

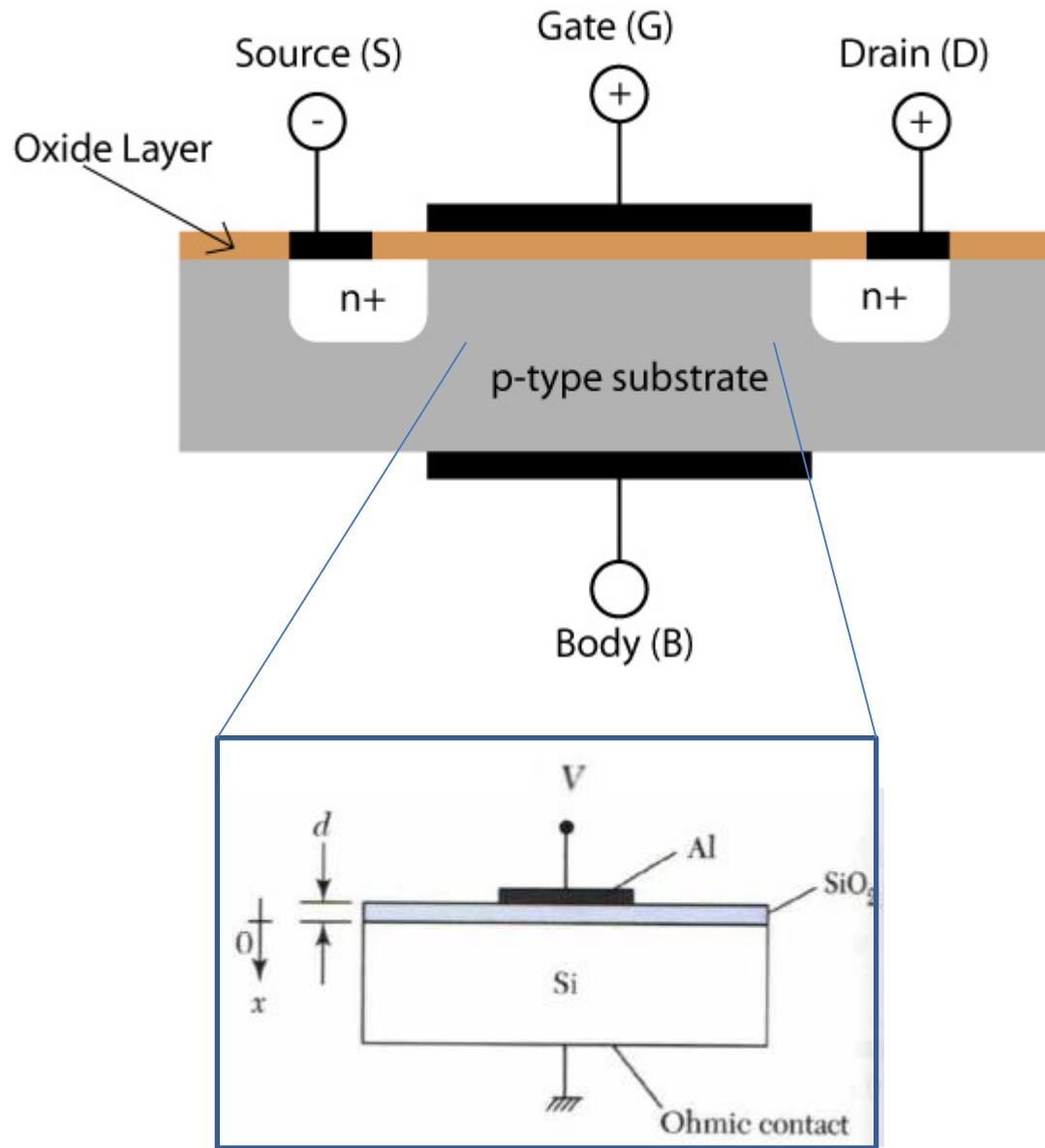
Organic Field Effect Transistors

Prof- Piero Cosseddu, Ph. D.

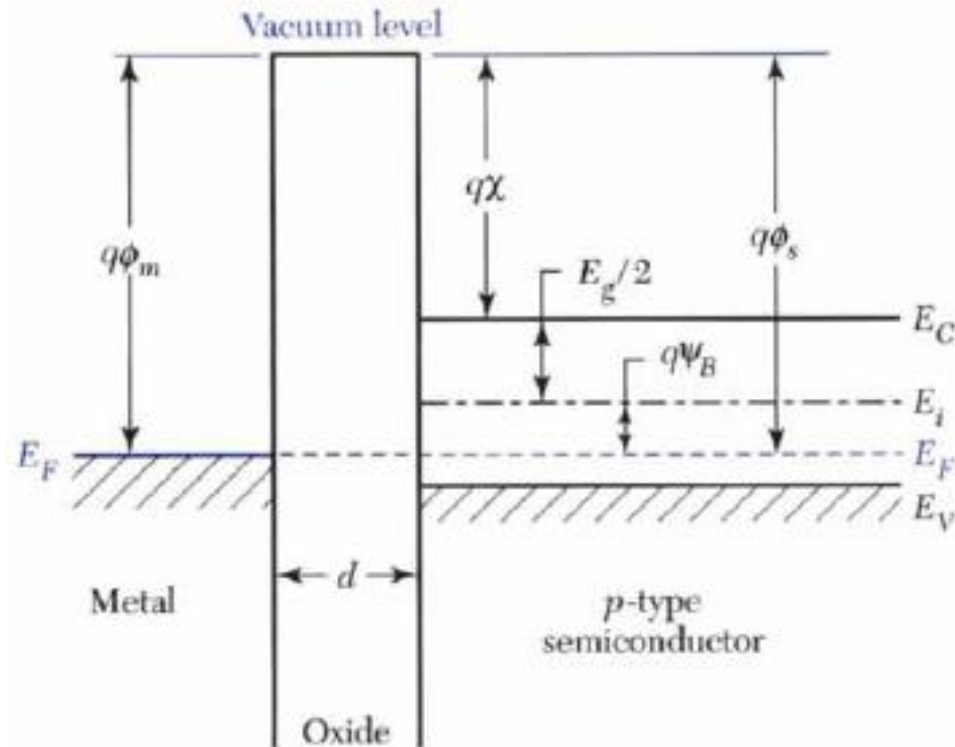
Dept. of Electrical and Electronic Engineering
University of Cagliari (Italy)

Corso di Tecnologie e Dispositivi Elettronici Avanzati
A.A. 2015-2016

MOS



Il diagramma a bande si costruisce imponendo che, all'equilibrio, il livello di Fermi sia costante e il livello del vuoto sia continuo. Nel caso particolare in cui la funzione lavoro del metallo sia pari a quella del semiconduttore, condizione di banda piatta (quando non vi è tensione applicata)

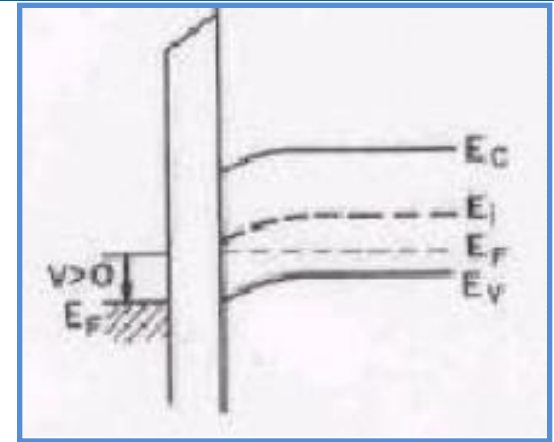


Quando si applica una tensione al sistema MOS, di qualunque segno sia la tensione, **il livello di Fermi nel metallo dista dal livello di Fermi nel semiconduttore di una quantità pari**, in elettronvolt, **alla tensione applicata** (in Volt).

D'altra parte, data la presenza dell'ossido, non ci può essere passaggio di corrente dal metallo al semiconduttore.

