

# → FORMULARIO DISPOSITIVI ELETTRONICI ←

## MODELLO ATOMICO IDROGENOIDE

$$F_{\text{Coulomb}} = F_{\text{centrifuga}}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{e^2}{r_n^2} = \frac{m_0 v^2}{r_n}$$

$m_0$ : massa  $e^-$   
 $e$ : carica  $e^-$   
 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

$$r_n = \frac{n^2 \cdot \hbar^2 \cdot 4\pi\epsilon}{m \cdot e^2}$$

\* RAGGIO ATOMICO ↑

\* ENERGIA TOTALE ↓

$$E_{\text{TOT}} = \frac{1}{2} m v^2 + \left( -\frac{e^2}{4\pi\epsilon r_n} \right)$$

↓                      ↓  
 $E_{\text{cinetica}}$        $E_{\text{potenziale}}$

\* QUANTIZZAZIONE MOMENTO ANGOLARE

$$\hookrightarrow m_0 \cdot r_n \cdot v = n \cdot \hbar$$

$n$ : numero intero  
 $\hbar$ : cost. Dirac

## UNITA' DI MISURA

CARICA: Coulomb [C]

CAPACITA': Farad  $[F = \frac{C}{V}]$

CORRENTE: Ampere  $[A = \frac{C}{s}]$

RESISTENZA: Ohm  $[R = \frac{V}{A}]$

$m \rightarrow \mu m$  ( $\times 10^{-6}$ )

$cm \rightarrow \mu m$  ( $\times 10^{-2}$ )

## SEMICONDUCTORI: MICROSCOPICAMENTE e MACROSCOPICAMENTE

$$\langle v_d \rangle = \mu E$$

VELOCITA' DI DERIVA MEDIA

$$\mu = \frac{q\tau}{m}$$

MOBILITA'

$\tau$ : tempo necessario per perdere quantità di moto [s]

$E$ : campo elettrico [V/m]

$m$ : massa efficace [kg]

## CAMPO EL - POTENZIALE

$$V = E \cdot L$$

LEGGI DI OHM

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p}$$

$\rho$ : resistività [ $\Omega \cdot m$ ]

$\sigma$ : conducibilità

$L$ : lunghezza

$A$ : sezione

MOTO BROWNIANO

$$\frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$v_{th}$ : velocità termica

$k$ : cost. Boltzmann

$T$ : temperatura

CORRENTE ELETTRICA - DENSITA' DI CORRENTE

$$I = N q v_d = q n (v_d \cdot A) = q n A \mu E$$

$$= \sigma \frac{A}{L} V = \sigma E \cdot A = J_{\text{deriva}} \cdot A$$

$$J_{\text{deriva}} = \sigma E$$

$$J_{\text{diffusione}} = \mp q \Phi_p = \pm q D_p \frac{dn}{dx}$$

$n$ : concentrazione elettroni liberi [ $cm^{-3}$ ]

$p$ : concentrazione lacune libere [ $cm^{-3}$ ]

$D_p$ : coeff. di diffusione [ $\frac{cm^2}{s}$ ]

$\Phi_p$ : flusso di elettroni/lacune [ $cm^{-2}s^{-1}$ ]

MOBILITA' e TEMPERATURA

$$\mu(T) = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-3/2} \mu(T_0)$$

$$\mu(T) \propto T^{-3/2}$$

COEFF. DI DIFFUSIONE - RELAZIONE DI EINSTEIN

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \stackrel{300K}{=} V_{th} \mu_p = v_{th} \lambda$$

$V_{th}$ : tensione termica = 25,8 mV (a 300K)

$v_{th}$ : velocità termica

$\lambda$ : cammino libero (senza urti)

LEGGE DI FLICK

$$\Phi_n = -v_{th} \lambda \frac{dn}{dx} = -D_n \frac{dn}{dx}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi_n}{\partial x} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi_p}{\partial x} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x}$$

EQUAZIONE DI POISSON

$$\text{div } \vec{E} = \rho / \epsilon$$

$$\frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{\partial E(x)}{\partial x} = -\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2}$$

$\rho(x)$ : densità di carica spaziale [ $C \cdot cm^{-3}$ ]

$E(x)$ : campo elettrico

$V(x)$ : potenziale elettrico

SATURAZIONE VELOCITA':  $v_d = 10^7$  cm/s

## DROGGAGGIO

$N_D$ : concentrazione atomi donori [ $cm^{-3}$ ]

