

Part I – Analyze with Diode Connected Structure (R:NMOS B:PMOS)

1. Threshold voltage V_{th} (TT)

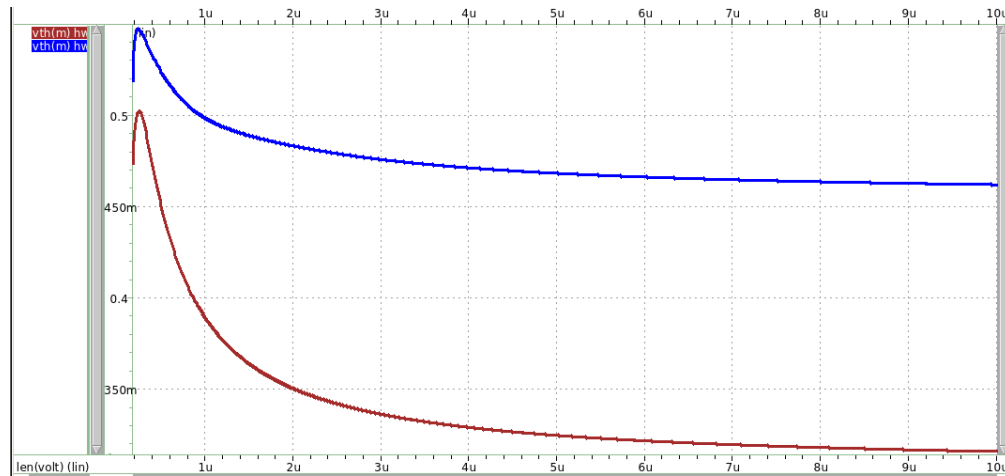


Fig. 1 waveform of threshold voltage in TT corner

X-axis: channel length (m) Y-axis: threshold voltage (V)

2. Threshold voltage V_{th} (SS)

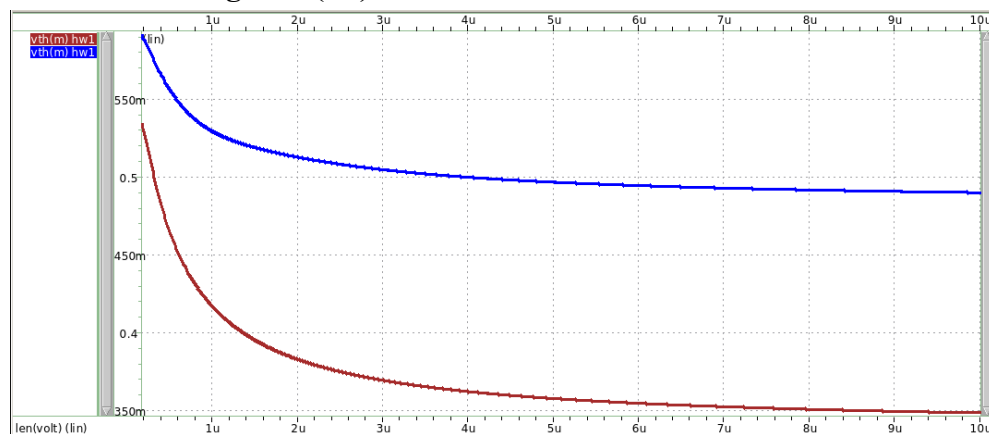


Fig. 2 waveform of threshold voltage in SS corner

X-axis: channel length (m) Y-axis: threshold voltage (V)

3. Threshold voltage V_{th} (FF)

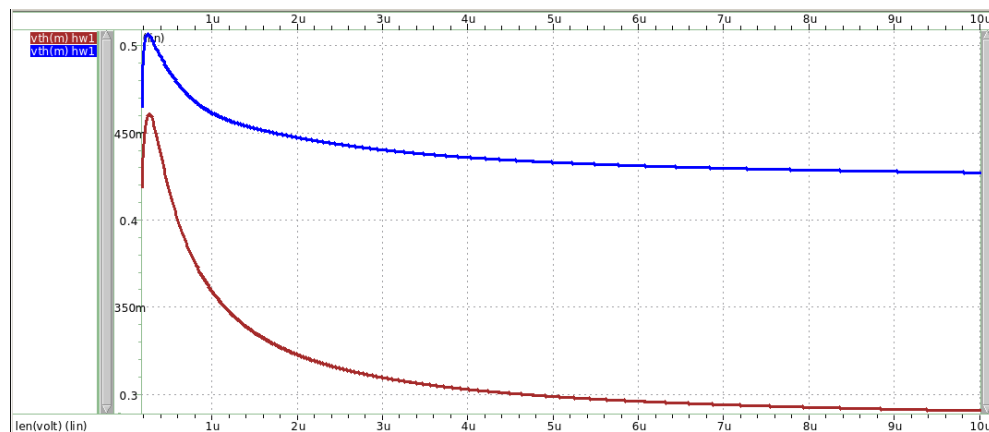


Fig. 3 waveform of threshold voltage in FF corner

X-axis: channel length (m) Y-axis: threshold voltage (V)

