

Design

- NMOS : $I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$, with $\mu C_{ox} = k_n W/L=3$
 1. For $V_{DS} = 4V, V_{GS} = 3V \rightarrow 1.4539m = 0.5 \times k_n \times 3(3 - V_T)^2(1 + 4 \lambda)$
 2. For $V_{DS} = 3V, V_{GS} = 3V \rightarrow 1.4437m = 0.5 \times k_n \times 3(3 - V_T)^2(1 + 3 \lambda)$
 3. For $V_{DS} = 3V, V_{GS} = 4V \rightarrow 3.3549m = 0.5 \times k_n \times 3(4 - V_T)^2(1 + 3 \lambda)$
 - I. Calculate $V_T : \frac{3.3549}{1.4437} = \left(\frac{4-V_T}{3-V_T}\right)^2 \rightarrow V_T = 1.093V$
 - II. Calculate $\lambda : \frac{1.4539}{1.4437} = \frac{1+4\lambda}{1+3\lambda} \rightarrow \lambda = 0.00723$
 - III. Calculate $k_n \rightarrow k_n = 259.04\mu$
- PMOS : $I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} + V_T)^2 (1 + \lambda V_{SD})$, with $\mu C_{ox} = k_p W/L=3$
 1. For $V_{SD} = 4V, V_{SG} = 3V \rightarrow 1.6217m = 0.5 \times k_p \times 3(3 - V_T)^2(1 + 4 \lambda)$
 2. For $V_{SD} = 3V, V_{SG} = 3V \rightarrow 1.5398m = 0.5 \times k_p \times 3(3 - V_T)^2(1 + 3 \lambda)$
 3. For $V_{SD} = 3V, V_{SG} = 4V \rightarrow 3.1444m = 0.5 \times k_p \times 3(4 - V_T)^2(1 + 3 \lambda)$
 - I. Calculate $V_T : \frac{3.1444}{1.5398} = \left(\frac{4-V_T}{3-V_T}\right)^2 \rightarrow V_T = -0.669V$
 - II. Calculate $\lambda : \frac{1.6217}{1.5398} = \frac{1+4\lambda}{1+3\lambda} \rightarrow \lambda = 0.0634$
 - III. Calculate $k_p \rightarrow k_p = 188.89\mu$

