

INTRODUZIONE ALL'USO DI SCHEMATICS

Prima di cominciare l'esercitazione è opportuno prendere confidenza con le potenzialità ed i meccanismi di operazione di SCHEMATICS (l'interfaccia grafica di SPICE), mediante la quale è possibile svolgere le tappe fondamentali quali disegnare un circuito, simularne il comportamento elettrico (collegamento a PSPICE) e tracciare i risultati su di un grafico (collegamento a PROBE). In un opportuno ambiente (*Symbol Editor*) è inoltre possibile agire direttamente sulle proprietà di tutti gli elementi (attivi, passivi, di controllo, ecc.) necessari per realizzare un circuito. Le operazioni più frequenti sono la modifica dei parametri elettrici degli elementi delle librerie in dotazione al programma, la copia di questi in una libreria definita "ad hoc" per i propri scopi, e la creazione di nuovi elementi.

Creazione di una libreria di dispositivi (simboli e modelli per la simulazione)



In questa fase preliminare, ciò che a noi interessa è creare la libreria di elementi che utilizzeremo nel corso dell'anno e che aggiorneremo all'occorrenza. In realtà, poiché un elemento è generalmente caratterizzato da varie specifiche riportate in diverse librerie, sarà necessario far riferimento a più di una libreria per lo stesso elemento. Difatti, ad un elemento sono associati:

- una rappresentazione grafica (simbolo), da salvare in una libreria con estensione **.slb**;
- un'eventuale sigla per il contenitore (package), da salvare in una libreria con estensione **.plb**;
- un eventuale modello per la simulazione, da salvare in una libreria con estensione **.lib**.

Un transistor bipolare NPN di tipo commerciale come il Q2N2222, ad esempio, è definito dal simbolo Q2N2222 nella libreria **eval.slb**, dal contenitore TO-18 nella libreria **eval.plb**, e dal modello per la simulazione Q2N2222 nella libreria **eval.lib**.

Per i nostri scopi non è necessario assegnare il contenitore. Definiamo una libreria di simboli in cui conservare il MOSFET ad arricchimento ed il MOSFET a svuotamento, entrambi a canale n. Per prima cosa, avviamo SCHEMATICS seguendo il percorso dalla tendina del MENU' AVVIO o selezionandolo direttamente sul desktop.




- MOSFET ad arricchimento

- 1) Aprire il *Symbol Editor* selezionando **Edit Library** nel menù **File** (o premendo sul simbolo );
- 2) Copiare il simbolo del MOSFET a canale n (MbreakN) dalla libreria **Breakout.slb**, situata nella cartella **C:\Programmi\Orcad_demo\Pspice\lib** ed aperta selezionando in sequenza **Part**, **Copy**, e **Select.lib**. Prima di confermare (**OK**) cambiare il **New Part Name** in **MOS_N_E** (enhancement=arricchimento);
- 3) Salvare il simbolo nella nuova libreria **C:\Programmi\Orcad_demo\Pspice\Userlib\Esd.slb**, attraverso il comando **Save As** del menù file (o premendo sul simbolo );
- 4) Rispondere affermativamente alla domanda **Add to list of Schematics' configured libraries ?** per avere simbolo e libreria corrispondente disponibili in SCHEMATICS;
- 5) Modificare il modello per la simulazione, scegliendo dal menù **Edit** prima **Model**, poi **Edit Model (Text)**, sostituendo la stringa ".model MbreakN NMOS" con ".model MOS_N_E NMOS", e salvando le modifiche in **C:\Programmi\Orcad_demo\Pspice\Userlib\Esd.lib**. Modificare il nome del modello sul dispositivo premendo 2 volte il mouse sul testo MbreakN per cambiarlo in MOS_N_E;
- 6) Contrariamente a quanto avviene al punto 4), il programma non chiede in modo automatico la visibilità di **Esd.lib** in SCHEMATICS, che è un'operazione necessaria per apportare modifiche alla libreria. (Provate a riaprire **Esd.lib** per vedere cosa avviene ...). Per rendere disponibile **Esd.lib** in tutte le applicazioni, passare in SCHEMATICS attraverso il menù **Window**, dal menù **Analysis** selezionare **Library and Include Files**, e, aiutandosi con il **Browse**, aggiungere **Esd.lib** con il comando **Add Library***. (*Attenzione a non operare con il comando Add Library senza asterisco*, che rende disponibile la libreria solo per il file SCHEMATICS (.sch) aperto in quel momento). Attraverso il menù **Window**, ritornare alla finestra del *Symbol Editor*;
- 7) Provate ad aprire adesso **Esd.lib**. Assicuratevi che ogni modifica o aggiunta al modello vada a salvarsi in **Esd.lib**;
- 8) Per salvare in **Esd.slb** le modifiche sul simbolo dovute alle operazioni dal punto 5) in poi, eseguire dal menu **Part** il comando **Save to Library**.