首先討論因製程而生的改變，總體而言 V_{th} 的大小是 $SS > TT > FF$ 符合我們對越快(Fast)的 MOS 有更低 V_{th} 的期望。然而若是越快的製程，就得面對更嚴重的 short channel effect，其中包含了 V_{th} 會隨 channel length 增加先增加再減少，並且最後趨近一個定值。

再來看到 NMOS 與 PMOS 的差別，第一個看到的就是 PMOS 的 V_{th} 明顯的比 NMOS 來的大，不過 PMOS 的 V_{th} 對 channel length 影響也小過 NMOS。

4. Transconductance g_m

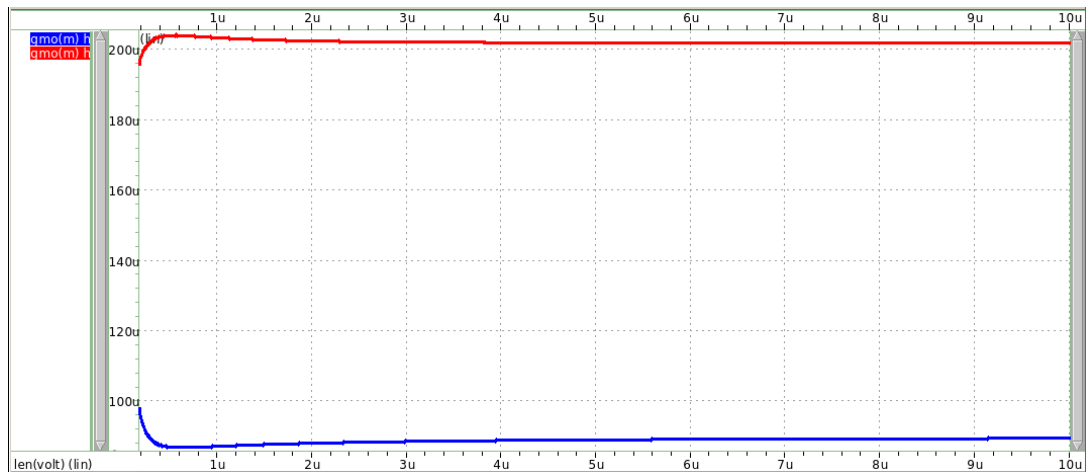


Fig. 4 waveform of transconductance

X-axis: channel length (m) Y-axis: transconductance ($1/\Omega$)

根據 $g_m = u_n \cdot C_{ox} \cdot (W/L) \cdot (V_{GS} - V_{th})$ ， g_m 與 $(V_{GS} - V_{th})$ 成正比，因此如圖，NMOS 的 g_m 會隨著 V_{th} 越大而有變小的趨勢，PMOS 則是相反。

5. Output conductance g_{ds}

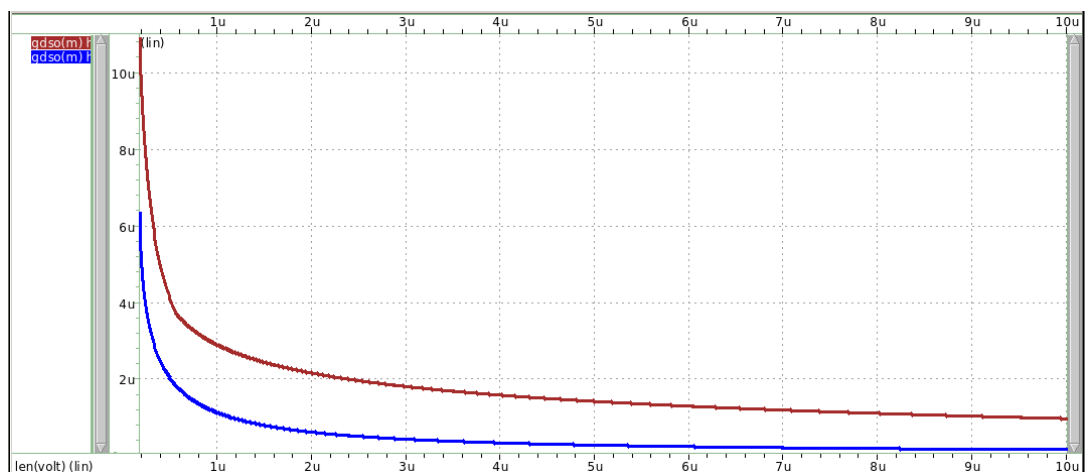


Fig. 5 waveform of output conductance

X-axis: channel length (m) Y-axis: output conductance ($1/\Omega$)

我們知道 conductance 與 resistance / impedance 是倒數關係，而根據 output impedance 的公式 $Z_{out} = 1/\lambda I_D$ ，而 I_D 又與 V_{th} 相關，並且 V_{th} 越大， I_D 越小，output impedance 越大，output conductance 越小(如上圖)的結果。

