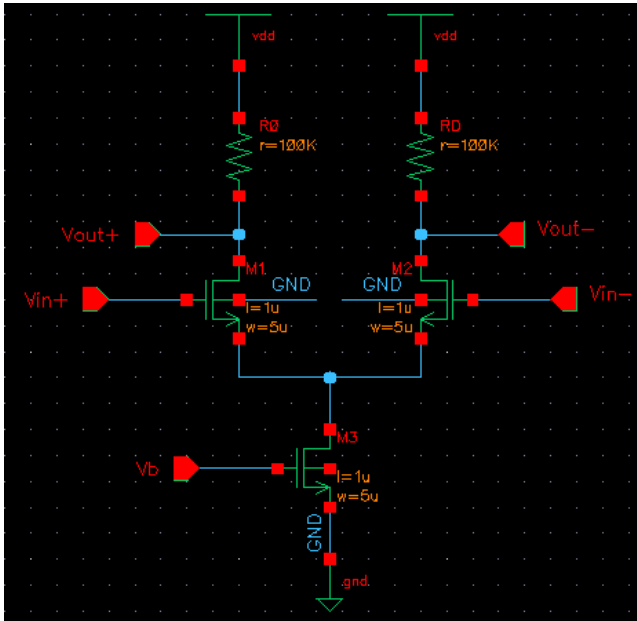


1.

(a)

✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=5um ; L=1um ; m=1
M2	W=5um ; L=1um ; m=1
M3	W=5um ; L=1um ; m=1
RDp	100kΩ
RDn	100kΩ
Vb	DC=0.5475V

✓ Waveform:

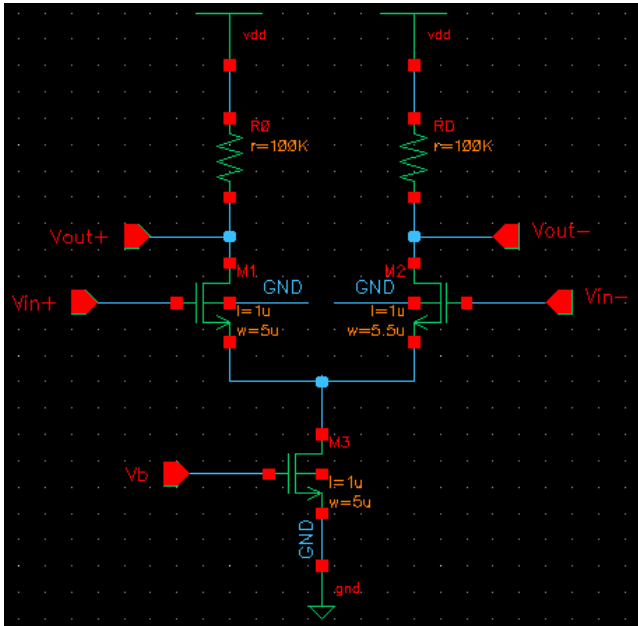


✓ Comment:

由 frequency response 可以看出，differential mode gain = 21.5 dB，符合題目大於 20dB 的要求。

(b)

✓ Schematic:



✓ Specification:

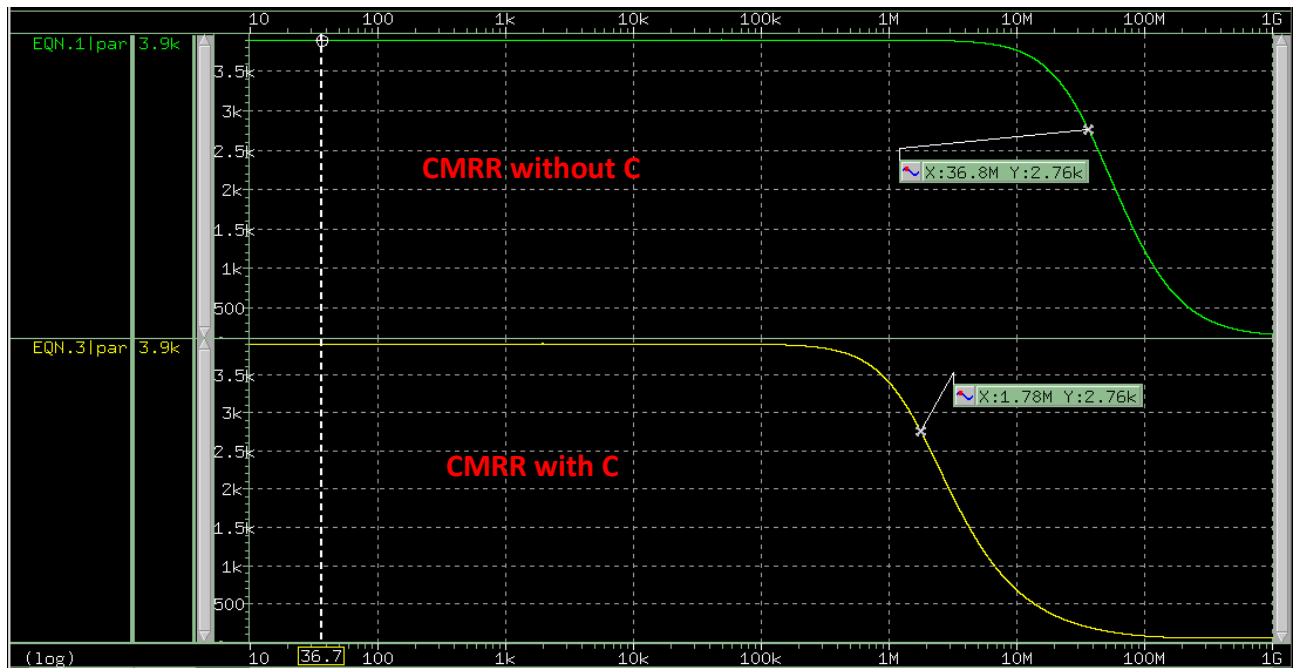
M1	W=5um ; L=1um ; m=1
M2	W=5.5um ; L=1um ; m=1
M3	W=5um ; L=1um ; m=1
RDp	100kΩ
RDn	100kΩ
Vb	DC=0.5475V

✓ Waveform:

Frequency response:



CMRR: (將 differential mode gain 除以 common mode to differential mode gain 作圖)



✓ **Comment:**

此題將 M2 的 width 調整大於 M1 的 width 10%，造成 differential 兩端沒有完全 symmetric，產生 input common mode 變動而使 differential output 變動，而有 common mode to differential mode 的 gain。由 frequency response 可以看出，不論有沒有在 P 點加上 Cp 的電容，differential mode gain 都等於 12、common mode to differential mode gain 都等於 3.07m。

依據定義， $CMRR = \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm_dm}} \right| = \frac{12}{3.07m} = 3.9k$ 。

由 CMRR 的 frequency response 圖可以看出，在加了 Cp 電容後 bandwidth 會變小，CMRR 會在較低頻時開始下降，且沒加 Cp 的 CMRR 的-3dB bandwidth 約等於 36.8MHz，加了 Cp 的 CMRR 的-3dB bandwidth 約等於 1.78MHz，bandwidth 大於下降了 35.02Hz。(這裡-3dB bandwidth 求法是找到 CMRR 等於 $10^{\{[20\log(3.9k) - 3]/20\}}$ 的值)

加上電容後會使得 CMRR bandwidth 變小的現象可由公式來解釋，common mode to differential mode gain 的公式為

$$A_{CM-DM} = -\frac{g_{m1} - g_{m2}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} R_D = \frac{-\Delta g_m R_D}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1}$$

可以看到 A_{CM-DM} 與 R_{SS} 呈反向關係，當 R_{SS} 越小時， A_{CM-DM} 越大，CMRR 就會越小。在此題中，我們為了明顯化模擬 parasitic 電容對電路的影響，所以在 P 點並聯一個

