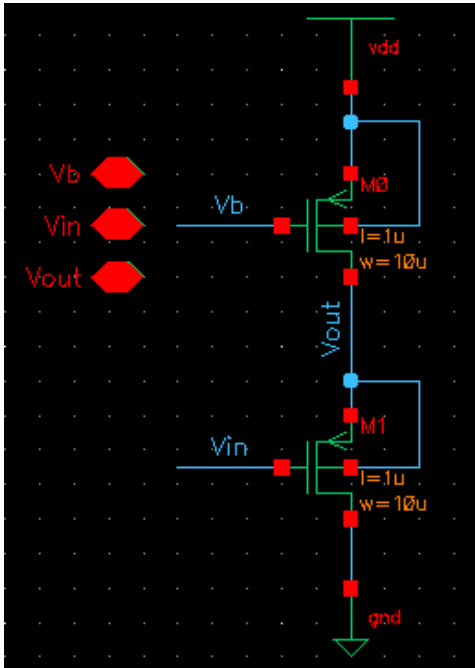


1.

(a)

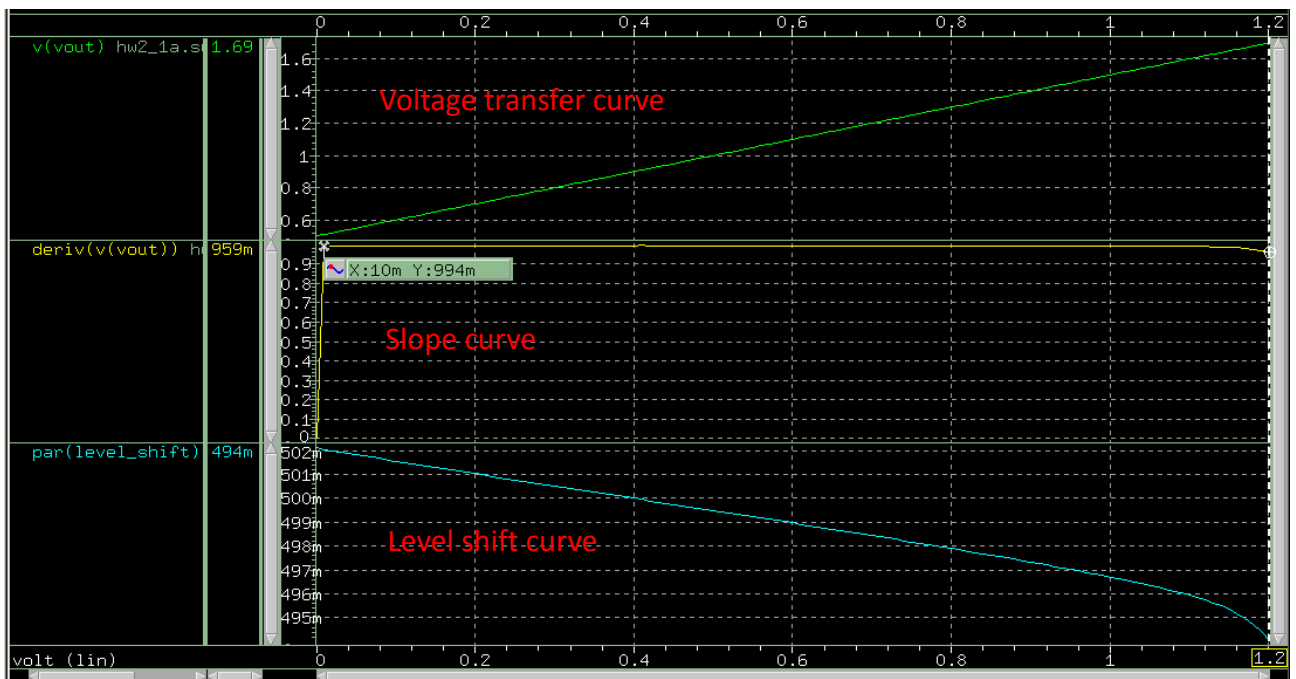
✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=10um ; L=1um ; m=1
M2	W=10um ; L=1um ; m=1
Vb	DC=1.3V

✓ Waveform: (上方為 voltage transfer curve V_{in} vs. V_{out} ，中間為每個點的斜率圖，下方為 V_{in} 從 0~1.2V 的 level shift)



✓ **Comment:**

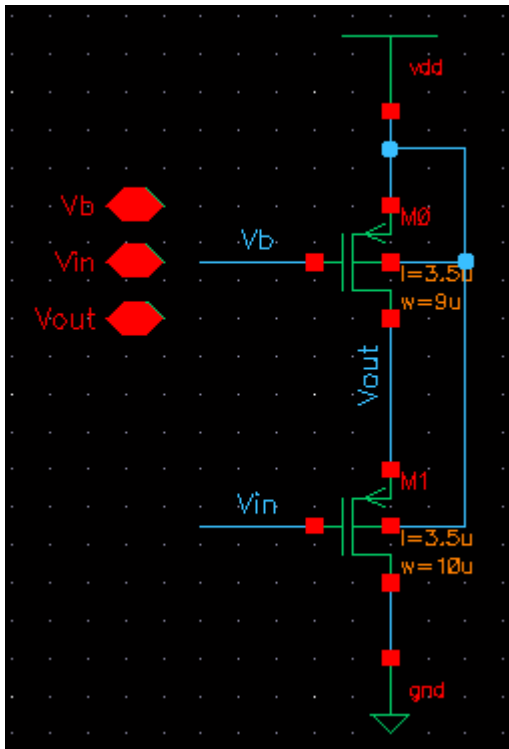
- I. 我利用 deriv function 來找到 Vin 從 0~1.2V 的 gain，除了 Vin=0V 的點外，在 Vin=1.2V 時 gain=0.959 是最小的，所以整個在 Vin=0~1.2V 的區間 gain 都大於 0.95，符合題目要求。
- II. 在 level shift 的部分，我是用 Vout 減 Vin，也就是 M1 的 source 跟 gate 的壓差，可以發現在 Vin=0V 時 level shift=502mV，在 Vin=1.2V 時 level shift=494mV，差異不大，原因為此題的 gain 很接近 1，所以 Vout 和 Vin 的比值約為 1 比 1，因此 level shift 差異不大。
- III. The relationship between bias current and sizes：此題是 Common Drain + Current Source Load，下方的 M1 是 common drain，上方的 M2 當作 bias current，電流會由 M2 決定，gain 為 $A_v = \frac{g_{m1}r_{o2}}{1+(g_{m1}+g_{mb1})r_{o2}}$ ，因 $\lambda \propto \frac{1}{L}$ ，所以 $r_o = \frac{1}{\lambda I_D} \propto \frac{L}{I_D}$ ，當要讓 gain 變大時，L 要變大，但為了維持固定的電流 W 也要變大。另外，當 bias current 變大時，若維持一樣的 Vov，根據電流公式：