A questo punto il primo elemento è stato definito completamente. Possiamo configurare anche il MOSFET a svuotamento, seguendo le tappe logiche descritte qui sopra per il MOSFET ad arricchimento. Il compito si presenta

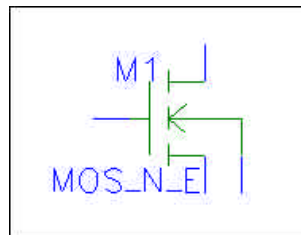
molto più rapido poiché il simbolo ed il modello per la simulazione verranno aggiunti rispettivamente in **Esd.slb** e in **Esd.lib**, già configurate in SCHEMATICS.

- MOSFET a svuotamento

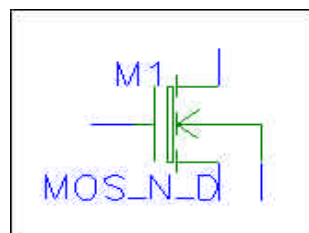
- 1) Copiare il simbolo del MOSFET ad arricchimento (MOS_N_E) dalla stessa **Esd.slb**, selezionando in sequenza **Part**, **Copy**. Prima di confermare (**OK**) cambiare il **New Part Name** in MOS_N_D (depletion=svuotamento);
- 2) Modificare il modello per la simulazione, ripetendo le operazioni già utilizzate al punto 5) del caso precedente. Modificare la stringa “.model MOS_N_E NMOS ” in “.model MOS_N_D NMOS ” e salvare in **Esd.lib**. Modificare il nome del modello sul dispositivo da MOS_N_E in MOS_N_D;
- 3) Per distinguere graficamente il simbolo di MOS_N_D da MOS_N_E, potremmo disegnare il canale impiantato. Potremmo, ad esempio, ingrandire l'area l'oggetto e disegnare un rettangolo utilizzando i simboli della barra degli strumenti ,  e  oppure i comandi **Fit** del menù **View**, e **Box** dal menù **Graphics**. Se la griglia non è ben visibile, è possibile infittirla mediante il comando **Display Options** del menù **Options** aggiornando il **Grid Spacing** ad un valore di 00.01 in;
- 4) Salvare il nuovo dispositivo con tutte le sue proprietà in **Esd.slb**.

I due dispositivi così definiti appaiono in SCHEMATICS nel seguente modo:

MOSFET ad arricchimento a canale n



MOSFET a svuotamento a canale n



IL MODELLO SPICE DEL TRANSISTORE MOS

Il simulatore circuitale SPICE prevede la possibilità di selezionare diversi modelli per il transistor MOS. Nel seguito si farà riferimento al modello più semplice (livello 1), le cui equazioni in larga parte ricalcano quelle utilizzate nel corso di teoria.

