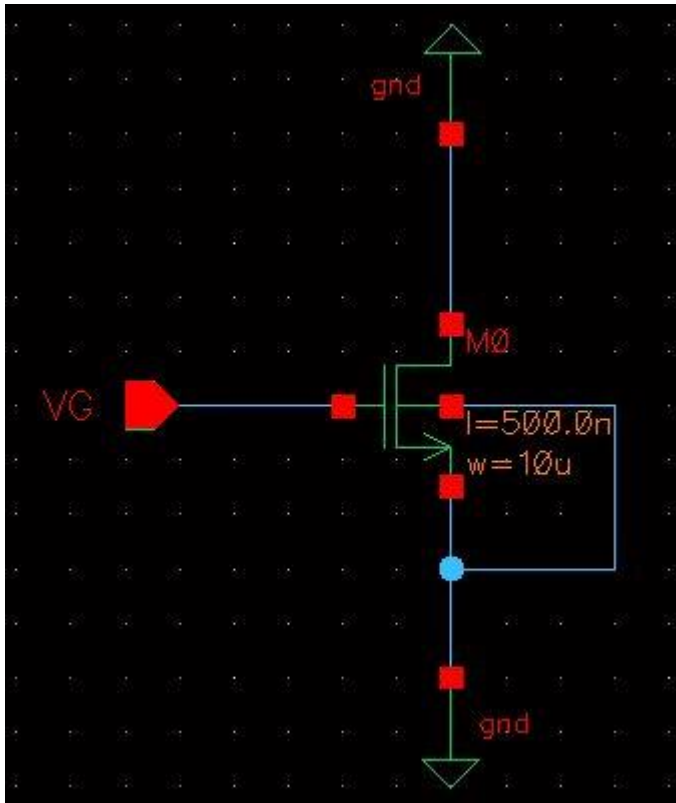
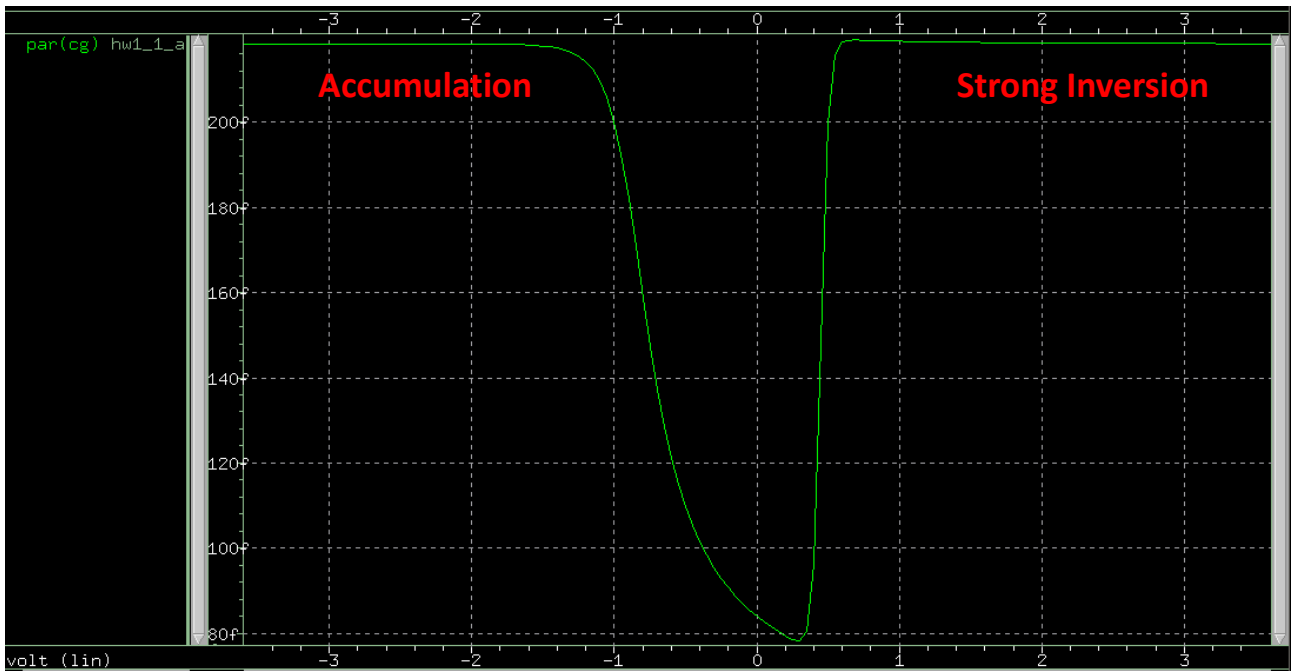


1. (a)  $W=10\mu\text{m}$  ,  $L=0.5\mu\text{m}$  ,  $M=5$  ,  $V_G=-3.6\text{V}\sim 3.6\text{V}$

✓ Schematic:

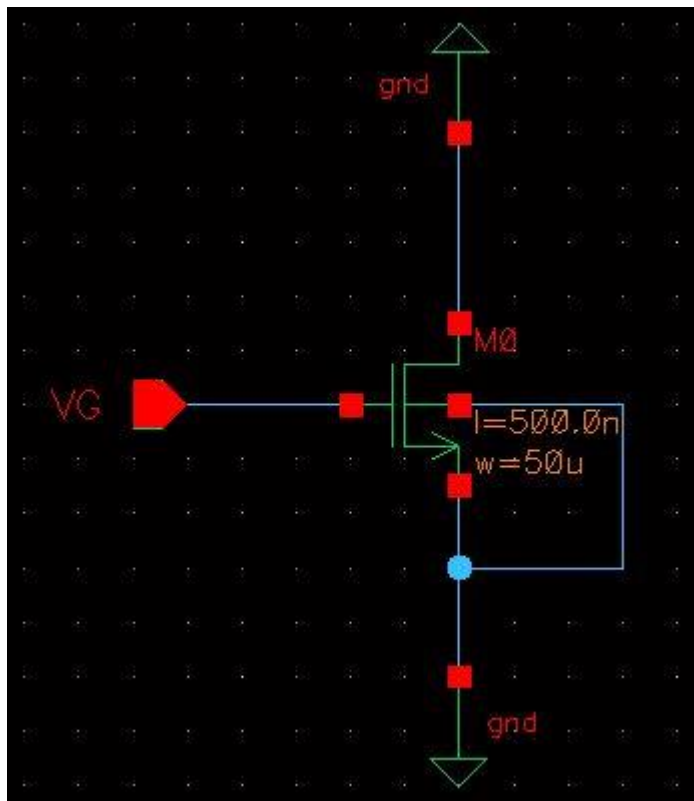


✓ Waveform:

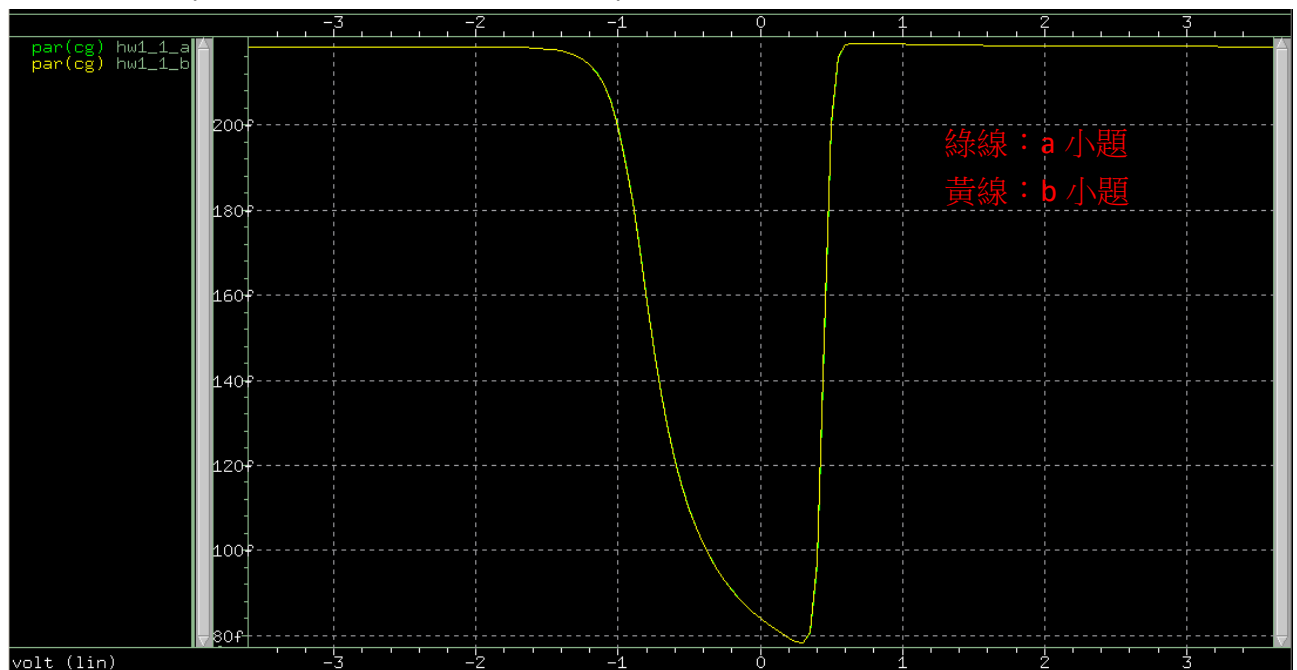


(b)  $W=50\mu\text{m}$  ,  $L=0.5\mu\text{m}$  ,  $V_G=-3.6\text{V}\sim 3.6\text{V}$

✓ Schematic:



✓ Waveform: (a 小題和 b 小題的圖疊在一起)

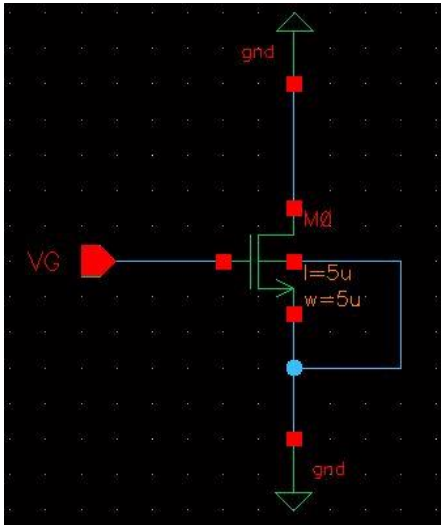


✓ Comment:

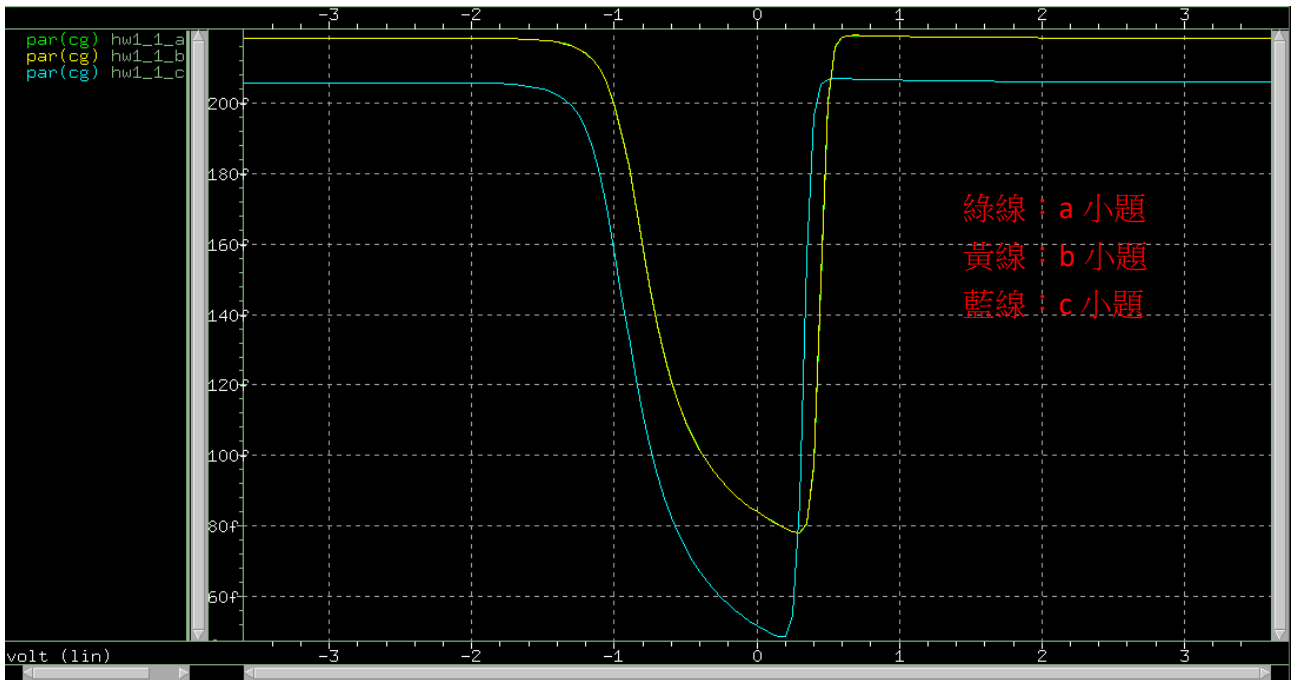
由 waveform 可以看出，(a)  $W/L = 5 \cdot 10\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$  和 (b)  $W/L = 50\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$  的  $C_{G,\text{total}}$  對  $V_{GS}$  作圖結果是一模一樣的。因為在 a 小題裡將 5 顆  $W/L = 10\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$  的 NMOS 並聯， $W$  會變成原來的 5 倍，等效相當於一個  $W/L = 50\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$  的 NMOS，所以結果會相同。

(c)  $W=5\mu\text{m}$  ,  $L=5\mu\text{m}$  ,  $V_G=-3.6\text{V}\sim 3.6\text{V}$

✓ Schematic:



✓ Waveform: (a、b、c 小題的圖疊在一起)



✓ Comment:

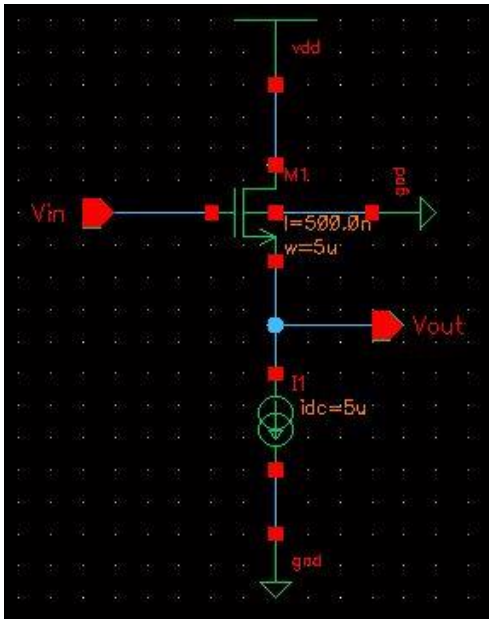
由 waveform 可以觀察到，(c)小題  $W/L=5\mu\text{m}/5\mu\text{m}$  的 NMOS 的  $C_{G,\text{total}}$  對  $V_{GS}$  作圖結果會比(a)和(b)小題來得小，且有向左移的趨勢。 $C_{G,\text{total}}=C_{GS}+C_{GD}+C_{GB}$ ， $C_{GS}$ 、 $C_{GD}$ 、 $C_{GB}$  在不同的 mode 會有不同的值可以寫成下表：

|            | $C_{GS}$                 | $C_{GD}$             | $C_{GB}$   |
|------------|--------------------------|----------------------|------------|
| Cut off    | $C_{ov}W$                | $C_{ov}W$            | $C_{ox}WL$ |
| Triode     | $WLC_{ox}/2+WC_{ov}$     | $WLC_{ox}/2+WC_{ov}$ |            |
| Saturation | $2/3*WL C_{ox}+ WC_{ov}$ | $WC_{ov}$            |            |

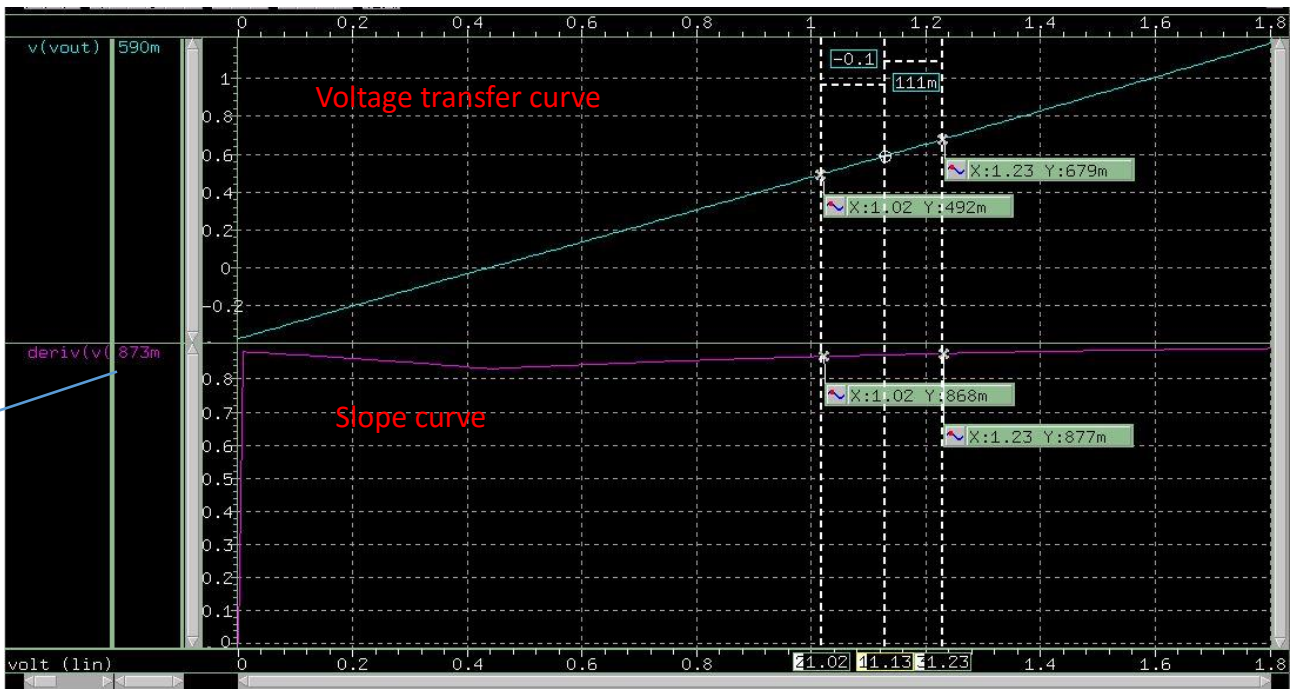
可以看出，不管在哪個 region， $C_{G,\text{total}}$  的值會跟  $WL$  的乘積還有  $W$  的大小有關(正相關)，雖然(a)、(b)、(c)三小題的  $WL$  乘積都相同，但因(c)小題的  $\text{width}=5\mu\text{m}$  比(a)和(b)小題小，所以造成電容  $C_{G,\text{total}}$  變小，整條 C-V curve 都在(a)、(b)小題下方。

2. (a)

✓ Schematic:



✓ Waveform: (上方為 voltage transfer curve  $V_{in}$  vs.  $V_{out}$ ，下方為每個點的斜率圖)



✓ Comment:

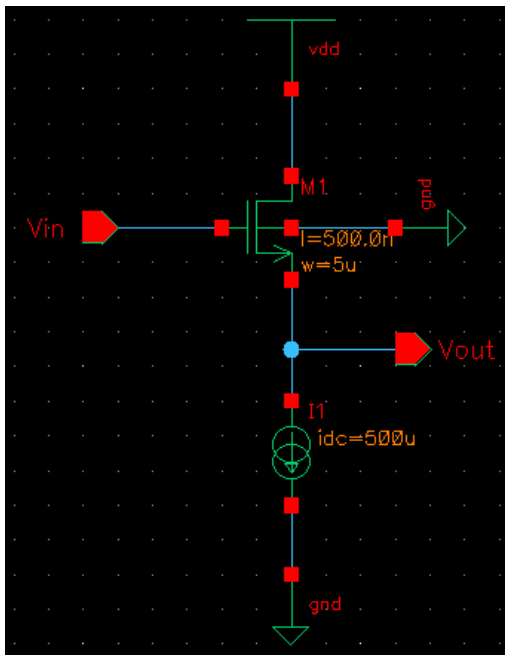
我利用 deriv function 來找到 voltage transfer curve 中每個點的斜率如圖中紫線，得到  $1/2V_{out}=590m$ ，且此時的  $slope=873m$ 。

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Linear range                      | 1.02V~1.23V   |
| Slope                             | 1/2Vout : 873m<br>Left point : 868m<br>Right point : 877m         |
| DC offset<br>( $V_{in}-V_{out}$ ) | Left point : 1.02V-492mV=528mV<br>Right point : 1.23V-679mV=551mV |