6. Saturation drain voltage V_{dsat}

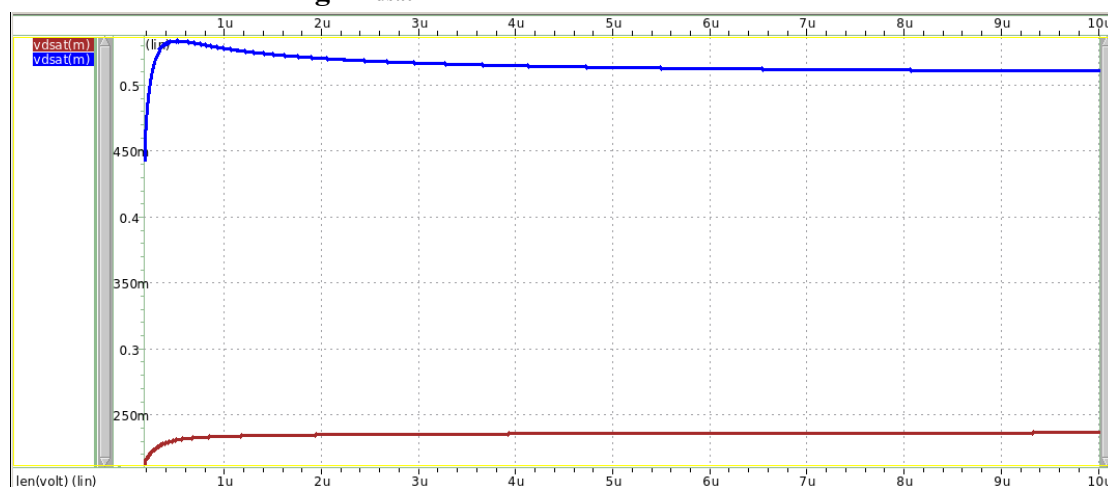


Fig. 6 waveform of Saturation drain voltage

X-axis: channel length (m) Y-axis: Saturation drain voltage (V)

在此條件下 small channel length 的部分 NMOS 和 PMOS 的 V_{dsat} 都有上升的趨勢，然而當趨於穩定之後 NMOS 的 V_{dsat} 緩慢上升，PMOS 則相反，原因不難看出，因為若要使得 MOS 進入 saturation mode，在 NMOS 中是要大過 $V_{gs} - V_{th}$ ，而 PMOS 則是小過 overdrive voltage。

7. Intrinsic gain $g_m r_o$

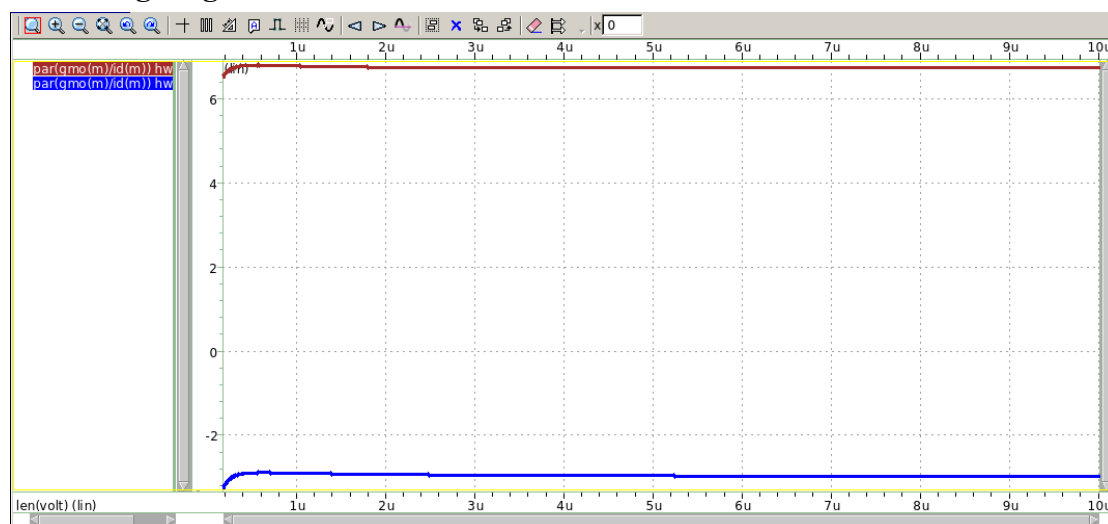


Fig. 7 waveform of Intrinsic gain

X-axis: channel length (m) Y-axis: Intrinsic gain (V/V)

此題可以直接從 3.與 5.看出來，在兩者 output impedance 相差不大時，即使 PMOS 的 output impedance 較大，但在 NMOS 的 g_m 遠大於 PMOS，便可以得出如上圖的結果。