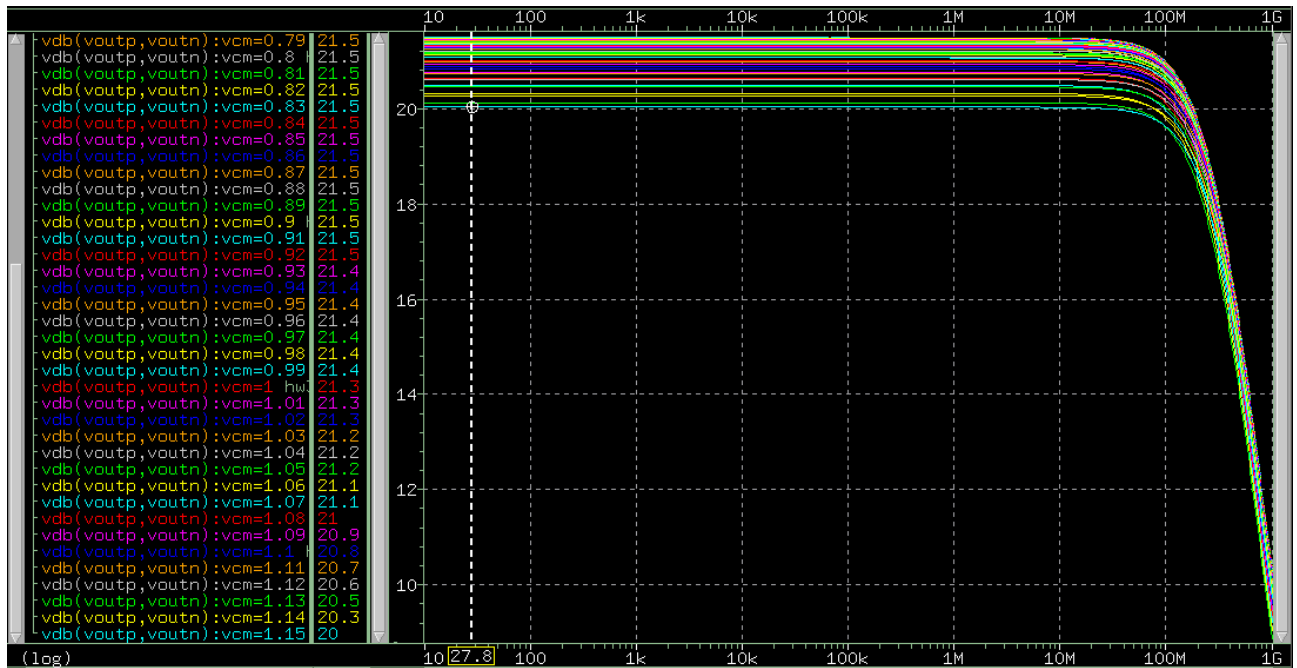
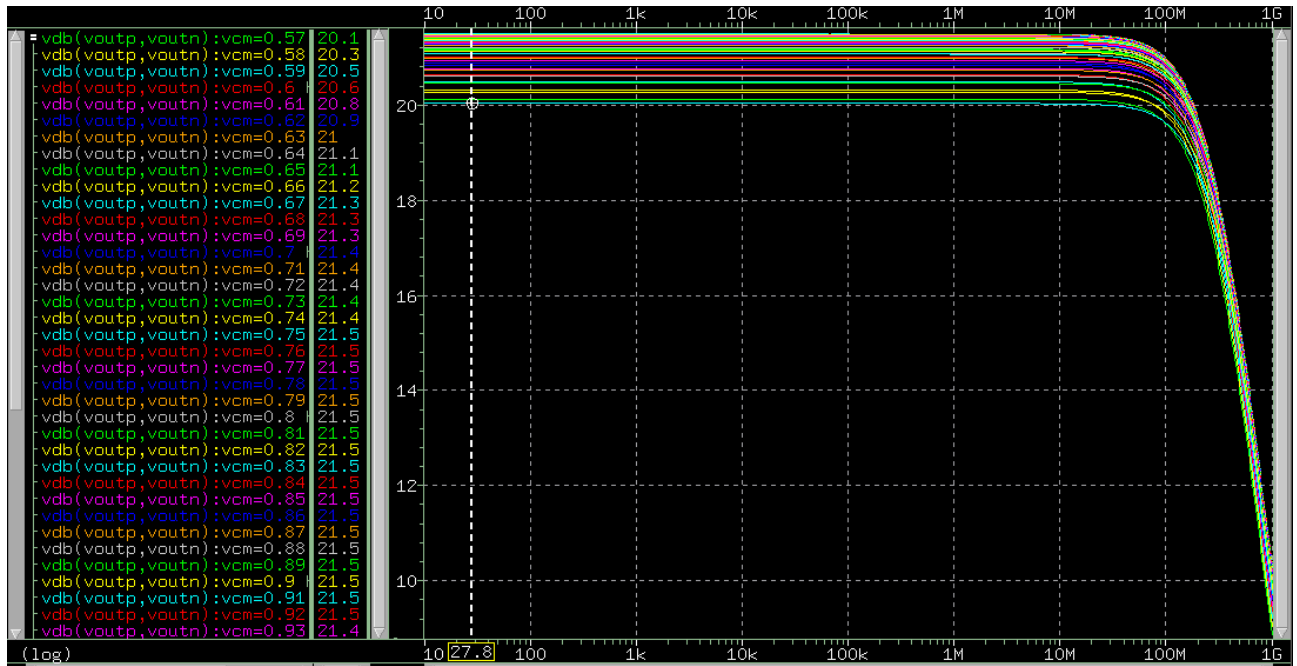
Cp 電容，因為電容的 impedance 可以寫成 $\frac{1}{sC}$ ，當頻率越高時，電容 Cp 的

impedance 就會越小，到更高頻時會短路，將 P 點直接連到 ground，且因為 Cp 與 R_{SS} 並聯，所以等效上的電阻變小，造成 A_{CM-DM} 越大，CMRR 就會越小，所以 bandwidth 會變小。

(c)

✓ Comment:

i. Find input common mode range when differential mode gain > 20dB



我利用 sweep input common mode 的值，從 0 到 1.8V 慢慢縮小範圍，最後找到 input common mode voltage 在 0.57V~1.15V 之間時 differential gain 都會大於 20dB，如上面兩張圖所示。

ii. Find input common range when all MOS operate in saturation region

```

847 **** voltage sources
848
849 subckt
850 element 0:vinp 0:vinn 0:vdd 0:vb
851 volts 670.0000m 670.0000m 1.8000 547.5000m
852 current 0. 0. -18.4378u 0.
853 power 0. 0. 33.1881u 0.
854
855 total voltage source power dissipation= 33.1881u watts
856
857
858 **** resistors
859
860 subckt
861 element 0:rdp 0:rdn
862 r value 100.0000k 100.0000k
863 v drop 921.8923m 921.8923m
864 current 9.2189u 9.2189u
865 power 8.4989u 8.4989u
866
867
868 **** mosfets
869
870 subckt
871 element 0:m1 0:m2 0:m3
872 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
873 region Saturati Saturati Saturati
874 id 9.2189u 9.2189u 18.4378u
875 ibs -67.8130a -67.8130a -3.263e-21
876 ibd -373.5454a -373.5454a -67.8081a
877 vgs 510.5939m 510.5939m 547.5000m
878 vds 718.7016m 718.7016m 159.4061m
879 vbs -159.4061m -159.4061m 0.
880 vth 418.6000m 418.6000m 390.6211m

