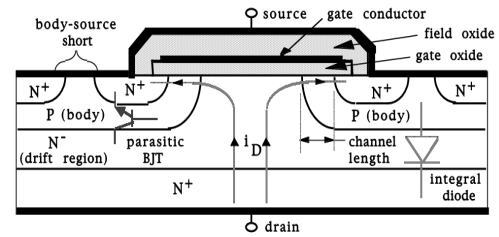


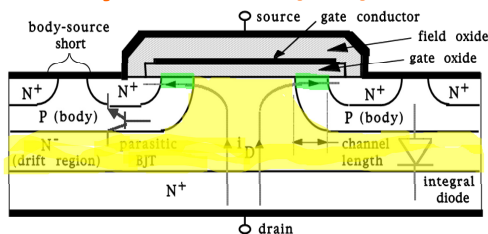
MOSFET di potenza

Vertically Diffused (VD) MOSFET



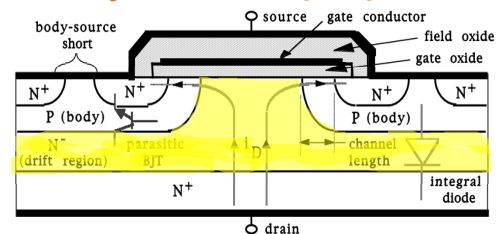
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N^{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$
- La tensione di breakdown e' determinata dalla regione di deriva
- BJT parassita (Nota: corto tra body e source, spegne il BJT)
- Diodo tra p-body e n+ drain (utile nei raddrizzatori)
- Il gate e' sovrapposto alla regione di deriva. Regione ON: riduce RON (accumulazione), regione OFF (agisce da "field plate").

Vertically Diffused (VD) MOSFET



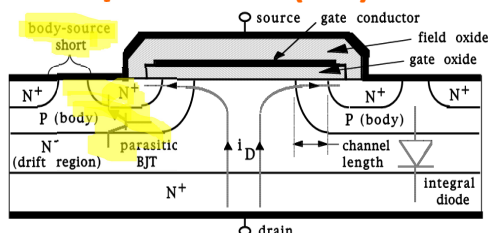
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N^{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$

Vertically Diffused (VD) MOSFET



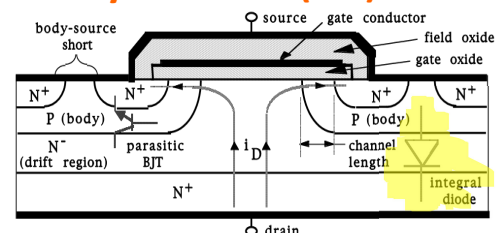
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N^{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$
- La tensione di breakdown e' determinata dalla regione di deriva

Vertically Diffused (VD) MOSFET



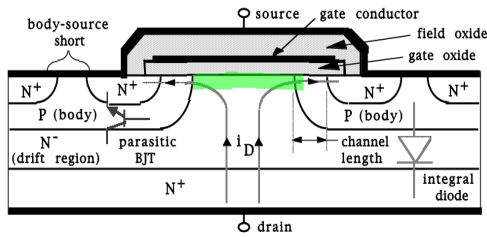
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N^{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$
- La tensione di breakdown e' determinata dalla regione di deriva
- BJT parassita (Nota: corto tra body e source, spegne il BJT)

Vertically Diffused (VD) MOSFET



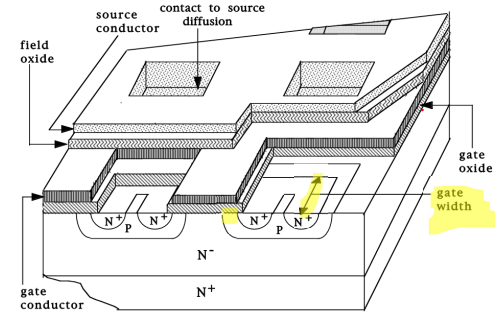
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N^{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$
- La tensione di breakdown e' determinata dalla regione di deriva
- BJT parassita (Nota: corto tra body e source, spegne il BJT)
- Diodo tra p-body e n+ drain (utile come diodo di ricircolo)