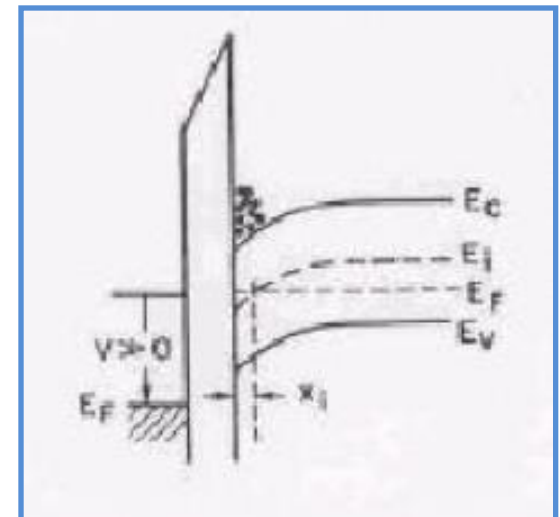
- Se $V < 0$ il livello di Fermi del metallo è superiore a quello del semiconduttore
- Se $V > 0$ il livello di Fermi del metallo è inferiore a quello del semiconduttore

Caso $V > 0$ (ma non troppo) : le bande si incurvano verso il basso, in superficie $E_i - E_F$ diminuisce \rightarrow svuotamento di lacune. Si crea una regione di carica spaziale di ampiezza W



$$p = n_i \exp \left[\frac{E_i - E_F}{kT} \right]$$

Caso $V \gg 0$: le bande si incurvano verso il basso, in superficie $E_i - E_F$ diminuisce fino a cambiare segno \rightarrow accumulo di elettroni



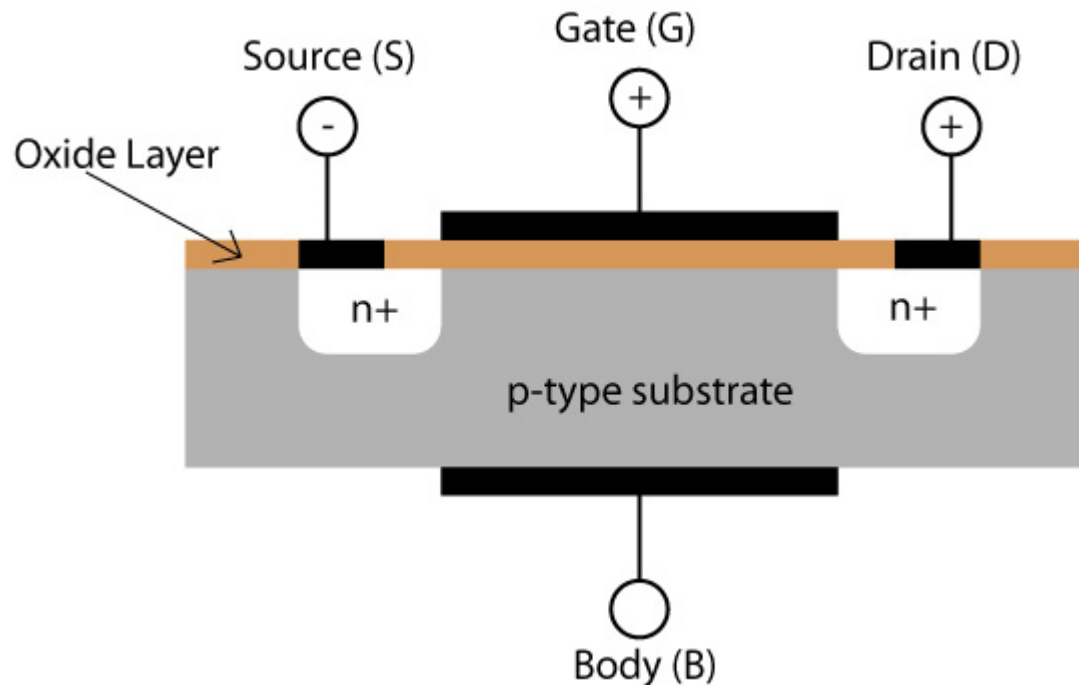
INVERSIONE DI POPOLAZIONE

MOSFET

Il MOSFET è un FET che utilizza come canale la regione di inversione che si crea in una struttura MOS opportunamente polarizzata

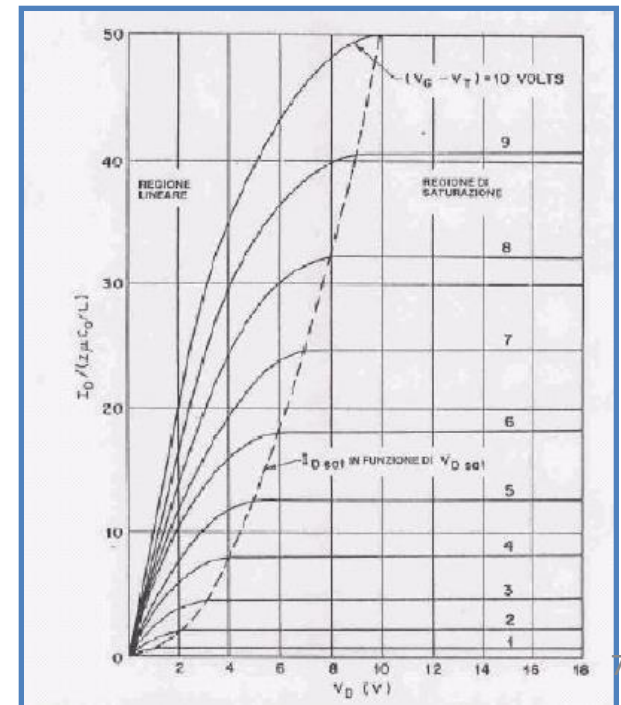
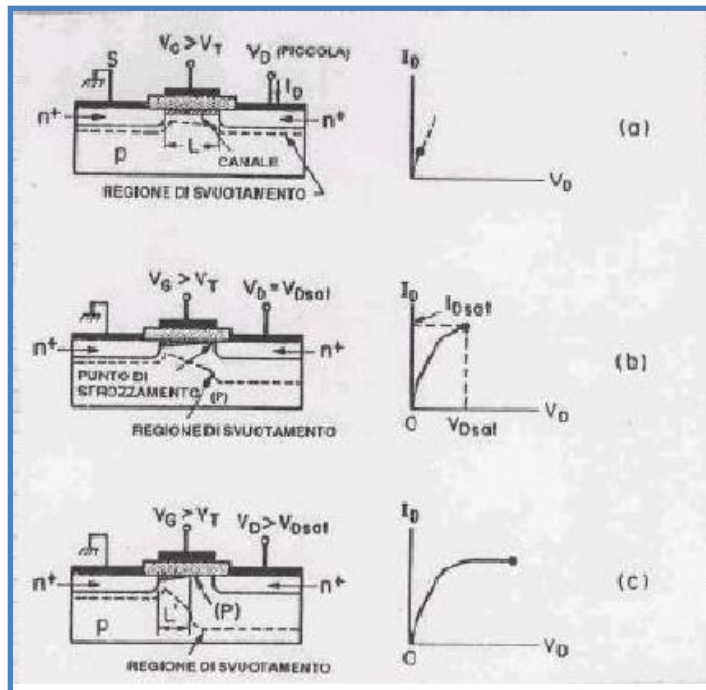
Il contatto di gate del transistor coincide con il Metallo della struttura MOS. Esso è elettricamente isolato dal resto della struttura attraverso l'ossido della struttura MOS

Rispetto al MOS, perciò, la struttura ha due ulteriori contatti, SOURCE e DRAIN, mentre il contatto del bulk di solito (ma non obbligatoriamente) viene eliminato

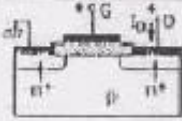
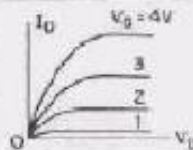
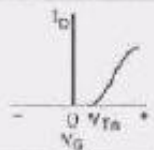

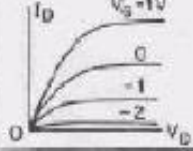
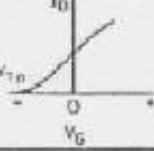
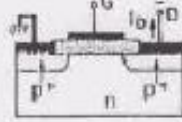
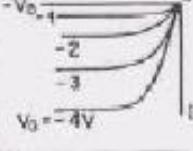
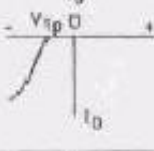
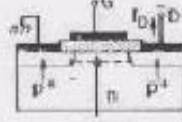
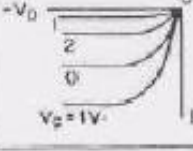



Partendo dalla condizione in cui $V_G > V_T$, ovvero purchè il canale sia formato, per V_D piccoli, il canale ha un comportamento ohmico e nella caratteristica si osserva una regione lineare. Man mano che V_D aumenta, il canale diventa sempre meno simmetrico e si restringe verso il drain.