Parametri per le caratteristiche I-V

La corrente di drain nelle varie regioni di funzionamento del dispositivo è calcolata come:

$$\begin{aligned}
 i_D &= 0 && \text{se } v_{GS} < V_T \\
 i_D &= \frac{W}{L} \frac{K_p}{2} \left[2(v_{GS} - V_T)v_{DS} - v_{DS}^2 \right] && \text{se } v_{DS} \leq v_{GS} - V_T \\
 i_D &= \frac{W}{L} \frac{K_p}{2} (v_{GS} - V_T)^2 (1 + I v_{DS}) && \text{se } v_{DS} \geq v_{GS} - V_T
 \end{aligned}$$

La tensione di soglia è calcolata portando in conto l'effetto di body:

$$V_T = V_{TO} + g \left[\sqrt{f^* + V_{SB}} - \sqrt{f^*} \right]$$

Dalle precedenti equazioni risulta che sono necessari 7 parametri per specificare le caratteristiche del dispositivo: 2 geometrici (W e L) e 5 elettrici (K_p , g , V_{TO} , I , f^*). Questi ultimi vengono chiamati elettrici poiché si riferiscono al comportamento elettrico del MOSFET. Sebbene sia possibile specificare tutti i 7 parametri nel modello per la simulazione data dal comando **.model** all'interno di **Esdlib**, il modo più opportuno per simulare un circuito MOS è quello di specificare i parametri W ed L per ogni dispositivo presente nel circuito. In tal caso si può utilizzare lo stesso modello anche per dispositivi che hanno diverse dimensioni geometriche.

In SPICE, esistono due diversi modi per definire i parametri elettrici di un dispositivo MOS.

Una prima possibilità è specificare direttamente i valori di I , V_{TO} , K_p , g , f^* .

Esempio:

```
.model MOS_N_E NMOS (
LEVEL=1,
LAMBDA=0.02,
VTO=1,
KP=20E-6,
GAMMA=0.37,
PHI=0.54)
```

Una seconda possibilità è specificare i valori di I , V_{TO} e di tre parametri tecnologici del dispositivo: lo spessore dell'ossido t_{ox} , la mobilità degli elettroni m ed il drogaggio del substrato N_{SUB} . I valori di K_p , g , f^* vengono calcolati da SPICE e possono essere visualizzati editando il file di uscita **.OUT** prodotto dal simulatore. Le relazioni che legano i parametri fisici t_{ox} , m , N_{SUB} con i parametri elettrici K_p , g , f^* sono riportate nel seguito, per comodità di riferimento:

$$\begin{aligned}
 C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} && K_p = m C_{ox} \\
 g &= \frac{\sqrt{2eqN_{SUB}}}{C_{ox}} && f^* = 2 \frac{kT}{q} \log \left(\frac{N_{SUB}}{n_i} \right)
 \end{aligned}$$

Esempio:

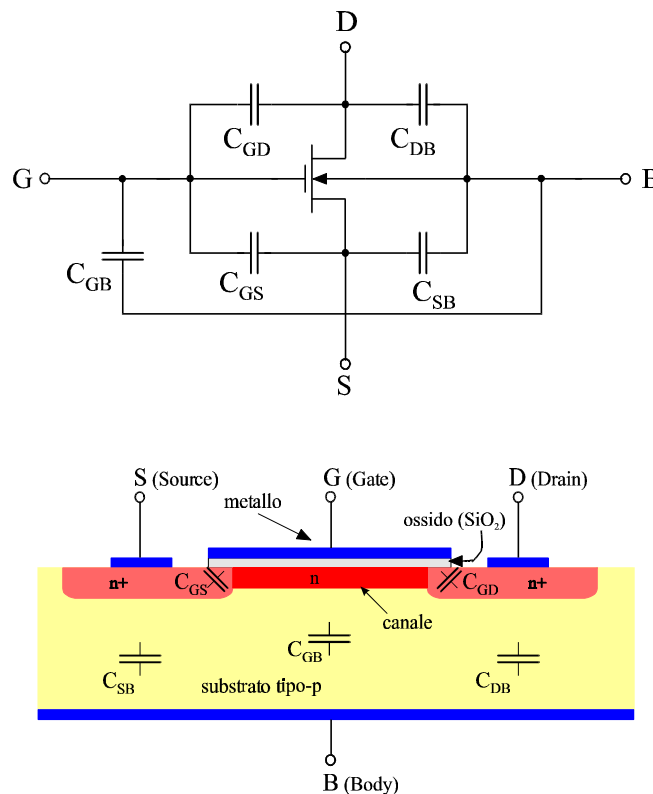
```
.model MOS_N_E NMOS (
LEVEL=1,
LAMBDA=0.02,
VTO=0.8,
TOX=0.1E-6,
NSUB=5E14,
UO=580)
```