Vertically Diffused (VD) MOSFET



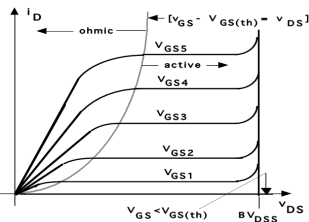
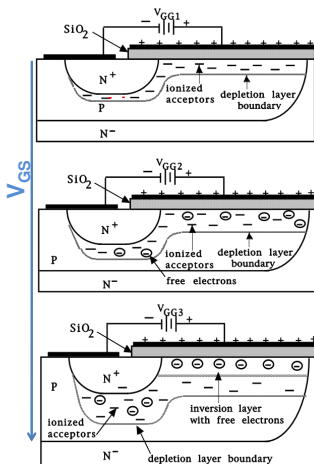
- $N^+ \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $P \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{\text{epi}} \sim 10^{14}\text{-}10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}} \sim 100 \text{ nm}$
- La tensione di breakdown è determinata dalla regione di deriva
- BJT parassita (Nota: corto tra body e source, spegne il BJT)
- Diodo tra p-body e n+ drain (utile come diodo di ricircolo)
- Il gate è sovrapposto alla regione di deriva. **Regione ON:** riduce R_{ON} (accumulazione). **Regione OFF:** agisce da "field plate".

VDMOSFET



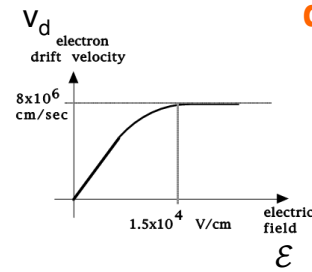
- Molte celle in parallelo (migliaia) di varia forma (per es. HEXFET) con piccole regioni di source → alto W/L (1000-10000)
- W del MOSFET è la somma delle larghezze di queste regioni

Funzionamento e caratteristiche I-V



- $V_{th} \sim 2\text{-}5 \text{ V}$
- **Caratteristica di trasferimento ~ lineare (non parabolica!)**

Saturazione della velocità di deriva

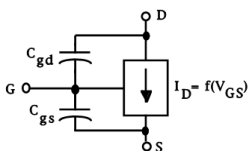


- È responsabile della transcaratteristica lineare.
- **Overdrive** = $(V_{GS} - V_{th})$
- Perché $I \sim (V_{GS} - V_{th})^2$?
 1. $I \propto Q v_d$
 2. $Q \propto (V_{GS} - V_{th})$
 3. $v_d \propto E \propto (V_{GS} - V_{th})$
 Caduta di tensione sul canale
- Il fattore 2 sparisce se la velocità degli elettroni satura ($v_d = v_{sat}$)
- In tal caso $I \propto Q v_d \propto (V_{GS} - V_{th})$

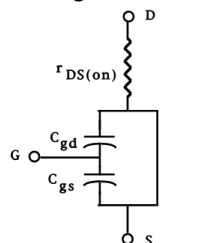
Modelli MOSFET in commutazione

- I MOSFET si basano su portatori maggioritari e sono quindi intrinsecamente più veloci dei BJT (frequenza switching fino a 1 MHz)
- C_{gs} e C_{gd} determinano la frequenza di commutazione

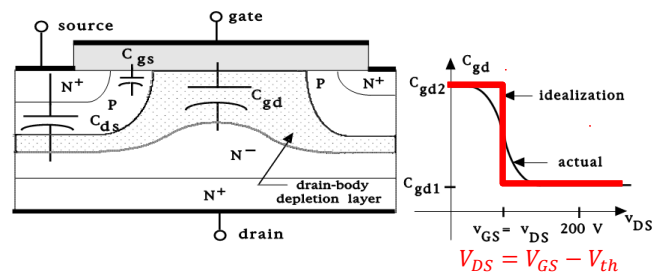
Zona attiva



regione ohmica

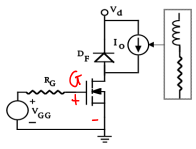


Capacità interne

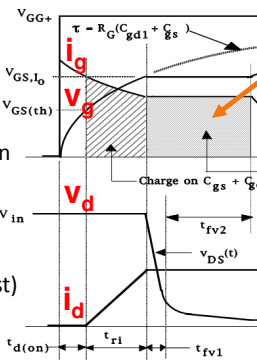


- C_{gs} indipendente da V_{DS}
- C_{gd} varia anche di 2 ordini di grandezza con V_{DS} .
- Appross a due livelli ($V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ - regione ohmica o $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ - saturazione)