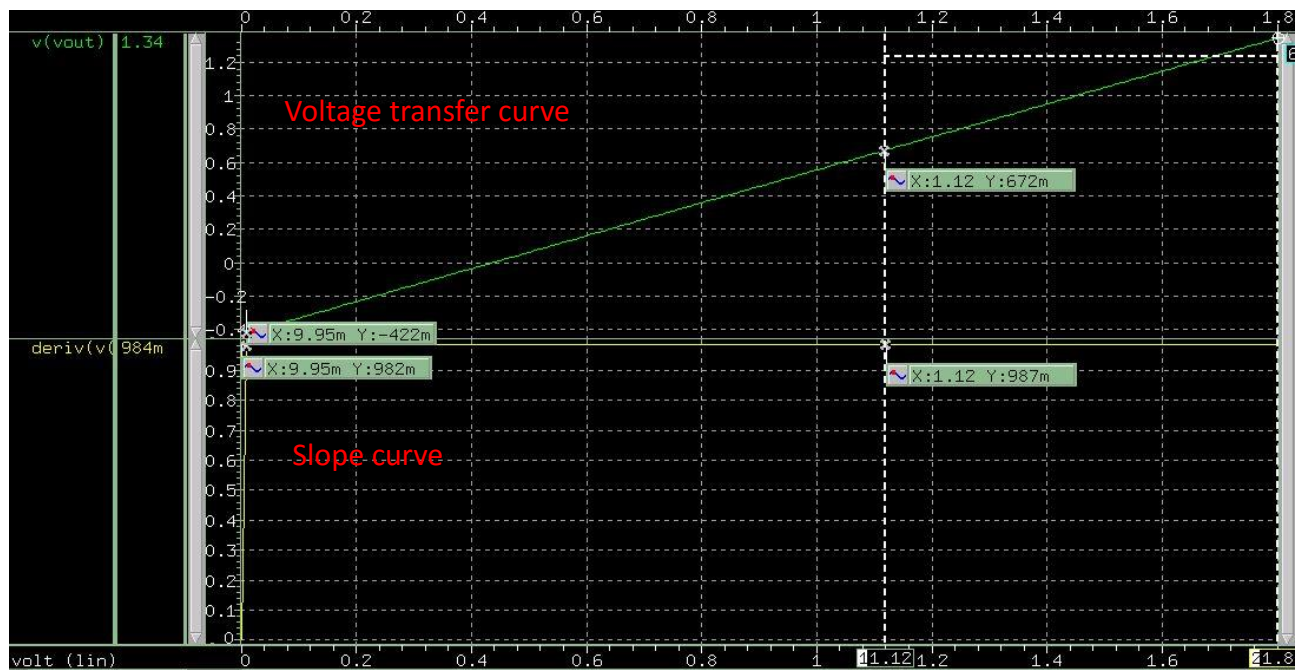
因為此題是 source follow，我們預期它可以用來做 **voltage buffer**，透過模擬得到 voltage transfer curve 是一條斜直線，符合我們的預測。

(b)

✓ Schematic:



✓ Waveform: (上方為 voltage transfer curve  $V_{in}$  vs.  $V_{out}$ ，下方為每個點的斜率圖)



✓ Comment:

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Linear range                      | 9.95mV~1.8V   |
| Slope                             | 1/2Vout : 987m<br>Left point : 982m<br>Right point : 984m               |
| DC offset<br>( $V_{in}-V_{out}$ ) | Left point : 9.95mV-(-422mV)=431.95mV<br>Right point : 1.8V-1.34V=460mV |

我可以觀察到，與(a)小題相比 linear range 變大很多，且 slope 更接近 1。這個原因是因為(b)小題的 body 跟 source 接在一起，沒有了 body effect，根據 threshold voltage 的公式：

$$V_{TH} = V_{TH0} + \gamma \left( \sqrt{|2\Phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\Phi_F|} \right)$$

當 body 跟 source 接在一起時， $V_{SB}$  會等於 0，所以  $V_{TH}=V_{TH0}$ ，此時  $V_{TH}$  為最小值。又根據電流的公式(at saturation)：

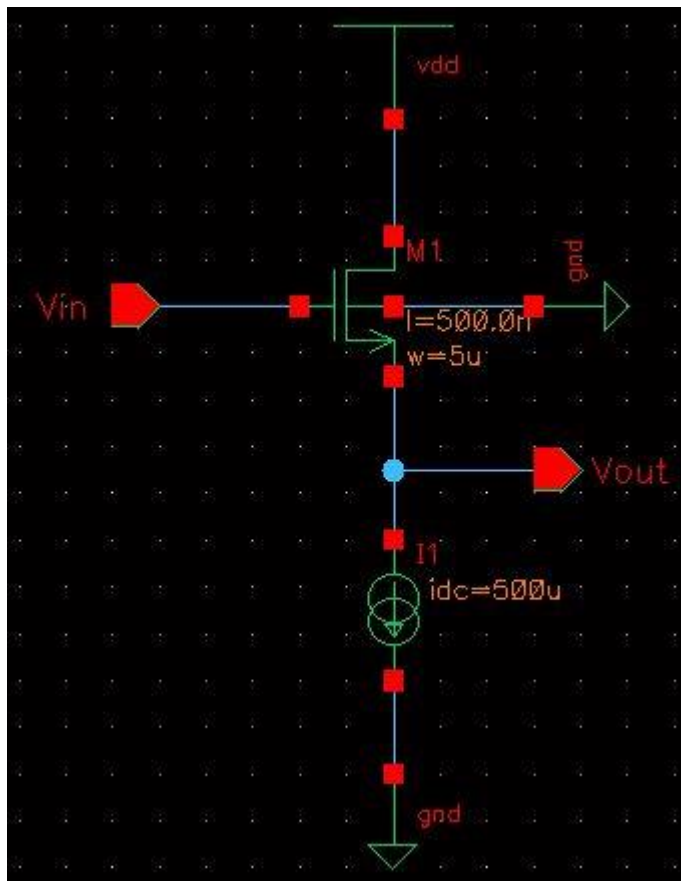
$$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{out} - V_{TH})^2$$

因為  $I_1$  是固定的電流源，當  $V_{TH}$  最小時(如 b 小題)，DC offset( $V_{in}-V_{out}$ )會變小以維持相同的電流，所以當有 body effect 影響(如 a 小題)時， $V_{TH}$  會變大，為了維持相同的電流，DC offset 也會變大。

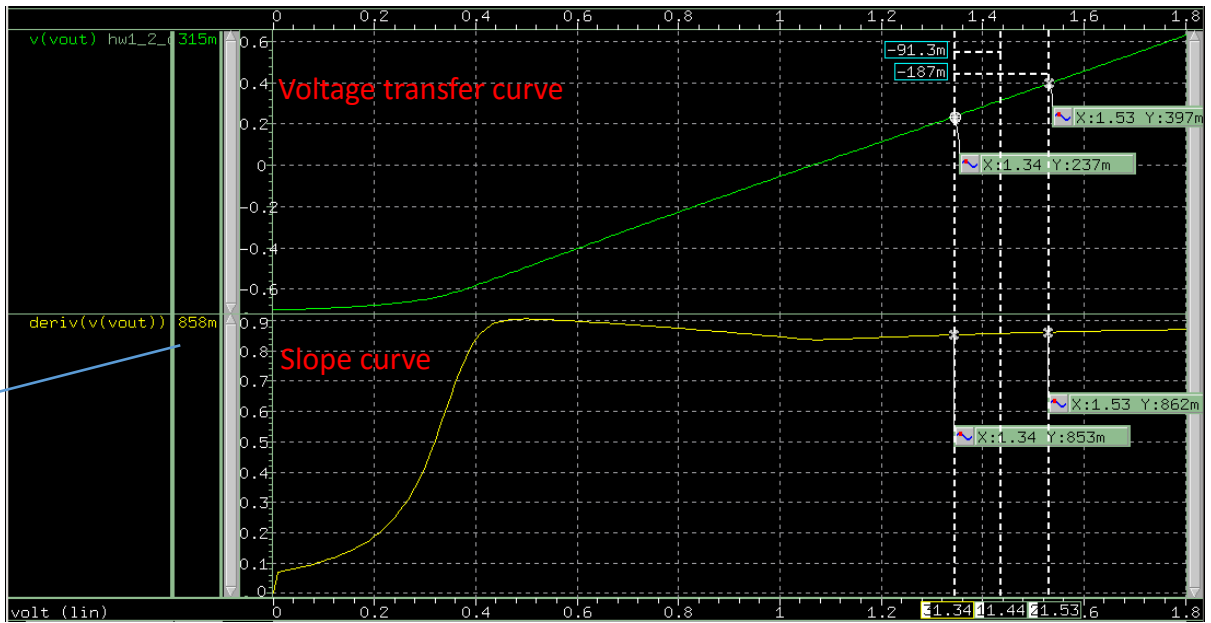
另外，在沒有 body effect 的情況下，voltage transfer curve 的斜率會更接近 1，代表 gain 也越接近 1，更適合做為更優質的 voltage buffer。