```

```

5036 **** voltage sources
5037
5038 subckt
5039 element 0:vinp 0:vinn 0:vdd 0:vb
5040 volts 1.2600 1.2600 1.8000 547.5000m
5041 current 0. 0. -20.8821u 0.
5042 power 0. 0. 37.5878u 0.
5043
5044 total voltage source power dissipation= 37.5878u watts
5045
5046 **** resistors
5047
5048 subckt
5049 element 0:rdp 0:rdn
5050 r value 100.0000k 100.0000k
5051 v drop 1.0441 1.0441
5052 current 10.4411u 10.4411u
5053 power 10.9016u 10.9016u
5054
5055 **** mosfets
5056
5057 subckt
5058 element 0:m1 0:m2 0:m3
5059 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
5060 region Saturati Saturati Saturati
5061 id 10.4411u 10.4411u 20.8821u
5062 ibs -274.0888a -274.0888a -3.695e-21
5063 ibd -321.5551a -321.5551a -274.0832a
5064 vgs 615.6960m 615.6960m 547.5000m
5065 vds 111.5891m 111.5891m 644.3040m
5066 vbs -644.3040m -644.3040m 0.
5067 vth 506.8686m 506.8686m 386.9533m

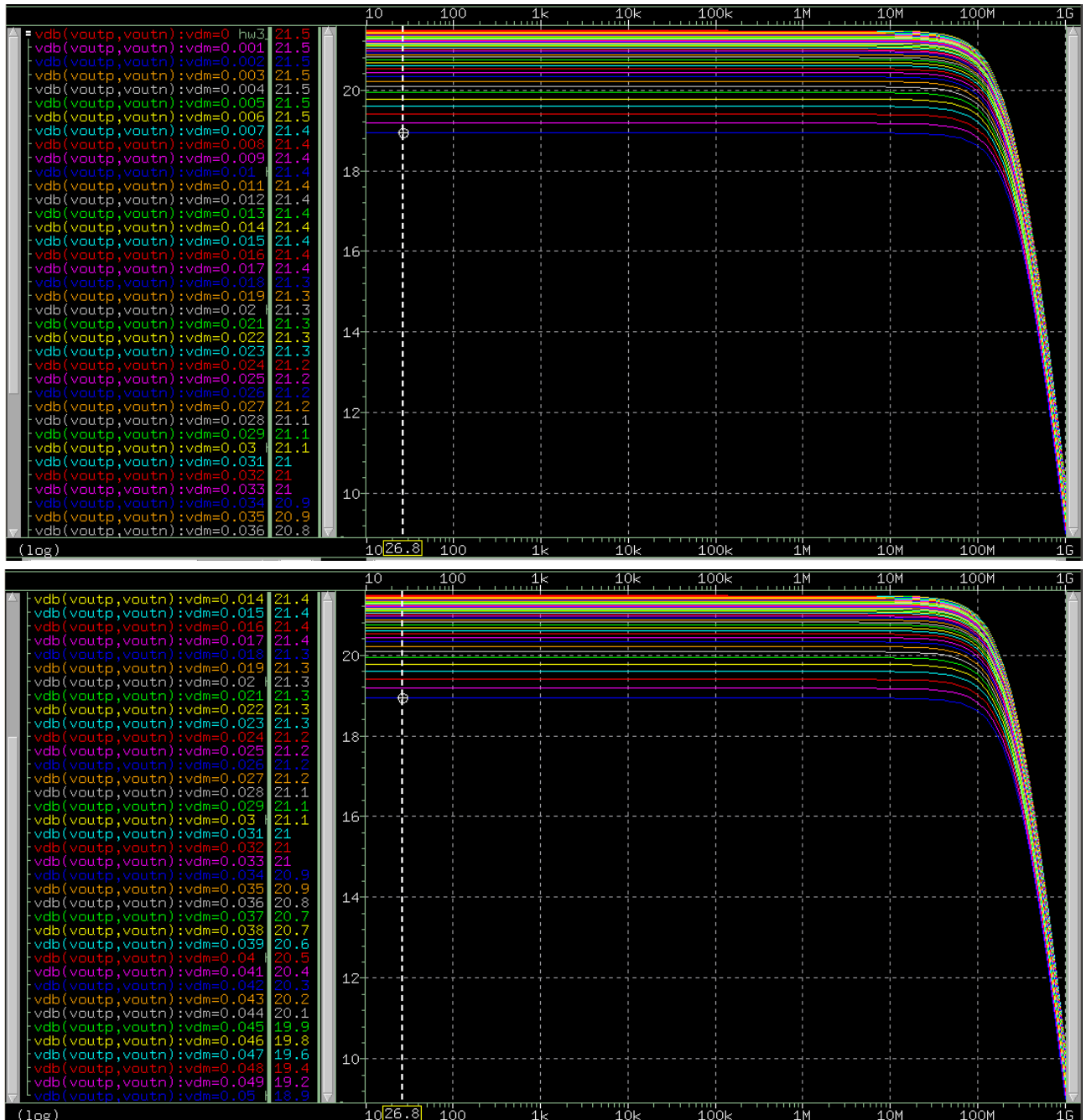
```

從.lis 檔裡可以找到讓每顆 MOS 都 saturation 的 input common mode voltage 的 lower bound 是 0.67V，upper bound 是 1.26V，所以 saturation 的範圍是 0.67V~1.26V。

最後，取 differential gain 大於 20dB 的 input common code range 與 all MOS in saturation region 的 input common code range 的交集，也就是題目要求的範圍為 **0.67V~1.15V**。

(d)

✓ Comment:



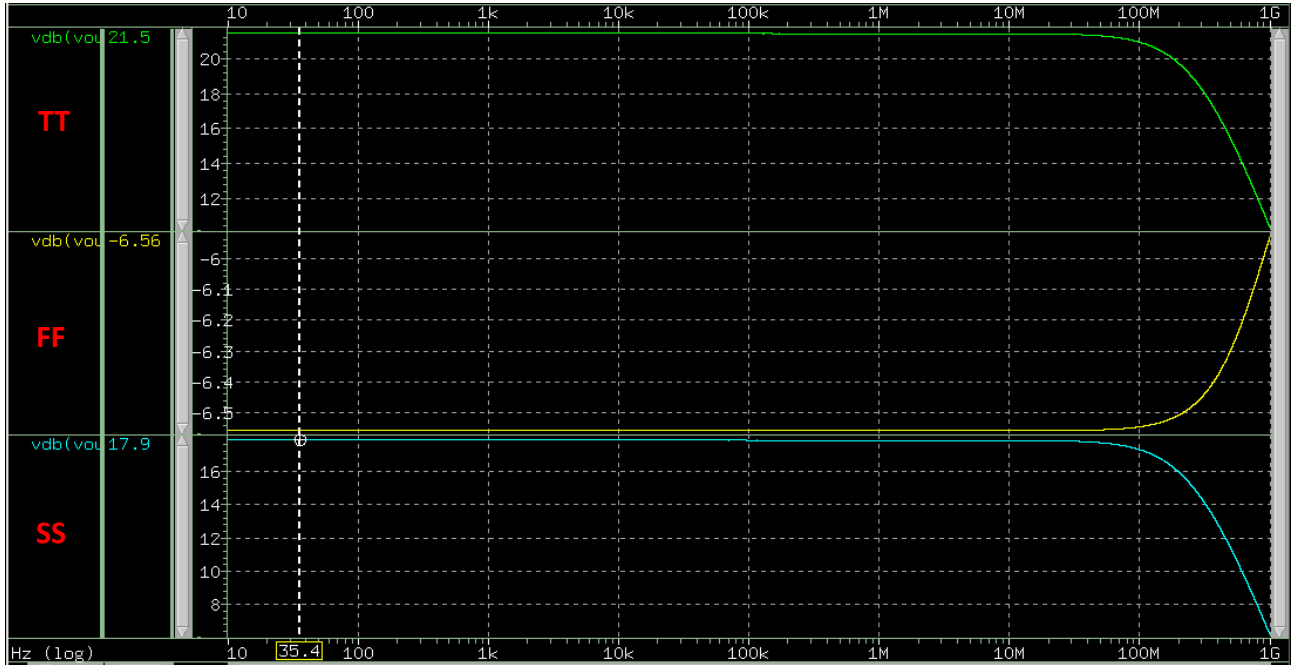
我在 V_{in} 正端輸入 $0.9 + \frac{1}{2}V_{dm}$ 、負端輸入 $0.9 - \frac{1}{2}V_{dm}$ ，並 sweep V_{dm} 從 0V 到 0.05V，來找 input differential range，由 waveview 可以看到當 V_{dm} 在 0V~0.044V 之間時，也就是 V_{in} 正端或負端在 0.878V~0.922V 時，differential mode gain 都大於

20dB，且由上一題得知 all MOS in saturation region 的範圍是 0.67~1.26V，符合 saturation 的條件，所以 $\text{input differential range} = 0.044\text{V}$ 。

(e)

✓ Using ideal voltage source to simulate TT, FF, SS corner

Frequency response under different corner:



```

88 **** mosfets
89
90
91 subckt
92 element 0:m1      0:m2      0:m3
93 model  0:n_18.1  0:n_18.1  0:n_18.1
94 region Saturati Saturati Saturati
95 id     10.0048u  10.0048u  20.0096u
96 ibs   -147.7503a -147.7503a -3.541e-21
97 ibd   -340.1142a -340.1142a -147.7450a
98 vgs   552.6832m  552.6832m  547.5000m
99 vds   452.2035m  452.2035m  347.3168m
100 vbs   -347.3168m -347.3168m  0.
101 vth   455.2727m  455.2727m  389.1998m
102 vdsat 119.8004m  119.8004m  157.2121m
103 vod   97.4105m  97.4105m  158.3002m

```

TT corner : (all in saturation)

```

217 **** mosfets
218
219
220 subckt
221 element 0:m1      0:m2      0:m3
222 model  0:n_18.1  0:n_18.1  0:n_18.1
223 region Linear    Linear    Saturati
224 id     14.3947u  14.3947u  28.7895u
225 ibs   -128.2311a -128.2311a -5.091e-21
226 ibd   -153.9247a -153.9247a -128.2234a
227 vgs   599.6648m  599.6648m  547.5000m
228 vds   60.1912m  60.1912m  300.3352m
229 vbs   -300.3352m -300.3352m  0.
230 vth   419.6429m  419.6429m  360.4481m
231 vdsat 178.9023m  178.9023m  178.5514m
232 vod   180.0219m  180.0219m  187.0519m