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

W/L 的 size 要變大才能跟得上電流的增加。

(b)

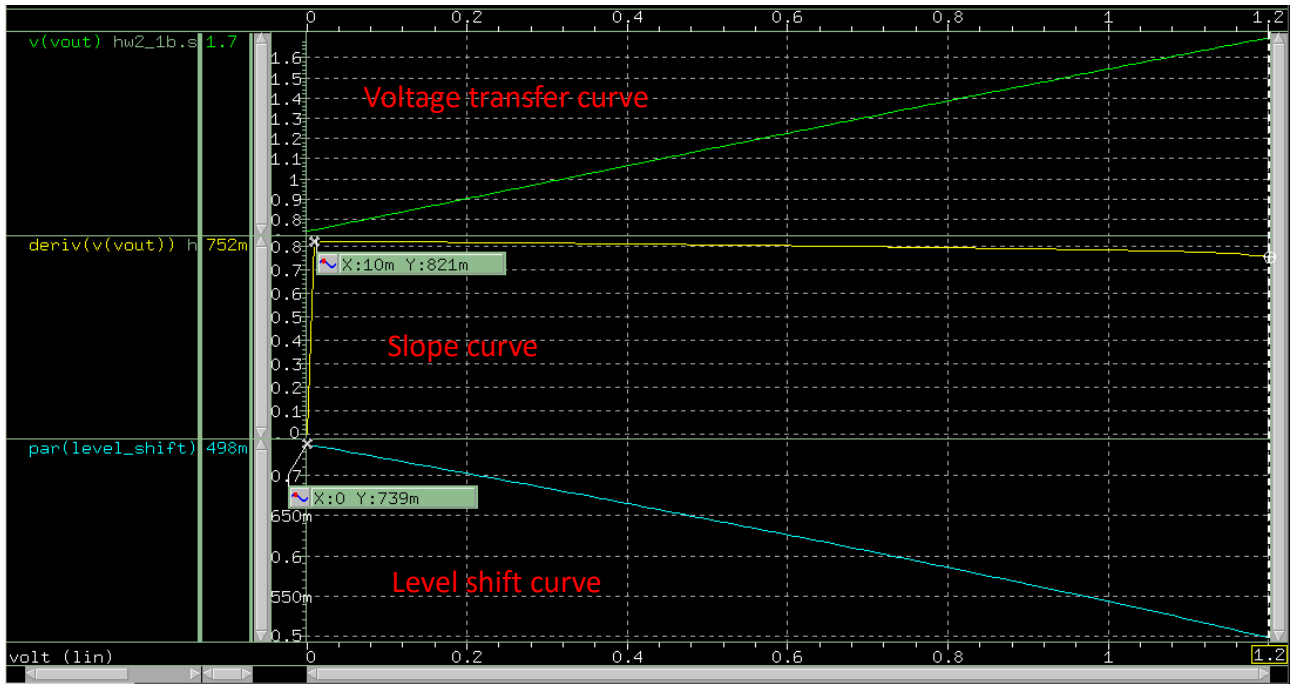
✓ **Schematic:**



✓ **Specification:**

M1	W=10um ; L=3.5um ; m=1
M2	W=9um ; L=3.5um ; m=1
Vb	DC=1.325V

- ✓ **Waveform:** (上方為 voltage transfer curve V_{in} vs. V_{out} ，中間為每個點的斜率圖，下方為 V_{in} 從 0~1.2V 的 level shift)



- ✓ **Comment:**
此題將 M1 的 body 接到 VDD，考慮了 body effect，因此 gain 會變小，可以由 gain 的公式來解釋之， $A_v = \frac{g_{m1}r_{o2}}{1+(g_m+g_{mb})r_{o2}}$ ，因為分母變大了，所以 gain 會變小。

(c)

- ✓ **Comment:**

- I. (a)小題的 gain 大於(b)小題，這是因為此題的 $A_v = \frac{g_{m1}r_{o2}}{1+(g_m+g_{mb})r_{o2}}$ ，而(b)小題的 M1 的 body 接到 VDD，考慮了 body effect，(a)小題則沒有 body effect，根據 gain 的公式，所以 gain 會因 body effect 而變小。
- II. Level shift 的範圍：

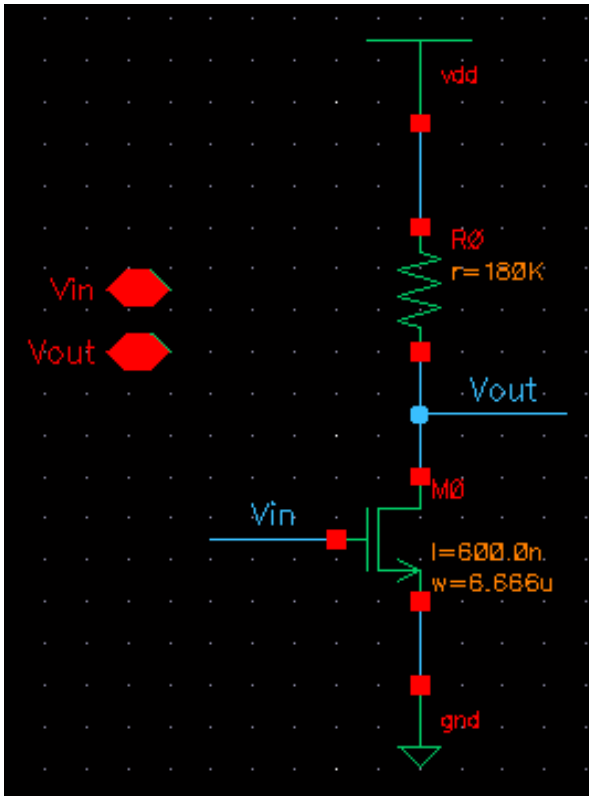
(a)小題	Vin=0V 時 level shift=502mV，在 Vin=1.2V 時 level shift=494mV	範圍 502mV~494mV
(b)小題	Vin=0V 時 level shift=739mV，在 Vin=1.2V 時 level shift=498mV	範圍 739mV~498mV