(c)

✓ Schematic:



✓ **Waveform:** (上方為 voltage transfer curve  $V_{in}$  vs.  $V_{out}$ ，下方為每個點的斜率圖)



✓ **Comment:**

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Linear range                      | 1.34V~1.53V   |
| Slope                             | 1/2Vout : 858m<br>Left point : 853m<br>Right point : 862m           |
| DC offset<br>( $V_{in}-V_{out}$ ) | Left point : 1.34V-237mV=1.103V<br>Right point : 1.53V-397mV=1.133V |

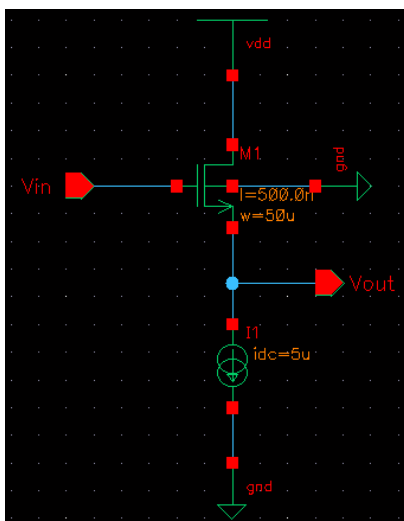
我可以觀察到(c)小題的 DC offset 比(a)小題大很多，此原因為電流源  $I_1$  變大了，從原本的 5uA 變成 500uA，根據電流的公式(at saturation)：

$$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{out} - V_{TH})^2$$

當電流變大時， $V_{TH}$  還是維持一樣的值(a 跟 c 小題受到一樣的 body effect 影響)， $V_{in}-V_{out}$  會變大，此  $V_{in}-V_{out}$  即為 DC offset。

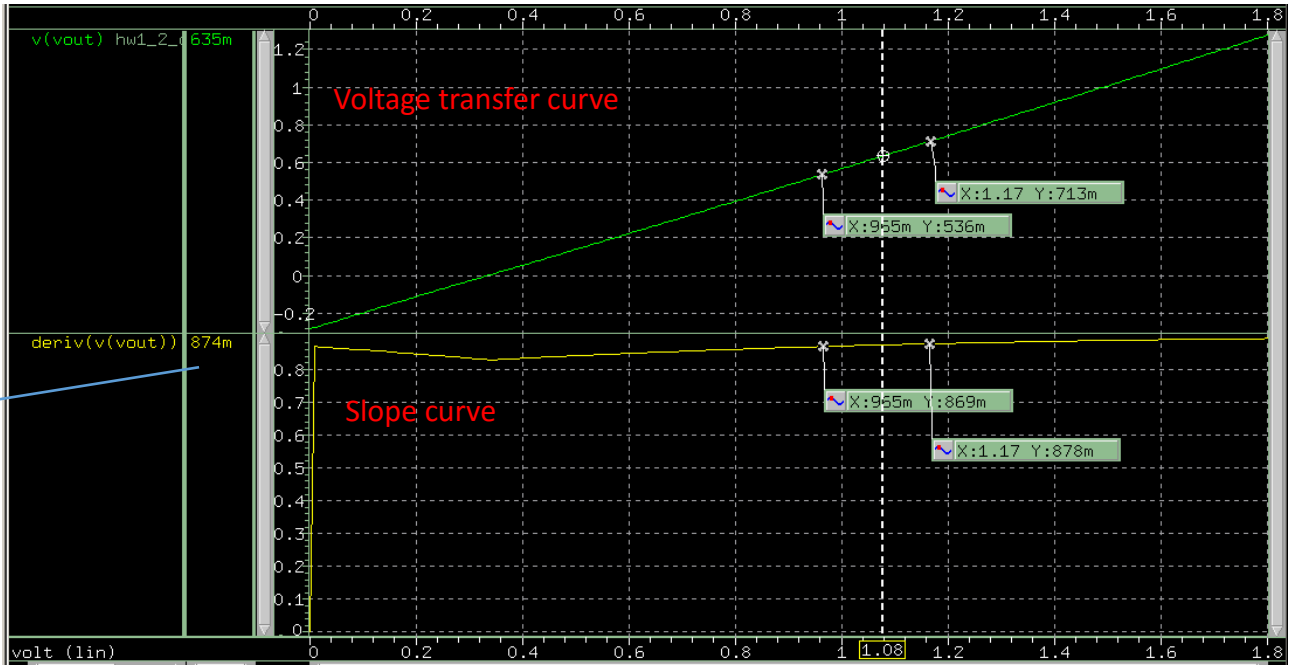
(d)

✓ **Schematic:**



✓ **Waveform:**

$\frac{1}{2}V_{out}$  時的斜率



✓ **Comment:**

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Linear range                      | 965mV~1.17V   |
| Slope                             | 1/2Vout : 874m<br>Left point : 869m<br>Right point : 878m         |
| DC offset<br>( $V_{in}-V_{out}$ ) | Left point : 965mV-536mV=429mV<br>Right point : 1.17V-713mV=457mV |

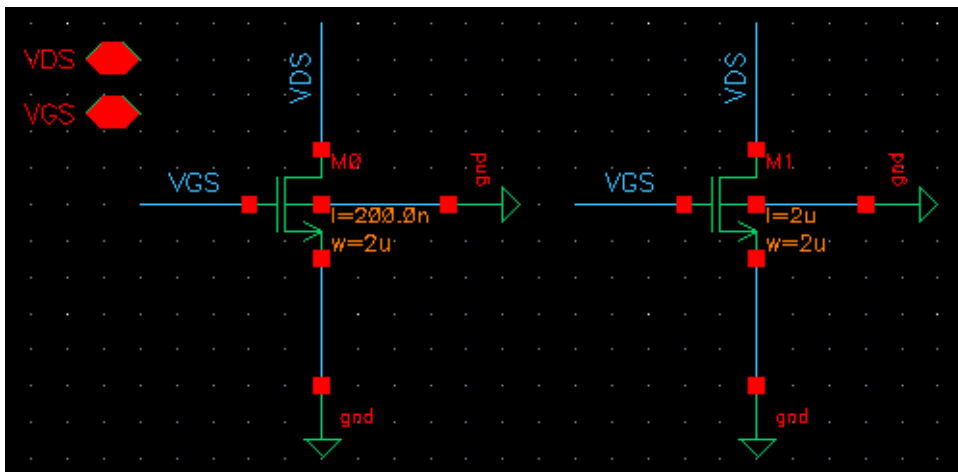
我可以觀察到(d)小題的 DC offset 比(a)小題來的小約 100mV 左右，此原因為(d)小題的 Width 變大了，從原本的 5um 變成 50um，且根據電流的公式(at saturation)：

$$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in} - V_{out} - V_{TH})^2$$

因為電流源為定值=5uA， $V_{TH}$  還是維持一樣的值(a 跟 c 小題受到一樣的 body effect 影響)，但是 W 變大了，為了維持相同的電流，DC offset(也就是  $V_{in}-V_{out}$ )會變小。

3.