Hspice code

- 左半 : nmos

右半 : pmos

```

lab6_nmos.sp
lab6_nmos
.param Vtn=1.093
+ kn=259.04u
+ lam=0.00723
+ toxn=100n
+ cbd0=2p
+ cgso=0.1p
.model N_MOS nmos level=1 vto=vtn kp=kn
+ lambda=lam tox=toxn cgso=cgso
+ cgdo=cgso cbd=cbd0 cbs=cbd0
***** $Table1
M1 d1 g1 gnd! gnd! N_MOS W=30u L=10u
Vds1 d1 gnd! 3.3
Vgs1 g1 gnd! 3.3
.DC Vds1 0 5 0.1 sweep Vgs1 2 5 1
.probe dc I(M1)
***** $Table2
M2 d2 g2 gnd! gnd! N_MOS W=30u L=10u
Vds2 d2 gnd! 3.3
Vgs2 g2 gnd! 3.3
.DC Vgs2 0 3.3 0.1
.probe dc I(M2)
***** $Vary the parameters
M3 d3 g3 gnd! gnd! N_MOS W=30u L=10u
Vds3 d3 gnd! 3.3
Vgs3 g3 gnd! 2
.DC Vds3 0 5 0.5 sweep Vtn 0.8 1.6 0.2
.alter
.DC Vds3 0 5 0.5 sweep kn 50u 250u 50u
.alter
.DC Vds3 0 5 0.5 sweep lam 0.02 0.06 0.01
.probe dc I(M3)
*****
.option post probe
.end

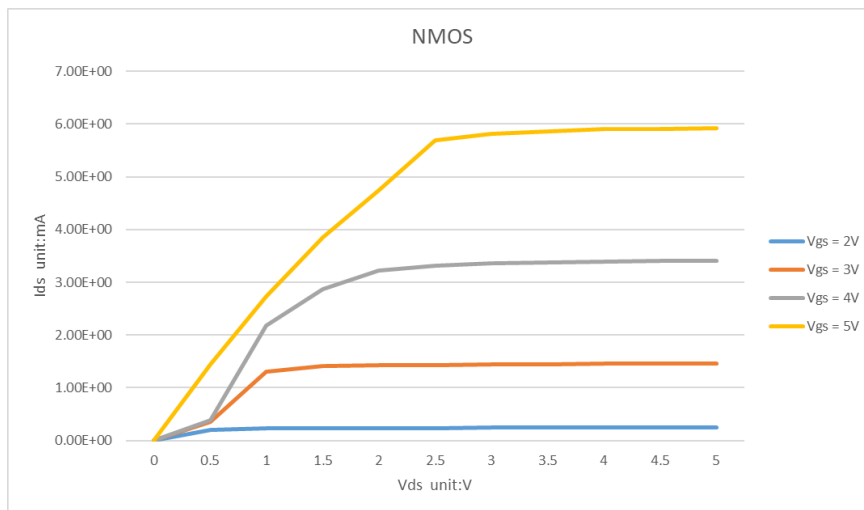
lab6_pmos.sp
lab6_pmos
.param Vtn=-0.669
+ kn=188.89u
+ lam=0.0634
+ toxn=100n
+ cbd0=2p
+ cgso=0.1p
.model P_MOS pmos level=1 vto=vtn kp=kn
+ lambda=lam tox=toxn cgso=cgso
+ cgdo=cgso cbd=cbd0 cbs=cbd0
***** $Table1
M1 d1 g1 gnd! gnd! P_MOS W=30u L=10u
Vds1 gnd! d1 3.3
Vgs1 gnd! g1 3.3
.DC Vds1 0 5 0.1 sweep Vgs1 2 5 1
.probe dc I(M1)
***** $Table2
M2 d2 g2 gnd! gnd! P_MOS W=30u L=10u
Vds2 gnd! d2 3.3
Vgs2 gnd! g2 3.3
.DC Vgs2 0 3.3 0.1
.probe dc I(M2)
*****
.option post probe
.end
    
```