因為(b)小題的 gain 較小，差不多略大於 0.75，而 gain 的定義為 V_{out} 對 V_{in} 的微分，也就是 V_{out} 變化量對 V_{in} 變化量的比值，當 $gain < 1$ 很多而不約等於 1 時，表示 V_{in} 有變化量時， V_{out} 的變化量較小，所以 level shift 的變動範圍會較大。

2.

(a)

✓ Schematic:

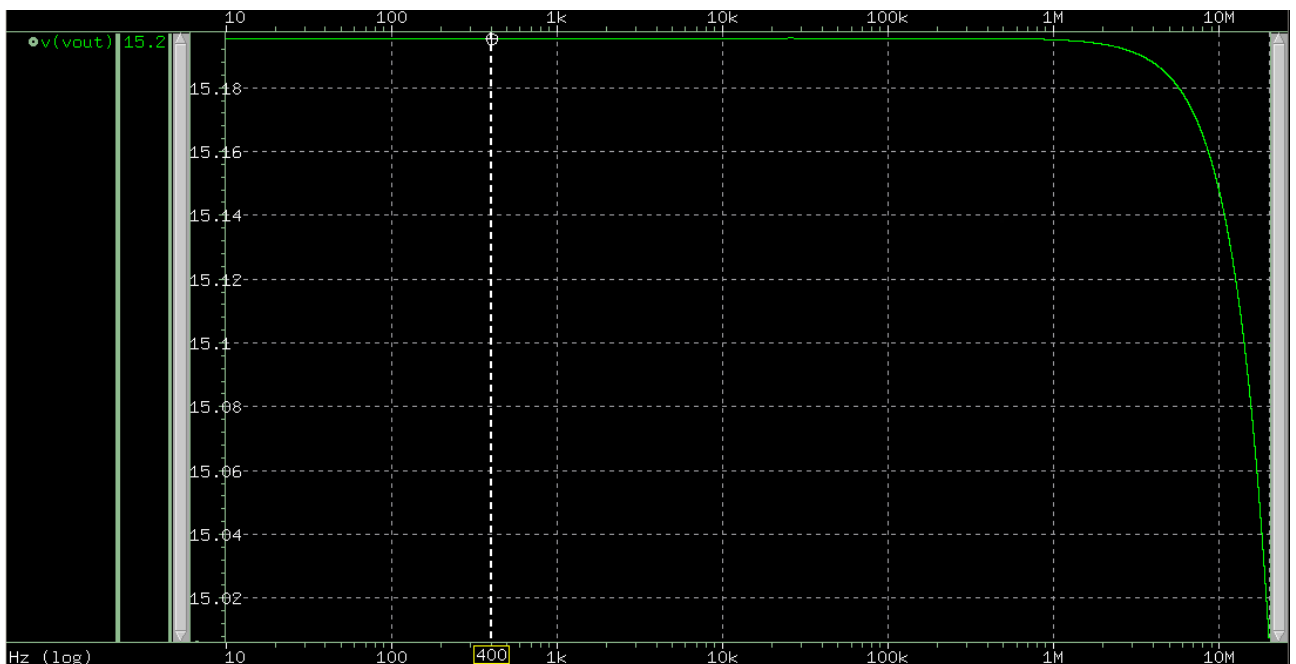


✓ Specification:

M1	W=6.666um ; L=0.6um ; m=1
Vin	DC=0.43V

✓ Results:

(方法一) 利用 .AC 來分析：



由此圖可以看到 $|gain| = 15.2$ 。

(方法二) 利用 .tf 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
****      small-signal transfer characteristics
v(vout)/vin          = -15.1955
input resistance at  vin    = 1.0000e+20
output resistance at v(vout) = 146.6116k
```

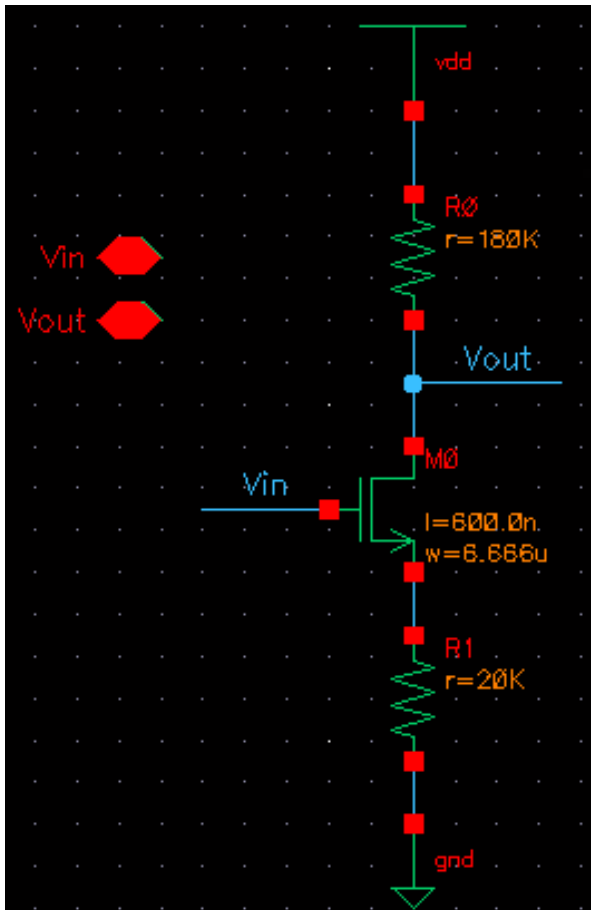
Gain = -15.1955 ◦

