

Analog IC Design Homework #1

請由所給的 HSPICE model 求出：

(a) NMOS 之 length 及 width 分別為 $L=0.24\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$

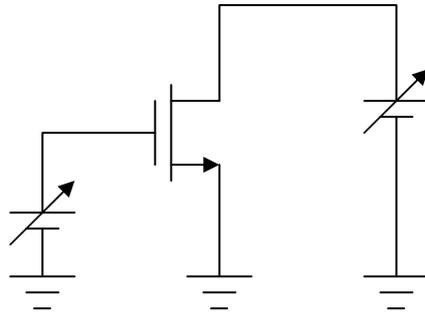
$W=0.3\mu\text{m}\sim 0.6\mu\text{m}$ (nch.9)時之

(1) λ , (2) μC_{ox} , (3) V_t , (4) C_g , (5) C_d , (6) current equation.

(b) 由所得參數畫出的 I-V curve 與 HSPICE 所畫出的 I-V curve 比較及討論其誤差.

一. 作業流程規劃：

1. 以 HSPICE 描述電路如下：



2. 給定一 W/L ($\frac{0.45}{0.24}$, $\frac{0.45}{0.35}$, $\frac{0.45}{0.5}$)，找出 V_t 和 V_{gs} 、 V_{ds} 的關係。
3. 以 HSPICE simulation 得到 I_d 對 V_{gs} 、 V_{ds} 的資料，將這些資料帶入 matlab 利用 curve fitting 找出 λ 值和 V_{gs} 、 V_{ds} 的關係式。
4. 利用 $I_d = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^2$ 找出 μC_{ox} 的估計值。
5. 將以上結果帶入 $I_d = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^\alpha (1 + \lambda V_{ds})$ 找出 α 。
6. 用 matlab 畫出 $I_d = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^\alpha (1 + \lambda V_{ds})$ 和 HSPICE 模擬結果的比較圖。
7. 參考 model 及製程參數求出 C_{ox} ，再由此求出 C_g 和 C_d 。

使用公式如下：

$$C_{ox} = \frac{K_{ox} \epsilon_0}{t_{ox}} \quad \text{其中} \quad K_{ox} \cong 3.9, \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m},$$

$t_{ox} = 5.4 \text{ nm}$ 可在 model 中找到。

$$C_g = C_{ox} WL$$

$$C_d = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + V_{DB} / \phi_0}} \quad \text{其中} \quad C_{j0} = 1.8366 \text{ fF} / \mu\text{m}^2 \text{ 可在 model 中找到,}$$

$$V_{DB} = V_{ds}, \quad \phi_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$N_A = 1.63 \times 10^{17}$ 可在 model 中找到。

8. 換另外一組 W/L 再做一遍。

二. 作業過程紀錄：

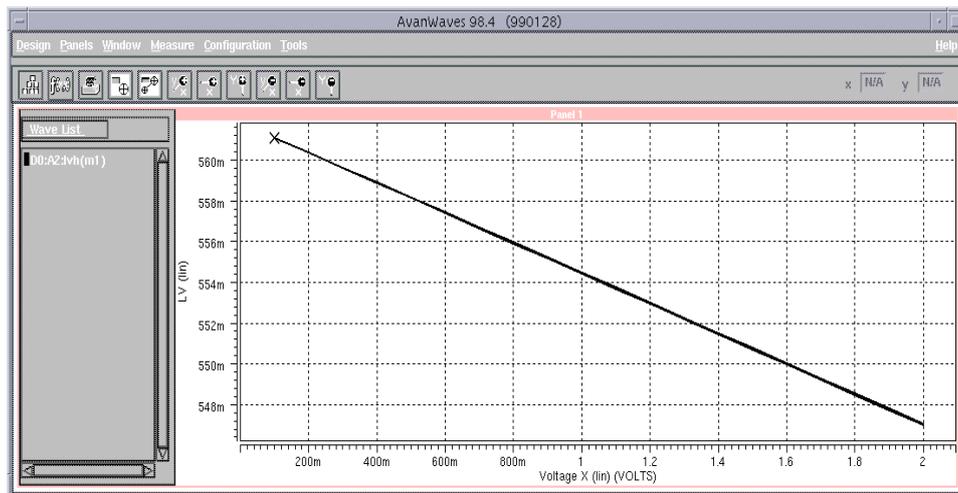
1. 首先取 $\frac{W}{L} = \frac{0.45}{0.24}$ ，以 HSPICE 模擬分別得到 V_t 和 I_d 對 V_{gs} 和 V_{ds} 的關係資料。