Aumentando ancora V_D fino a V_{Dsat} , il canale si strozza, la corrente diventa costante. ogni ulteriore aumento di V_D fa sì che il punto di pinch-off si sposti verso il source che mantiene sempre lo stesso potenziale V_{Dsat} rispetto al source



Tipi di MOSFET

TIPO	SEZIONE TRASVERSALE	CARATTERISTICHE D'USCITA	TRASCARATTERISTICHE
CANALE n AD ARRICCHIMENTO (NORMALMENTE CHIUSO)			
CANALE n A SVUOTAMENTO (NORMALMENTE APERTO)			
CANALE p AD ARRICCHIMENTO (NORMALMENTE CHIUSO)			
CANALE p A SVUOTAMENTO (NORMALMENTE APERTO)			

Vedi
Sze pag 254

A seconda che il semiconduttore sia di tipo p o di tipo n e a seconda del valore della tensione di soglia, si possono ottenere diversi tipi di dispositivi che si distinguono in base al fatto che a $V=0$, il canale sia o meno formato e al tipo di conduzione (elettroni o lacune)

Organic Field Effect Transistor

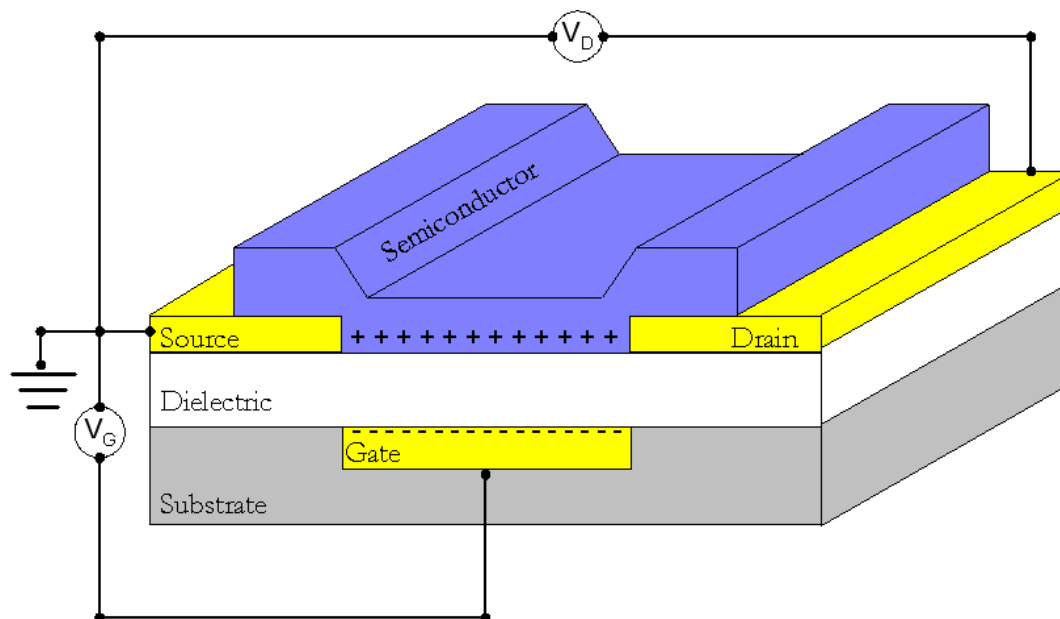
Primi esempi di Transistor Organico ad Effetto di Campo
Configurazione a **Transistor a film sottile (TFT)**

Substrato Silicio fortemente dopato → Gate

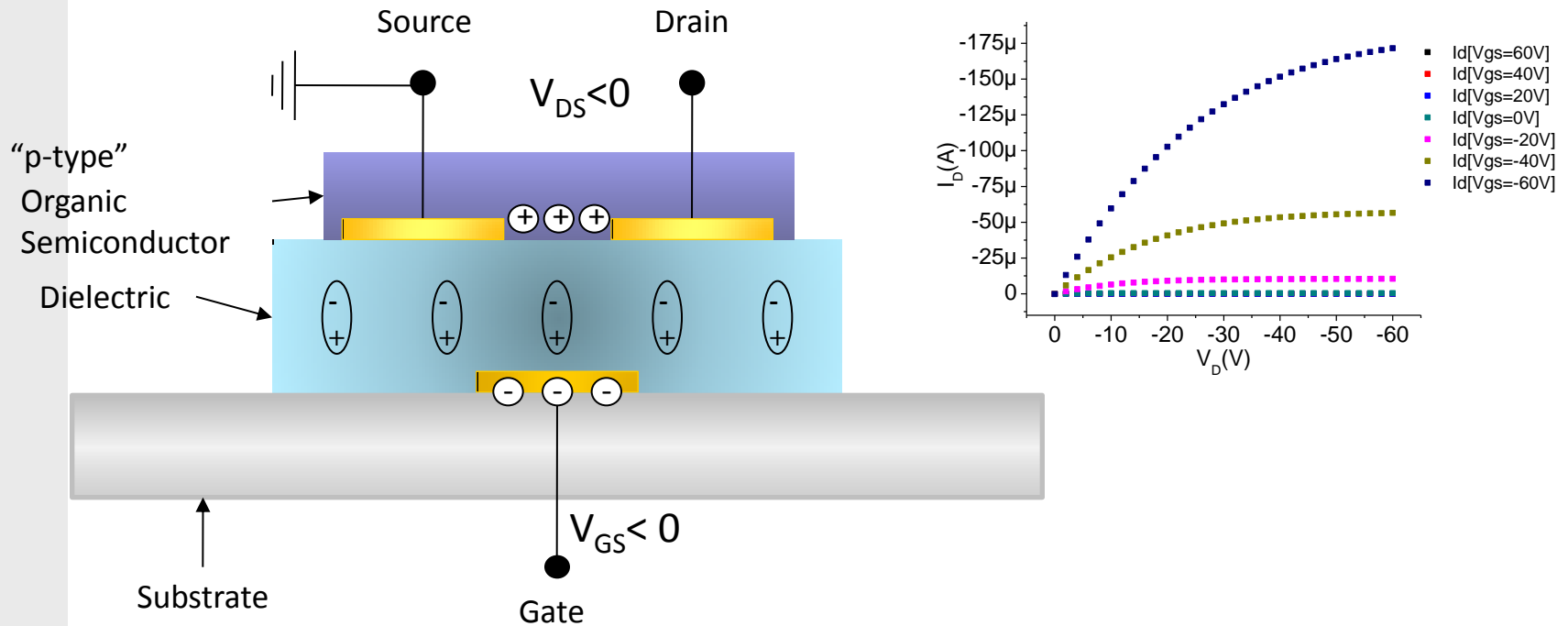
SiO_2 → Ossido di Gate

Oro → Source e Drain

Semiconduttore Organico → Strato Attivo



Organic Thin Film Transistor (OTFT)