$N_A$ : concentrazione atomi accettori [ $cm^{-3}$ ]

$n_i$ : concentrazione intrinseca [ $cm^{-3}$ ]

$n$ : concentrazione elettroni liberi [ $cm^{-3}$ ]

$p$ : concentrazione lacune libere [ $cm^{-3}$ ]

\* FREEZE OUT: concentr. tende ad aumentare di T

\* REGIONE ESTRINSECA (N300K):

$$nSi: n = N_D \quad p = n_i^2 / N_D$$

$$pSi: p = N_A \quad n = n_i^2 / N_A$$

\* REGIONE INTRINSECA:

$$\left\{ \begin{array}{l} n + N_A = p + N_D \end{array} \right. \rightarrow \text{CARICA}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} np = n_i^2 \end{array} \right. \rightarrow \text{LEGGE DI AZIONE DI MASSA}$$

LEGGE NEUTRALITA' DI



## CONCENTRAZIONE INTRINSECA PORTATORI LIBERI

$$n_i(T) = C T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{GAP}}{2kT}\right)$$

## REGOLA DI MATTHIESSEN

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}$$

probabilità totale  
coincidenza di  
meccanismi di  
interazione.

## GENERAZIONE e RICOMBINAZIONE

\* RICOMBINAZIONE MEDIATA DA DIFETTI:

$$\tau_n = \frac{1}{N_t A \nu_{th}}$$

$$R_n = R_p = \frac{n}{\tau_n} = \frac{p}{\tau_p}$$

$\tau_n$ : tempo medio per incontrare

primo difetto

$N_t$ : concentrazione di difetti [cm<sup>-3</sup>]

all'equilibrio:

$$G_n = G_p = \frac{n_0}{\tau_n} = \frac{p_0}{\tau_p}$$

$G = g_1(T)$  TASSO DI GENERAZIONE

$R = n p g_2(T)$  TASSO DI RICOMBINAZIONE

$$\text{allo equilibrio: } G = R \Rightarrow n p = \frac{g_1(T)}{g_2(T)} = n_i^2(T)$$

\* CONCENTRAZIONE DI PORTATORI:

$$n = n_0 + n'$$

$n_0$ : conc. all'equilibrio [cm<sup>-3</sup>]

$n'$ : conc. in eccesso

## EQUAZIONE DI CONTINUITA'

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \left( E \cdot \frac{\partial n}{\partial x} + n \cdot \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_n - \frac{n}{\tau_n}$$

↳ per lacune (meno)

$$g_n = G_{n_0} + g_{n'}$$

$$R_n = R_{n_0} + R_{n'}$$

all'eq:  $G_{n_0} = R_{n_0}$

inoltre

$$g_{n'} = g_{p'} = g'$$

\* semiconduttore omogeneo: eq. di continuità con  $n'$  al posto di  $n$ :

n Si:

$n_0 \gg p_0$ ;  $p' \ll n_0$   
BASSA INIEZIONE

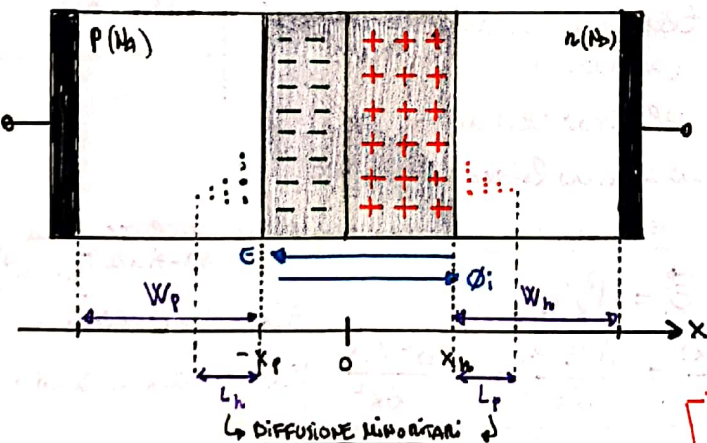
$$\frac{\partial p'}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p'}{\partial x} + g' - \frac{p'}{\tau_p}$$

p Si:

$p_0 \gg n_0$ ;  $n' \ll p_0$   
BASSA INIEZIONE

$$\frac{\partial n'}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n'}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n'}{\partial x} + g' - \frac{n'}{\tau_n}$$