```
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node    =voltage    node    =voltage    node    =voltage
+0:vdd  = 1.8000    0:vin   = 430.0000m  0:vout  = 900.3334m
```

Vout = 900.3334mV ◦

(b)

✓ Schematic:

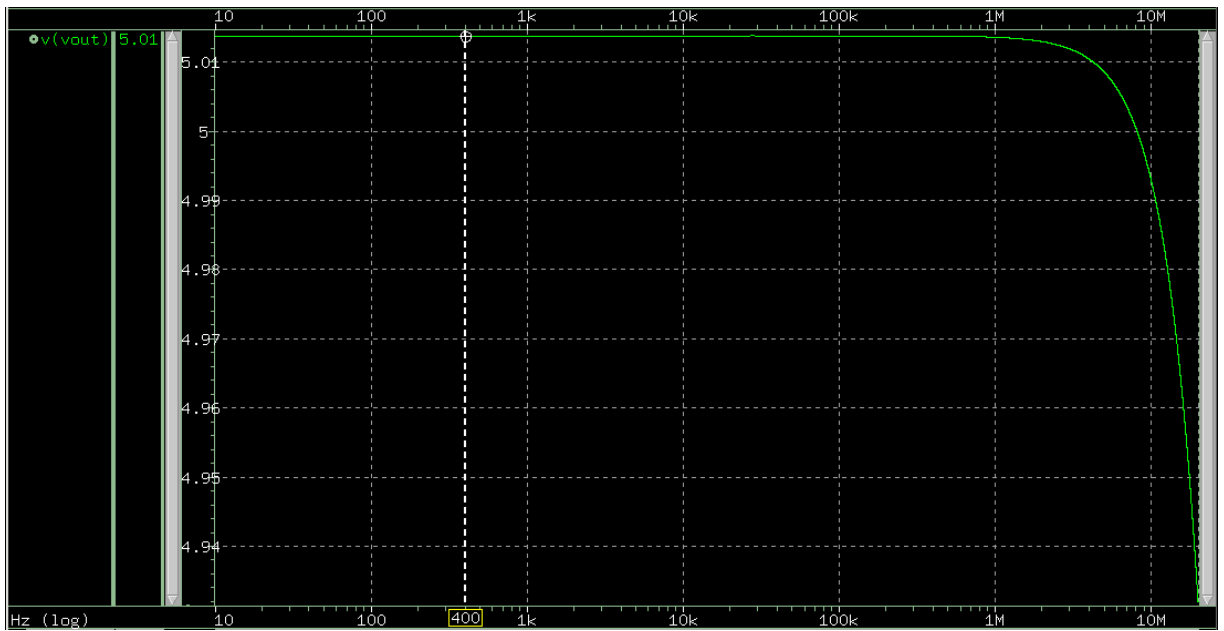


✓ Specification:

M1	W=6.666um ; L=0.6um ; m=1
Vin	DC=0.5505V

✓ **Results:**

(方法一) 利用 .AC 來分析：



由此圖可以看到 $|gain| = 5.01$ 。

(方法二) 利用 .tf 來分析，並從 .lis 檔看到結果：

```
****      small-signal transfer characteristics

v(vout)/vin          = -5.0138
input resistance at  vin      = 1.0000e+20
output resistance at v(vout) = 168.4622k
```

Gain = -5.0138。

```
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node   =voltage   node   =voltage   node   =voltage
+0:net1 = 99.9595m 0:vdd    = 1.8000  0:vin    = 550.5000m
+0:vout = 900.3647m
```

Vout = 900.3647mV。

✓ **Comment:**

第 2(a)小題是 common source，2(b)小題是 common source + source degeneration，我可以發現在 source 端加上一個電阻(也就是 source degeneration)後，gain 會下降，從原本的 15.1955 降為 5.0138，這可以從公式計算來解釋之：

$$\text{Common source: } Av = -g_m(r_o \parallel R_D) = -g_m \frac{r_o R_D}{r_o + R_D}$$

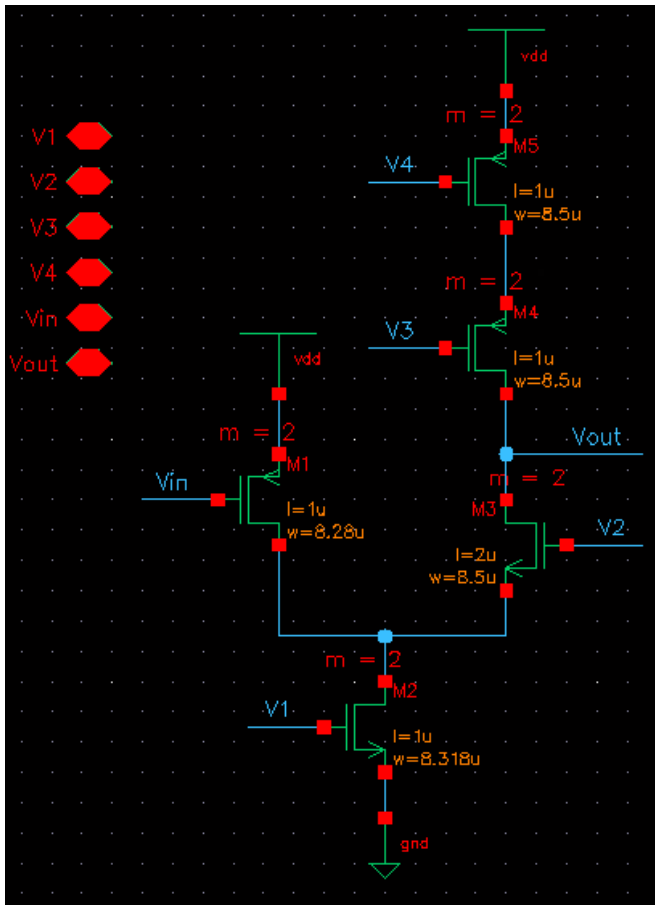
$$\text{CS + source degeneration: } Av = -\frac{g_m r_o}{R_s + [1 + (g_m + g_{mb})R_s]r_o} \{ [R_s + r_o + (g_m + g_{mb})R_s r_o] \parallel R_D \} = -g_m \frac{r_o R_D}{r_o + R_D + R_s + (g_m + g_{mb})R_s r_o}$$

由此可發現，當加入 source degeneration 後，分子項相同但分母項變大了，也就是 gain 明顯下降許多，但 gain 下降換來的好處是 linearity 會上升。

3.

(a)

✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=8.28um ; L=1um ; m=2
M2	W=8.318um ; L=1um ; m=2
M3	W=8.5um ; L=2um ; m=2
M4	W=8.5um ; L=1um ; m=2
M5	W=8.5um ; L=1um ; m=2
Vin	DC=1.05V
V1	DC=0.5V
V2	DC=0.95V
V3	DC=1.15V
V4	DC=1.25V

✓ Results:

© 利用 .tf 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```

****      small-signal transfer characteristics

v(vout)/vin          = -2.4118k
input resistance at  vin      = 1.000e+20
output resistance at v(vout)  = 10.4292x
    
```