8. Power efficiency g_m/I_D

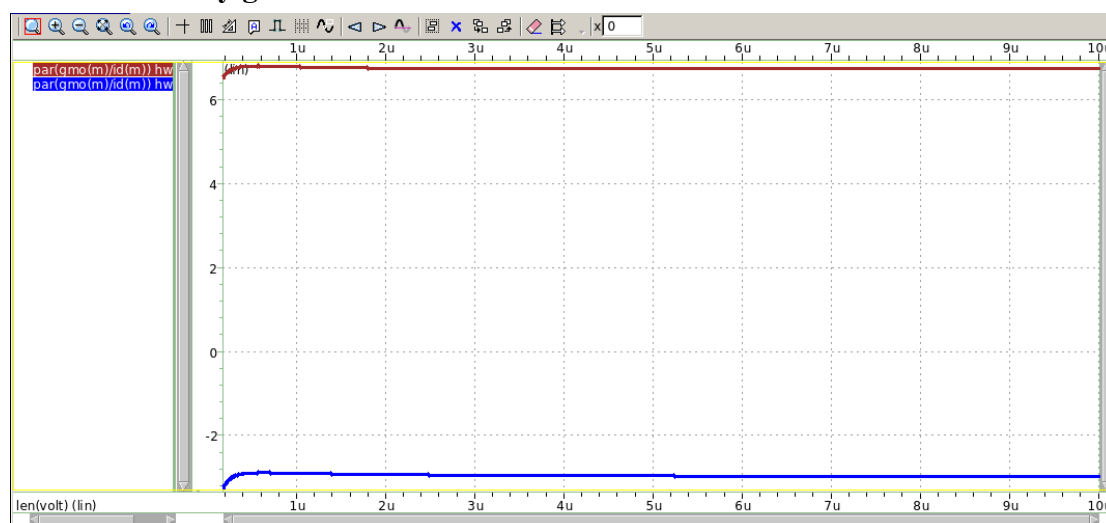


Fig. 8 waveform of power efficiency

X-axis: channel length (m) Y-axis: power efficiency ($1/A\Omega$)

由數學的定義，當流過 MOS 的 I_D 固定時，有越高的 g_m 就會有越高的 Power efficiency，在此題中，我們利用一個理想電壓源當作 tail current，使得兩個 MOS 一定流過相同的電流，因此 8. 的圖形應該與 4. 完全一樣，只差倍數而已。

9. Speed g_m/C_g

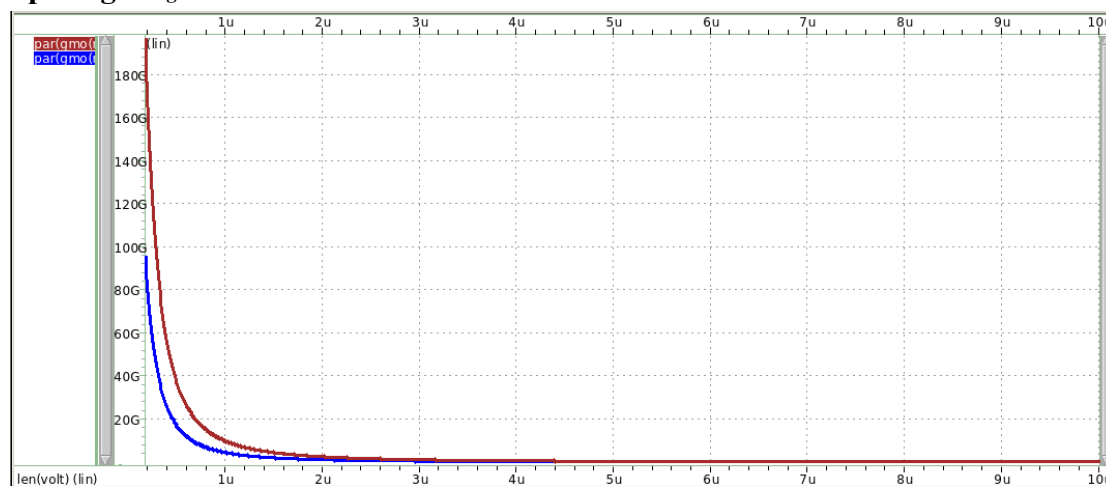


Fig. 9 waveform of speed

X-axis: channel length (m) Y-axis: speed (m/s)

由 speed 的定義，gate 的 parasitic 電容 C_g 越大、 g_m 越小，speed 就越大。從 Fig. 4、Fig. 9 可以得知，NMOS 有較大的 g_m ，因此 NMOS 速度上本質就會比 PMOS 快。除此之外，我們還可以看出當 channel length 越大，parasitic capacitor 就會變得很大(因為 g_m 不太隨 channel length 而變)

Part II – Drain Current

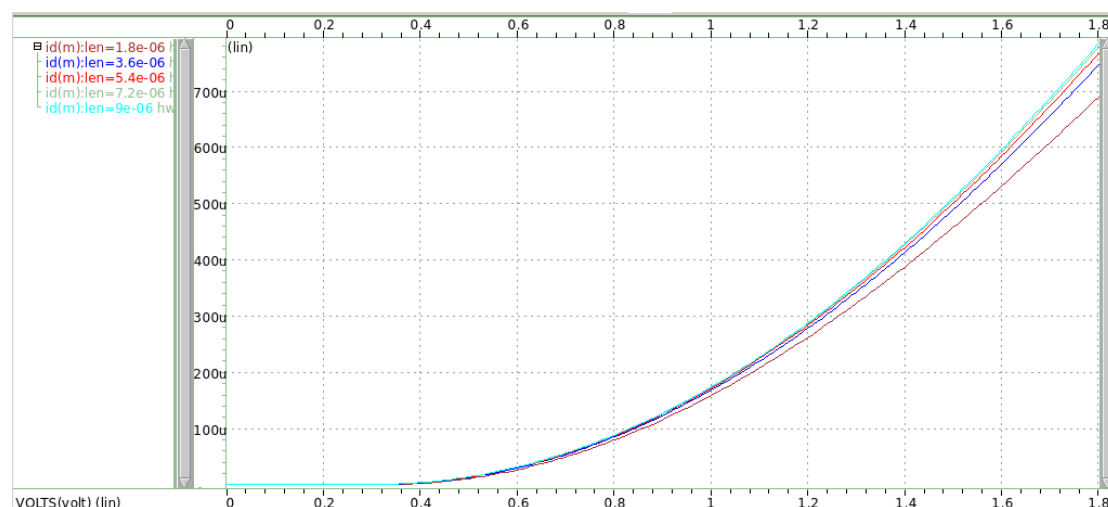


Fig. 10 drain current of NMOS

X-axis: gate voltage (V) Y-axis: drain current (A)

