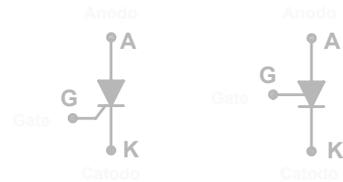
$$(V_{GS}=10\text{ V}, T_C=100\text{ °C}) I_D = 10\text{ A}$$

Pulsed Drain Current

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

1.8 - SCR

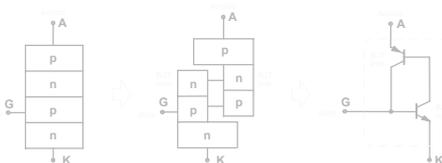
SCR (Silicon Controlled Rectifier) Simboli



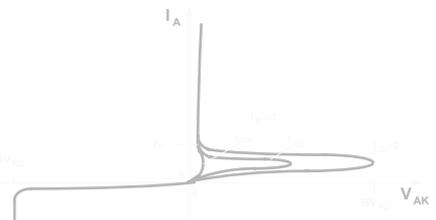
Simboli alternativi dell'SCR

SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Schema interno equivalente
derivato dalla struttura a quattro strati pnpn

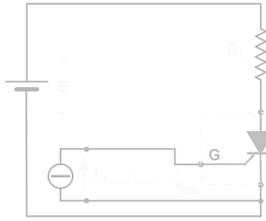


SCR (Silicon Controlled Rectifier) Caratteristiche statiche (I_A , V_{AK}) param. I_G



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

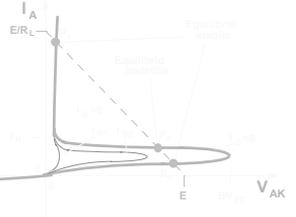
Circuito di prova per illustrare l'innesco ed il comportamento bistabile



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Punti di equilibrio con $I_G = 0$

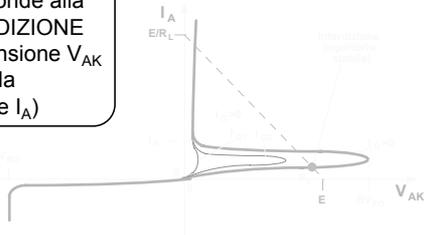
Con $I_G = 0$ vi sono due punti (P_1 e P_3) di equilibrio stabile ed uno (P_2) di equilibrio instabile



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Condizione di interdizione P_3 ($I_G = 0$)

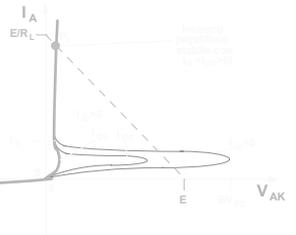
Il punto P_3 corrisponde alla **INTERDIZIONE** (alta tensione V_{AK} e piccola corrente I_A)



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

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

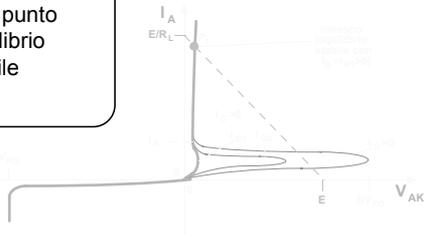
Per causare l'**INNESCO** dell'SCR si manda in gate una adeguata corrente $I_G > 0$ (ad es. I_{G1})



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

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

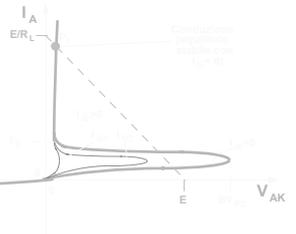
In tali condizioni, l'unico punto di equilibrio possibile è P_1



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

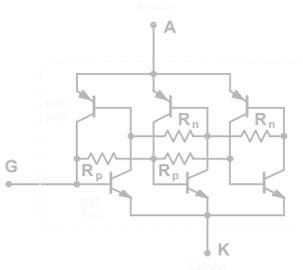
Condizione di conduzione P_1 ($I_G = 0$)