Gain = -2.4118k = -20log(2411.8) dB = -67.65dB ◦

◎ 利用 .OP 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
**** mosfets

subckt
element 0:m1      0:m2      0:m3      0:m4      0:m5
model    0:p_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:p_18.1 0:p_18.1
region   Saturati Saturati Saturati Saturati Saturati
id       -36.4540u 40.0017u  3.5477u  -3.5477u  -3.5477u
ibs      3.720e-21 -6.596e-21 -668.4390a 69.5744a  3.610e-22
ibd      1.0585f -655.6694a -1.7451f  417.4883a 69.5737a
vgs      -750.0000m 500.0000m 452.8128m -566.3468m -550.0000m
vds      -1.3028  497.1872m 800.8401m -418.3195m -83.6532m
vbs      0.        0.        -497.1872m 83.6532m  0.
vth      -494.7705m 386.5357m 441.3702m -519.2568m -494.7489m
vdsat    -240.2562m 126.4965m 67.6983m -90.5710m -94.1642m
vod      -255.2295m 113.4643m 11.4425m -47.0900m -55.2511m
beta     1.1372m  5.1793m  2.6086m  1.2104m  1.2288m
gam_eff  557.0846m 507.4461m 519.8375m 556.4871m 557.0847m
gm       250.8093u 521.3450u 75.3268u  60.7102u  53.2994u
gds      1.0755u  6.3847u  740.1463n 248.8312n 14.2442u
gmb      77.6547u 105.3979u 12.1829u  17.5990u  16.1495u
cdtot    17.4671f  23.1395f  20.7949f  20.3805f  31.4398f
cgtot    107.9984f 113.6419f 159.3565f 96.7616f 103.1022f
cstot    126.9083f 127.3696f 151.0765f 107.6276f 111.6965f
cbtot    59.3555f  63.0602f  77.2844f  61.5267f  66.6169f
cgs      95.0063f  98.7166f 125.4092f 79.0710f 83.1102f
cgd      5.9463f  5.9376f  5.9085f  6.1300f  9.7171f
```

M2 的 bias current = 40.0017uA。

$$V_{out_max} = VDD - V_{ov5} - V_{ov4}$$

$$V_{out_min} = V_{ov2} + V_{ov3}$$

$$V_{out_swing} = V_{out_max} - V_{out_min} = VDD - V_{ov5} - V_{ov4} - V_{ov2} - V_{ov3} = 1.8V - 94.1642mV - 90.5710mV - 126.4965mV - 67.6983mV = 1.42107 V。$$

✓ **Design methodology:**