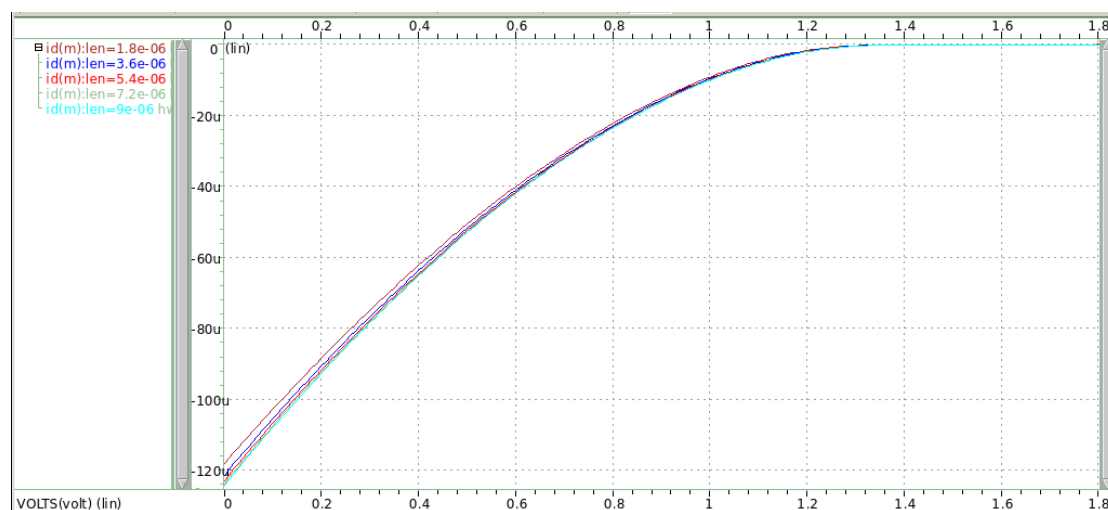


Fig. 11 drain current of PMOS

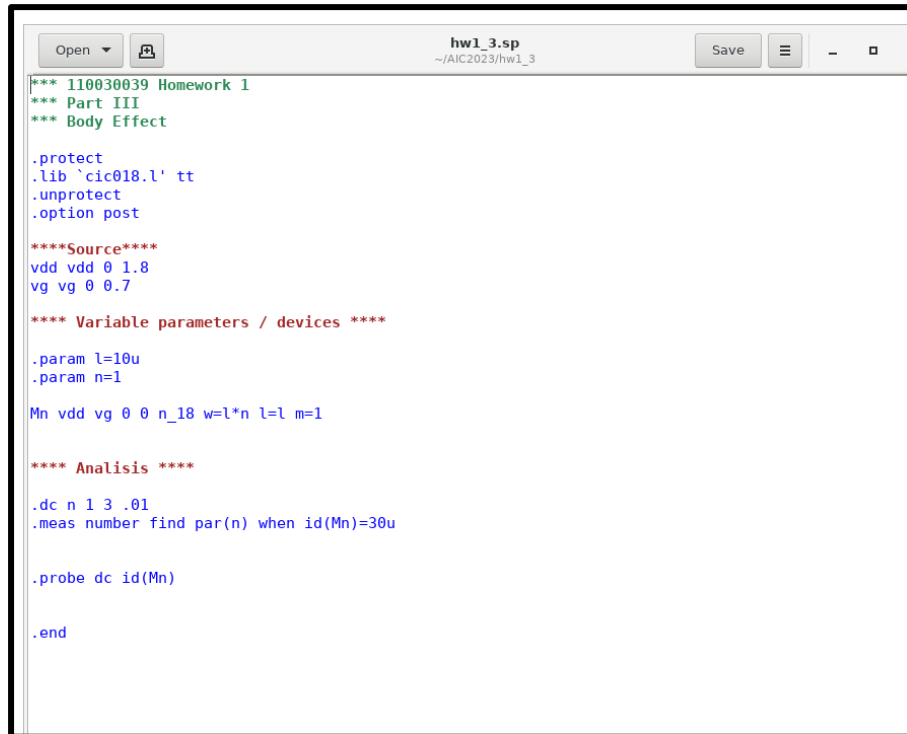
X-axis: gate voltage (V) Y-axis: drain current (A)

在 Fig. 10 中 channel length 由下而上依序是 1.8, 3.6, 5.4, 7.2, 9.0 (um)，因為流經 NMOS 電流的公式為 $I_D = 0.5 \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot (W/L) \cdot (V_{GS} - V_{th})^2$ ，所以我們可以看到 I_D 對 V_{GS} 的作圖接近二次曲線符合 square law。並且隨著 V_G 變大，越長的 channel length 會有越大的 drain current。