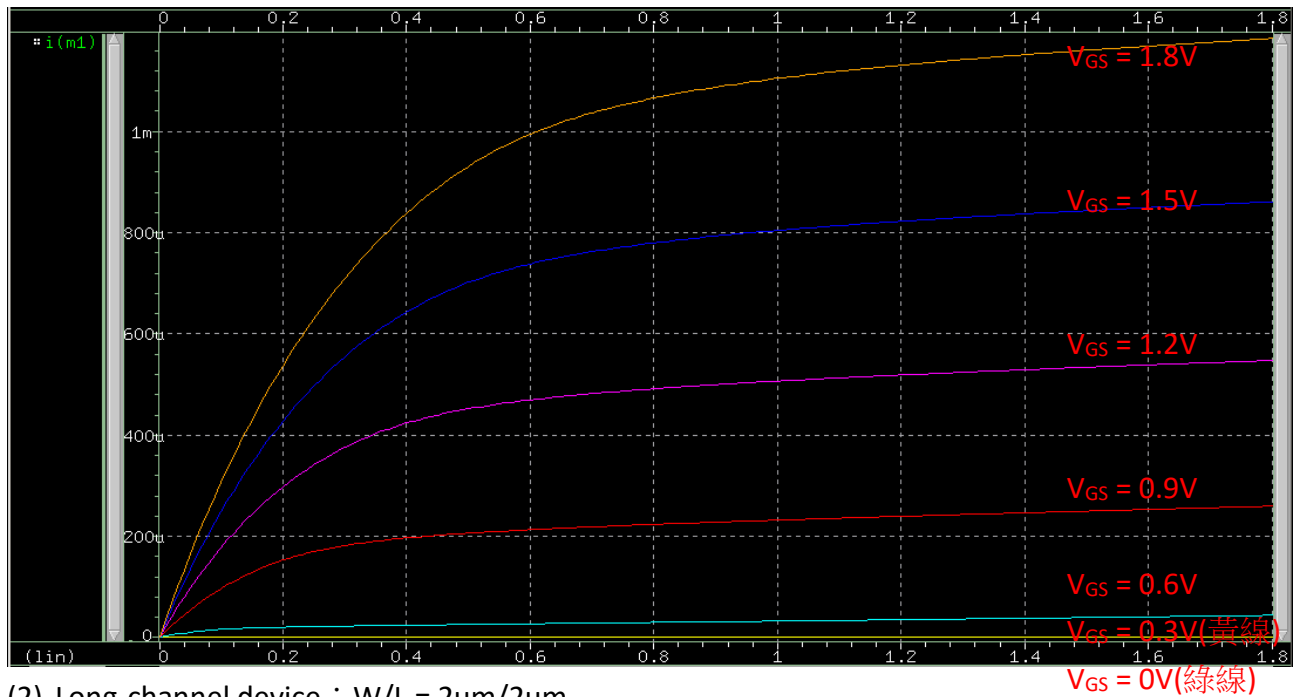
✓ **Schematic:**



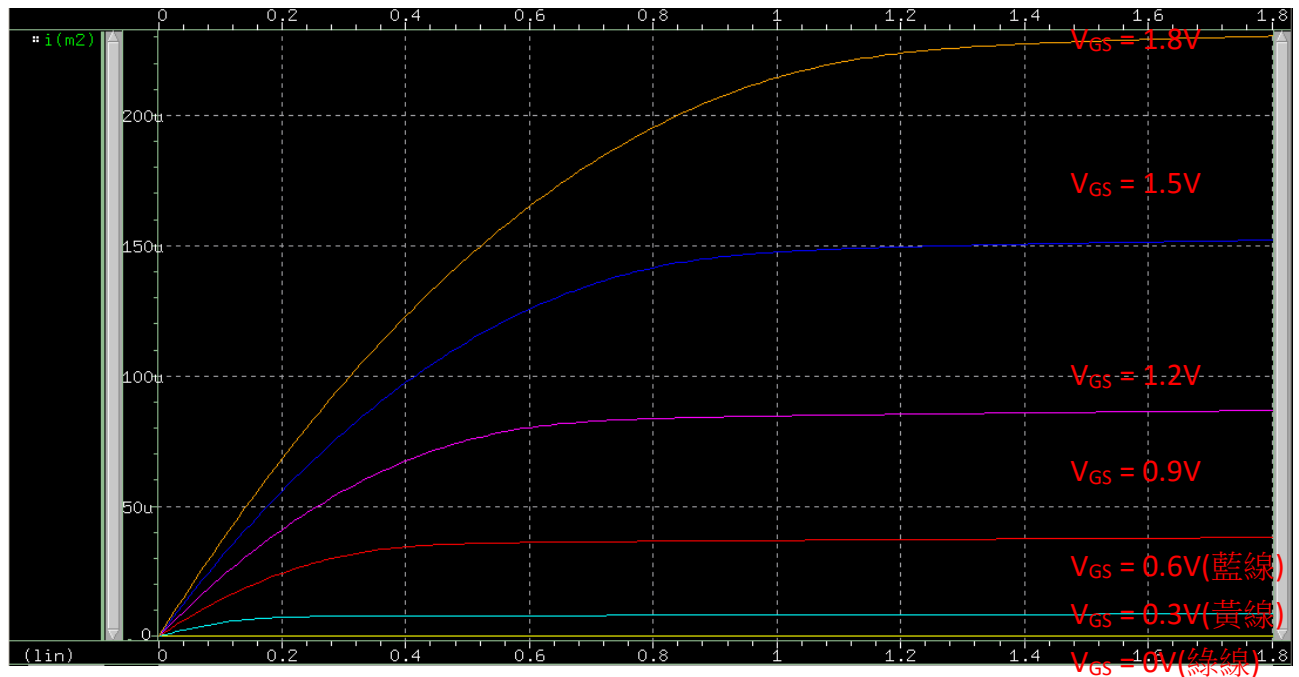


✓ **Waveform:**

(1) Short-channel device :  $W/L = 2\mu\text{m}/0.2\mu\text{m}$



(2) Long-channel device :  $W/L = 2\mu\text{m}/2\mu\text{m}$



✓ **Comment:**

由圖中可以看出  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  curve，Short-channel device ( $W/L = 2\mu\text{m}/0.2\mu\text{m}$ ) 會大於 Long-channel device ( $W/L = 2\mu\text{m}/2\mu\text{m}$ )，這是受到 **channel length modulation effect** 的影響。原本 ideal 的情況下，當  $V_{GS}$  大於  $V_{OV}$  時會進入 saturation region，此時  $I_D$  為定值：

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

，但因為 channel length modulation effect 的影響，使得實際的  $I_D$  會略大於 ideal 情況下的  $I_D$ ，必須修正  $I_D$  的公式變成：