這題是我此次作業花最多時間 design 的，剛開始看到 5 顆 mos 要調就嚇傻了，但依照助教給的 hint 的步驟就做出來了。一開始，我將 5 顆 mos 的 size 統一設成 $W=5\mu m$ 、 $L=1\mu m$ 、 $m=1$ ，然後 V_{in} 、 $V_1 \sim 4$ 都給統一的電壓 0.5V，再跑 hspice 模擬從.lis 檔裡看這 5 顆 mos 的資訊，發現有些在 cut off 有些在 Linear，然後我就在瞎猜的多試了幾組電壓，發現這樣下去不行，於是我仔細觀察電路圖，認為應該是 M1 會影響 g_{m1} ，M3、M4、M5 會影響 R_{out} ，進而影響 gain 的變化，另外，為了使 Output voltage 的 swing 達到最大，於是我想說盡量設計讓 V_{out} 的電壓在 VDD 的一半 0.9V，比較容易達到超過 1V 的 swing。於是以下的設計步驟：

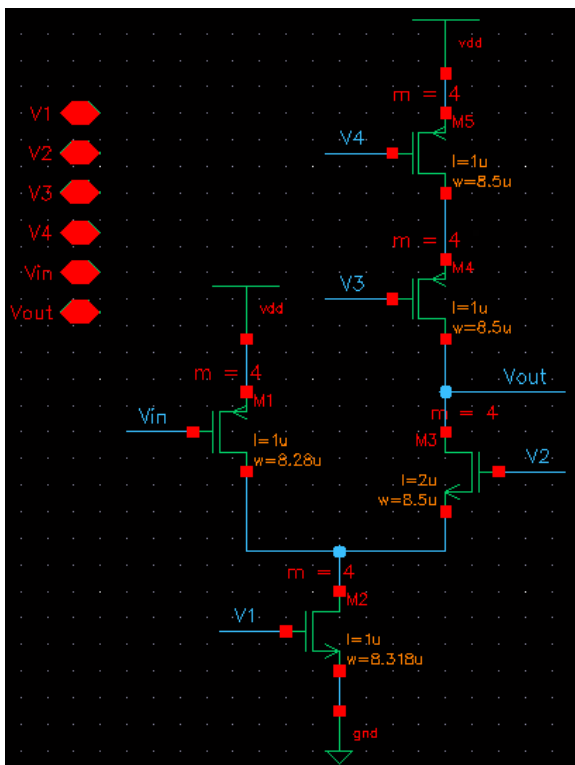
1. 第一步目標為讓 5 顆 mos 同時 saturation，而要同時調 5 顆實在太難了，所以我先讓 M3 cutoff 也先不管 M4 和 M5，先想辦法調整 M1 和 M2 成 saturation，在此時我還是不調 W/L 的 size，一直調整 V_{in} 和 V_1 的電壓，常常 V_{in} 的電壓些微改變一點就會很容易影響這兩顆 mos 的 region，再讓這兩顆 mos 都 saturation 之後，還有一點要注意，盡量讓 M1 的 V_{ds} 壓差大一點，M2 的 V_{ds} 壓差小一點才能增加 output swing。再來，調整 M3、M4、M5，我也一樣盡量不動 W/L 的 size，我一開始是先讓這三顆 mos 都 turn on 後，開始調 M5 的 V_4 電壓，讓他

saturation，再來是調 M4，最後是調 M3，在調這 3 顆 mos 的時候我也盡量讓它們的 V_{ds} 壓差小一點以增加 output swing，在調 M5 和 M4 時非常好調很容易就 saturation，但常常 M3 在 cut off，我觀察 .lis 檔，把 M3 的 L 變大，讓他的 V_{th3} 變小，讓 M3 turn on，但這時候一直有一個問題，M3、M4、M5 總會有一顆在 linear，於是我觀察每顆 mos 的 V_{gs} 隨 V_2 、 V_3 、 V_4 變動的趨勢，盡量調整 V_2 、 V_3 、 V_4 讓這 3 顆 mos 的 V_{gs} 小一點比較容易進入 saturation，最後若有任何一顆不再 saturation 都可用這種方法調整，而得到 5 顆 saturation 的 mos 了。

- II. 第二步目標為 M2 的 bias 電流等於 40uA，讓 5 顆 mos 同時 saturation 後我發現 M2 的電流只有 10uA 左右，於是我讓 5 顆 mos 的 W 同時變成 2 倍(也就是 10um)，發現此時 mos 都不再 saturation 了，於是我在把 5 顆 mos 的 W 同時調為 9um，此時 mos 維持在 saturation 但電流還是不夠，於是我就開始用 m 催下去，把 5 顆 mos 的 m 同時變兩倍(也就是 $m=2$)，然後電流就達到我需求之上差不多為 43uA 左右，我再運用等比例放大和縮小的概念將 5 顆 mos 的 W 都調成 8.5um，得到 M2 的電流為 40.9uA，但為了得到更精準的 40uA 電流，我將 M2 的 W 逐漸降低慢慢微調，此時 M1 的 W 也要跟著降低，不然會有 mos 會 cut off 或進入 linear region，慢慢調到 M2 和 M1 的 W 都等於 8.318um 時電流會等於 40.00uA 左右。
- III. 第三步目標為讓 gain 變超大大於 45dB，在調整完電流後，gain 只有 -56.534 不到題目的要求，於是我開始調整 M1 的 size，將 M1 的 W 逐漸些微的降低，以免有其他顆 mos 進入 cut off 或 linear，當 M1 的 W 降低到 8.3um 時 gain 有 300 多、8.29um 時 gain 有 900 多，而我為了讓 gain 越大，取 M1 的 W 為 8.28um 且此時 gain 為 -2411.8，相當於 -67.65dB。

(b)

✓ Schematic:



✓ **Specification:**

M1	W=8.28um ; L=1um ; m=4
M2	W=8.318um ; L=1um ; m=4
M3	W=8.5um ; L=2um ; m=4
M4	W=8.5um ; L=1um ; m=4
M5	W=8.5um ; L=1um ; m=4
Vin	DC=1.05V
V1	DC=0.5V
V2	DC=0.95V
V3	DC=1.15V
V4	DC=1.25V

✓ **Comment and Compare:**

◎ Gain :