在 Fig. 11 中 channel length 由上而下依序是 1.8, 3.6, 5.4, 7.2, 9.0 (um)，因為在 HSPICE 中 I_D 的方向定義為從 source 到 drain 的電流方向，因此 PMOS 的 I_D 為負，若取絕對值的概念來看，PMOS 一樣符合 square law，但是從座標軸來看，在同樣的 overdrive voltage 下，PMOS 的 I_D 大小會小於 NMOS。

Part III – Body Effect

1. Find correct size



```

*** 110030039 Homework 1
*** Part III
*** Body Effect

.protect
.lib `cic018.l' tt
.unprotect
.option post

****Source****
vdd vdd 0 1.8
vg vg 0 0.7

**** Variable parameters / devices ****

.param l=10u
.param n=1

Mn vdd vg 0 0 n_18 w=l*n l=l m=1

**** Analysis ****

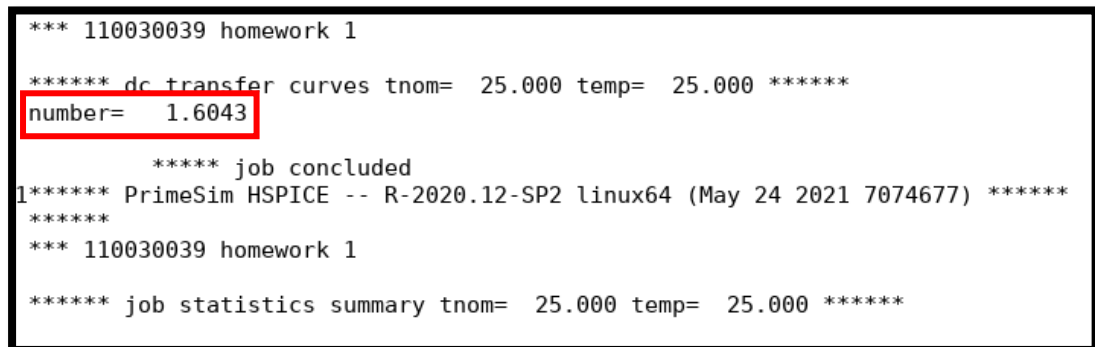
.dc n 1 3 .01
.meas number find par(n) when id(Mn)=30u

.probe dc id(Mn)

.end

```

Fig. 12 the code about how to find the correct size of MOS



```

*** 110030039 homework 1

***** dc transfer curves tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
number= 1.6043

***** job concluded
1***** PrimeSim HSPICE -- R-2020.12-SP2 linux64 (May 24 2021 7074677) *****
*****
*** 110030039 homework 1

***** job statistics summary tnom= 25.000 temp= 25.000 *****

```

Fig. 13 test results in hw1_3.lis

我先設定 channel length 為 10um (避免因 channel length 太小而生不理想效應)，再設定一個倍數 n ，做改變 n 的 DC 分析，並使用 find/when 的功能找到適合的(W/L)。得到 $n=1.6043$ ，於是之後的題目都設定 $n=1.6$ 。

2. Body effect analysis

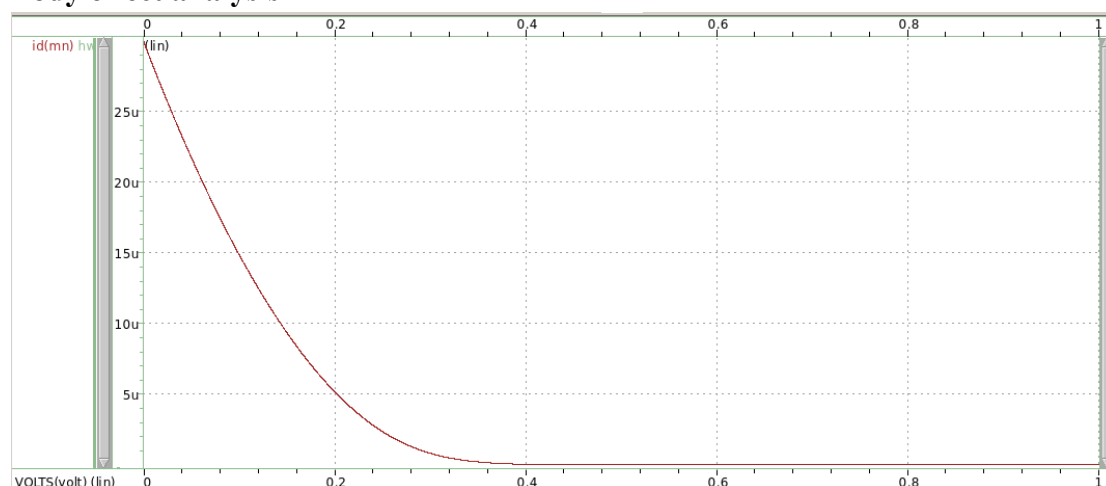


Fig. 14 drain current analysis with body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: drain current (A)