程式如下：

```
*****  
* test_model.sp  
*****  
.lib '~/spice/mix025_1.l' TT  
*****  
*mos drain gate source bulk channel width lengthmulti  
m1 1 2 0 0 nch w=0.45u l=0.24u  
  
*****  
* bias and signal source  
*****  
vin 2 0 dc 0.756v  
vdd 3 0 dc 2v  
vtest 3 1 dc 0v  
*****  
  
.op  
.option post INGOLD=2  
.dc vdd 0.1v 2v 0.1v vin 0.756v 2.156v 0.2v  
.option accurate absv=10n relv=10u absi=10p reli=10u ABSMOS=10n RELMOS=10u  
.option rmax=0.01  
.option numdgt=6  
.print 'id'=i(vtest)  
.probe i(vtest) vth(m1)  
.end
```

將執行結果輸出檔中的數據資料擷取到檔案 id_data1 中。

2. 從 awaves 可直接觀察出 V_t - V_{gs} , V_{ds} 的關係，如下圖：



- a. 由圖可發現 V_t 和 V_{gs} 無關。
- b. V_t 隨 V_{ds} 變動範圍很小。

所以在 $\frac{W}{L} = \frac{0.45}{0.24}$ 時我們取 $V_t = 0.556V$

3. 將 I_d - V_{gs} , V_{ds} 的資料帶入 matlab 做運算及 curve fitting。Matlab 程式如下：

```
%%%%%%%% poly1.m %%%%%%%%%
```

```
format long e
```

```
load id_data1 -ascii;
```

```
vds=id_data1(1:20,1);
```

```
landa_avg=[0 0 0 0 0 0];
```

```
difference=[0 0 0 0 0 0];
```

```
k=[1:6];
```

載入資料及
變數宣告

```
for i=1:6
```

```
id_spice=id_data1((i-1)*20+1:i*20,2);
```

```
id_appr_para=polyfit(vds,id_spice,5);
```

```
id_appr_val=polyval(id_appr_para,vds);
```

```
id_appr_der_para=polyder(id_appr_para);
```

```
id_appr_der_val=polyval(id_appr_der_para,vds);
```

```
landa=id_appr_der_val./id_appr_val;
```

Curve fitting 及
運算

```

j=0;
for n=1:20
    if (n>=(2*i))
        landa_avg(i)=landa_avg(i)+landa(n);
        j=j+1;
    end
end
landa_avg(i)=landa_avg(i)/j;

```

求 λ 值

```

id=1/2*117e-6*0.45/0.24*(0.2*i)^1.61*(1+landa_avg(i)*vds);
vds_sat=vds((20-j+1):20);
id_sat=id((20-j+1):20);
id_spice_sat=id_spice((20-j+1):20);

```

current equation for saturation region

```

subplot(2,2,1),plot(vds,id_spice,'o'),title('Id v.s. Vds'),xlabel('Vds')...
ylabel('Id')
hold on
subplot(2,2,1),plot(vds_sat,id_sat)
hold on

```

Current equation 和 spice 模擬結果比較圖

```

% find landa
subplot(2,2,2),plot(vds,landa),title('landa v.s. Vds'),xlabel('Vds')...
ylabel('landa')
hold on

```

λ 對 Vgs 和 Vds 的關係圖

```

% find alpha
for n=1:j
    difference(i)=difference(i)+((id_sat(n)-id_spice_sat(n))/id_spice_sat(n))^2;
end
difference(i)=difference(i)/j;

```

計算方差

```

% show difference v.s. Vds for each Vgs
subplot(2,2,3),plot(vds_sat,(id_sat-id_spice_sat)*100/id_spice_sat),...
title('difference %'),xlabel('Vds'),ylabel('(id_diff)*100/id')
hold on
end

```

current equation 對 hspice 模擬結果誤差百分比圖

```

% show difference for each vgs

```

Current equation 對 hspice 模擬結果的方差圖

```
subplot(2,2,4),plot(k,difference),title('variance for each vgs'),...
```

```
xlabel('Vgs'),ylabel('variance')
```

```
hold on
```

```
subplot(2,2,1),grid
```

```
subplot(2,2,2),grid
```

```
subplot(2,2,3),grid
```

```
subplot(2,2,4),grid
```

```
hold off
```