Measurement of I-V characteristic

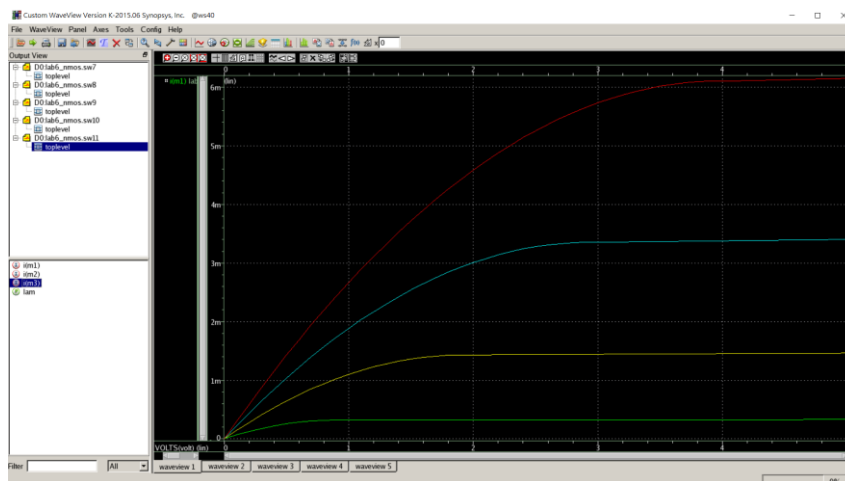
- NMOS

- $I_{DS} - V_{DS}$

- ◆ Measurement chart



- ◆ Hspice chart



- ◆ Comparison

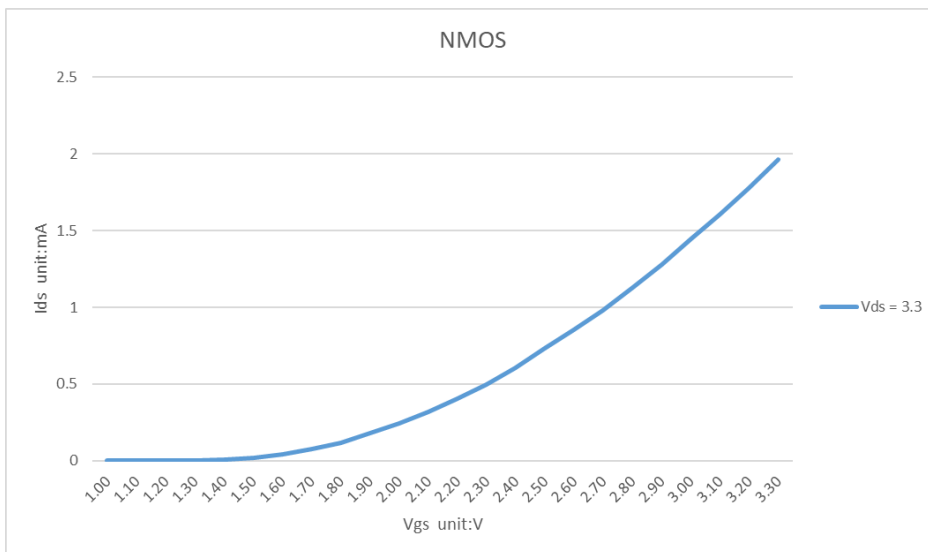
unit:mA	Vds = 1.5V			Vds = 3V			Vds = 4.5V		
	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)
Vgs = 2V	0.2389	0.323	35.20301	0.2415	0.327	35.40373	0.2438	0.33	35.35685
Vgs = 3V	1.4074	1.36	-3.36791	1.4437	1.44	-0.25629	1.4583	1.46	0.116574
Vgs = 4V	2.8747	2.54	-11.643	3.3549	3.35	-0.14606	3.4012	3.39	-0.3293
Vgs = 5V	3.8573	3.72	-3.55948	5.813	5.73	-1.42783	5.909	6.12	3.570824

- Comment :

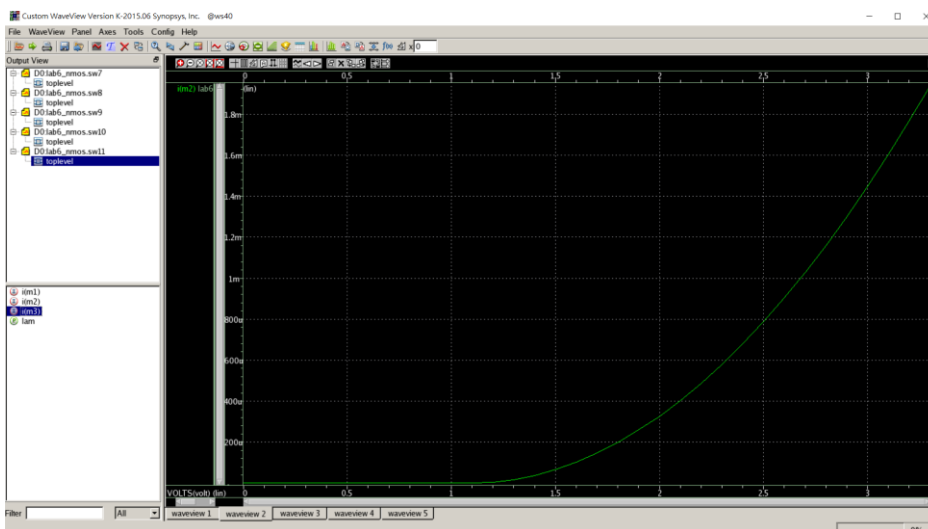
我們用 $V_{ds} = 1.5V$ 、 $3V$ 、 $4.5V$ 的測量值與 hspice 模擬的值做比較，發現在 V_{gs} 越小時誤差越大，因為在小電壓時外界干擾因素增加，因此測得的電流值會有明顯下降的趨勢。