```

FF corner :
(M1、M2 in linear, M3 in saturation)

```

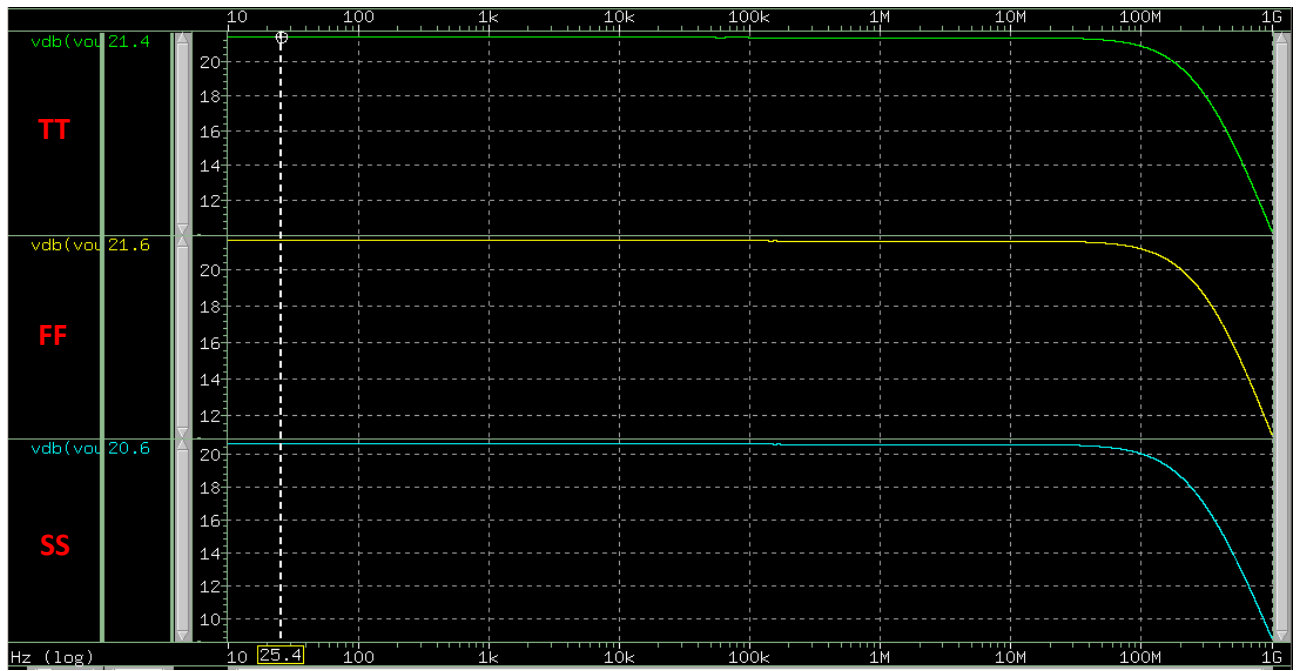
357 **** mosfets
358
359
360 subckt
361 element 0:m1 0:m2 0:m3
362 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
363 region Saturati Saturati Saturati
364 id 5.4425u 5.4425u 10.8850u
365 ibs -145.5648a -145.5648a -1.928e-21
366 ibd -532.4240a -532.4240a -145.5619a
367 vgs 556.6806m 556.6806m 547.5000m
368 vds 912.4308m 912.4308m 343.3194m
369 vbs -343.3194m -343.3194m 0.
370 vth 480.9490m 480.9490m 416.0434m
371 vdsat 103.2151m 103.2151m 135.5020m
372 vod 75.7316m 75.7316m 131.4566m

```

SS corner : (all in saturation)

✓ Using current mirror to simulate TT, FF, SS corner

Frequency response under different corner:



```

102 **** mosfets
103
104
105 subckt
106 element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4
107 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
108 region Saturati Saturati Saturati Saturati
109 id 9.7083u 9.7083u 19.4167u 20.0000u
110 ibs -148.6574a -148.6574a -3.436e-21 -3.539e-21
111 ibd -352.7256a -352.7256a -148.6523a -231.6717a
112 vgs 550.5507m 550.5507m 544.6056m 544.6056m
113 vds 479.7169m 479.7169m 349.4493m 544.6056m
114 vbs -349.4493m -349.4493m 0. 0.
115 vth 455.3959m 455.3959m 389.1836m 387.7074m
116 vdsat 118.3000m 118.3000m 155.1797m 156.2219m
117 vod 95.1548m 95.1548m 155.4220m 156.8982m

```

TT corner : (all in saturation)

```

242 **** mosfets
243
244
245 subckt
246 element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4
247 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
248 region Saturati Saturati Saturati Saturati
249 id 9.8062u 9.8062u 19.6124u 20.0000u
250 ibs -162.4124a -162.4124a -3.468e-21 -3.537e-21
251 ibd -349.8344a -349.8344a -162.4072a -216.7515a
252 vgs 519.6038m 519.6038m 507.6807m 507.6807m
253 vds 438.9854m 438.9854m 380.3962m 507.6807m
254 vbs -380.3962m -380.3962m 0. 0.
255 vth 429.8777m 429.8777m 359.8367m 358.8659m
256 vdsat 115.5237m 115.5237m 150.6515m 151.3350m
257 vod 89.7261m 89.7261m 147.8440m 148.8148m

```

FF corner : (all in saturation)


```

393 **** mosfets
394
395
396 subckt
397 element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4
398 model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
399 region Saturati Saturati Saturati Saturati
400 id 9.6111u 9.6111u 19.2223u 20.0000u
401 ibs -129.6081a -129.6081a -3.404e-21 -3.542e-21
402 ibd -355.6774a -355.6774a -129.6030a -255.3030a
403 vgs 594.3169m 594.3169m 602.1528m 602.1528m
404 vds 533.2034m 533.2034m 305.6831m 602.1528m
405 vbs -305.6831m -305.6831m 0. 0.
406 vth 477.0334m 477.0334m 416.2935m 414.3296m
407 vdsat 130.3936m 130.3936m 173.5887m 174.9884m
408 vod 117.2835m 117.2835m 185.8593m 187.8231m

```

SS corner : (all in saturation)

✓ **Comment:**

從.lis 檔可以看出當使用 ideal voltage source 時，TT 和 SS corner 都會 saturation，但是 FF corner 的 M1 和 M2 卻在 linear，造成 gain 大幅下降，但 M3 的 bias current 上升變成 28uA；另外 SS corner 的 gain 也下降了許多，M3 的 bias current 也下降成 10uA 左右。而如果使用一顆與 M3 相同 size 的 M4 加上一個 20uA 的直流電流源來做成 current mirror，來給定 Vb 的 bias voltage 使 M3 的電流為 20uA，結果 TT、FF 和 SS corner 的所有 MOS 都會在 saturation，且這三個 corner 的 M3 電流都是 19uA 左右，gain 也都差不多 21dB 左右，可以看出使用 current mirror 來產生 Vb 電壓比 ideal voltage source 效果還好！

為了解釋這個現象，我們可以觀察到 MOS 在 FF corner 的 Vth 最小，在 TT corner 的 Vth 中等，在 SS corner 的 Vth 最大，因此如果使用 ideal voltage source 時，觀察 M3，根據電流公式：

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

因為 Vb 是定值，所以 Vgs 固定，且 W/L 也固定，當 Vth 變小時，電流會變大，也就是 FF corner 的情形，而電流變大會造成 R_D 的壓降變大再加上 Vov3 變大的影響，會使得 M1 和 M2 的 Vds 太小而無法 saturation 只能在 linear；當 Vth 變大時，電流會變小，也就是 SS corner 的情形，因為電流變小會使 R_D 的壓降變小再加上 Vov3 變小的影響，會造成 M1 和 M2 的 Vds 變大而繼續維持在 saturation。

但如果使用 current mirror 的話，會讓流過 M3 的電流固定，使得 R_D 的壓降變動不大，所以 M1 和 M2 的 Vds 都足夠大到維持在 saturation region。

另外，為了解釋 gain 的變動，可以從 Vth 的變動與 gain 的公式來解釋，differential pair 的 gain = g_mR_D，而根據 g_m 的公式：