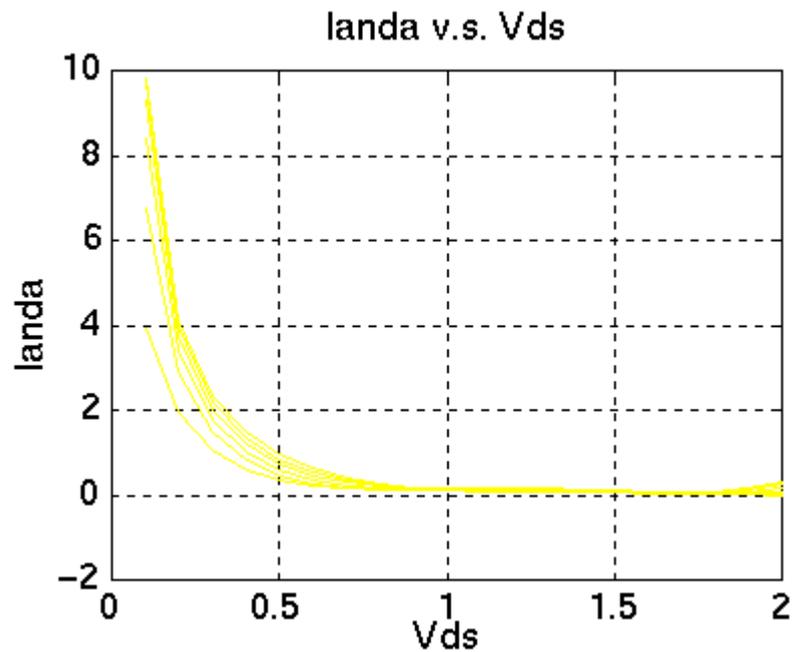
4. matlab 程式執行結果說明如下：

a. 從 λ v.s. V_{ds} 圖形可看出在 saturation region λ 約為定值。求得此區間的 λ 平均值如下：

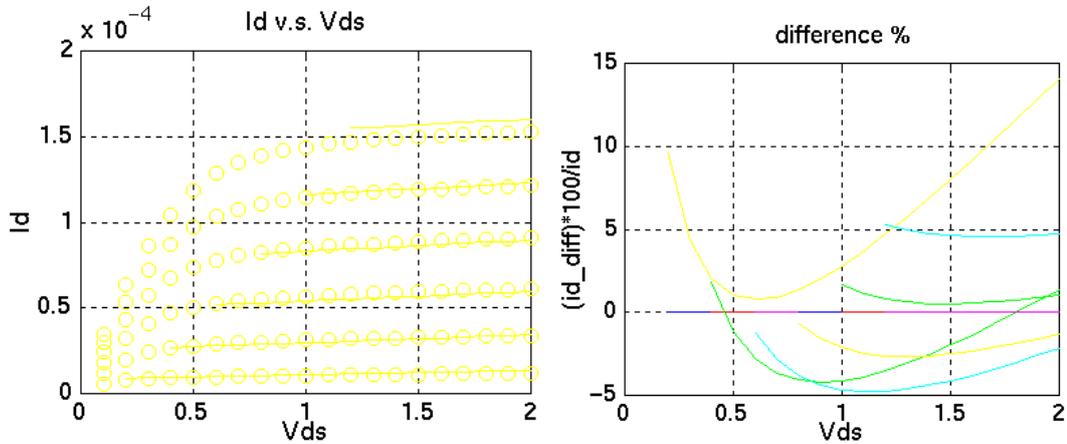
	$\Delta V=0.2V$	$\Delta V=0.4V$	$\Delta V=0.6V$	$\Delta V=0.8V$	$\Delta V=1.0V$	$\Delta V=1.2V$
Landa_avg	3.28e-1	1.84e-1	1.19e-1	8.46e-2	6.01e-2	4.42e-2

找出 I_d - V_{gs} , V_{ds} 的五階多項式，並利用公式 $\lambda = \frac{\partial I_d / \partial V_{ds}}{I_d}$ 找出 λ 對 V_{gs} , V_{ds} 的

關係。將 saturation region 的 λ 值取平均值，共取六組不同 V_{gs} 下的平均 λ 值。



- b. 採用公式 $I_d = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^\alpha (1 + \lambda V_{ds})$ 並估計 α 值，微調 μC_{ox} 值，使公式與利用 HSPICE 模擬得到的數據在所需的操作範圍內的誤差量能達到要求。輸出結果如下：



- 在 id v.s. Vds 圖中 O 代表 hspice 模擬出來的點，實線為近似的 current equation。
- 在 difference % 圖中顯示除了 $\Delta V = 0.2V$ 以外的曲線誤差都在 5% 以內。