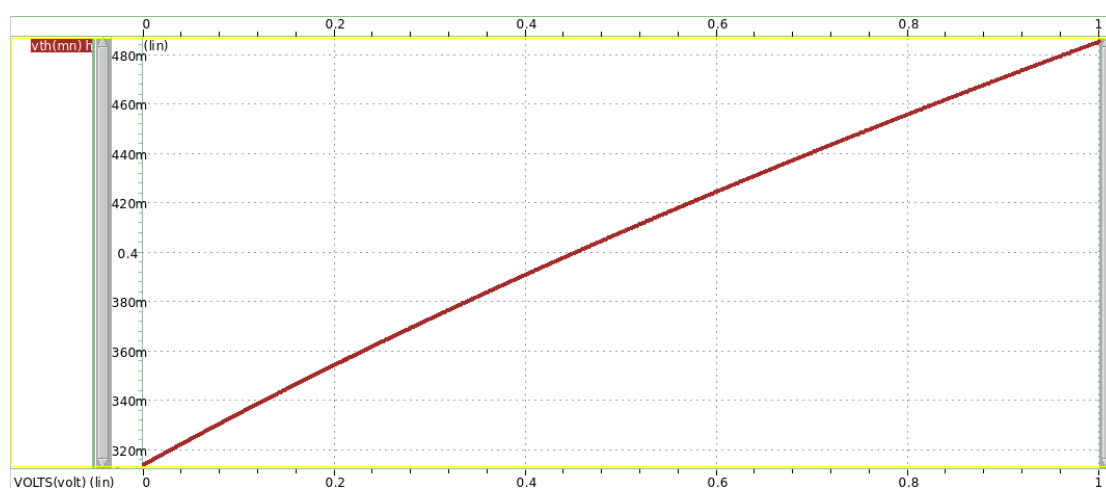


Fig. 15 threshold voltage analysis with body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: threshold voltage (V)

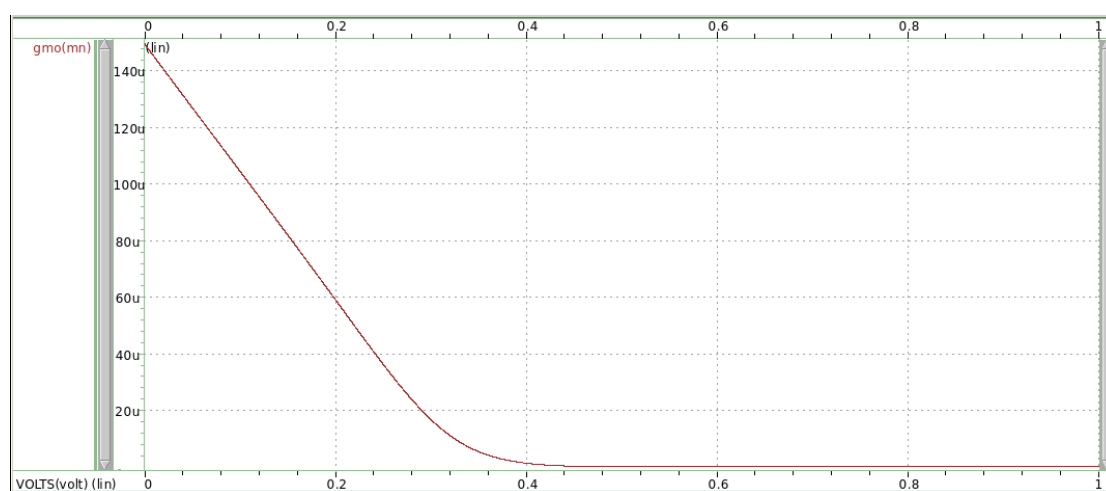


Fig. 16 transconductance analysis with body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: transconductance ($1/\Omega$)

根據 body effect 的公式 $V_{th} = V_{th0} + \gamma (\sqrt{|2\phi_f + V_{sb}|} - \sqrt{|2\phi_f|})$ ，如果 V_{sb} 越大， V_{th} 就會越大，且根據 Fig. 15， V_{th} 是隨著 V_{sb} 線性變大的。且因為 overdrive voltage 越變越小， I_D 就會越來越小，當 overdrive voltage 太小，MOS 就不被 turn on，所以 I_D 近乎為 0 並導致 g_m 也趨近為 0。

3. Compare body effect free case to 2.

(R: with body effect B: without body effect)