發現 V_{gs} 越大產生的電流越大，且當 V_{ds} 大到一定程度後，MOS 會進入 Saturation 的狀態。

- $I_{DS} - V_{GS}$ with $V_{DS} = 3.3V$
 - ◆ Measurement chart



- ◆ Hspice chart



- ◆ Comparison

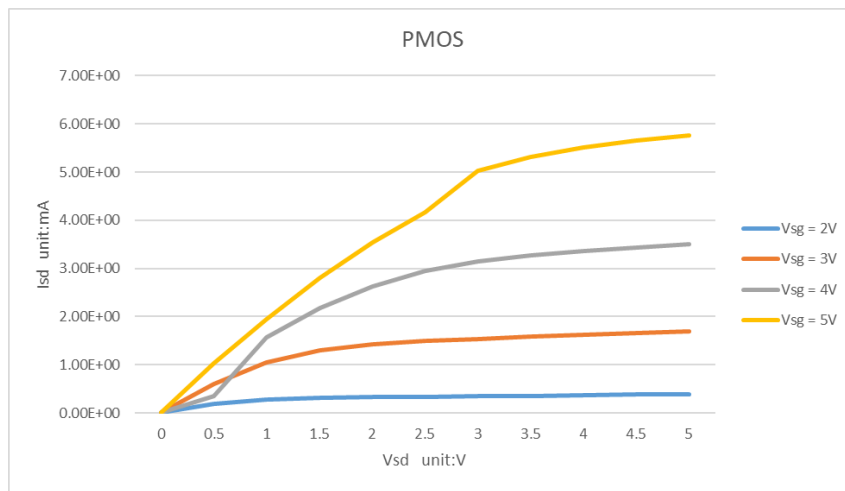
unit: mA	Vgs = 1.5V			Vgs = 2V			Vgs = 2.5V			Vgs = 3V		
	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)
Vgs = 3.3V	0.01906	0.0659	245.7503	0.242	0.327	35.12397	0.731	0.788	7.797538	1.447	1.45	0.207326

- Comment :

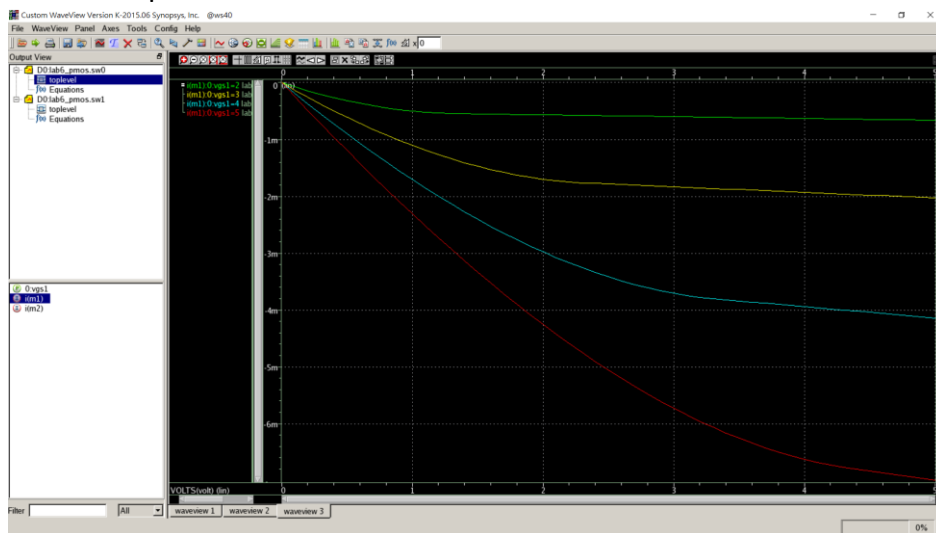
我們用 $V_{gs} = 1.5V$ 、 $2V$ 、 $2.5V$ 、 $3V$ 的測量值與 hspice 模擬的值做比較，發現在 V_{gs} 越小時誤差越大，原因與上述 $I_{DS} - V_{DS}$ 作圖同，因為在小電壓時外界干擾因素增加，因此測得的電流值會有明顯下降的趨勢。