- c. 最後採用的公式為： $I_d = \frac{1}{2} \times \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^{1.61} (1 + \lambda V_{ds})$

其中 $\mu C_{ox} = 117 \mu A/V^2$ ， $\left(\frac{W}{L}\right) = \left(\frac{0.45 \mu m}{0.24 \mu m}\right)$ ， V_t 取 $0.556V$

λ 值如之前的 a. 部分所列。

5. 利用先前流程規劃中所列公式來求 C_g 和 C_d 。結果如下：

$$C_{ox} = 6.4 \times 10^{-3} F/m^2, \quad C_g = 0.7 fF,$$

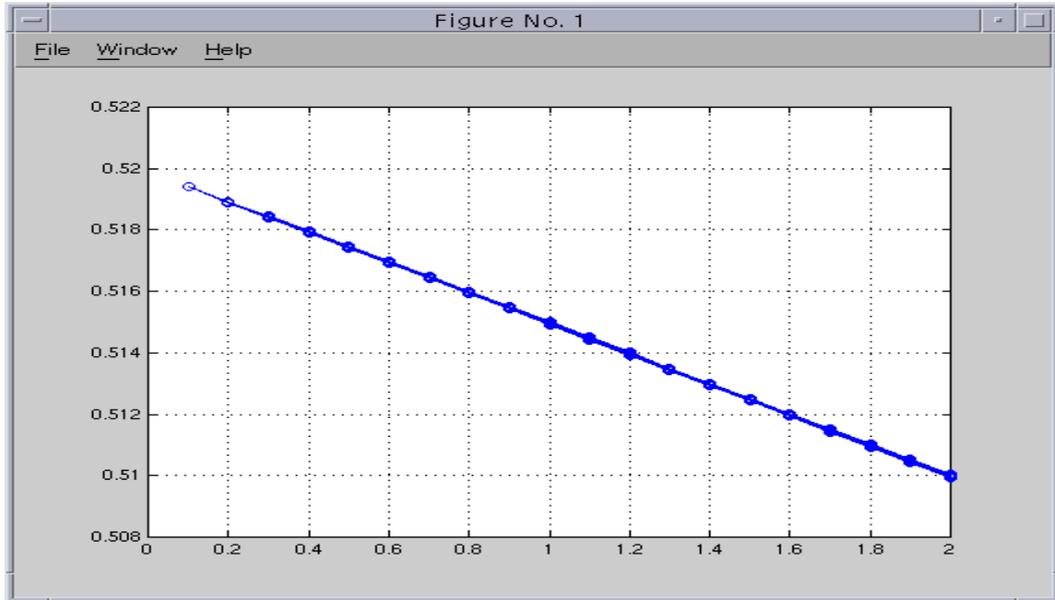
$$\text{而 } C_d = \frac{1.8366 fF / \mu m^2}{\sqrt{1 + V_{DB} / \phi_0}}, \text{ 其中 } \phi_0 = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.602 \times 10^{-19}} \ln\left(\frac{1.63 \times 10^{17}}{1.1 \times 10^{16}}\right) \cong 0.07$$

因此將操作點之 V_{DB} 代入上式可求得 C_d 。

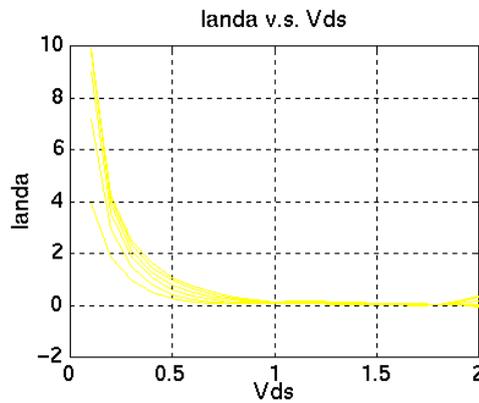
6. 以上為 $\frac{W}{L} = \frac{0.45 \mu m}{0.24 \mu m}$ 時的模擬結果，下面列出取 $\frac{W}{L}$ 為 $\frac{0.45 \mu m}{0.35 \mu m}$ 及 $\frac{0.45 \mu m}{0.5 \mu m}$ 時的模擬結果。