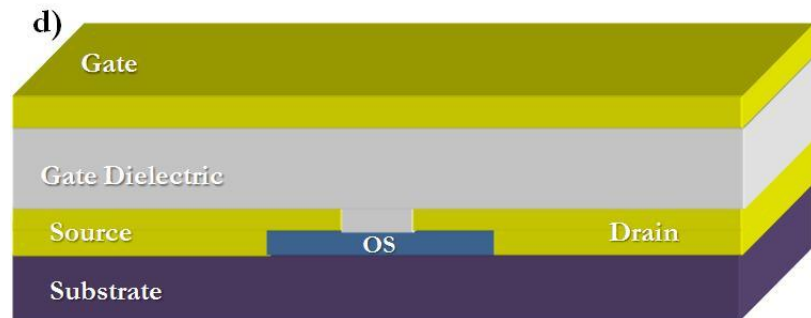
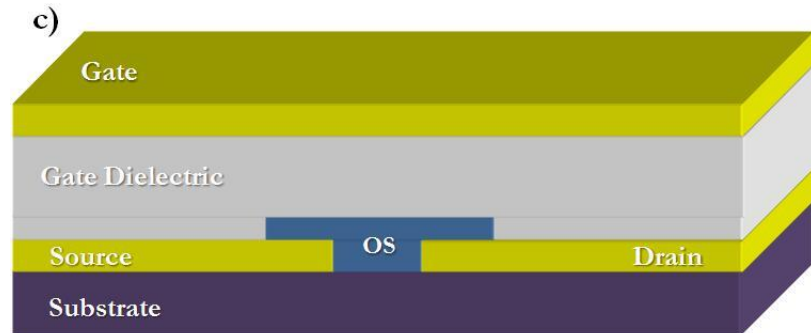
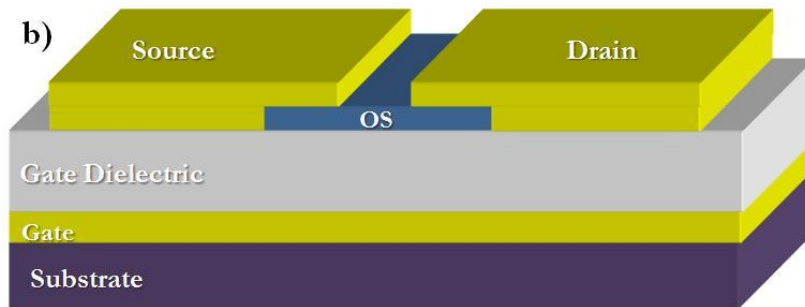
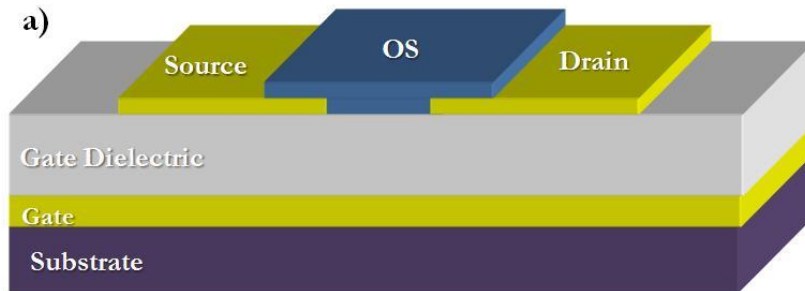


- **Il canale è già presente nel dispositivo**, ma essendo la conducibilità intrinseca molto bassa, se non applico una tensione di gate, scorre una corrente molto piccola
- Semiconduttore di tipo p
- $V_{GS} < 0$: accumulo lacune all'interfaccia con il dielettrico
- $V_{DS} < 0$: quando il canale è formato, inizia a scorrere corrente

Il dispositivo funziona in ACCUMULAZIONE

N.B. MOSFET funzionano in INVERSIONE

Strutture per OFETs



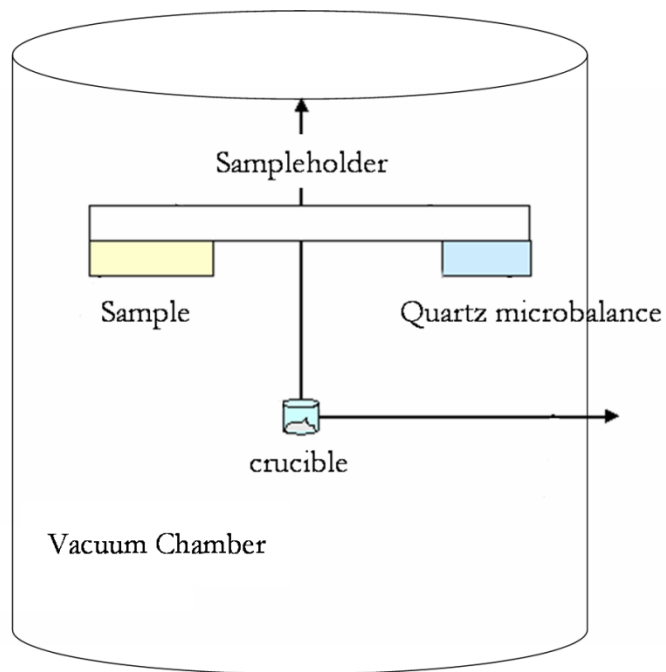
- a) Bottom gate, Bottom Contact
- b) Bottom gate, Top Contact
- c) Top Gate, Bottom Contact
- d) Top Gate, Top Contact