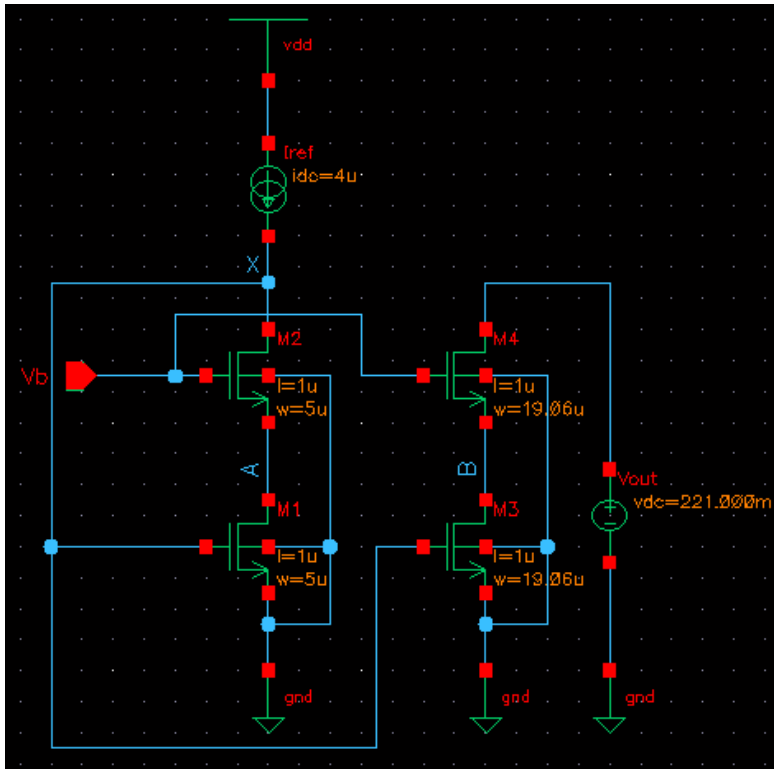
$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})$$

可以發現當 Vth 變大，g_m 會變小，differential gain 也會變小，這是 FF corner 的情形；當 Vth 變小，g_m 會變大，differential gain 也會變大，這是 SS corner 的情形。因此我們可以發現再接上 current mirror 後 differential gain 的大小比較為：SS > TT > FF。

2.

(a)

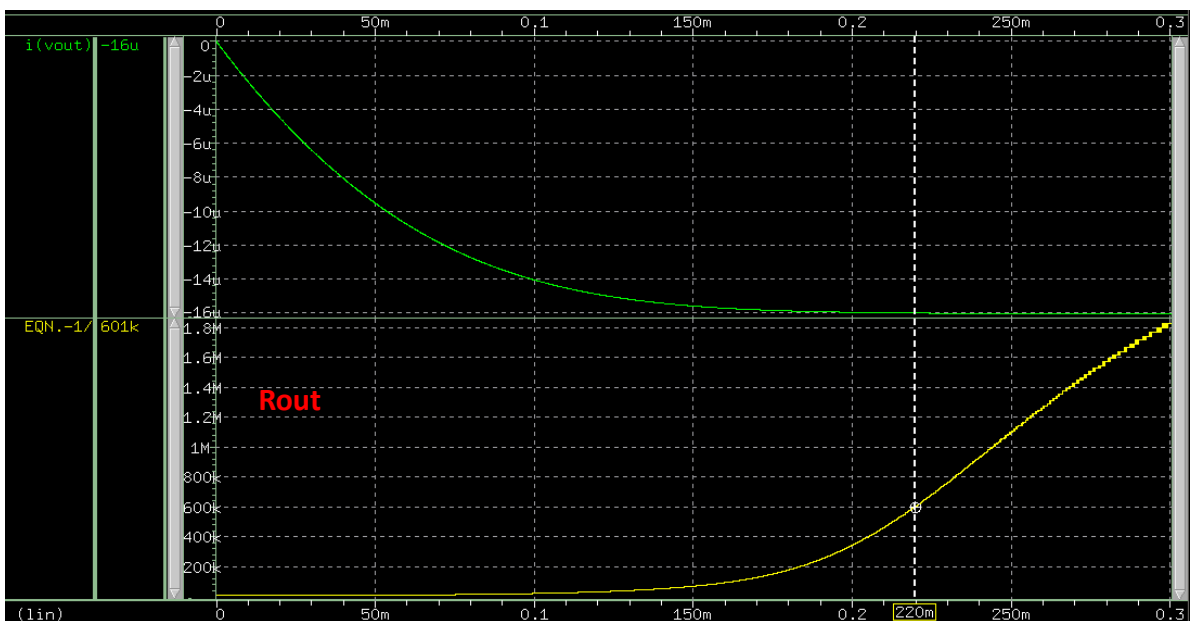
✓ Schematic:



✓ Specification:

M1	W=5um ; L=1um ; m=1
M2	W=5um ; L=1um ; m=1
M3	W=19.06um ; L=1um ; m=1
M4	W=19.06um ; L=1um ; m=1
Vb	DC=0.55V
Vout	DC=0.22V

✓ Waveform:



```

**** mosfets

subckt
element 0:m1      0:m2      0:m3      0:m4
model    0:n_18.1  0:n_18.1  0:n_18.1  0:n_18.1
region   Saturati  Saturati  Saturati  Saturati
id       4.0000u   4.0000u   16.0065u  16.0065u
ibs     -7.079e-22 -41.4697a -2.475e-21 -133.7450a
ibd     -41.4683a -186.9618a -133.7400a -313.1349a
vgs     439.4981m 452.5177m 439.4981m 455.6098m
vds     97.4823m 342.0158m 94.3902m 126.6098m
vbs     0.        -97.4823m 0.        -94.3902m
vth     391.0882m 409.4697m 388.2480m 407.7110m
vdsat   85.9173m 84.0084m 88.1481m 87.2562m
vod     48.4099m 43.0480m 51.2501m 47.8989m
beta    1.5528m  1.5562m  5.9273m  5.9410m
gam_eff 507.4460m 510.1074m 507.4460m 510.0251m
gm       68.4061u 73.5054u 267.7200u 282.7487u
gds      8.8216u 946.9956n 41.2033u 15.4525u
gmb      14.2412u 14.3310u 55.7996u 55.5553u
cdtot    9.0725f  7.0868f  35.1486f  30.5640f
cgtot    31.9442f 30.5553f 123.0298f 119.8673f
cstot    34.1882f 33.1597f 131.3501f 128.2827f
cbtot    19.9058f 18.5428f 75.2387f 71.6731f
cgs      26.3776f 25.3547f 101.7158f 99.8091f
cgd      2.3485f  1.8020f  9.3332f  7.8759f

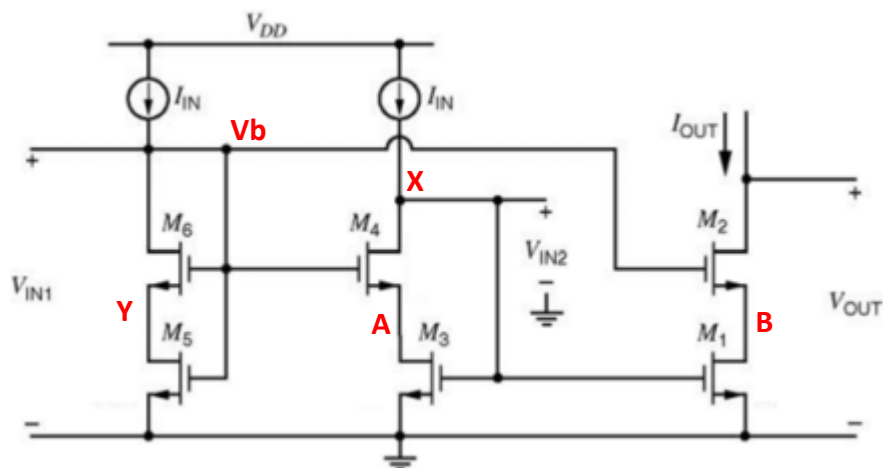
```

✓ **Comment:**

這題是要求我們做出一個 1:4 的 cascode current mirror，我調整 Vb 電壓=0.55V 使得 Iout 電流變成 16uA，再掃 Vout DC 從 0V 到 0.3V，從 waveview probe 出 Iout 對 Vout 的圖形，利用 $R_{out} = -\frac{dI_{out}}{dV_{out}}$ 來求出 Rout 的圖形，發現我可以讓 $R_{out} > 600k\Omega$ 、電流等於 16uA 的最小 Vout 如圖所示為 220mV，符合 Vout minimum < 300mV 的條件。

(b)

✓ **Calculation:**



I. M6's operation region:

因為 M6 的 gate 和 drain 接在一起(diode connected)，所以 $V_{DS6} = V_{GS6}$ ，因此 $V_{DS6} > V_{GS6} - V_{TH6}$ ，我可以知道 M6 一定會在 saturation region。

II. M5's operation region:

因為 M6 的 gate 和 M5 的 gate 接在一起，所以 $V_{G5} = V_{G6}$ 、 $V_{GS6} = V_{G6} - V_{D5}$ ，又因為 M6 在 saturation region，也就是說 $V_{GS6} > V_{TH}$ ，所以可以得到 $V_{GS6} = V_{G6} - V_{D5} = V_{G5} - V_{D5} = V_{GS5} - V_{DS5} > V_{TH}$ ，也就是 $V_{DS5} < V_{GS5} - V_{TH}$ ，因此 M5 操作在 Linear region。