7. $\frac{W}{L} = \frac{0.45\mu m}{0.35\mu m}$

a. V_t - V_{gs} , V_{ds} 的關係圖



b. 求得 λ 的結果



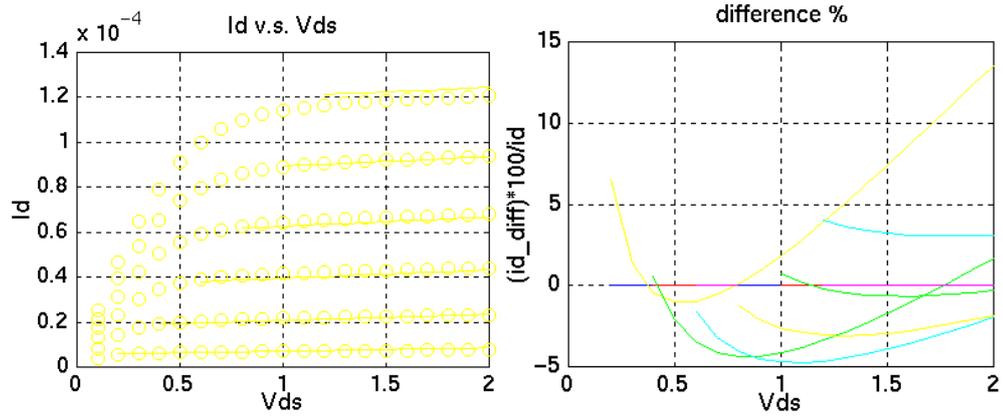
	$\Delta V=0.2V$	$\Delta V=0.4V$	$\Delta V=0.6V$
Landa_avg	2.8e-1	1.55e-1	1.01e-1
	$\Delta V=0.8V$	$\Delta V=1.0V$	$\Delta V=1.2V$
Landa_avg	7.0e-2	4.68e-2	3.36e-2

c. 求得 I_d - V_{ds} , V_{gs} 近似公式 $I_d = \frac{1}{2} \times \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^{1.7} (1 + \lambda V_{ds})$

其中 $\mu C_{ox} = 133\mu A/V^2$, $\left(\frac{W}{L}\right) = \left(\frac{0.45\mu m}{0.35\mu m}\right)$, V_t 取 0.516V

λ 值如 b. 部分所列。

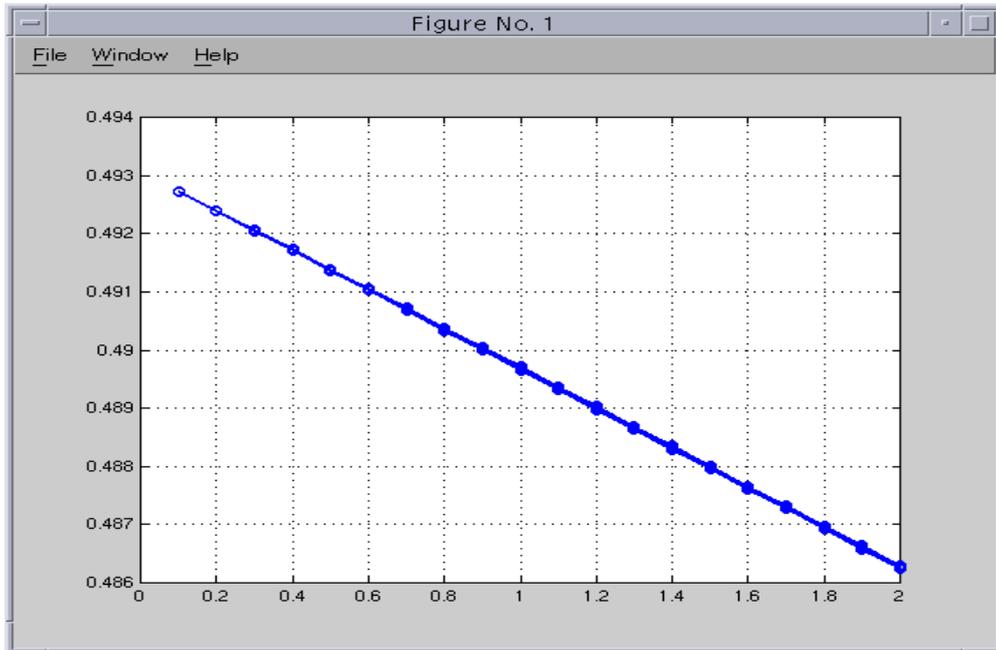
Saturation region curve fitting 及其誤差結果表示如下