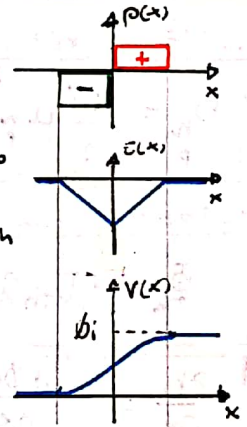
## GIUNZIONE PN - DIODO



$$\rho(x) = \begin{cases} -qN_A & -x_p < x < 0 \\ qN_D & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\epsilon} (x + x_p) & -x_p < x < 0 \\ \frac{qN_D}{\epsilon} (x - x_n) & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$V(x) = \begin{cases} \frac{qN_A}{2\epsilon} (x + x_p)^2 & -x_p < x < 0 \\ \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2 + \frac{qN_D}{\epsilon} (x_n x - \frac{x^2}{2}) & 0 < x < x_n \end{cases}$$



## CONDIZIONE BASE COLTA - LATO n O LATO p

\* lato p:  $W_p < 5 L_n$

$L_n$ : lunghezza di diffusione minoritari

\* lato n:  $W_n < 5 L_p$

## TENSIONE DI BUILT-IN

$$V_{bi} = V_{th} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

## POLARIZZAZIONE

$$\phi_i = V_{bi} + V_R - V_D$$

$V_{bi}$ : tensione built-in

$V_R$ : tensione INVERSA

$V_D$ : tensione DIRETTA

( $V_D$  e  $V_R$  si escludono a vicenda)

## ZONA SVUOTATA

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_i}{q} \left(\frac{N_A}{N_D}\right) \left(\frac{1}{N_A + N_D}\right)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_i}{q} \left(\frac{N_D}{N_A}\right) \left(\frac{1}{N_A + N_D}\right)}$$

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_i}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$$

$$x_n = W \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

$$x_p = W \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

$$\phi_i = (F_{max} \cdot W) / 2$$

## GIUNZIONE UNILATERA

DIFFERENZA  $N_A - N_D$  di FATTORE 100

ZONA SVUOTATA SI ESTENDE MAGGIORMENTE NELLA ZONA MENO DROGATA



## LUNGHEZZA DI DIFFUSIONE

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

e' la "costante esponenziale" dell'andamento della CONCENTRAZIONE di MINORITARI. Determina BASE LUNGA o CORTA.

In BASE CORTA andamento lineare, si usa  $W_n$  e  $W_p$ !

## CONCENTRAZIONE PORTATORI MINORITARI - ( $V = V_0 = -V_R$ | dipende da polarizzazione)

$$\left. \begin{aligned} n(0) &= n_0 \exp(V/V_{th}) \\ p(0) &= p_0 \exp(V/V_{th}) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{dipende da temperatura } (V_{th}) \\ &\text{indica la CONCENTRAZIONE AI BORDI DELLA ZONA SVUOTATA} \\ &\text{ovvero } n(-x_p) \text{ e } p(x_n). \end{aligned}$$

Basta sapere questo, poi in base a BASE CORTA/LUNGA e VALORI DI EQUILIBRIO si ricava il resto.

Per completezza:

\* BASE LUNGA:

$$n(x) = n_0 + n_0 (e^{V/V_{th}} - 1) \exp\left[-\frac{|DISTANZA DA X_p|}{L_n}\right]$$

$$p(x) = p_0 + p_0 (e^{V/V_{th}} - 1) \exp\left[-\frac{|DIST. DA X_n|}{L_p}\right]$$

\* BASE CORTA:

$$n(x) = n_0 + n_0 (e^{V/V_{th}} - 1) \left[1 - \frac{|DIST. DA X_p|}{W_p}\right]$$

$$p(x) = p_0 + p_0 (e^{V/V_{th}} - 1) \left[1 - \frac{|DIST. DA X_n|}{W_n}\right]$$

## DENSITA' DI CORRENTE (STESSO ANDAMENTO EXP. con COSTANTI EXP. $L_{n,p}$ ALLONTANANDOSI VANNO A ZERO con COSTANTE EXP. $L_{n,p}$ )

$$J_n(0) = q n_0 \frac{D_n}{(L_n, W_p)} (e^{V/V_{th}} - 1)$$

$$J_p(0) = q p_0 \frac{D_p}{(L_p, W_n)} (e^{V/V_{th}} - 1)$$

e' tutto cio' che c'e' da sapere!