(N.B. **TOX** è lo spessore dell'ossido espresso in metri, **NSUB** è il drogaggio di substrato espresso in cm^{-3} , **UO** è il valore di mobilità degli elettroni, espressa in cm^2 / Vs). La contemporanea assegnazione dei parametri t_{ox} , **m**, N_{SUB} e dei parametri elettrici fa sì che K_p , **g**, **f*** assumano i valori imposti dall'utente nella scheda **.model**

Nel seguito per specificare le caratteristiche di un dispositivo MOS utilizzeremo sempre il secondo set di parametri I , V_{TO} , t_{ox} , **m**, N_{SUB} .

Parametri Capacitivi

Il modello SPICE del MOS prevede la presenza delle cinque capacità mostrate in figura:



C_{db} e C_{sb} sono le capacità di svuotamento relative al contributo delle regioni sotto le giunzioni P-N drain-body e source-body. Il valore di tali capacità dipende dalla tensione inversa applicata alla giunzione, secondo la relazione:

$$C(V) = \frac{C_{jo}}{(1 - V / j_o)^m}$$

I parametri da specificare nel comando **.model** sono quindi tre:

CJ: corrisponde al fattore C_{jo} dell'equazione precedente, ed è la capacità per $V=0$ e per unità di area della giunzione (è espressa in F/m^2). C_{jo} è comunemente determinato (vedi file **.OUT**) se sono assegnati N_{SUB} e j_o .

PB: corrisponde al fattore j_o dell'equazione precedente e rappresenta la tensione interna della giunzione (valore di default 0.8 V).

MJ: corrisponde al fattore m dell'equazione precedente e dipende dal tipo di giunzione P-N. Nel caso di giunzioni brusche, che assumeremo nel seguito, risulta $m=0.5$ (valore di default ed, inoltre, si ha:

$$j_o = \frac{kT}{q} \log \left(\frac{N_D N_{SUB}}{n_i^2} \right)$$

$$C_{jo} = \sqrt{\frac{eqN_{SUB}}{2j_o}}$$

dove N_D è il drogaggio di source e drain.

Il contributo delle regioni di bordo è dato dalla definizione della capacità di bordo per unità di perimetro, **CJSW**.

Per poter calcolare le capacità totali relative alle due giunzioni drain-substrato e source-substrato è necessario moltiplicare le capacità per unità di area, **CJ**, calcolata utilizzando le formule precedenti, per l'area delle due regioni di source e di drain. Questa capacità, sia per il source che per il drain, va sommata alla **CJSW** moltiplicata per il rispettivo perimetro. E' quindi necessario specificare quattro ulteriori parametri:

- AS:** area di source (espressa in m^2)
- AD:** area di drain (espressa in m^2)
- PS:** perimetro di source (espresso in m)
- PD:** perimetro di drain (espresso in m)

Come per **W** ed **L**, anche i parametri **AS**, **AD**, **PS** e **PD** vanno specificati per ogni dispositivo presente nel circuito, anziché nella scheda **.model**.

I sei parametri geometrici, precedentemente menzionati, non sono fra loro indipendenti. Quindi, qualora si cambi la dimensione di **W**, ad esempio, le dimensioni delle aree e dei perimetri variano di conseguenza tenendo presente il tracciato (layout) del circuito integrato nel silicio.

Le capacità C_{gd} , C_{gs} e C_{gb} sono date dalla somma di due contributi.