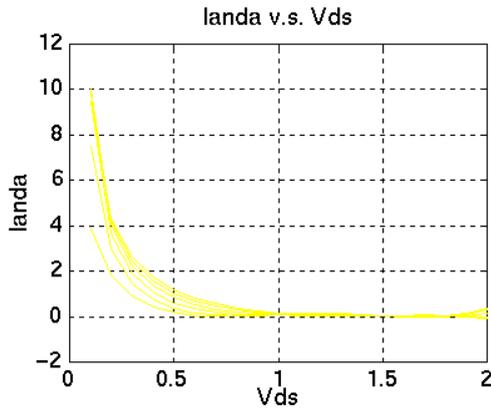
d. $C_g = 1.008 fF$, $C_d = \frac{1.8366 fF / \mu m^2}{\sqrt{1 + V_{DB} / \phi_0}}$

8. $\frac{W}{L} = \frac{0.45 \mu m}{0.5 \mu m}$

a. V_t - V_{gs} , V_{ds} 的關係圖



b. 求得 λ 的結果



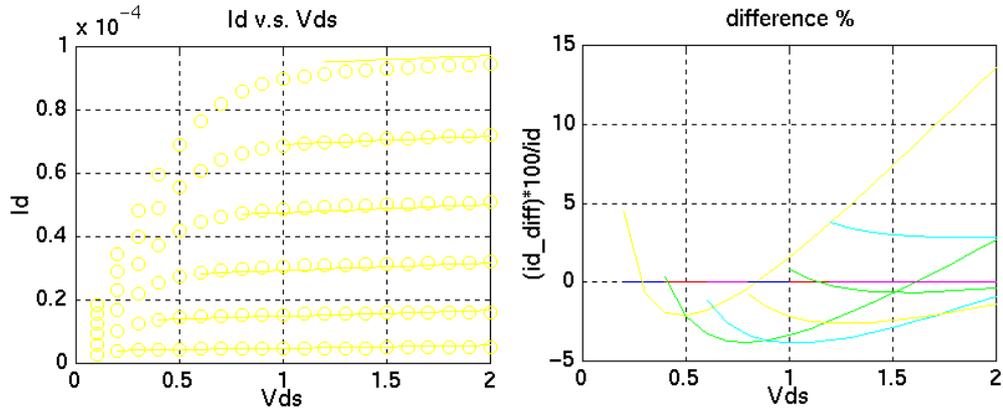
	$\Delta V=0.2V$	$\Delta V=0.4V$	$\Delta V=0.6V$
Landa_avg	2.46e-1	1.34e-1	8.76e-2
	$\Delta V=0.8V$	$\Delta V=1.0V$	$\Delta V=1.2V$
Landa_avg	5.93e-2	3.84e-2	2.86e-2

c. 求得 I_d - V_{ds} , V_{gs} 近似公式 $I_d = \frac{1}{2} \times \mu C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_t)^{1.77} (1 + \lambda V_{ds})$

其中 $\mu C_{ox} = 148 \mu A/V^2$, $\left(\frac{W}{L}\right) = \left(\frac{0.45 \mu m}{0.5 \mu m}\right)$, V_t 取 $0.4905V$

λ 值如 b. 部分所列。

Saturation region curve fitting 及其誤差結果表示如下



d. $C_g = 1.44 fF$, $C_d = \frac{1.8366 fF / \mu m^2}{\sqrt{1 + V_{DB} / \phi_0}}$

三. 討論：

1. HSPICE 模擬結果資料我們去掉 $V_{ds}=0$ 這一點，因為若包含這一點則此時的 I_d 趨近於 0，使得 λ 在這一點附近變得很大，且在 triode region 時根本就不考慮 λ 。
2. 由結果顯示 V_t 和 V_{gs} 無關，且隨 V_{ds} 的變動亦不大。因此在不同的 W/L 求出 V_t 對 V_{gs}, V_{ds} 的關係圖後我們取 $V_{ds}=0.8V$ 時的 V_t 為一般值。
3. 這次作業主要在找出一條簡單的近似公式，因不同的電路會有不同的規格和操作區間，因此要找出 match 所有範圍的近似公式是不需要的，所以我們只在一般操作區間 ($\Delta V=0.2V\sim 1.2V, V_{ds}=0.2V\sim 2V$) 來考慮近似公式的誤差，通常在這區間內且在 saturation region 內的誤差都在 10% 以內 (若考慮較小操作區間，則誤差可降至 5% 以下)。
4. 本次作業近似公式的結果是調整 α 和 μC_{ox} 並觀察誤差之後人為決定，並無一套標準規則，這標準度量規則尚待進一步發展。