發現 drain current I_{DS} 會隨著 V_{gs} 上升而有近似於 exponential 上升的趨勢。

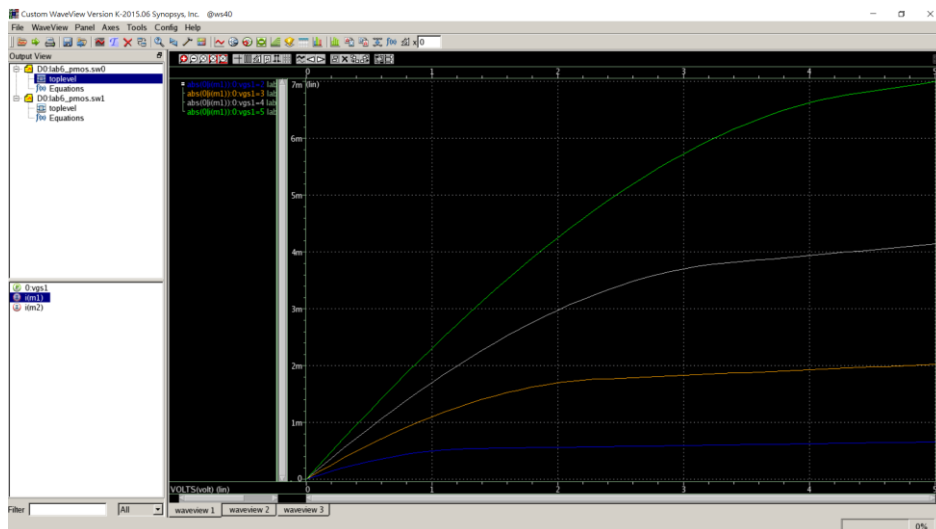
- PMOS
 - $I_{SD} - V_{SD}$
 - ◆ Measurement chart



◆ Hspice chart



(取絕對值後)



◆ Comparison

unit:mA	Vsd = 1.5V			Vsd = 3V			Vsd = 4.5V		
	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)
Vsg = 2V	0.3093	0.55	77.82089	0.3488	0.597	71.15826	0.3795	0.645	69.96047
Vsg = 3V	1.3072	1.47	12.4541	1.5398	1.83	18.8466	1.6583	1.98	19.39938
Vsg = 4V	2.1756	2.4	10.3144	3.1444	3.7	17.66951	3.4314	4.04	17.7362
Vsg = 5V	2.8036	3.33	18.77586	5.02	5.73	14.14343	5.645	6.83	20.99203

● Comment :

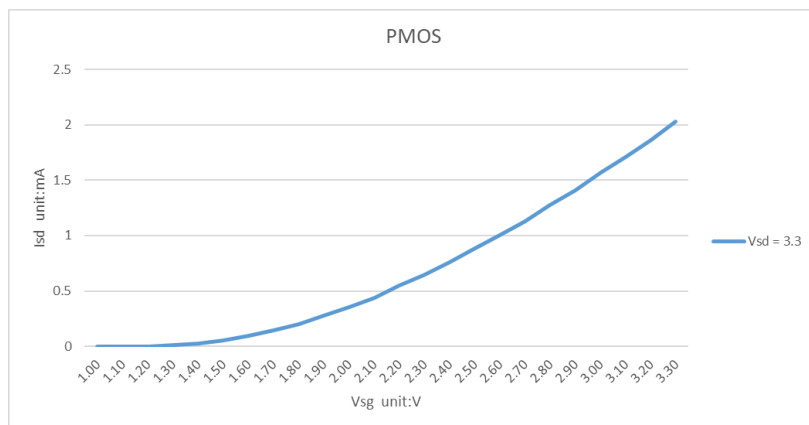
我們用 $V_{sd} = 1.5V$ 、 $3V$ 、 $4.5V$ 的測量值與 hspice 模擬後取絕對值得出的數做比較，由於是 PMOS， I_{SD} 電流方向與電路有調整過的實驗值相反，因此以取絕對值後的數做比較。