BASE LUNGA: si usa  $L$ , ANDAMENTO ESPONENZIALE

BASE CORTA: si usa  $W$ , RETTA COSTANTE

Ovviamente si intende  $J_n(-x_p)$  e  $J_p(x_n)$

$$J_{TOT} = |J_n(0)| + |J_p(0)| = q n_i^2 \left[ \frac{D_p}{N_D (L_p, W_n)} + \frac{D_n}{N_A (L_n, W_p)} \right] \cdot (e^{V/V_{th}} - 1)$$

Il contributo dei maggioritari per differenza!

## CONDENSATORE MOS

### TENSIONE CONTATTO METALLO-SUBSTRATO

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - \left( q\chi + \frac{E_{GAP}}{2} \mp |q\phi_p| \right) [eV]$$

$q\phi_m$ : funzione lavoro metallo

$q\chi$ : AFFINITA' ELETTRONICA (=  $\frac{E_{vacuum} - E_c}{W_{MOS}}$ )

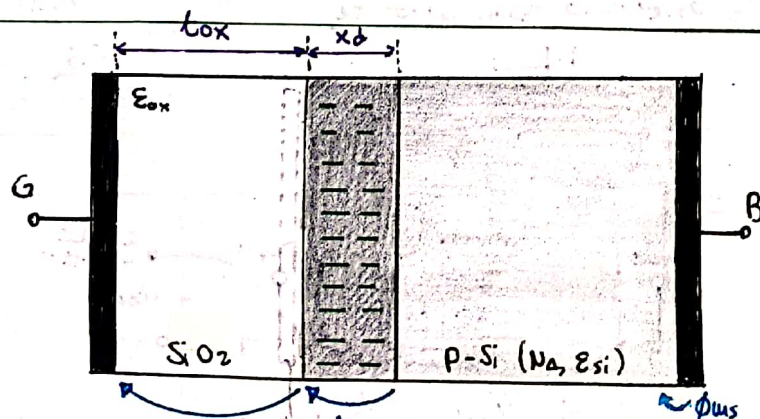
$q\phi_p$ : potenziale di Fermi substrato n o p

### POTENZIALE DI FERMÌ n o p

$$q\phi_n = kT \ln(N_D/n_i)$$

$$q\phi_p = kT \ln(N_A/n_i)$$

$E_c$ : BANDA DI CONDUZIONE  
 $E_v$ : BANDA VALENZA  
 $E_i$ : LIVELLO FERMÌ INTRINSECO



CAPACITA' OSSIDO SiO2  $C'_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox} \left[ \frac{F}{cm^2} \right]$

TENSIONE DI BANDA PIATTA  $V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ox}'}{C'_{ox}}$

$Q_{ox}$ : carica intrappolata all'interfaccia SiO2-Si (spesso e' zero)

### TENSIONE AL CONTATTO DI DUE ZONE DROGATE DIVERSAMENTE

si considerano sempre gli elettroni!

$$\phi_{np} = V_{th} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = V_{th} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

potenziale positivo verso n (numeratore)



## EQ. BILANCIO TENSIONI CONDENSATORE MOS:

$$V_{GB} - V_{FB} = \psi_s + \Delta V_{ox}$$

$$\Delta V_{ox} = \frac{Q_{GATE}}{C_{ox'}} = - \frac{Q'_{BULK}}{C_{ox'}}$$

$Q_{GATE}$ : carica all'interp. G-SiO<sub>2</sub>

$Q'_{BULK}$ : carica all'interp. Si-SiO<sub>2</sub> [ $\frac{C}{cm^2}$ ]

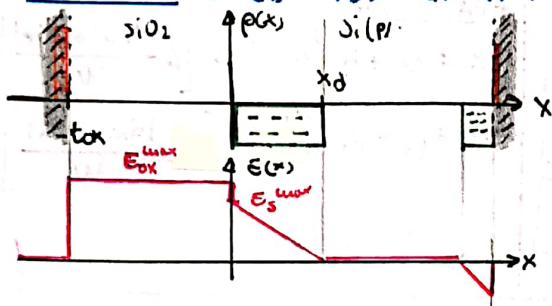
## REGIONI DI FUNZIONAMENTO

\* **ACCUMULAZIONE** ( $V_{GB} < V_{FB}$ ):  $\psi_s$  vicino perché zona svuotata molto piccola.