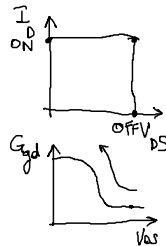
Accensione – turn on



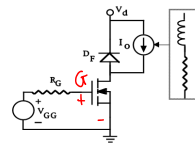
- Carico induttivo
- $t_{d(on)}$: delay turn on
 V_{GS} arriva a V_{th}
- t_{ri} : rise time i (sat) v_{in}
- t_{fv1} sat (V_{GS} cost)
- t_{fv2} lineare (V_{GS} cost)



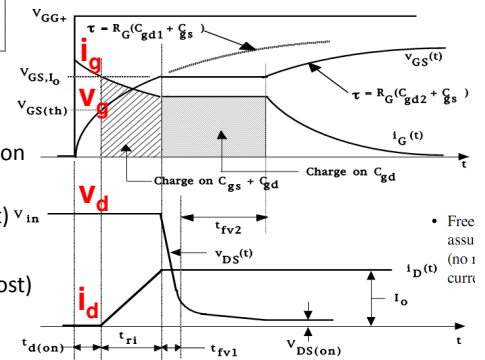
Nota:
 V_{GS} costante,
 I_G costante
 $\rightarrow dQ/dt$ costante
 $\rightarrow dC_{GD}/dt$ costante



Accensione – turn on

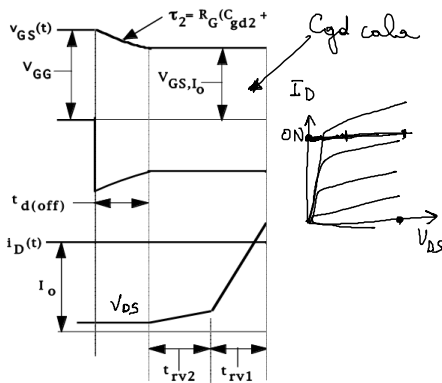


- Carico induttivo
- $t_{d(on)}$: delay turn on
 V_{GS} arriva a V_{th}
- t_{ri} : rise time i (sat) v_{in}
- t_{fv1} sat (V_{GS} cost)
- t_{fv2} lineare (V_{GS} cost)



• Free
 assu
 (no 1
 curr)

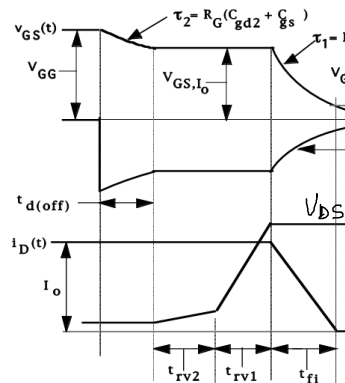
Spegnimento – turn off



• Per $t=0$ V_{GG} va a 0.
 • Quando VGS raggiunge il valore che sostiene la ID la variazione si arresta finché il canale non si svuota

- $t_{d(off)}$
- t_{rv2} : (lin)
- t_{rv1} : (sat)

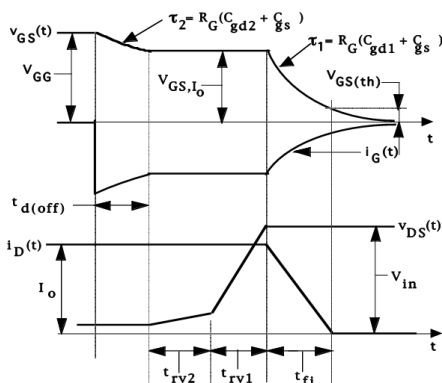
Spegnimento – turn off



• Per $t=0$ V_{GG} va a 0.
 • Quando VGS raggiunge il valore che sostiene la ID la variazione si arresta finché il canale non si svuota