發現在 V_{sg} 越小時誤差越大，因為在小電壓時外界干擾因素增加，因此測得的電流值會有明顯下降的趨勢。

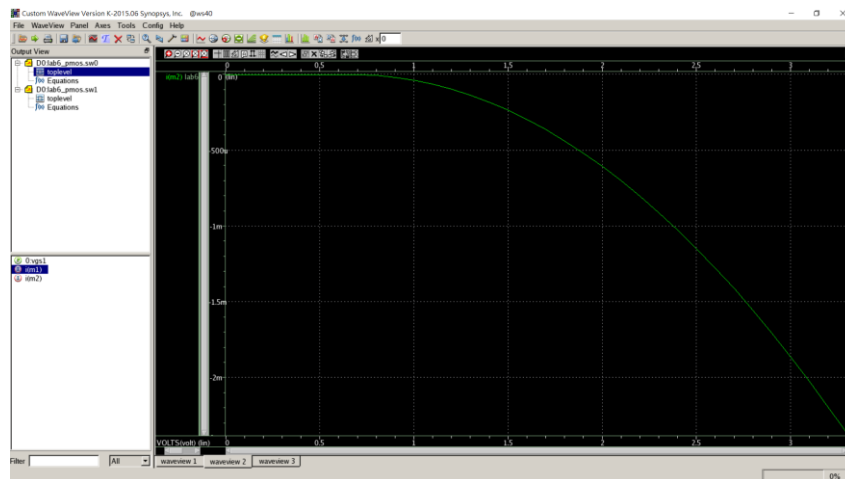
整體而言，PMOS 的誤差值明顯比 NMOS 來的大，因為 PMOS 的 mobility 較小，易受到外界 noise 的影響，所以誤差普遍會較大。

■ $I_{SD} - V_{SG}$ with $V_{SD} = 3.3V$

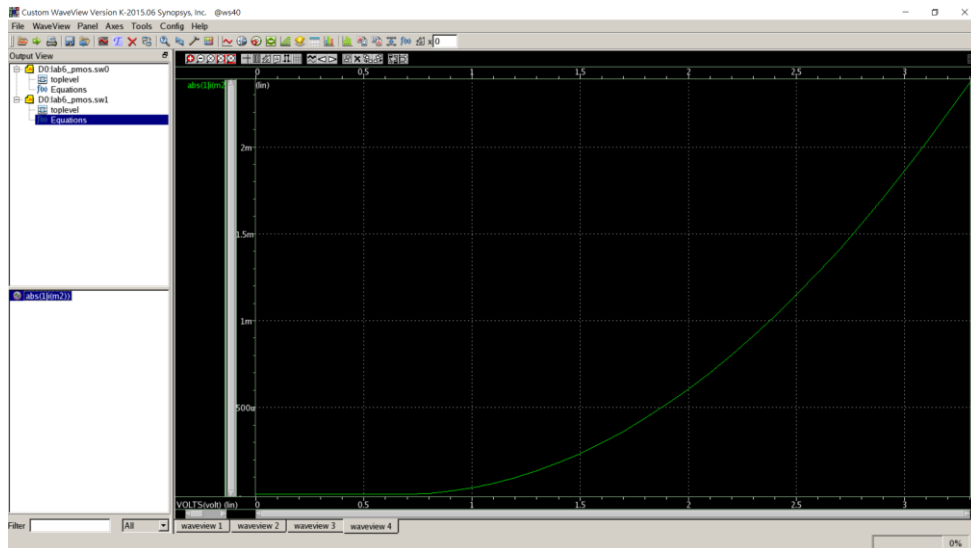
◆ Measurement chart



◆ Hspice chart



(取絕對值後)



◆ Comparison

unit: mA	Vsg = 1.5V			Vsg = 2V			Vsg = 2.5V			Vsg = 3V		
	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)	measure	hspice	error (%)
Vgs = 3.3V	0.0547	0.237	333.2724	0.355	0.607	70.98592	0.883	1.15	30.23783	1.567	1.86	18.69815

● Comment :

我們用 $V_{sg} = 1.5V$ 、 $2V$ 、 $2.5V$ 、 $3V$ 的測量值與 hspice 模擬後取絕對值得出的數做比較，由於是 PMOS， I_{SD} 電流方向與電路有調整過的實驗值相反，因此以取絕對值後的數做比較。