$Q_B > 0$  mentre  $Q_G < 0$

$$V_{GB} - V_{FB} = \frac{Q_G'}{C_{ox'}} = - \frac{Q_B'}{C_{ox'}}$$

\* **SVUOTAMENTO** ( $V_{GB} > V_{FB}$ ,  $V_{GB} - V_{FB}$  piccolo;  $0 < \psi_s < \phi_F$ ):



$$\epsilon_{ox} \epsilon_{ox}^{max} = \epsilon_s \epsilon_s^{max}$$

$$x_d = \sqrt{\frac{2\psi_s \epsilon_s}{qN_A}}$$

$$-Q_G' = Q_B' = Q_d' = -qN_A x_d$$

$$\psi_s = \frac{qN_A x_d^2}{2\epsilon_s}$$

$$Q_d' = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A \psi_s}$$

$Q_d'$ : carica svuotamento

$Q_c'$ : carica elettroni liberi [ $\frac{C}{cm^2}$ ]

\* **INVERSIONE** ( $V_{GB} - V_{FB}$  grande)

$$Q_B' = Q_c' + Q_d'$$

**DEBOL INVERSIONE**  $\phi_F < \psi_s < 2\phi_F$

**DEBOL INVERSIONE**

$Q_c \approx 0$ ; come svuotamento!

**FORTE INVERSIONE**  $\psi_s > 2\phi_F$

**FORTE INVERSIONE**

Quando la concentrazione di elettroni liberi è almeno pari a  $N_A$ ; ciò avviene per

$$\psi_s = 2V_{th} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 2\phi_F$$

**TENSIONE di SOGLIA** ( $\psi_s = 2\phi_F$ )

$Q_d'$  calcolato come sopra!

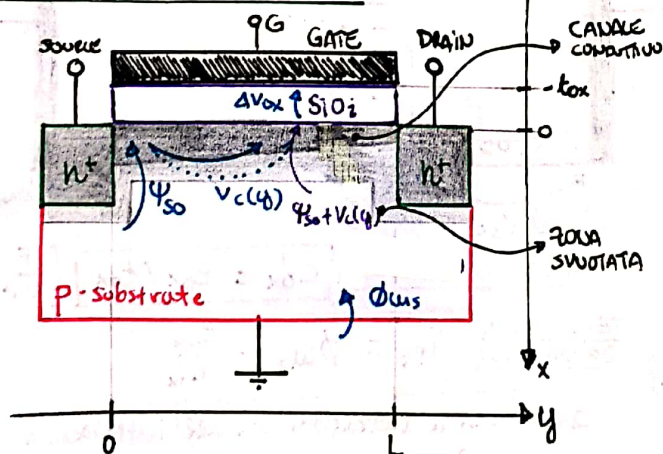
$$V_{TH} = V_{FB} + \psi_s - Q_d'/C_{ox'}$$

$$Q_c' = -C_{ox'}(V_{GB} - V_{TH}) \quad (\text{deve essere } \leq 0)$$

per eventuali diodi interni si osservano zone svuotate



## MOSFET a canale n



a. si approssima la carica  $Q_d'$  della zona svuotata a quella al source

$$Q_d'(y) \approx -\sqrt{2q\epsilon_s N_A (\psi_s + V_s)}$$

b. anche la TENSIONE di SOGLIA si modifica. Partendo dalla solita equazione

$$V_G - V_{FB} = \psi_s + V_c(y) - \frac{Q_d'}{C_{ox'}} - \frac{Q_c'(y)}{C_{ox'}}$$

$Q_c'$ : carica nel canale [ $C/cm^2$ ]  
isolando  $Q_c'(y)$ :

**TENSIONE di SOGLIA** ( $\psi_s = 2\phi_F$ )

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F - \frac{Q_d'}{C_{ox'}}$$

osserva al drain e source  
V\_G, V\_D, V\_S

**CARICA NEL CANALE**

$$Q_c'(y) = \begin{cases} -C_{ox'} [V_G - V_c(y) - V_{TH}] & \text{per } V_G - V_c(y) > V_{TH} \\ 0 & \text{per } V_G - V_c(y) < V_{TH} \end{cases}$$

\* (spessore: W)

\* E' un CONDENSATORE MOS cui sono stati aggiunti Source e Drain. Una eventuale tensione al Drain-Source  $V_c(y)$  si somma a  $\psi_s$   
 $\psi_s = \psi_{s0} + V_c(y)$  con  $V_c(0) = V_s$   
 $V_c(L) = V_d$



## REGIONI DI FUNZIONAMENTO

\* INTERDIZIONE ( $V_{GS} < V_{TH}$ ): densità di carica nulla (pressoché). Corrente  $I_D$  nulla.