```
**** small-signal transfer characteristics
v(vout)/vin = -2.4118k
input resistance at vin = 1.0000e+20
output resistance at v(vout) = 5.2146x
```

當 m 變兩倍後，可以發現 gain 依然維持不變，這可由 folded cascode 的 gain 公式來解釋之，folded cascode 的 gain 可以大約近似成 $A_v = -g_{m1}(g_{m3}r_{o1}r_{o3} \parallel g_{m4}r_{o4}r_{o5})$ ，當 m 變兩倍， g_m 會變兩倍， r_o 則會變成一半，利用公式計算得到的結果顯示 gain 不會改變。

◎ Bias current :

```
**** mosfets

subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5
model 0:p_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:p_18.1 0:p_18.1
region Saturati Saturati Saturati Saturati Saturati
id -72.9080u 80.0034u 7.0953u -7.0953u -7.0953u
ibs 7.440e-21 -1.319e-20 -1.3369f 139.1488a 7.220e-22
ibd 2.1169f -1.3113f -3.4902f 834.9766a 139.1473a
vgs -750.0000m 500.0000m 452.8128m -566.3468m -550.0000m
vds -1.3028 497.1872m 800.8401m -418.3195m -83.6532m
vbs 0. 0. -497.1872m 83.6532m 0.
vth -494.7705m 386.5357m 441.3702m -519.2568m -494.7489m
vdsat -240.2562m 126.4965m 67.6983m -90.5710m -94.1642m
vod -255.2295m 113.4643m 11.4425m -47.0900m -55.2511m
beta 2.2743m 10.3586m 5.2173m 2.4209m 2.4576m
gam_eff 557.0846m 507.4461m 519.8375m 556.4871m 557.0847m
gm 501.6186u 1.0427m 150.6536u 121.4204u 106.5989u
gds 2.1510u 12.7694u 1.4803u 497.6623n 28.4883u
gmb 155.3094u 210.7958u 24.3658u 35.1980u 32.2989u
cdtot 34.9342f 46.2790f 41.5898f 40.7610f 62.8795f
cgtot 215.9968f 227.2838f 318.7129f 193.5233f 206.2044f
cstot 253.8166f 254.7392f 302.1531f 215.2552f 223.3930f
cbtot 118.7111f 126.1204f 154.5688f 123.0533f 133.2338f
cgs 190.0125f 197.4331f 250.8184f 158.1420f 166.2204f
cgd 11.8925f 11.8753f 11.8170f 12.2599f 19.4342f
```

當 5 顆 mos 的 m 同時變兩倍時，我可以觀察到 **bias current** 也跟著變兩倍，從原本的 40.0017uA 變成 80.0034uA，可以由電流公式來解釋之：

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

當 m 變成兩倍，相當於有兩個相同 size 的 mos 並聯，也等效於一個 L 不變 W 為兩倍的 mos。根據電流公式，當兩顆相同 size 的 mos 並聯，因為並聯不會改變跨壓，所以這兩顆 mos 的(Vgs-Vth)壓差不變，兩顆 mos 都會產生一樣的電流，所以電流會變兩倍，所以也可以視為等效上 W 變成 2 倍，電流因此變兩倍。

◎ Output swing :

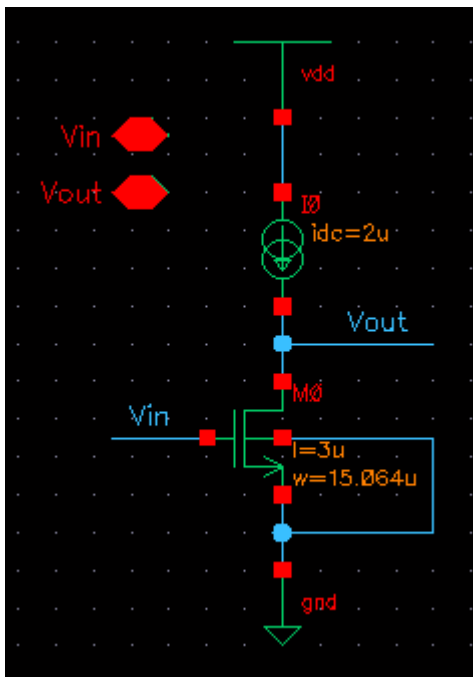
原來的 Vout swing	Vout swing = VDD-Vov2-Vov3-Vov4-Vov5=1.8V – 94.1642mV – 90.5710mV – 126.4965mV – 67.6983mV = 1.42107 V
M 變兩倍後的 Vout swing	Vout swing = VDD-Vov2-Vov3-Vov4-Vov5=1.8V – 94.1642mV – 90.5710mV – 126.4965mV – 67.6983mV = 1.42107 V

由計算得到 **Vout swing** 不變，這是因為當 m 變成兩倍，相當於有兩個相同 size 的 mos 並聯，並聯的 mos 享有一樣的跨壓，所以每個 mos 的 Vdsat 都不變，Vout swing 也就不會改變。

4.

(a)

✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=15.064um ; L=3um ; m=1
Vin	DC=0.35V

✓ **Results:**

◎ 利用 .OP 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node      =voltage      node      =voltage      node      =voltage
+0:vdd    = 1.8000  0:vin    = 350.0000m  0:vout    = 500.0888m
```

Vout = 500.0888mV ◦

◎ 利用 .tf 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
**** small-signal transfer characteristics
v(vout)/vin = -153.6111
input resistance at vin = 1.000e+20
output resistance at v(vout) = 3.6644x
```

Gain = -153.6111 ◦

(b)

✓ **Calculation:**

```
**** mosfets

subckt
element 0:m1
model   0:n_18.1
region  Saturati
id      2.0000u
ibs     -3.135e-22
ibd     -567.6572a
vgs     350.0000m
vds     500.0888m
vbs     0.
vth     335.9231m
vdsat   64.5249m
vod     14.0769m
beta    1.5082m
gam eff 507.4459m
gm      41.9197u
gds     272.8927n
gmb     8.7076u
cdtot   20.7953f
cgtot   220.6119f
cstot   207.9620f
cbtot   109.4440f
cgs     171.5134f
cgd     5.3351f
```

$$r_o = \frac{1}{g_{ds}} = \frac{1}{272.8927n} = 3664383.511\Omega$$

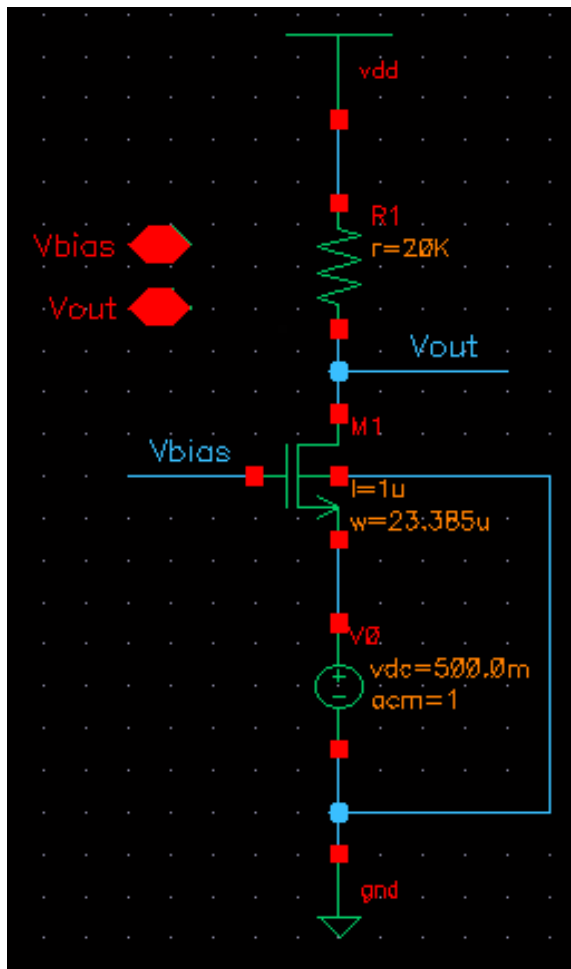
$$\text{gain} = -g_m r_o = -41.9197u \times 3664383.511 = -153.609$$

✓ **Comment:**

這題是 common source，沒有受到 body effect 影響，gain = $-g_m r_o$ ，用.lis 檔算出來得 gain 與使用.tf 得到的 gain=-153.6111 幾乎一樣，非常接近。

(c)

✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=23.385um ; L=1um ; m=3
Vbias	DC=1V
Vin	DC=0.5V

✓ Results:

◎ 利用 .tf 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
**** small-signal transfer characteristics
v(vout)/vin = 15.5525
input resistance at vin = 1.2860k
output resistance at v(vout) = 16.4833k
```