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

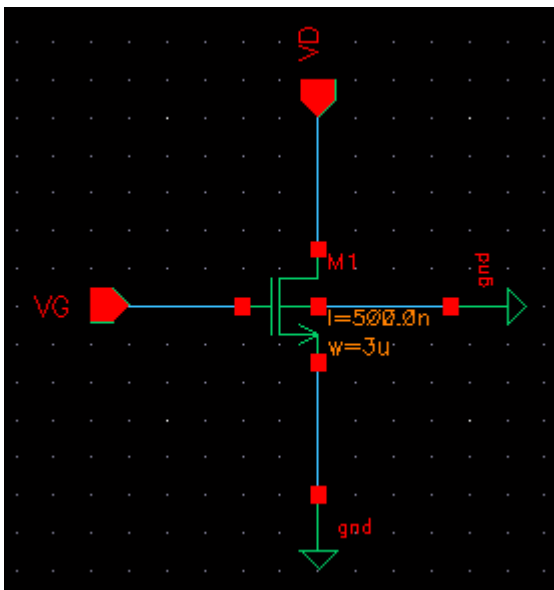
又因為

$$\lambda \propto \frac{1}{L} \quad \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \propto \frac{\lambda}{L} \propto \frac{1}{L^2}$$

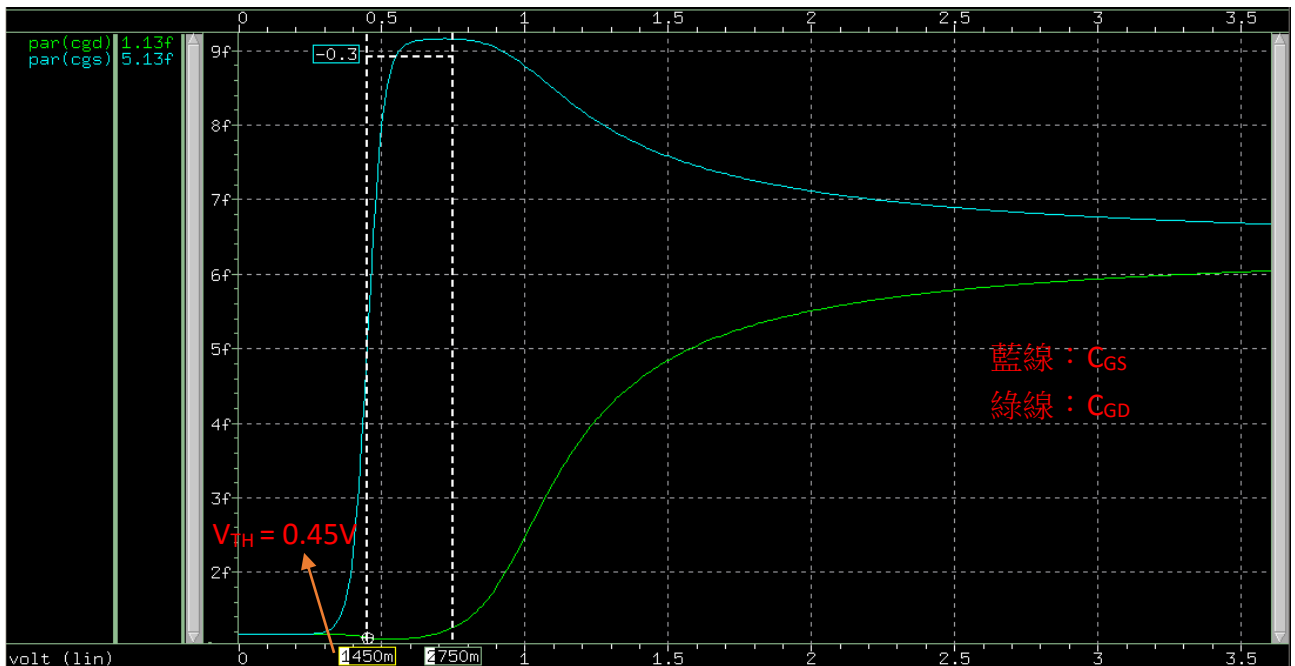
斜率會正比於 Length 的倒數平方，因此當 Length 變短，在 saturation region 的  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  curve 斜率就會愈大，且為平方倍成長，表示受到 **channel-length modulation effect** 影響較大，在 saturation 時 short-channel 實際的  $I_D$  和 ideal 的  $I_D$  的差值會比 long-channel 大。

4.

✓ Schematic:



✓ Waveform:



✓ **Comment:**

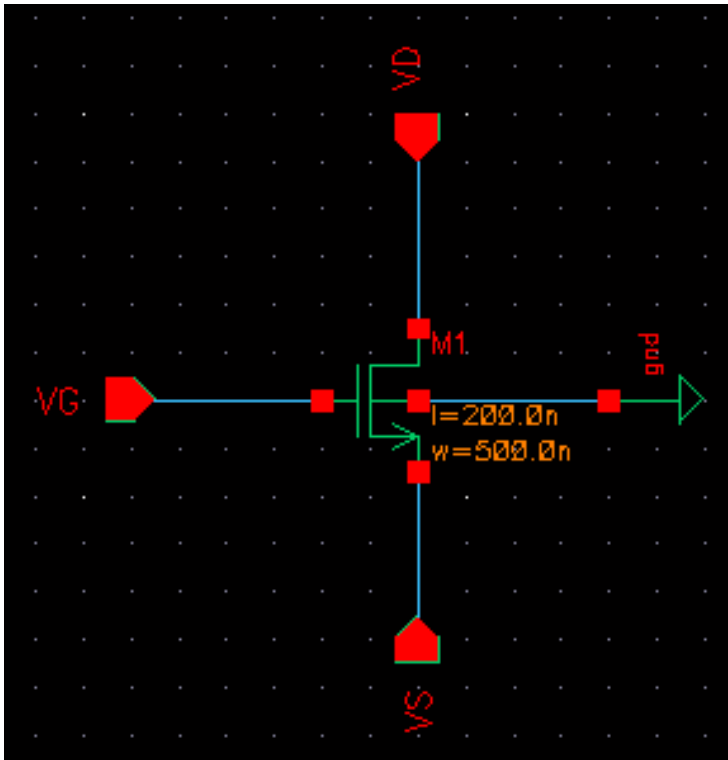
首先，我從.lis 檔中得到  $V_{TH}=0.45V$ ，再用 cursor 畫上  $V_{GS}=V_{TH}$  和  $V_{GS}=V_{TH}+V_{DS}$  的垂線。另外，此圖形在不同 region 的電容值可以整理為下列表格：

|            | $C_{GS}$                 | $C_{GD}$             |
|------------|--------------------------|----------------------|
| Cut off    | $C_{ov}W$                | $C_{ov}W$            |
| Triode     | $WLC_{ox}/2+WC_{ov}$     | $WLC_{ox}/2+WC_{ov}$ |
| Saturation | $2/3*WL C_{ox}+ WC_{ov}$ | $WC_{ov}$            |