Tecniche di deposizione

Metalli

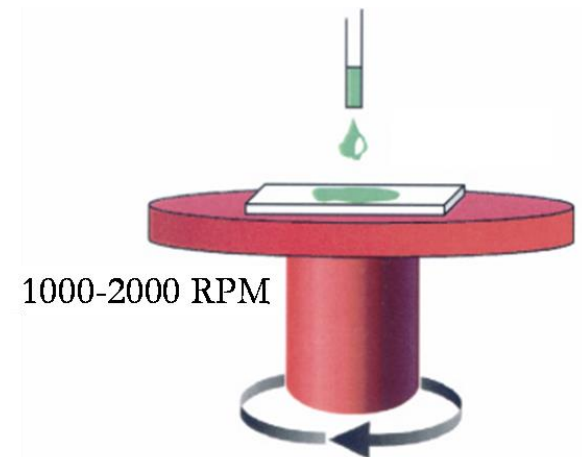
Small molecule non solubile

Deposizione da fase vapore



Polimero in soluzione
Conduttori,
semiconduttori e isolanti

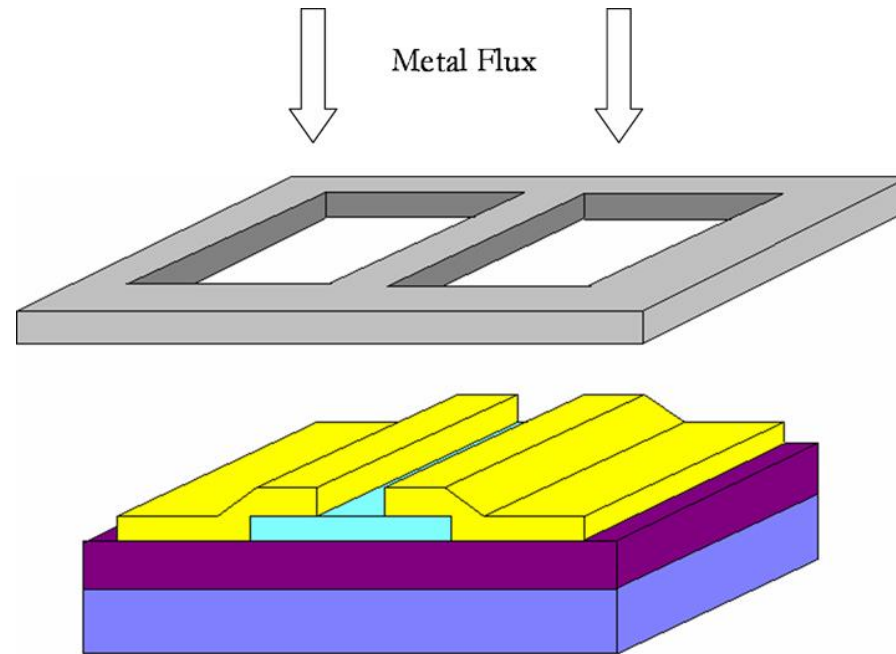
Spin coating o drop casting



Inkjet printing



Patterning degli elettrodi: Shadow Mask

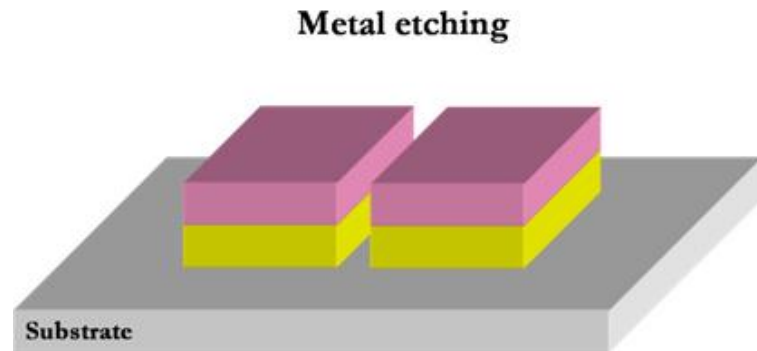
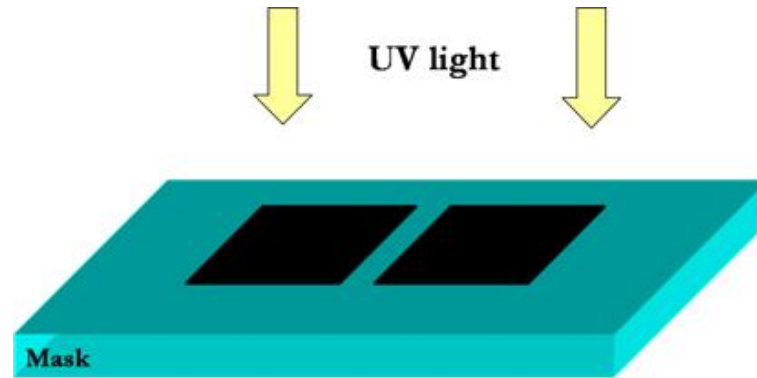


Elettrodo di gate

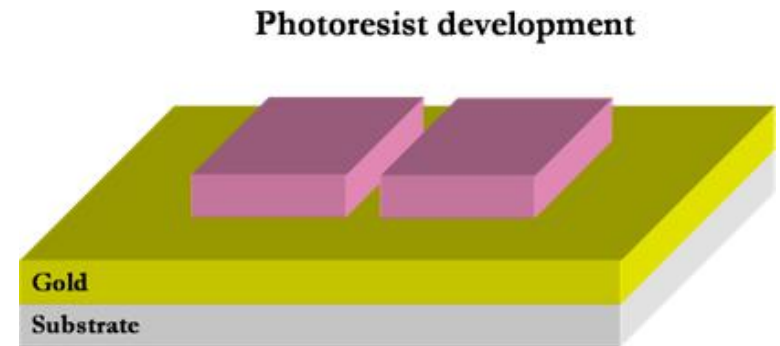
Elettrodi di source e drain

- Bassa risoluzione ($100\ \mu\text{m}$)
- No per deposizioni su larga area
- Top Contact \rightarrow possibili difetti nel semiconduttore

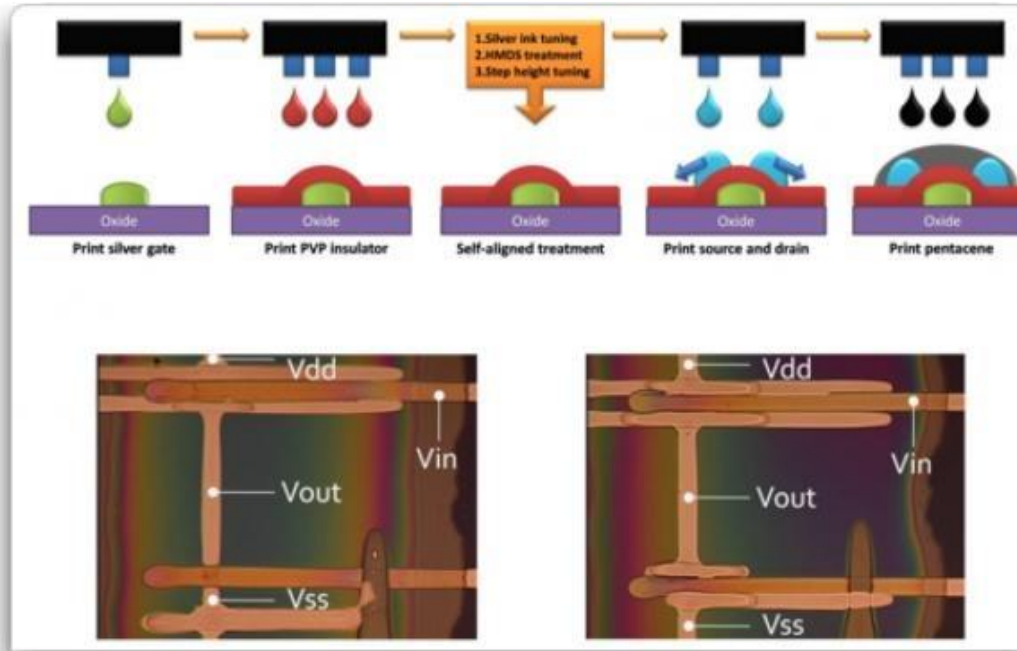
Patterning degli elettrodi: Fotolitografia



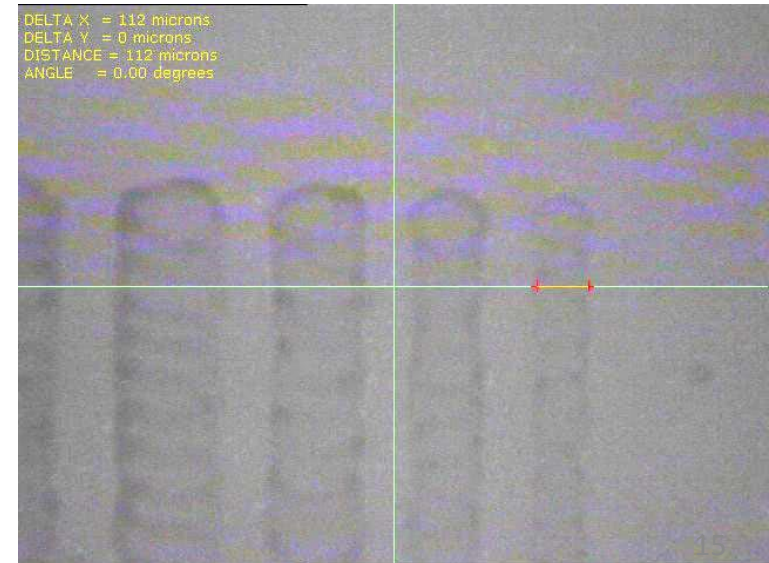
- Risoluzione elevata
- Bottom Contact
- No low cost



Patterning degli elettrodi: inkjet printing



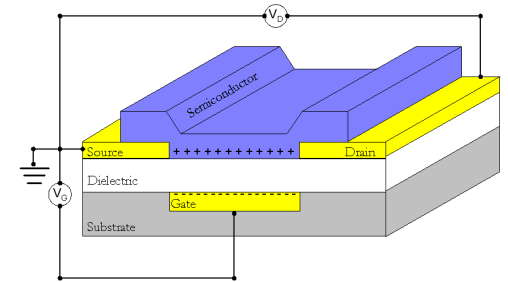
- Bassa risoluzione (anche se in aumento col passare degli anni)
- Bottom Contact
- Deposizioni su larga area
- Low cost



Transistor a film sottile (TFT)

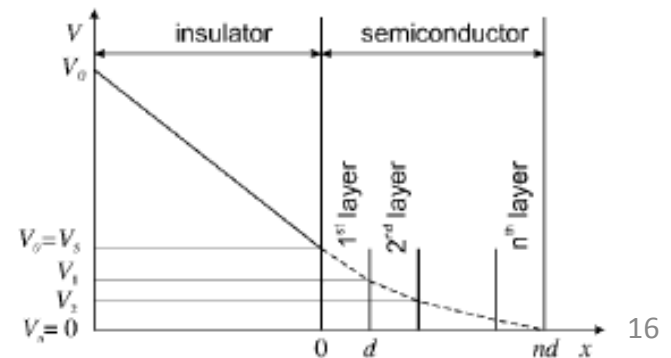
Il canale è già presente nel dispositivo!