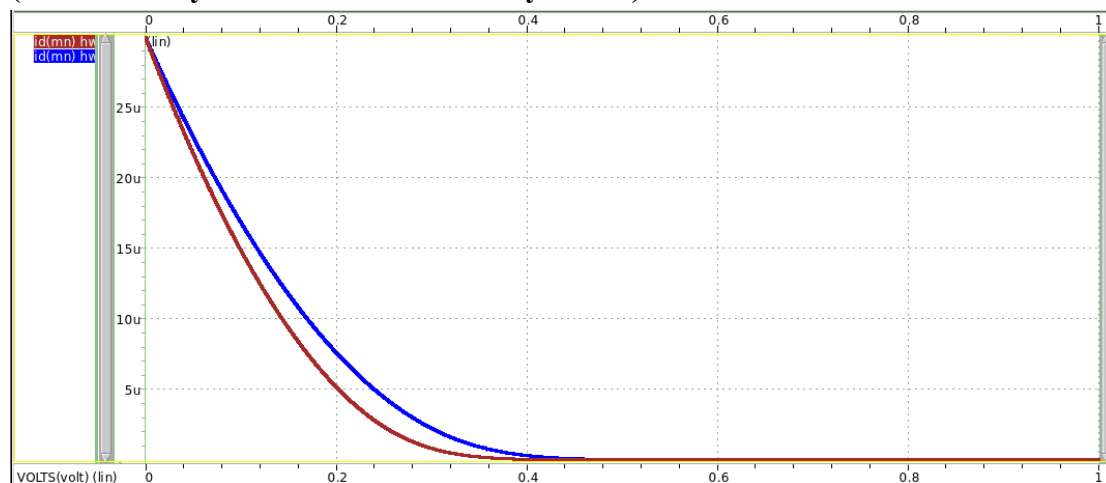


Fig. 17 drain current analysis of body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: drain current (A)

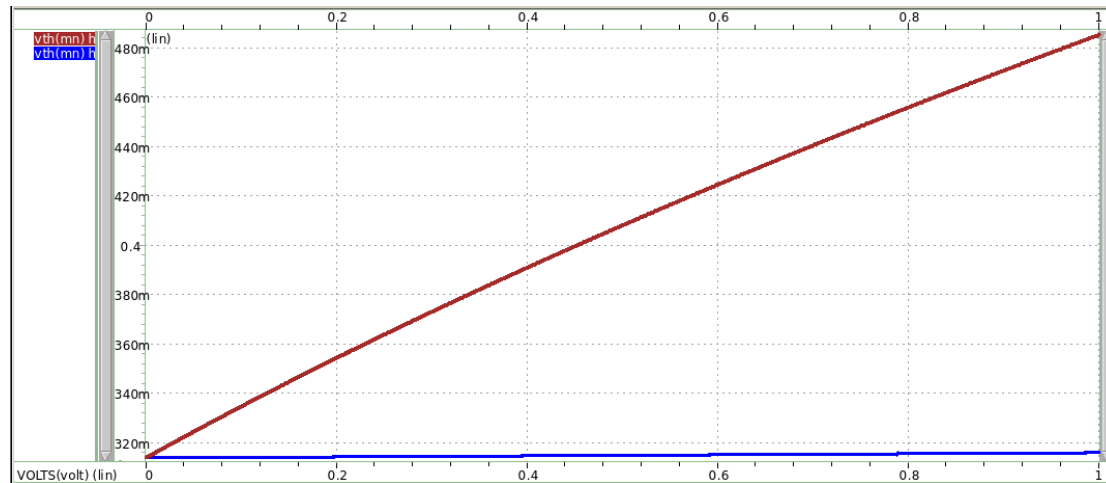


Fig. 18 threshold voltage analysis of body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: threshold voltage (V)

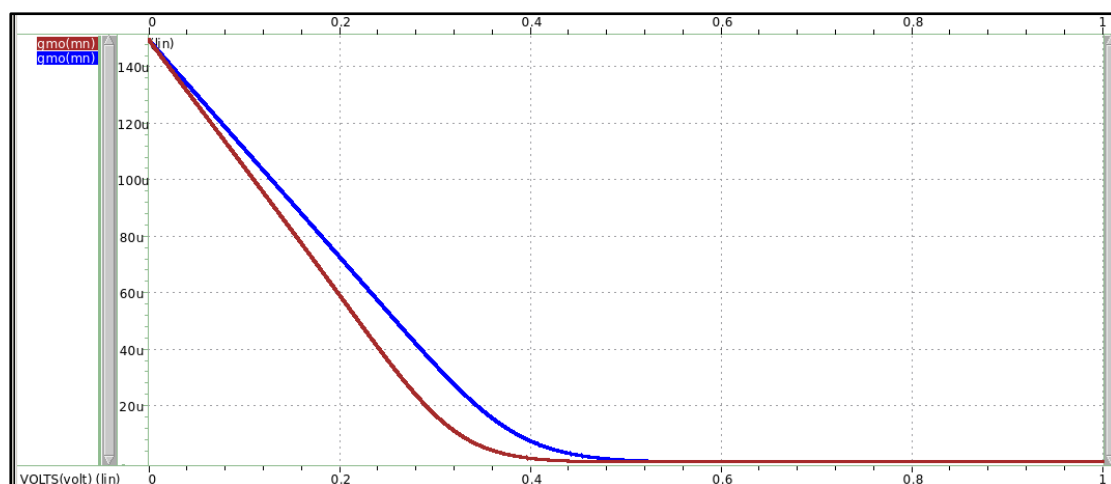


Fig. 19 threshold voltage analysis of body effect

X-axis: source voltage (V) Y-axis: transconductance ($1/\Omega$)

從 Fig. 18 中，我們可以看到當我們把 source and body 接到同一點， V_{th} 基本上沒有變化，可以消除 body effect。再看到 Fig. 17 和 Fig. 19 我們可以看到因為藍線沒有 body effect，所以藍線的 V_{th} 不會隨著 V_s 增加而變大，overdrive voltage 只與 V_{gs} 相關，因此 I_D 以及 g_m 都比有 body effect 的 MOS 來的大，但當 V_s 太大，使得 V_{gs} 太小沒辦法 turn on MOS，最後的電流跟 transconductance 都會趨近於零。