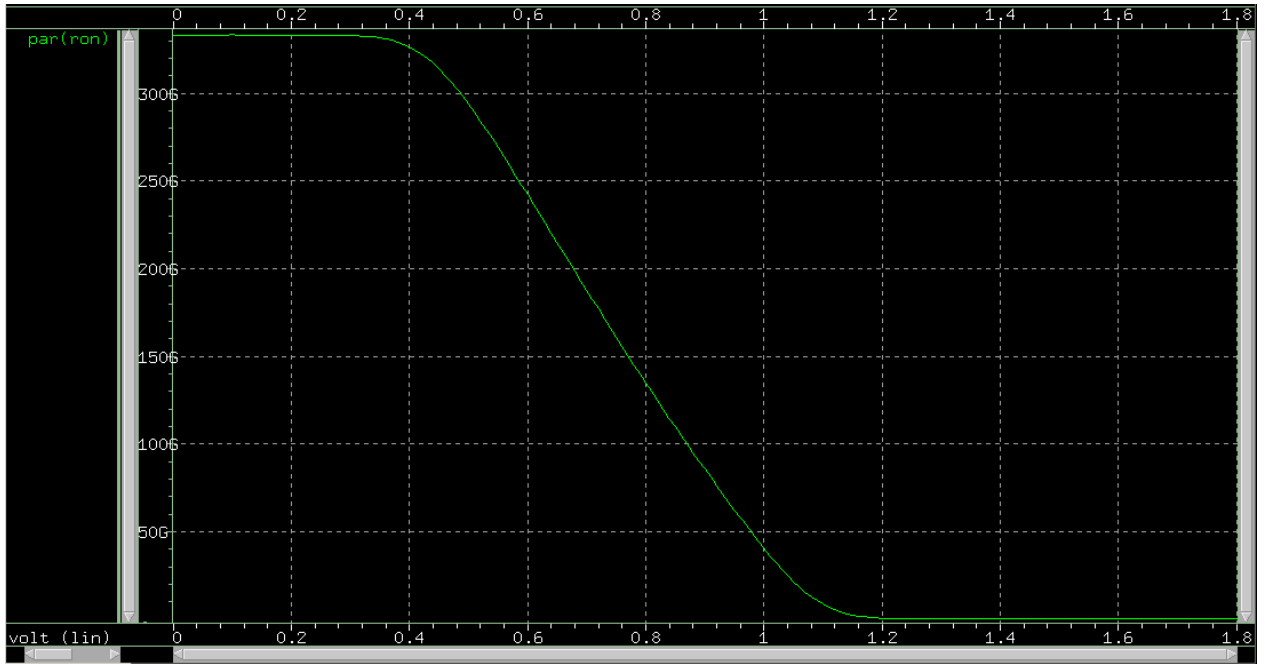
我可以從圖形中觀察出是非常符合這些值的趨勢的。當  $V_{GS}<V_{TH}$  時，nmos 在 cut off region，沒有 channel 形成，所以只有 overlap 的電容會影響， $C_{GS}$  和  $C_{GD}$  幾乎重疊等於  $C_{ov}W$ ；當  $V_{GS}>V_{TH}$  時，nmos 進入 saturation region， $V_{gate\ to\ channel}$  在 source 端會等於  $V_{GS}$ ，且會逐漸減少 pinch-off 的點，值為  $V_{GS}-V_{TH}$ ，此時會有 channel 形成，所以會受到 channel 和 overlap 的電容影響， $C_{GS}$  平均等於  $2/3*WL C_{ox}+ WC_{ov}$ ， $C_{GD}$  不變等於  $C_{ov}W$ ；當  $V_{GS}$  又更大，大到  $V_{GS}>V_{TH}+V_{DS}$  時，會是 triode region，此時也有 channel，所以會同時受到 channel 和 overlap 的電容影響，且  $C_{GS}$  和  $C_{GD}$  會各分一半 channel 電容的值，兩者皆等於  $WLC_{ox}/2+WC_{ov}$ 。

5.

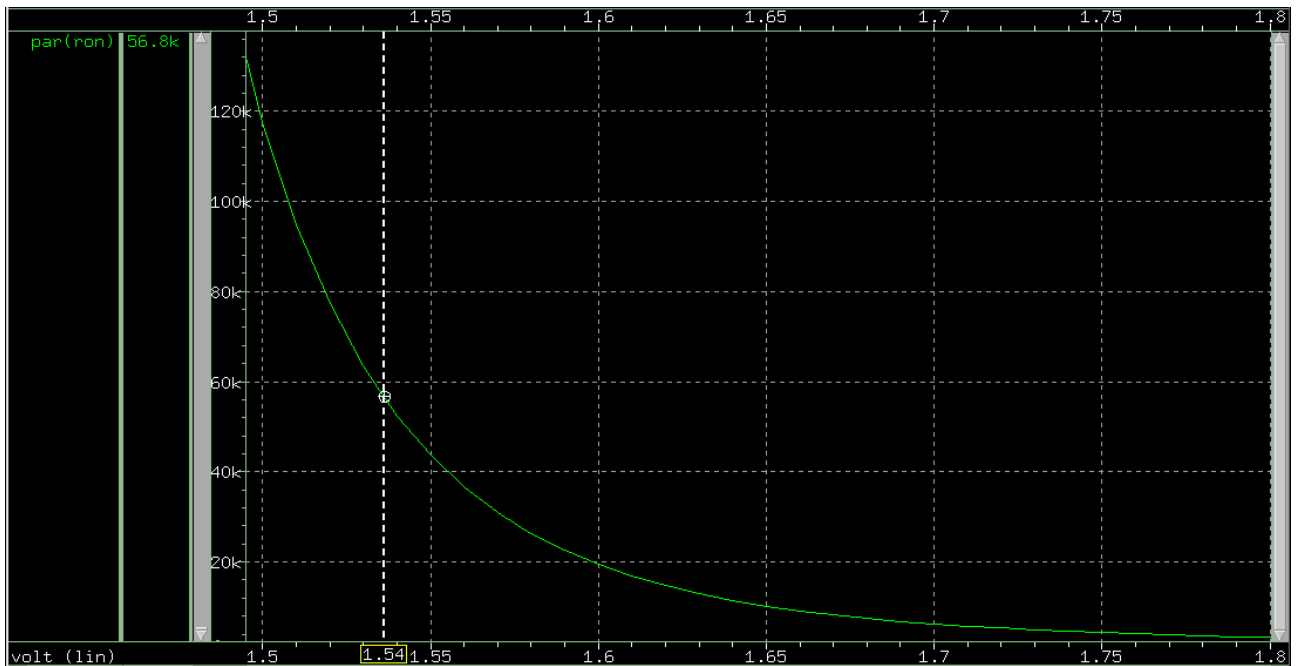
✓ **Schematic:**



✓ **Waveform:**



只看  $V_G < 1 + V_{TH}$  後的圖形：



✓ **Comment:**

我從.lis 檔中得到  $V_{TH}=0.546V$ 。

從圖形可以觀察到， $R_{on}$  在  $V_G < 1 + V_{TH}=1.546V$  時， $R_{on}$  趨近無限大，這是因為此時 nmos 是 turn-off 的，相當於斷路，所以  $R_{on}$  無限大；當  $R_{on}$  在  $V_G > 1 + V_{TH}=1.546V$  時， $R_{on}$  隨著  $V_G$  變大而變小，這可以從  $R_{on}$  的公式來解釋：

$$R_{on} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})}$$

因為  $V_{TH}$  不變， $V_{GS}=V_G-V_S$  且  $V_S=1V$ ，當  $V_G$  變大時  $V_{GS}$  會變大， $R_{on}$  會變小，有反比的關係。