Alta resistenza di bulk del semiconduttore organico → bassa corrente → dispositivo spento (per $V_g < V_t$)



Il gate modula la popolazione di carica nello strato attivo

- $V_{gs} < 0$ accumulo di lacune all'interfaccia isolante/semiconduttore (tipo p)
- $V_{ds} < 0$ le lacune si muovono all'interno del canale
- Il canale si forma all'interfaccia, solo i primi layer sono coinvolti nella conduzione!!



OTFT: regione lineare

Quando viene applicata una tensione di gate maggiore della tensione di soglia, con una tensione applicata tra source e drain (V_{DS}) (tale che $V_G < V_{DS} < (V_G - V_T)$), il campo indotto dal gate è uniformemente distribuito su tutto il canale, nel quale è quindi presente uno strato di accumulazione esteso tra source e drain.

$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i \left[(V_g - V_t) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right]$$

Dove Z è la larghezza del canale, L è la lunghezza di canale, C_i la capacità dell'isolante utilizzato e μ è la mobilità dei portatori

Per valori piccoli di V_{DS} il campo cresce linearmente tra source e drain e la corrente cresce linearmente con esso

Regione lineare

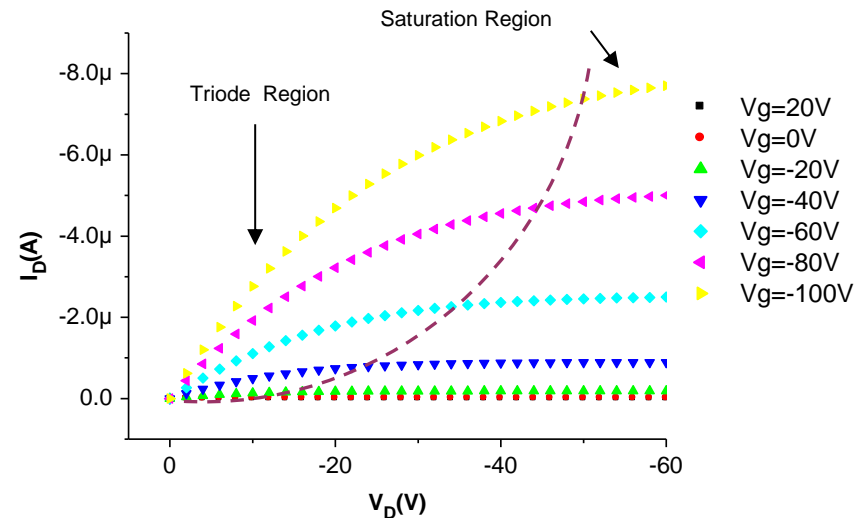
OTFT: Regione di saturazione

Per piccole V_{DS} , l'espressione precedente diventa lineare.

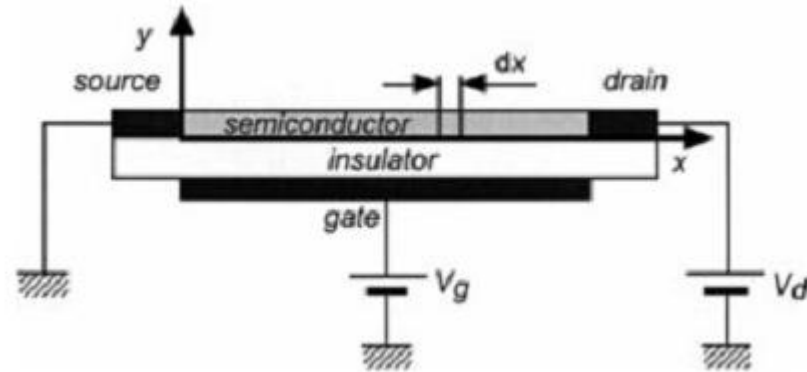
Per tensioni V_{DS} superiori ($V_D \geq (V_G - V_T)$) una regione di svuotamento viene a formarsi in prossimità dell'elettrodo di drain e da questo momento in poi la corrente che scorre all'interno del canale rimane costante.

La corrente in regione di saturazione è data dalla formula seguente:

$$I_{dsat} = \frac{Z}{2L} \mu C_i (V_g - V_t)^2$$



Regione Lineare



Si consideri un segmento infinitesimo di canale di lunghezza dx . La resistenza dR associata a tale segmento è fornita dall'equazione:

$$dR = \frac{dx}{Z\mu|Q(x)|} \quad (1)$$

in cui $Q(x)$ è la carica superficiale lungo l'asse x

Regione Lineare

In un OFET i contributi di carica di cui si deve tenere conto sono la carica dello **strato di accumulazione Q_s** e la **carica nella regione neutra Q_0**

Questo ultimo contributo di carica ha la seguente forma

$$Q_0 = \pm q n_0 d_s \quad (2)$$

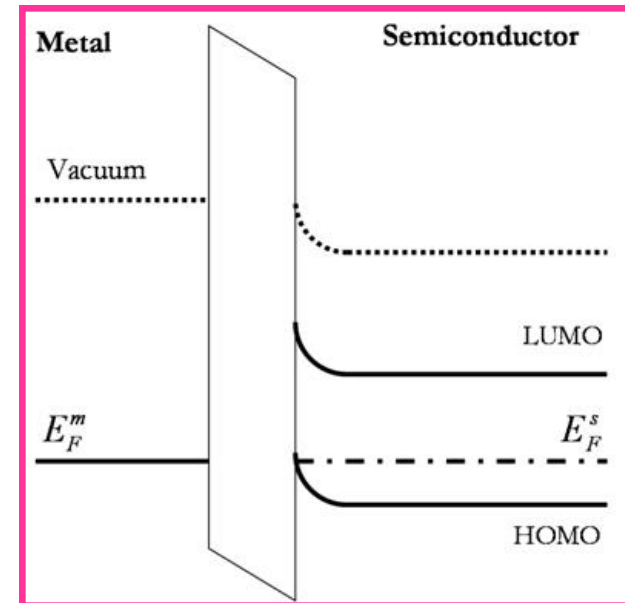
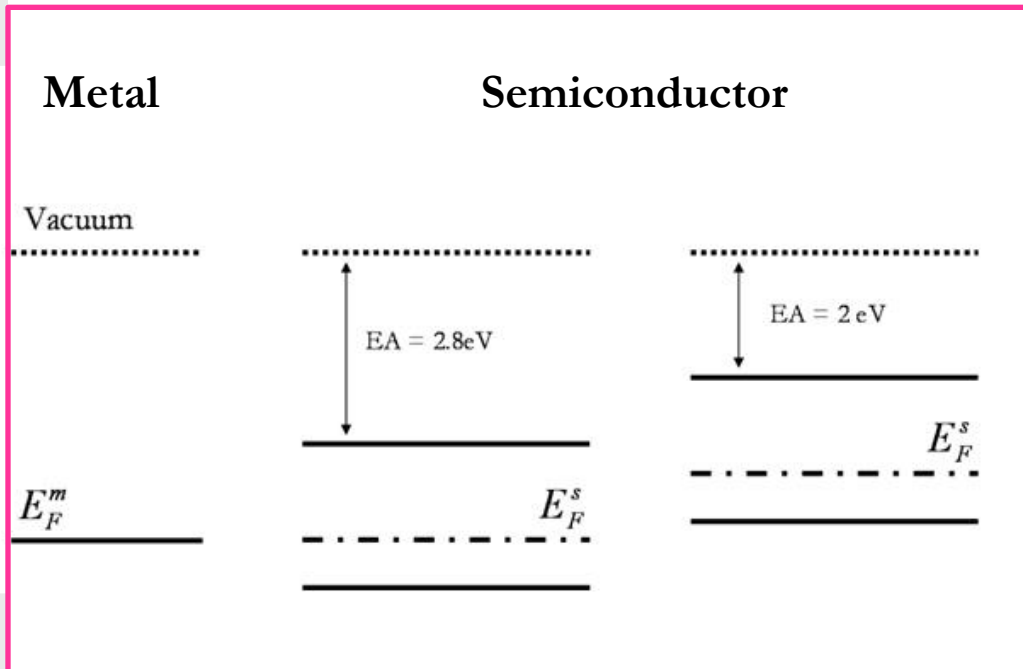
in cui q rappresenta la carica dell'elettrone, d_s lo spessore dello strato semiconduttivo e n_0 la densità all'equilibrio dei portatori liberi