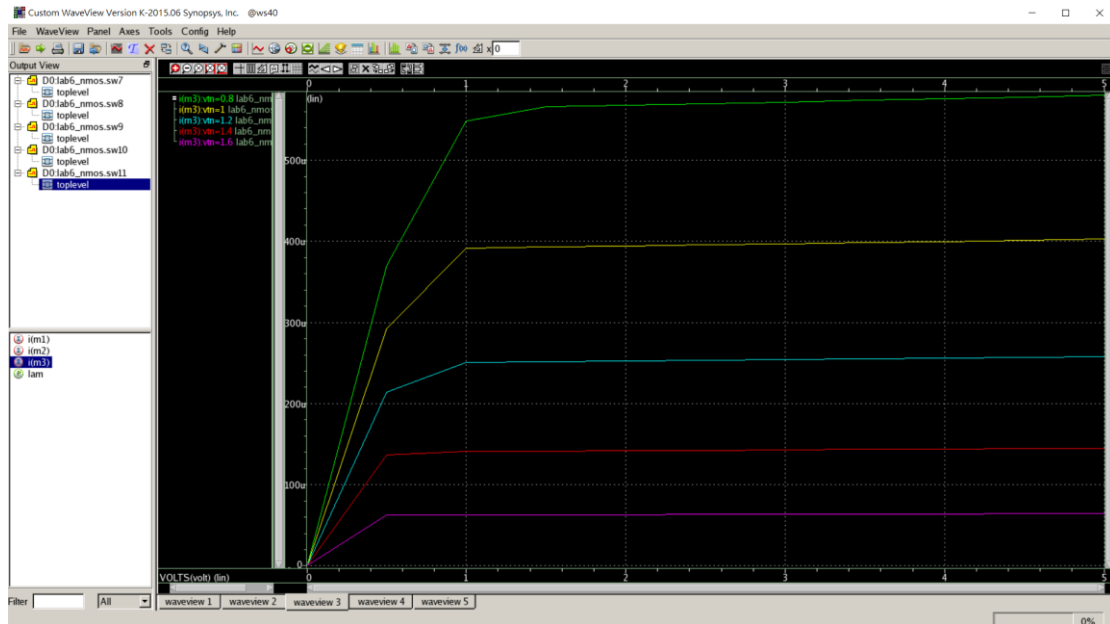
發現在 V_{sg} 越小時誤差越大，因為在小電壓時外界干擾因素增加，因此測得的電流值會有明顯下降的趨勢。

整體而言，PMOS 的誤差值明顯比 NMOS 來的大，因為 PMOS 的 mobility 較小，易受到外界 noise 的影響，所以誤差普遍會較大。

我也曾試著在 $I_{SD} - V_{SG}$ 和 $I_{SD} - V_{SD}$ 的電壓源接上電阻，但是對誤差值並無明顯的改善，因而作罷。

Vary the parameters of the N-MOSFET

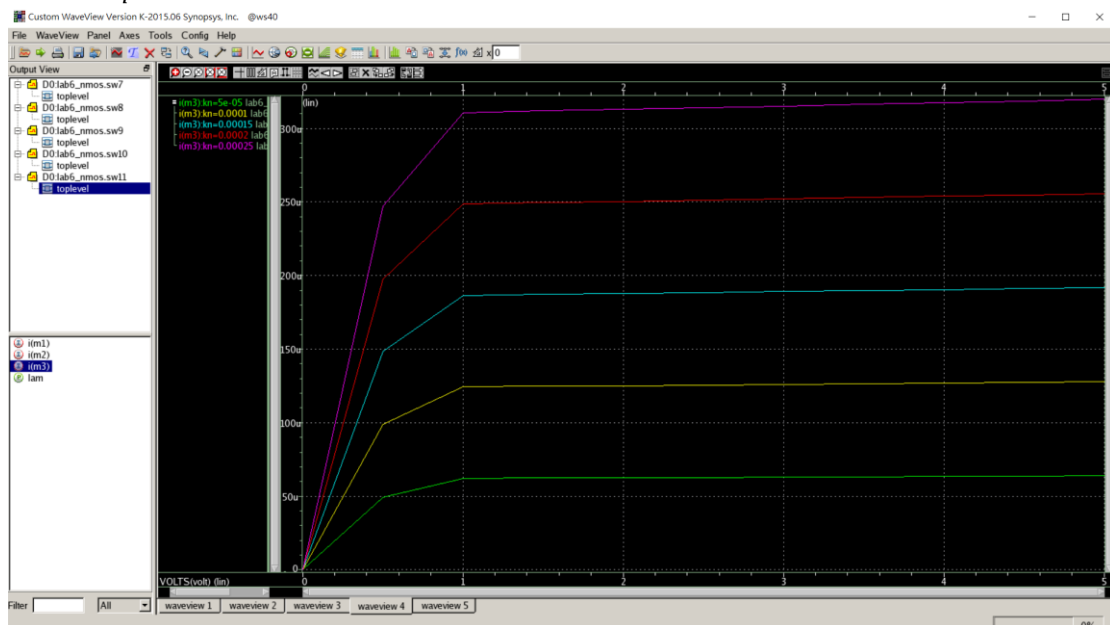
1. V_{to} : from 0.8 to 1.6V (0.2V/step)