Gain = 15.5525 ◦

◎ 利用 .OP 來分析，並從.lis 檔看到結果：

```
**** mosfets

subckt
element 0:m1
model 0:n_18.1
region Saturati
id 40.0042u
ibs -2.5829f
ibd -5.1653f
vgs 500.0000m
vds 499.9152m
vbs -500.0000m
vth 477.4302m
vdsat 76.8414m
vod 22.5698m
beta 22.0242m
gam eff 519.9006m
gm 805.4855u
gds 10.6678u
gmb 127.4068u
cdtot 88.7028t
cgtot 377.6853f
cstot 389.2572f
cbtot 222.1468f
cgs 301.7281f
cgd 25.0360f
```

$I_d = 40.0042\mu\text{A}$ ◦

```
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
**** operating point status is all simulation time is 0.
node =voltage node =voltage node =voltage
+0:vbias = 1.0000 0:vdd = 1.8000 0:vin = 500.0000m
+0:vout = 999.9152m
```

$V_{out} = 999.9152\text{mV}$ ◦

(d)

✓ Calculation:

$$r_o = \frac{1}{g_{ds}} = \frac{1}{10.6678\mu} = 93740.04012\Omega$$

$$\text{gain} = \frac{1+(g_m+g_{mb})r_o}{r_o+R_D} R_D = \frac{1+(g_m+g_{mb})r_o}{r_o} (r_o \parallel R_D) =$$

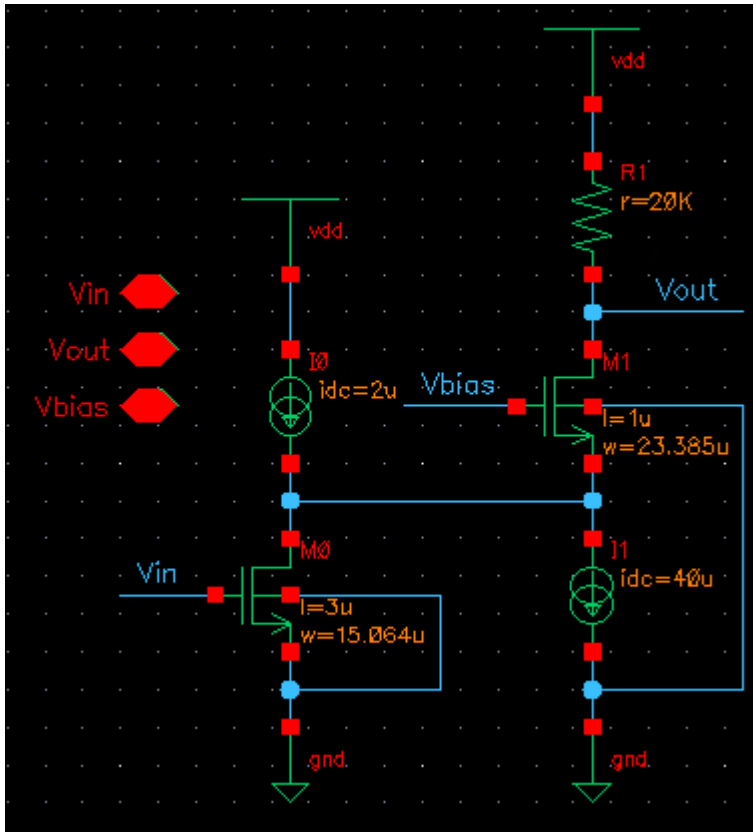
$$\left[\frac{1+(805.4855\mu+127.4068\mu)93740.04012}{93740.04012} \right] (93740.04012 \parallel 20k) = 15.5528$$

✓ Comment:

這題是 common gate，用.lis 檔算出來得 gain 與使用.tf 得到的 gain=15.5525 幾乎一樣，非常接近。

(e)

✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=15.064um ; L=3um ; m=1
M2	W=23.385um ; L=1um ; m=3
Vin	DC=0.35V
Vbias	DC=1V

✓ Comment:

◎ DC bias :

```
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node      =voltage      node      =voltage      node      =voltage
+0:vbias  = 1.0000      0:vdd    = 1.8000      0:vin     = 350.0000m
+0:vout   = 1.0000      0:vx     = 500.0055m
```

Vx 是 common source 的 Vout，在還沒接起來之前是 500.0888mV，接起來之後變成 500.0055mV，稍微變小了一點點點點，相差大約 0.0000833V，但其實還是幾乎相等的。

Vout 是 common gate 的 Vout，在還沒接起來之前是 999.9152mV，接起來之後變成 1V，稍微變大了一點點點點，相差大約 0.0000848V，但其實還是幾乎相等。

◎ Overall gain :

```
****      small-signal transfer characteristics
v(vout)/vin      = -838.0849m
input resistance at      vin      = 1.000e+20
output resistance at v(vout)      = 19.9988k
```

Overall gain 會變成-0.8380849，如果把 CS 的 gain 和 CG 的 gain 相乘得到， $A1 \times A2 = -153.6111 \times 15.5525 = -2389.036633$ ，很明顯的兩者並不相同且相差非常大。這個原因為，當 CS 和 CG 接在一起時，從 CS output 端來看等效上要並聯 CG 的 R_{in} ，但因為 CG 的 R_{in} 很小，跟 CS 的 r_o 並聯的話會 dominant，所以 CS 的 R_{out} 會變小導致 CS 輸出的 gain 變小；然而，從 CG stage 來看的話，因為與 CS 接在一起，CS 的 R_{out} 會被當成 CG 的 source degeneration，進而使 CG 的 gain 也變小。所以當 CS 和 CG 接在一起的 overall gain 會小於兩者的 gain 相乘。