$$Q_s(x) = -C_i [V_g - V_{fb} - V_s(x) - V(x)] \quad (3)$$

$V_s(x)$ è la caduta ohmica nel semiconduttore, contributo trascurabile per tensioni di gate superiori al volt

$V(x)$ tensione nel canale nel punto di ascissa x

La tensione V_{fb} è detta tensione di banda piatta (flat band)
 Tiene in considerazione qualsiasi **differenza di funzione lavoro**
tra metallo e semiconduttore



V(x)

Gradual channel approximation $L \gg d_s$

Si ha quando il campo elettrico trasversale (**E_y** nella direzione y perpendicolare al flusso di corrente) nel canale è **molto più intenso** del campo elettrico longitudinale (**E_x** nella direzione x parallela al flusso di corrente)

Il contributo di tensione **V(x)** dipende solamente dalla **tensione di drain applicata** e aumenta gradualmente da **0** a **V_d** muovendosi dal source verso il drain

$$dV = I_d dR = \frac{I_d dx}{Z\mu|Q_s(x) + Q_0|} \quad (4)$$

Sostituendo ora nella (4) le espressioni dei contributi di carica e integrando dal source ($x=0$, $V=0$) al drain ($x=L$, $V=V_d$) otteniamo per la corrente di drain l'espressione

$$I_d \int_0^L dx = \int_0^{V_d} Z \mu [C_i (V_g - V_{fb} - V) + qn_0 d_s] dV \quad (5)$$

risolvendo (considerando la mobilità costante) si ottiene:

$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i \left[(V_g - V_0) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right] \quad (6)$$

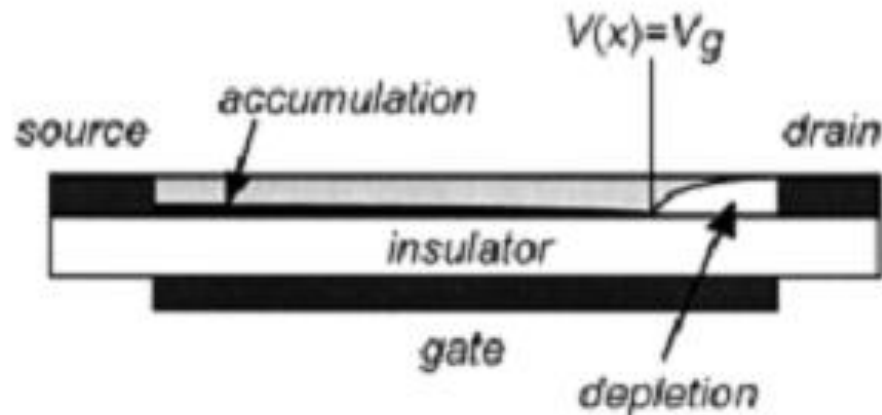
Dove:

$$V_0 = \pm \frac{qn_0 d_s}{C_i} + V_{FB} \quad (7)$$

Tiene conto del fatto che in questi dispositivi una corrente diversa da zero può scorrere anche per tensioni $V_{gs}=0$ V

Regione di Saturazione

Quando la tensione V_{ds} aumenta e supera il valore di V_{gs} , la situazione cambia



La **regione vicino all'elettrodo di drain si svuota** di portatori non ci sono cariche libere all'interfaccia isolante semiconduttore ma uno **strato ulteriormente isolante che riduce lo spessore effettivo del film semiconduttore**

Regione di Saturazione

La corrente di drain assume la forma:

$$I_d dx = Zqn_0\mu(d_s - W(V))dV \quad (8)$$

$$W(x) = \frac{\varepsilon_s}{C_i} \left[\sqrt{1 + \frac{2C_i^2(V(x) - V_g)}{qN\varepsilon_s}} - 1 \right] \quad (9)$$

ε_s è la permittività del semiconduttore e N la concentrazione dei droganti (che potrebbe anche essere differente da n_0 , ma noi in seguito la considereremo uguale), W è lo spessore della regione di svuotamento

Il metodo utilizzato per ricavare la corrente di drain, introdotto da A. R. Brown, suppone che **lo strato di accumulazione si estenda dal source fino al punto in cui la tensione nel canale $V(x)$ eguaglia la tensione V_g .**

In sostanza dividiamo il canale in due regioni, e la corrente è data dalla somma di due integrali, nelle due regioni

$$I_{dsat} = \frac{Z}{L} \mu C_i \int_0^{V_g} (V_g - V_0 - V) dV + \frac{Z}{L} q n_0 \mu \int_{V_g}^{V_{dsat}} (d_s - W) dV \quad (10)$$

Faccio un cambio di variabili nel secondo integrale $W(V_g)=0$ e $W(W_{dsat})=d_s$

Da cui:

$$I_{dsat} = \frac{Z}{L} \mu \left[C_i \int_0^{V_g} (V_g - V_0 - V) dV + \frac{q^2 n_0 N}{\epsilon_s} \int_0^{d_s} (d_s - W) \left(W + \frac{\epsilon_s}{C_i} \right) dW \right] = \quad (11)$$

$$= \frac{Z}{L} \mu \left[C_i \left(\frac{V_g^2}{2} - V_0 V_g \right) + \frac{q^2 n_0 N}{\epsilon_s} \frac{d_s^3}{6} \left(1 + 3 \frac{C_s}{C_i} \right) \right]$$

Definiamo la **tensione di pinch-off** come la tensione di gate per la quale lo strato di semiconduttore è completamente svuotato. Questo valore si ottiene sostituendo nell'equazione (9) $V(x)-V_g$ con V_p e uguagliando W con d_s .