III. 從 M1 和 M2 來計算 Vb 點的電壓，因 M1 和 M2 size 相同，可以得到 $V_b = V_{OV1} + V_{OV2} + V_{TH2} = 2V_{OV} + V_{TH}$ ，所以 M5 的 $V_{GS5} = V_b = 2V_{OV} + V_{TH}$ 、 $V_{DS5} = V_{OV}$ ，M6 的 $V_{DS6} = V_{OV}$ 。

IV. 利用電流公式讓 M6 電流與 M5 電流相等來計算 size：

$$\begin{cases} I_{D6} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_6 V_{OV}^2 \\ I_{D5} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_5 [2(V_{GS5} - V_{TH})V_{OV} - V_{OV}^2] \end{cases}$$

$$I_{D6} = I_{D5} \Rightarrow \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_6 V_{OV}^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_5 [2(V_{GS5} - V_{TH})V_{OV} - V_{OV}^2]$$

$V_{GS5} = 2V_{OV} + V_{TH}$ 代入

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_6 V_{OV}^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_5 [2(2V_{OV} + V_{TH} - V_{TH})V_{OV} - V_{OV}^2]$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_6 V_{OV}^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)_5 [4V_{OV}^2 - V_{OV}^2]$$

$$\Rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_6 = 3 \left(\frac{W}{L}\right)_5$$

$$\Rightarrow \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_6}{\left(\frac{W}{L}\right)_5} = 3 = \frac{1}{\frac{1}{3}}$$

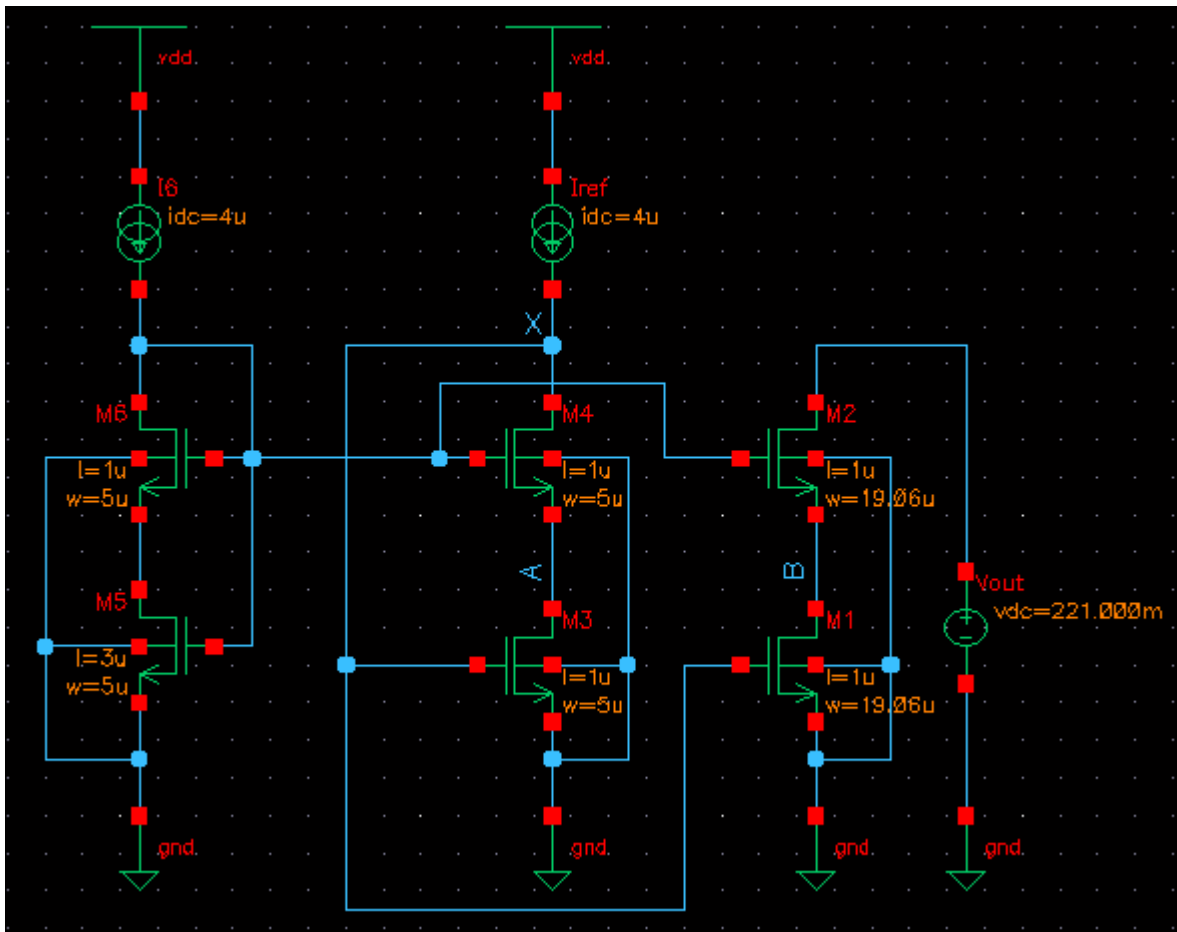
所以我設計 M6 跟 M3 和 M4 相同的 W/L，M5 則是 W/3L。

(c)

✓ Specification:

M1	W=19.06um ; L=1um ; m=1
M2	W=19.06um ; L=1um ; m=1
M3	W=5um ; L=1um ; m=1
M4	W=5um ; L=1um ; m=1
M5	W=5um ; L=3um ; m=1
M6	W=5um ; L=1um ; m=1
lin	DC=4uA
lin2	DC=4uA
Vout	DC=0.221V

✓ Schematic:



✓ Simulate under TT, FF, SS corner(M5's W/L=5um/3um):

TT corner :

```

***** 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:a      = 62.9398m 0:b      = 61.2404m 0:vb     = 508.1005m
+0:vdd    = 1.8000  0:vout   = 221.0000m 0:x      = 449.3433m
+0:y      = 63.5229m

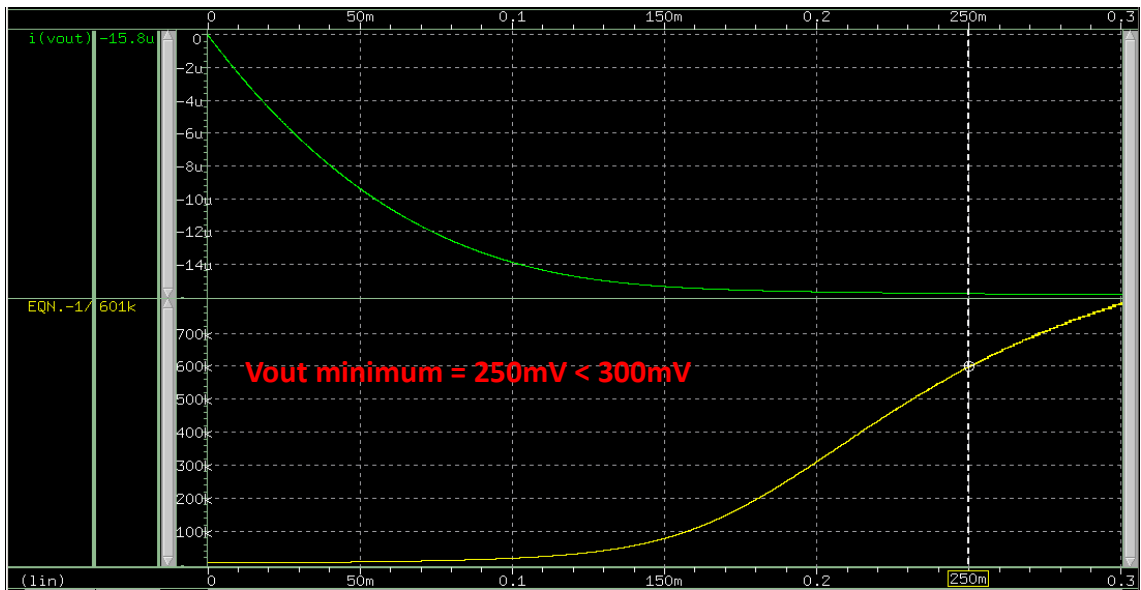
```

```

**** mosfets