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



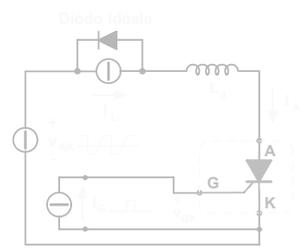
SCR (Silicon Controlled Rectifier)

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

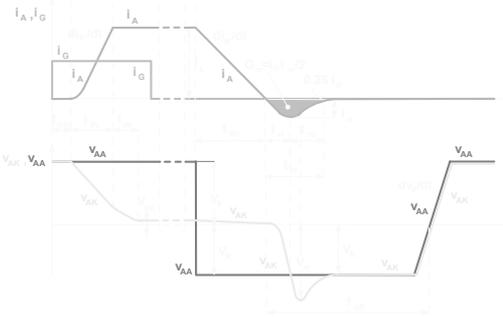


SCR (Silicon Controlled Rectifier)

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



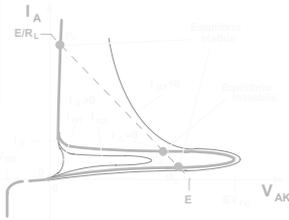
GTO (Gate Turn Off thyristor) Caratteristiche statiche (I_A , V_{AK}) param. I_G



GTO (Gate Turn Off thyristor)

Punti di equilibrio con $I_G = 0$

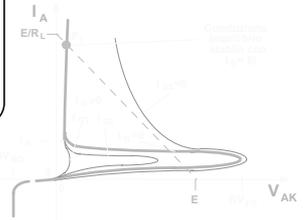
Come per l'SCR, con $I_G = 0$ vi sono due punti (P_1 e P_3) di equilibrio stabile ed uno (P_2) di equilibrio instabile



GTO (Gate Turn Off thyristor)

Condizione di conduzione P_1 ($I_G = 0$)

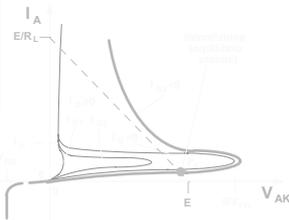
Se il GTO è in CONDUZIONE, nel punto di equilibrio stabile P_1 con $I_G = 0$



GTO (Gate Turn Off thyristor)

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

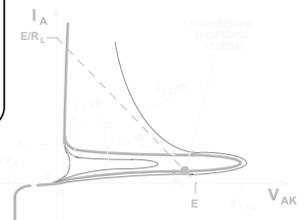
portando I_G ad un valore negativo $I_G = I_{G3} < 0$, l'unico punto possibile di funzionamento è P_4 (interdizione)



GTO (Gate Turn Off thyristor)

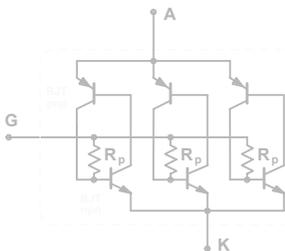
Condizione di interdizione P_3 ($I_G = 0$)

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



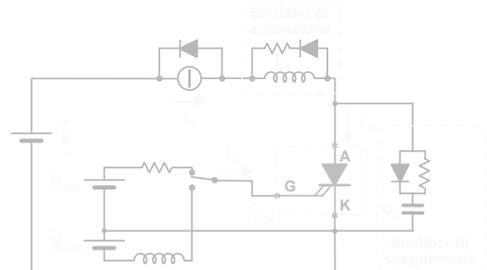
GTO (Gate Turn Off thyristor)

Schema interno equivalente di principio corrispondente alla struttura distribuita del GTO

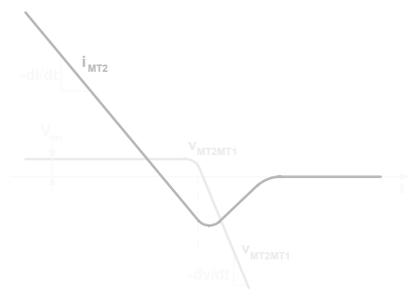


GTO (Gate Turn Off thyristor)

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



TRIAC (Triode AC thyristor)
Commutazione allo spegnimento



E

I

1