Il primo contributo è dato dalla inevitabile sovrapposizione fra l'elettrodo di gate e le regioni di drain, source e body (vedi la figura della pagina precedente). Esso è modellato in SPICE mediante tre parametri:

- CGSO:** capacità di sovrapposizione gate-source, per unità di larghezza di canale W (espressa in F/m)
- CGDO:** capacità di sovrapposizione gate-drain, per unità di larghezza di canale W (espressa in F/m)
- CGBO:** capacità di sovrapposizione gate-substrato, per unità di lunghezza di canale L (espressa in F/m)

Questi tre parametri possono essere ricavati, nota la capacità di gate per unità di area C_{ox} , stimando l'aliquota di sovrapposizione della gate sulle regioni di source, drain e substrato, rispettivamente. Detta d l'ammontare della sovrapposizione fra gate e source, ad esempio, si ha $CGSO = C_{ox} d$. Analogamente si ragiona per gli altri parametri.

Il secondo contributo porta in conto la capacità fra la gate ed il canale sottostante. Il valore complessivo di questa capacità è pari a:

$$C_G = WLC_{ox}$$

A seconda della regione di funzionamento del dispositivo, SPICE ripartisce automaticamente la C_G in tre capacità collegate fra gate-drain, gate-source e gate-substrato.

Riepilogo

Per ogni dispositivo presente nel circuito bisogna specificare i valori di:

W
L
AS
AD
PS
PD

Nella scheda **.model** in **Esd.lib** vanno specificati:

VTO
LAMBDA
TOX
UO
NSUB

Per il funzionamento statico

CJ (comunque assegnato quando sono dati N_{SUB} e ϕ_0)

Capacità di svuotamento

PB
MJ
CJSW
CGSO
CGDO
CGBO

Capacità di sovrapposizione

Parametri Tipici Tecnologia N-MOS

Negli successive esercitazioni, assumeremo i seguenti valori:

Spessore ossido:	<i>0.1 μm</i>
Drogaggio substrato:	<i>$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$</i>
Mobilità elettroni:	<i>$580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$</i>

Da essi, utilizzando le formule riportate in precedenza, è facile calcolare gli altri parametri di interesse:

Capacità di gate per unità di area C_{ox} :	<i>34.5 nF/cm²</i>
Fattore K_p :	<i>20 mA/V²</i>
Fattore g :	<i>0.37 V^{1/2}</i>
Fattore f^* :	<i>0.54 V</i>

Assumeremo inoltre:

Tensione di soglia senza effetto body ($V_{SB} = 0$):	<i>1 V</i>
Tensione di Early:	<i>50 V</i>

Per il calcolo dei parametri capacitivi, con il drogaggio delle regioni di drain e di source pari a 10^{20} cm^{-3} si ha:

Tensione interna giunzioni drain-body e source-body:	<i>0.86 V</i>
Capacità di giunzione a tensione nulla per unità di area:	<i>70 F/m²</i>
Capacità di giunzione di bordo per unità di perimetro:	<i>220 F/m</i>

Ipotizzando, infine, una sovrapposizione di *1 μm* fra l'elettrodo di gate e le regioni di drain e source, si ha:

Capacità di sovrapposizione gate-source (per unità di larghezza di canale):	<i>345 pF/m</i>
Capacità di sovrapposizione gate-drain (per unità di larghezza di canale):	<i>345 pF/m</i>
Capacità di sovrapposizione gate-substrato (per unità di lunghezza di canale):	<i>0 pF/m</i>

La scheda **.model**, per il nostro dispositivo ad arricchimento MOS_N_E, può quindi essere scritta come segue:

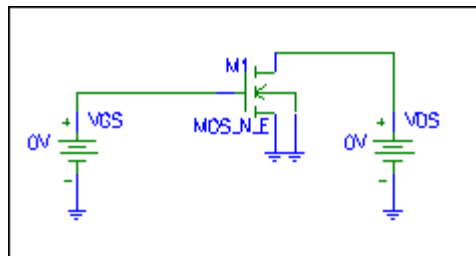
```
.model MOS_N_E NMOS (  
LEVEL=1,  
LAMBDA=0.02,
```