```

subckt	0:m1	0:m2	0:m3	0:m4	0:m5	0:m6
element	0:n_18.1	0:n_18.1	0:n_18.1	0:n_18.1	0:n_18.1	0:n_18.1
model	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Linear	Saturati
region	Saturati	Saturati	Saturati	Saturati	Linear	Saturati
id	15.7534u	15.7534u	4.0000u	4.0000u	4.0000u	4.0000u
ibs	-2.436e-21	-86.7747a	-7.079e-22	-26.7753a	-7.079e-22	-27.0234a
ibd	-86.7698a	-313.1349a	-26.7739a	-191.1499a	-27.0219a	-216.1452a
vgs	449.3433m	446.8600m	449.3433m	445.1607m	508.1005m	444.5776m
vds	61.2404m	159.7596m	62.9398m	386.4035m	63.5229m	444.5776m
vbs	0.	-61.2404m	0.	-62.9398m	0.	-63.5229m
vth	388.4986m	400.6649m	391.3495m	402.0965m	340.1974m	401.7608m
vdsat	93.6280m	85.9941m	91.2762m	83.6859m	156.3424m	83.5593m
vod	60.8447m	46.1951m	57.9938m	43.0641m	167.9031m	42.8167m
beta	5.9292m	5.9358m	1.5533m	1.5549m	503.6862u	1.5548m
gam_ eff	507.4460m	509.1341m	507.4460m	509.1801m	507.4460m	509.1959m
gm	224.9634u	283.5281u	58.6953u	73.4343u	29.1320u	73.4871u
gds	137.9705u	8.0120u	32.2580u	898.9506n	46.3311u	868.6107n
gmb	47.1494u	56.7532u	12.2861u	14.5982u	5.9991u	14.5859u
cdtot	50.2834f	29.2525f	12.6369f	7.0616f	76.2951f	6.9687f
cgtot	130.8879f	118.6284f	33.9656f	30.5863f	117.0991f	30.5465f
cstot	135.6580f	128.1120f	35.3706f	33.3139f	111.0476f	33.2741f
cbtot	76.2285f	72.3624f	20.1578f	18.7398f	39.4864f	18.6509f
cgs	105.3060f	98.6550f	27.4497f	25.3398f	82.5358f	25.2895f
cgd	15.3060f	7.3548f	3.7379f	1.8011f	29.9039f	1.7979f



FF corner :

```

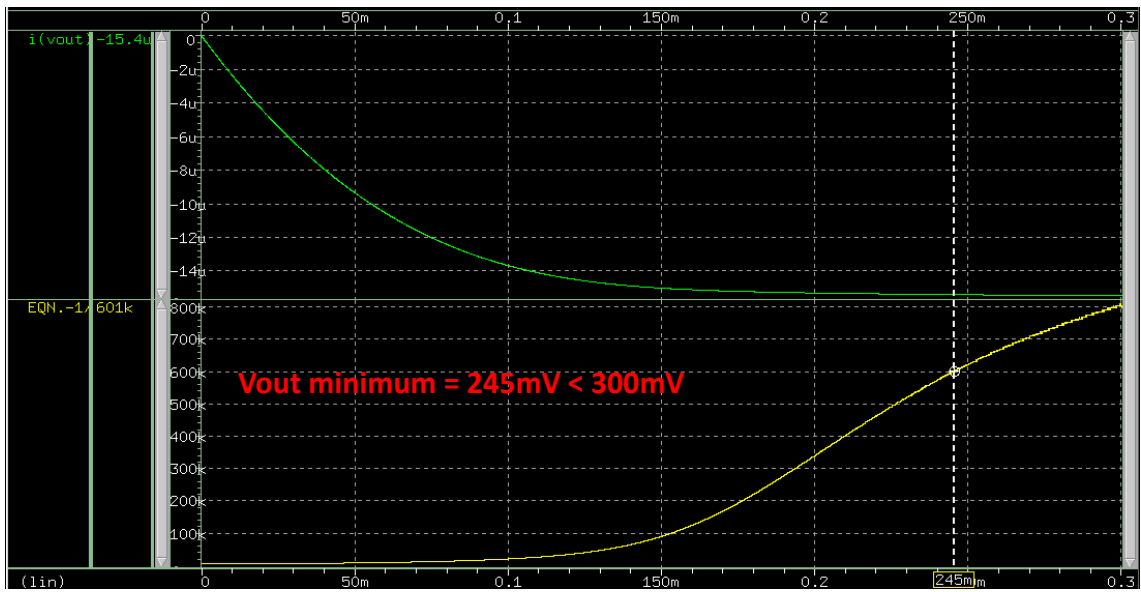
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node =voltage node =voltage node =voltage
+0:a = 61.3630m 0:b = 59.7508m 0:vb = 472.4245m
+0:vdd = 1.8000 0:vout = 221.0000m 0:x = 415.4253m
+0:y = 61.9436m

```

```

**** mosfets
subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5 0:m6
model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
region Saturati Saturati Saturati Saturati Linear Saturati
id 15.3598u 15.3598u 4.0000u 4.0000u 4.0000u 4.0000u
ibs -2.375e-21 -84.7567a -7.073e-22 -26.1997a -7.073e-22 -26.4476a
ibd -84.7519a -313.4779a -26.1983a -177.3657a -26.4462a -201.7016a
vgs 415.4253m 412.6737m 415.4253m 411.0615m 472.4245m 410.4809m
vds 59.7508m 161.2492m 61.3630m 354.0623m 61.9436m 410.4809m
vbs 0. -59.7508m 0. -61.3630m 0. -61.9436m
vth 360.9470m 372.4131m 362.2683m 372.5420m 312.2656m 372.2131m
vdsat 90.4817m 83.2411m 89.0657m 81.7388m 152.0432m 81.6124m
vod 54.4784m 40.2606m 53.1570m 38.5195m 160.1589m 38.2678m
beta 6.4128m 6.4203m 1.6870m 1.6887m 542.0875u 1.6887m
gam_eff 507.4460m 509.0937m 507.4460m 509.1374m 507.4460m 509.1531m
gm 227.8422u 284.6169u 60.3111u 75.0619u 30.3549u 75.1212u
gds 136.8514u 7.5555u 33.1933u 942.8580n 47.4507u 904.3023n
gmb 46.3738u 55.3811u 12.2569u 14.5098u 6.0635u 14.4987u
cdtot 46.7301f 27.2739f 11.9494f 6.6973f 75.9676f 6.6109f
cgtot 131.0885f 118.2116f 34.2815f 30.7306f 120.4344f 30.6838f
cstot 132.1582f 123.8084f 34.6997f 32.4447f 112.6305f 32.4006f
cbtot 71.0921f 67.5311f 18.8620f 17.6060f 38.3304f 17.5256f
cgs 105.1446f 97.2904f 27.5975f 25.2359f 85.3160f 25.1784f
cgd 15.1325f 7.7234f 3.7906f 1.9244f 30.3244f 1.9204f

```



SS corner :

```

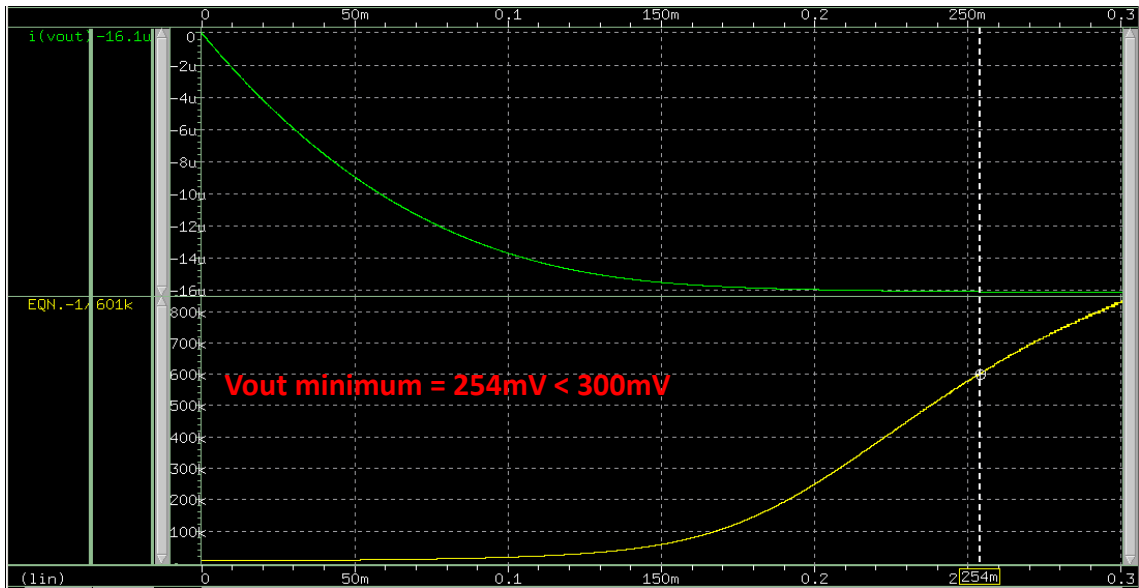
***** operating point information tnom= 25.000 temp= 25.000 *****
***** operating point status is all simulation time is 0.
node    =voltage    node    =voltage    node    =voltage
+0:a    = 66.9827m  0:b      = 65.2652m  0:vb     = 557.6269m
+0:vdd  = 1.8000     0:vout   = 221.0000m 0:x     = 494.9381m
+0:y    = 67.5460m