- $t_{d(off)}$
- t_{rv2} : (lin)
- t_{rv1} : (sat)
- t_{fi} : (sat)

Spegnimento – turn off



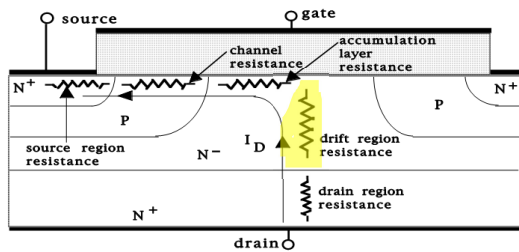
• Per $t=0$ V_{GG} va a 0.
 • Quando VGS raggiunge il valore che sostiene la ID la variazione si arresta finché il canale non si svuota

- $t_{d(off)}$
- t_{rv2} : (lin)
- t_{rv1} : (sat)
- t_{fi} : (sat)

Tensione di breakdown

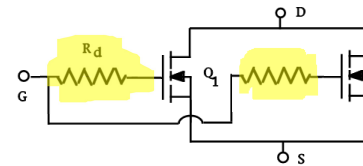
- Ratings:
 - $V_{GS(max)}$ \rightarrow breakdown dielettrico dell'ossido (10^7 V/cm)
 - Se $t_{ox} \sim 50-100$ nm $\rightarrow V_{GS(max)} \sim 50-100$ V (pratica 20-30 V)
 - Protezione da scariche elettriche tramite due Zener back-to-back tra G e S.
 - BV_{DSS} \rightarrow limitato dal breakdown a valanga tra drain e body \rightarrow dipende dallo spessore della regione di deriva (come nei diodi pn).

Perdita in conduzione



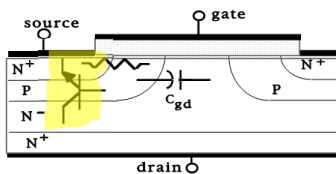
- R_{ON} Dovuta a tutte le resistenze di dispersione
- Per alte V_{BD} domina la resistenza della regione di deriva

MOSFET in parallelo



- R_{ON} ha un coefficiente di temperatura positivo
- Reazione negativa: se un MOSFET è più caldo degli altri, la sua corrente diminuisce rispetto agli altri e si raffredda (relativamente) riducendo la differenza
- R_D smorza eventuali oscillazioni L-C.

BJT Parassita

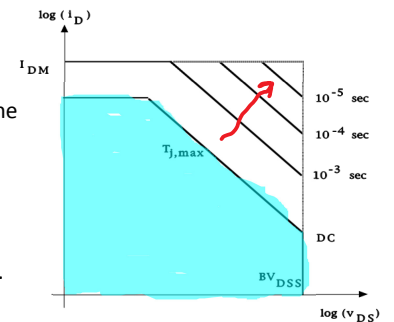


- Il BJT viene tenuto off mettendo in corto source e body.
- È pericolosa la condizione di latch up (BJT parassita in sat.) → alta dissipazione di potenza, e base non accessibile per lo spegnimento.
- Rischio durante il turn off del transistor: è necessario imporre un **limite a dv_{DS}/dt** attraverso circuiti di protezione (snubber)

SOA - Safe Operating Area

Tre limiti

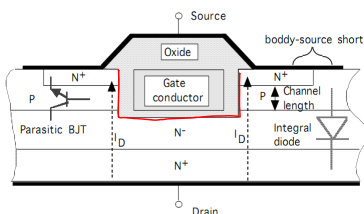
1. Massima corrente di drain
2. Temperatura di giunzione
3. Tensione di Breakdown BV_{DSS}



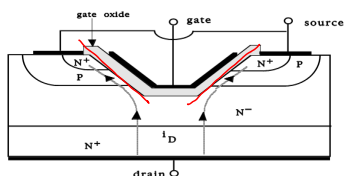
In modalità di switching la limitazione 2 non conta.

Non c'è distinzione tra FBSOA e RBSOA

Strutture alternative



- Trench-gate MOSFET
- Canale verticale
- Bassa R_{ON}
- Piu' recente



- V-groove MOSFET
- Alta R_{ON}