VTO=1,
TOX=0.1E-6,
NSUB=5E14,
UO=580,
CJ=70E-6,
MJ=0.5,
PB=0.86,
CGSO=345E-12,
CGDO=345E-12,
CJSW=220E-12)


Quasi tutti gli stessi valori sono utilizzati nella scheda **.model** del dispositivo a svuotamento (MOS_N_D), l'unico parametro da modificare è la tensione di soglia **VTO**, che dovrà essere negativa (pari a -3V).



Esempi SPICE


Considerando i parametri precedentemente introdotti, disegniamo in SCHEMATICS il circuito mostrato in figura per ricavare le caratteristiche corrente-tensione del MOSFET a canale n.




Per disegnare un elemento in SCHEMATICS si possono seguire più strade:

- scrivere il nome dell'elemento nella casella testo della barra strumenti , premere il tasto di invio e collocare n copie dell'elemento premendo n volte il tasto sinistro del mouse. Per terminare la selezione, premere il tasto destro del mouse. Quest'operazione è utile quando si conosce già il nome dell'elemento o quando esso sia stato precedentemente utilizzato;
- selezionare dal menù **Draw** il comando **Get New Part** oppure "cliccare" con il mouse sul simbolo  per visualizzare la finestra con gli elementi disponibili. Per cercare gli elementi in base alle librerie di appartenenza occorre premere sul tasto , per collocarli sul foglio una volta selezionati scegliere oppure **Place & Close** se si intende rispettivamente tenere aperta o chiudere la finestra elementi;
- cercare un elemento per descrizione riempiendo nella finestra elementi il riquadro **Description Search** utilizzando l'opzione **Search within Part List** prima di premere il tasto .

Nel nostro caso, per quanto concerne il MOSFET, è necessario specificare W e L attraverso la selezione del dispositivo (di colore rosso quando evidenziato) e la modifica degli attributi (icona  oppure **Attributes** dal menù **Edit**). Imponiamo $W=100\text{ mm}$ e $L=5\text{ mm}$ (che nel simulatore si immettono rispettivamente come **100u** e **5u**). Occorre poi disegnare i generatori di tensione continua (VDC), la connessione a massa (**EGND** oppure **GND_EARTH**) ed i collegamenti tra gli elementi tramite l'opzione **Wire** del menù **Draw** o il riquadro  della barra strumenti.

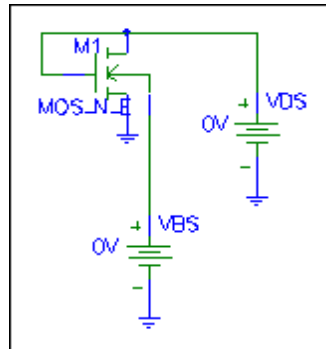
Una volta disegnato il circuito, lo salviamo in **C:\Programmi\Orcad_demo\Pspice\Esd\Mos\Caratt_IV.sch**. Dobbiamo adesso impostare la simulazione per ottenere le caratteristiche I-V. Per esempio, possiamo variare la tensione drain-source (V_{DS}) tra 0 e 10 V con step di 0.2 V, per valori di V_{GS} che vanno da 0 a 5 V con passo da 1 V. Nel simulatore, tali istruzioni si introducono premendo sul simbolo  (o, equivalentemente, scegliendo **Setup** dal menù **Analysis**), ed aprendo il sottomenù **DC Sweep**. Poiché l'analisi richiede l'impiego di due "loop" concatenati, è necessario riempire anche la schermata risultante dalla selezione di **Nested Sweep** (ricordarsi di abilitare quest'ultimo prima di tornare al **Main Sweep**). Verificare se **DC Sweep** è abilitato prima di chiudere la finestra di **Analysis Setup**, lasciando abilitata l'opzione **Bias Point Detail**, che riporta tutte le informazioni relative al punto di lavoro (correnti e tensioni statiche, parametri di piccolo segnale).