```

```

**** mosfets
subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5 0:m6
model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
region Linear Saturati Linear Saturati Linear Saturati
id 16.0620u 16.0620u 4.0000u 4.0000u 4.0000u 4.0000u
ibs -2.484e-21 -92.3854a -7.084e-22 -28.4007a -7.084e-22 -28.6395a
ibd -92.3804a -312.8232a -28.3993a -209.8479a -28.6381a -236.4273a
vgs 494.9381m 492.3618m 494.9381m 490.6442m 557.6269m 490.0809m
vds 65.2652m 155.7348m 66.9827m 427.9555m 67.5460m 490.0809m
vbs 0. -65.2652m 0. -66.9827m 0. -67.5460m
vth 413.6086m 427.3666m 417.8732m 430.1242m 374.4330m 429.8159m
vdsat 103.5883m 94.5543m 100.1755m 91.2633m 165.0929m 91.1236m
vod 81.3296m 64.9952m 77.0649m 60.5200m 183.1940m 60.2651m
beta 4.4913m 4.4961m 1.1705m 1.1717m 434.3986u 1.1717m
gam_eff 507.4460m 509.2431m 507.4460m 509.2895m 507.4460m 509.3047m
gm 203.7761u 264.5748u 52.7164u 67.9256u 27.0474u 67.9736u
gds 135.9874u 8.8289u 31.0717u 753.8003n 43.4465u 733.9578n
gmb 44.4160u 54.9863u 11.4774u 14.0130u 5.7967u 14.0011u
cdtot 64.7955f 32.2046f 15.9017f 7.3820f 81.3630f 7.2773f
cgtot 158.6403f 144.7680f 41.0295f 37.1818f 120.4191f 37.1483f
cstot 165.4228f 158.5636f 43.0239f 41.2223f 115.8680f 41.1903f
cbtot 88.4476f 83.6372f 23.2980f 21.5137f 42.5065f 21.4142f
cgs 128.0299f 123.9248f 33.4037f 31.8082f 84.2422f 31.7641f
cgd 19.8346f 7.3144f 4.7005f 1.6521f 31.3740f 1.6482f

```



✓ Simulate under TT, FF, SS corner(M5's W/L=5um/5um):

TT corner :

```
***** 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:a = 88.1158m 0:b = 85.4377m 0:vb = 538.6641m
+0:vdd = 1.8000 0:vout = 221.0000m 0:x = 440.9545m
+0:y = 89.1064m
```

```
subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5 0:m6
model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
region Saturati Saturati Saturati Saturati Linear Saturati
id 15.9551u 15.9551u 4.0000u 4.0000u 4.0000u 4.0000u
ibs -2.467e-21 -121.0600a -7.079e-22 -37.4852a -7.079e-22 -37.9066a
ibd -121.0551a -313.1349a -37.4837a -187.5813a -37.9052a -229.1470a
vgs 440.9545m 453.2265m 440.9545m 450.5483m 538.6641m 449.5577m
vds 85.4377m 135.5623m 88.1158m 352.8387m 89.1064m 449.5577m
vbs 0. -85.4377m 0. -88.1158m 0. -89.1064m
vth 388.3157m 405.8209m 391.1591m 407.4936m 328.8226m 406.9264m
```

FF corner :

```
***** 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:a = 85.8366m 0:b = 83.4592m 0:vb = 502.0157m
+0:vdd = 1.8000 0:vout = 221.0000m 0:x = 407.2031m
+0:y = 86.8251m
```

```
subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5 0:m6
model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
region Saturati Saturati Saturati Saturati Linear Saturati
id 15.5135u 15.5135u 4.0000u 4.0000u 4.0000u 4.0000u
ibs -2.399e-21 -118.3862a -7.073e-22 -36.6488a -7.073e-22 -37.0708a
ibd -118.3814a -313.4778a -36.6473a -173.8552a -37.0694a -214.3356a
vgs 407.2031m 418.5565m 407.2031m 416.1792m 502.0157m 415.1906m
vds 83.4592m 137.5408m 85.8366m 321.3665m 86.8251m 415.1906m
vbs 0. -83.4592m 0. -85.8366m 0. -86.8251m
vth 360.7663m 377.3310m 362.0817m 377.6554m 301.2306m 377.1005m
```


SS corner :

```
***** 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:a      = 92.4409m 0:b      = 89.4259m 0:vb     = 588.6917m
+0:vdd    = 1.8000  0:vout   = 221.0000m 0:x      = 485.7311m
+0:y      = 93.3844m
subckt
element 0:m1 0:m2 0:m3 0:m4 0:m5 0:m6
model 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1 0:n_18.1
region Saturati Saturati Saturati Saturati Linear Saturati
id 16.2870u 16.2870u 4.0000u 4.0000u 4.0000u 4.0000u
ibs -2.519e-21 -126.5850a -7.084e-22 -39.1947a -7.084e-22 -39.5947a
ibd -126.5799a -312.8232a -39.1933a -205.9442a -39.5933a -249.5985a
vgs 485.7311m 499.2658m 485.7311m 496.2509m 588.6917m 495.3073m
vds 89.4259m 131.5741m 92.4409m 393.2902m 93.3844m 495.3073m
vbs 0. -89.4259m 0. -92.4409m 0. -93.3844m
vth 413.4486m 432.7054m 417.7046m 435.7746m 363.4334m 435.2584m
```

✓ Comment:

由.lis 檔可以看出在 TT、FF、SS corner 的 Vb 分別為 508.1005mV、472.4245mV、557.6269mV，與在(a)小題使用 ideal voltage source 給的 Vb=550mV 有些差距，且 TT、FF、SS corner mirror 出來的 Iout 電流分別為 15.7334uA、15.3598uA、16.062uA。這是因為 Vth 會隨著製程環境而變，MOS 在 FF corner 的 Vth 最小，在 TT corner 的 Vth 中等，在 SS corner 的 Vth 最大，而依據電流公式： $I_{out} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ ，Vth 變動導致 Iout 電流會改變。而 Vb 會不準確的原因為當作 current mirror 的 M5 和 M6 size 比例時，並未考慮 channel length modulation effect 和 body effect 等等，而影響 mirror 出來的 bias 電壓不準確，且在跑 SS corner 時，M1 和 M3 會跑到 linear region。

為了得到更準確的結果，我調整 M5 的 size 從原本的 W/L=5um/3um 變成 W/L=5um/5um 再做相同的模擬，發現此時電路在 TT、FF、SS corner 下除了 M5 會 Linear 外，其他 MOS 都 saturation；在 TT、FF、SS corner 的 Vb 分別為 538.6641mV、502.0157mV、588.6917mV，更接近(a)小題使用 ideal voltage source 給的 Vb=550mV；在 TT、FF、SS corner mirror 出來的 Iout 電流分別為 15.9551uA、15.5135uA、16.287uA，Iout 電流更接近 16uA。

另外，使用 current mirror 來給 Vb 電壓的好處是可以讓每個 corner 下的 MOS 較容易維持在 saturation region，因為是用固定電流來給 bias 電壓，只要 size 得妥當效果會較使用 ideal voltage source 直接給電壓來的好！

(d)

✓ Calculation:

I. M6's operation region:

因為 M6 的 gate 和 drain 接在一起(diode connected)，所以 $V_{DS6} = V_{GS6}$ ，因此 $V_{DS6} > V_{GS6} - V_{TH6}$ ，我可以知道 M6 一定會在 saturation region。

II. M5's operation region:

因為 M6 的 gate 和 M5 的 gate 接在一起，所以 $V_{G5} = V_{G6}$ 、 $V_{GS6} = V_{G6} - V_{D5}$ ，又

因為 M6 在 saturation region，也就是說 $V_{GS6} > V_{TH}$ ，所以可以得到 $V_{GS6} = V_{G6} - V_{D5} = V_{G5} - V_{D5} = V_{GS5} - V_{DS5} > V_{TH}$ ，也就是 $V_{DS5} < V_{GS5} - V_{TH}$ ，因此 M5 操作在 Linear region。

(e)

✓ **Calculation:**

可以從 M1 和 M2 來計算 V_{IN1} 的電壓，因 M1 和 M2 size 相同，為了使 M1 和 M2 操作在 saturation region， $V_{GS2} = V_{OV2} + V_{TH2}$ 、 $V_{DS1} = V_{OV1}$ ，可以得到 $V_{IN1} = V_{GS2} + V_{DS1} = (V_{OV2} + V_{TH2}) + V_{OV1} = 2V_{OV} + V_{TH}$ 。