Definendo inoltre $C_s = \epsilon_s/d_s$ come capacità per unità di area del semiconduttore interamente svuotato, chiamiamo:

$$V_p = \pm \frac{qNd_s^2}{2\epsilon_s} \left(1 + 2 \frac{C_s}{C_i} \right) + V_{fb} \approx \pm \frac{qNd_s}{C_i} \quad (12)$$

Poiché poi negli OFET lo strato di semiconduttore è molto sottile, $C_s \gg C_i$, e assumendo $N=n_0$ la (11) si semplifica nella:

$$I_{dsat} = \frac{Z}{2L} \mu C_i (V_g^2 - 2V_0V_g + V_0V_p) \quad (13) \quad V_0 = V_p$$

$$I_{dsat} = \frac{Z}{2L} \mu C_i (V_g - V_0)^2 \quad (14)$$

Parametri caratteristici degli OFETs

Mobilità

Costante di proporzionalità tra velocità dei portatori e campo elettrico applicato, dimensionalmente [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$]

$$v = \mu E$$

$$\mu = \frac{v}{E}$$

La corrente che scorre è data da la quantità di carica che scorre nell'unità di tempo

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = QWv = QW\mu E$$

$$\mu = \frac{I}{QWE}$$

Parametri caratteristici degli OFETs

Mobilità

Valori tipici [$10^{-1} - 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$]

Corrente di Off e rapporto I_{on}/I_{off}

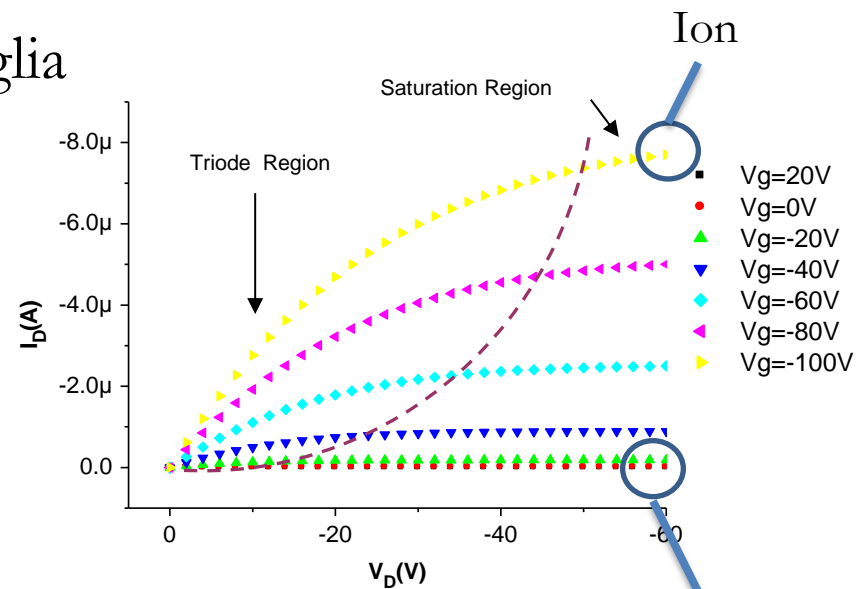
Per corrente di off si intende il valore della corrente quando il dispositivo è spento, sottosoglia

Valori tipici $10^5 - 10^6$

Tensione di soglia

Valori tipici [$+10\text{V} ; -10\text{V}$]

N.B. idealmente $V_t=0\text{V}$



Come si estraggono i parametri dalle curve?

Vengono calcolati dall'analisi delle caratteristiche elettriche

- Curve di uscita [$I_d V_d$]
- Transcaratteristiche

In regione lineare e in saturazione

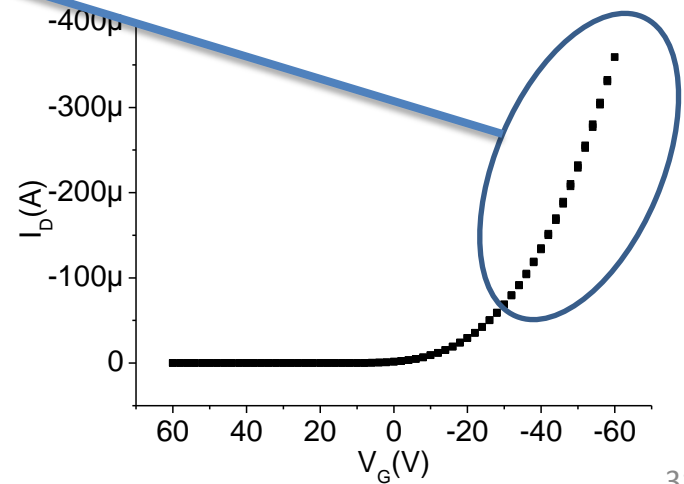
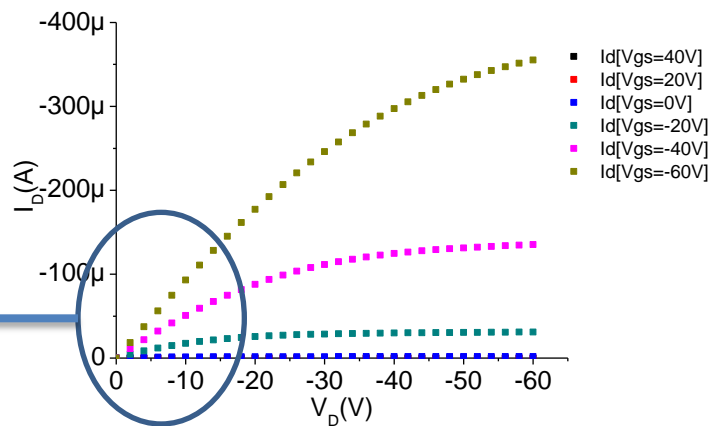
Conduttanza e transconduttanza in regione lineare

$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i [(V_g - V_t) V_d]$$

$$g_d = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G = \text{cost}} = \frac{Z}{L} \mu C_i (V_G - V_T) \quad (15)$$

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{cost}} = \frac{Z}{L} \mu C_i V_D \quad (16)$$

Con V_D tale da essere in regione lineare!

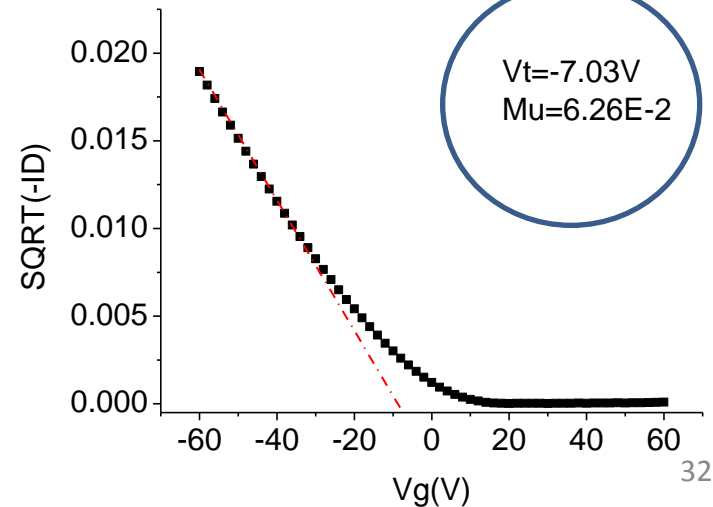
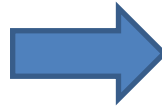
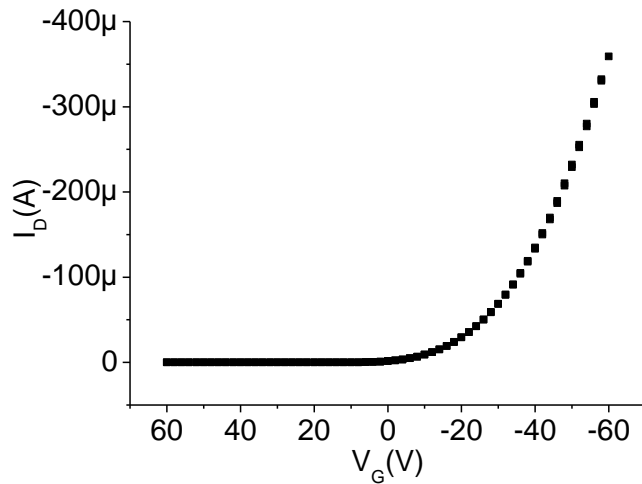


Transconduttanza in regione di saturazione

$$I_{dsat} = \frac{Z}{2L} \mu C_i (V_g - V_t)^2$$

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{cost}} = \frac{Z}{L} \mu C_i (V_G - V_T) \quad (17)$$

Con V_D tale da essere in regione di saturazione!



Come li calcolo?

$V_t = -7.03$ V
 $\mu = 6.26 \times 10^{-2}$