Per avviare la simulazione, si può premere il tasto di funzione **F11** oppure scegliere **Simulate** dal menù **Analysis** oppure cliccare sull'icona .

Il programma di grafica (PROBE) parte automaticamente alla fine della simulazione.

Per visualizzare le caratteristiche di uscita del MOSFET, scegliere **Add** del menù **Trace**, e la grandezza **ID(M1)**. Per evitare confusione, possiamo non mostrare nel menù di sinistra gli Alias Names. E' possibile, inoltre, tracciare la curva di "pinch-off" descritta dall'equazione $2e-4 * V(M1:d) * V(M1:d)$, dove $2e-4$ è il valore numerico di $\frac{W}{L} \frac{K_P}{2}$.

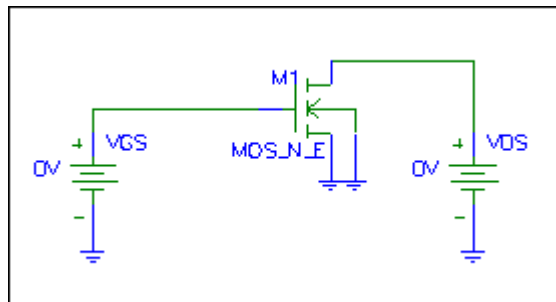
Per evidenziare l'effetto "body" si consideri il circuito di figura:



in cui V_{DS} varia adesso da 0 a 5 V con passo di 0.1 V, e V_{BS} va da 0 a -4 V con step di 1V.

Dopo aver salvato il file nella stessa directory di **Caratt_IV.sch** con il nome di **Body_Eff.sch**, avviare la simulazione. E' interessante visualizzare l'andamento della **ID(M1)** ed anche della **SQRT(ID(M1))**.

Infine, si consideri il seguente circuito (che salviamo con il nome **Capacita.sch**), per evidenziare come le capacità di gate e di giunzione dipendano dal punto di funzionamento del dispositivo.



Agli attributi del MOSFET si aggiungano **AD=AS=5E-11** e, prima di procedere con la simulazione, si disabiliti l'analisi in continua **DC Sweep**. Svolgere l'esercitazione e visualizzare il file di uscita **Capacita.out** (attraverso il comando **Examine Output** del menù **File** della finestra **PSpice**). Osservare come la capacità di gate in questo caso ($V_{GS}=V_{DS}=0$) si ripartisce fra i tre elettrodi di source (CGS), drain (CGD) e substrato (CGB). Analogamente si verifichino i valori delle capacità di giunzione CBS e CBD . Ripetere l'analisi per

- $V_{GS} = 2V$ e $V_{DS} = 0V$.
- $V_{GS} = 2V$ e $V_{DS} = 4V$.

modificando ciascun valore operando direttamente sul disegno del circuito.

Nei circuiti esaminati il parametro $L=5\text{mm}$ si riferisce sia alla lunghezza della gate di polisilicio (canale tecnologico) che alla distanza tra il source ed il drain (canale effettivo L_{eff}). Per considerare l'effetto della diffusione laterale x_l di source e drain (descritta dal parametro **LD** nella scheda **.model** di **SPICE**), poiché $L_{eff}=L-2x_l$, nell'ipotesi di $x_l=1\text{mm}$ dovremmo porre $L=7\text{mm}$ e $LD=1\text{mm}$ per ottenere gli stessi risultati. Verificare che ciò è esatto analizzando il caso b) dell'ultimo esempio proposto.

Salvare, nello spazio assegnato ad ogni account studente (unità "H", pari a 10 Mb) ed, eventualmente, su di un floppy disk, una copia di backup dei files di libreria (**Esd.slb**, **Esd.lib**) e dei file utente (**Caratt_IV.sch**, **Body_Eff.sch**, **Capacita.sch**), per poter svolgere le prossime esercitazioni anche da un diverso computer