\* TRIODO - OHMICA-LINEARE ( $V_{GS} > V_{TH} \mid V_{GD} > V_{TH} \text{ o } V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$ ):

Il canale è presente in tutto  $[0, L]$ . Vi è una corrente  $I_D \neq 0$ .

$$\frac{1}{\partial I_D / \partial V_{DS}} = \frac{1}{G}$$

RESISTENZA CANALE

$$R_{ch}(V_{GS}) = \frac{1}{\mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})}$$

CORRENTE OHMICA

$$I_D = \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$$

$$I_D^{max} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} V_{DS}^2 \text{ con } V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$$

per  $V_{DS}$  piccola:

$$I_D \approx \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS}$$

\* SATURAZIONE ( $V_{GS} > V_{TH} \mid V_{GD} < V_{TH} \text{ oppure } V_{DS} > (V_{GS} - V_{TH})$ ):

Il punto in cui il canale si strozza è  $L'$ , detto punto di PINCH-OFF. ( $L' < L$ )  
Aumentando  $V_{DS}$  oltre  $V_{GS} - V_{TH}$ ,  $L'$  si allontana da  $L$  (anticipa).

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_{TH} \text{ cade su } [0, L']$$

$$V_{DS} - V_{DSsat} \text{ cade su } [L', L]$$

La corrente  $I_D$  è determinata da  $V_{DSsat}$ ; i portatori giunti al PINCH-OFF vengono spinti al drain da  $V_{DS} - V_{DSsat}$ .

Sostituendo in  $I_D^{OHM}$   $V_{DS}$  con  $V_{DSsat}$  e approx.  $L'$  con  $L$  (MOSFET a CANALE LUNGO):

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox}' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

CORRENTE DI SATURAZIONE

Per tenere conto del variare di  $L'$  con  $V_{DS}$ :

MODULAZIONE CANALE

$$I_D \approx I_D^{sat} (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\lambda = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dV_{DS}} = 1/V_{EAFY}$$

$$I_{DS} = q n' c W \cdot v = Q_C' \cdot W \cdot v$$

$v$ : velocità portatori

$n'$ : concentrazione elet. liberi

CORRENTE MASSIMA TRASPORTABILE

$$I_{DS, max} = (V_{GS} - V_C - V_{TH}) W \cdot v_{sat}$$

$$v_{sat} \approx v_{th} = 10^7 \text{ cm/s}$$

VELOCITÀ CARICHE NEL CANALE

$$v_n = \mu_n E = \mu_n \frac{V_{DS}}{L} = \mu_n \frac{V_{DSsat}}{L}$$

TEMPO DI TRANSITO

$$\tau_T = \frac{L}{v_n}$$

FREQUENZA DI TAGLIO

$$f_T = \frac{1}{2\pi \tau_T}$$

## BANDE ENERGETICHE

ELETTRONI IN BANDA DI CONDUZIONE

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$N_C$ : densità di stati equivalenti in banda di conduzione

LACUNE IN BANDA DI VALENZA

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

$N_V$ : densità di stati equivalenti in banda di valenza

CONCENTRAZIONE INTRINSECA

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_{gap}}{2kT}\right)$$

$$E_{gap} = E_C - E_V$$

LIVELLO DI FERMI INTRINSECO

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{1}{2} kT \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right)$$

AFFINITÀ ELETTRICA

$$\chi = \text{livello di vuoto} - E_C$$

POTENZIALE DI FERMI

distanza tra  $E_F$  e  $E_i$

$$\phi_F = \frac{1}{q} (E_F - E_i)$$

$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \text{ (regione n)}$$

$$\phi_p = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \text{ (regione p)}$$

$$\text{BARRIERA DI POTENZIALE} = \phi_n - \phi_p$$

LIVELLO DI FERMI: livello occupato di maggior energia a 0K.

LIVELLO DI VUOTO: livello asintotico di energia

LIVELLO DI FERMI INTRINSECO  $E_i$ :