Comment :

由公式做分析，當 $V_{DS} > V_{GS} - V_{to}$ 時，drain current 才不會隨著 V_{DS} 增加而增加，再加上 $I_{D,Saturation} \propto (V_{GS} - V_{to})^2$ ，因此 V_{to} 越大，也就是 NMOS 的 Threshold voltage 越大， $I_{D,Saturation}$ 越小，與上圖趨勢同。

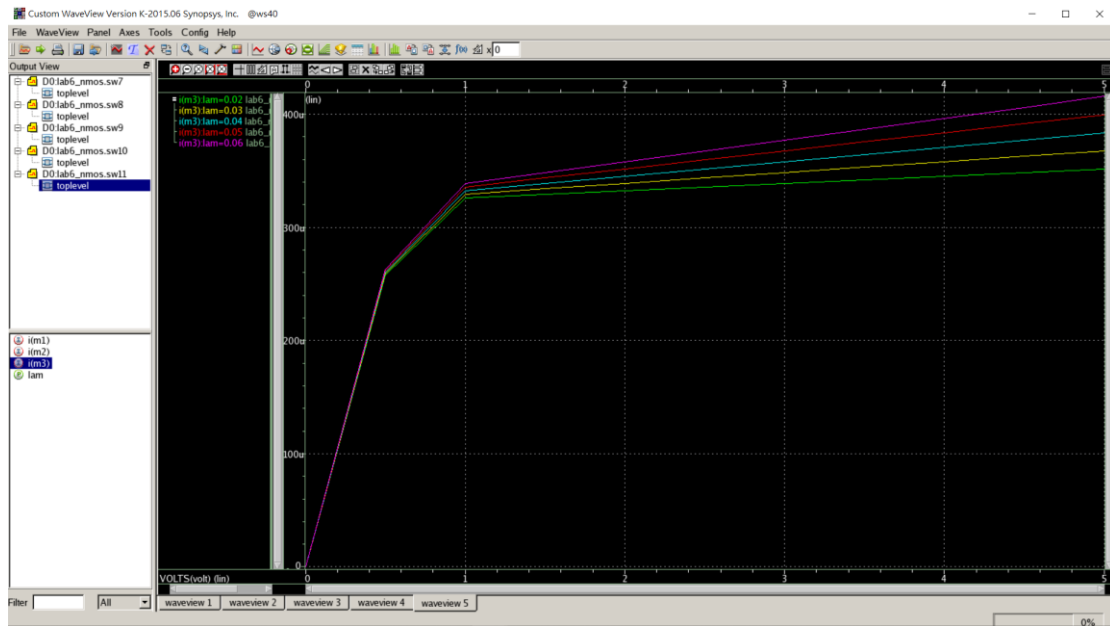
2. k_p : from 50μ to 250μ ($50\mu/step$)



Comment :

由公式做分析 $I_{D,Saturation} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} k_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ ，因此隨著 k_p 上升， $I_{D,Saturation}$ 也會增加，分析與上圖模擬結果相同。

3. Lambda : from 0.02 to 0.06 (0.01/step)



Comment :

由公式做分析 $I_{D,Saturation} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$ ，因此當 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ 時， $I_{D,Saturation}$ 一會隨著 λ 值的增加而些微的增加，分析與上圖模擬結果相同。