

1.

(a)

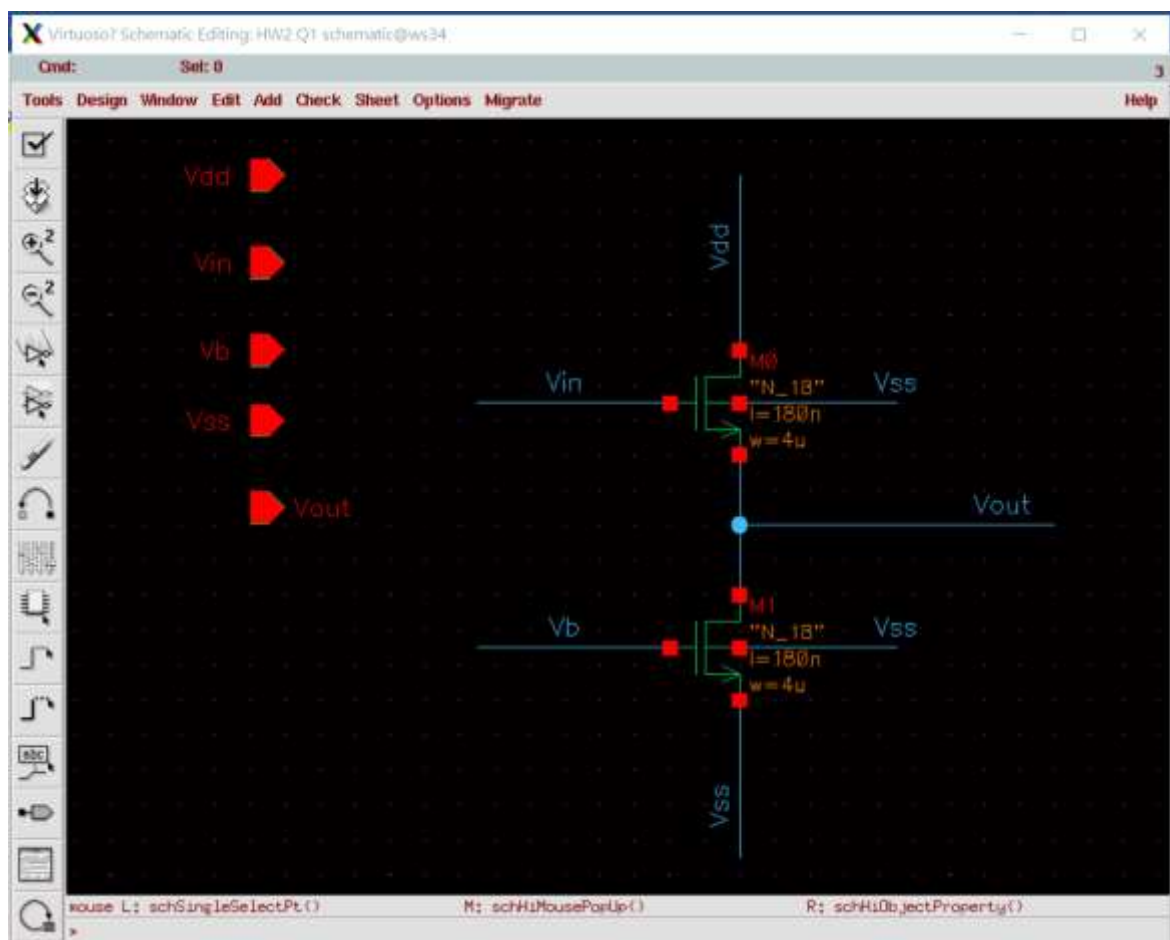
這個電路可以視為一個 CD Amplifier，上方的 MOS 有 body effect，他的 gain 是

$$A_v = \frac{\frac{1}{g_{mb}} || r_{on} || r_{on}}{\frac{1}{g_{mb}} || r_{on} || r_{on} + \frac{1}{g_m}} = \frac{\frac{g_m r_{on}}{2}}{1 + \frac{(g_m + g_{mb}) r_{on}}{2}} \approx \frac{0.5 \cdot g_m r_{on}}{1 + 0.6 \cdot g_m r_{on}} = \frac{\frac{V_A}{V_{ov}}}{2 + 1.2 \cdot \frac{V_A}{V_{ov}}}$$

我們一開始先隨便選定一個 size(W/L = 4um / 180nm)，這時 V_A 、 V_{th} 大致上就是定值，透過上面的

的算式我們，我們可以估計出 V_b 以及 V_{in} 大概為多少

Schematic



```

subckt
element 0:mm1 0:mm0
model 0:n_18.1 0:n_18.1
region Saturation Saturation
id 148.8151u 148.8151u
ibs -2.746e-20 -111.8835a
ibd -111.8286a -638.7565a
vgs 700.0000m 684.8059m
vds 315.1941m 1.4848
vbs 0. -315.1941m
vth 514.6502m 516.1847m
vdsat 184.0524m 177.0519m
vod 185.3498m 168.6212m
beta 7.9459m 7.9857m
gam_eff 507.4481m 515.6125m
gm 1.1212m 1.2461m
gds 114.2538u 48.0260u
gmb 167.3017u 145.9842u
cdtot 5.8846f 4.6881f
cgtot 7.4887f 7.4301f
cstot 10.7136f 10.0710f
cbtot 10.2654f 8.4343f
cgs 5.4132f 5.4177f
cgd 1.4662f 1.4341f

**** small-signal transfer characteristics

v(vout1)/vin = 801.6839m
input resistance at vin = 1.000e+20
output resistance at v(vout1) = 643.8333

```

(b)

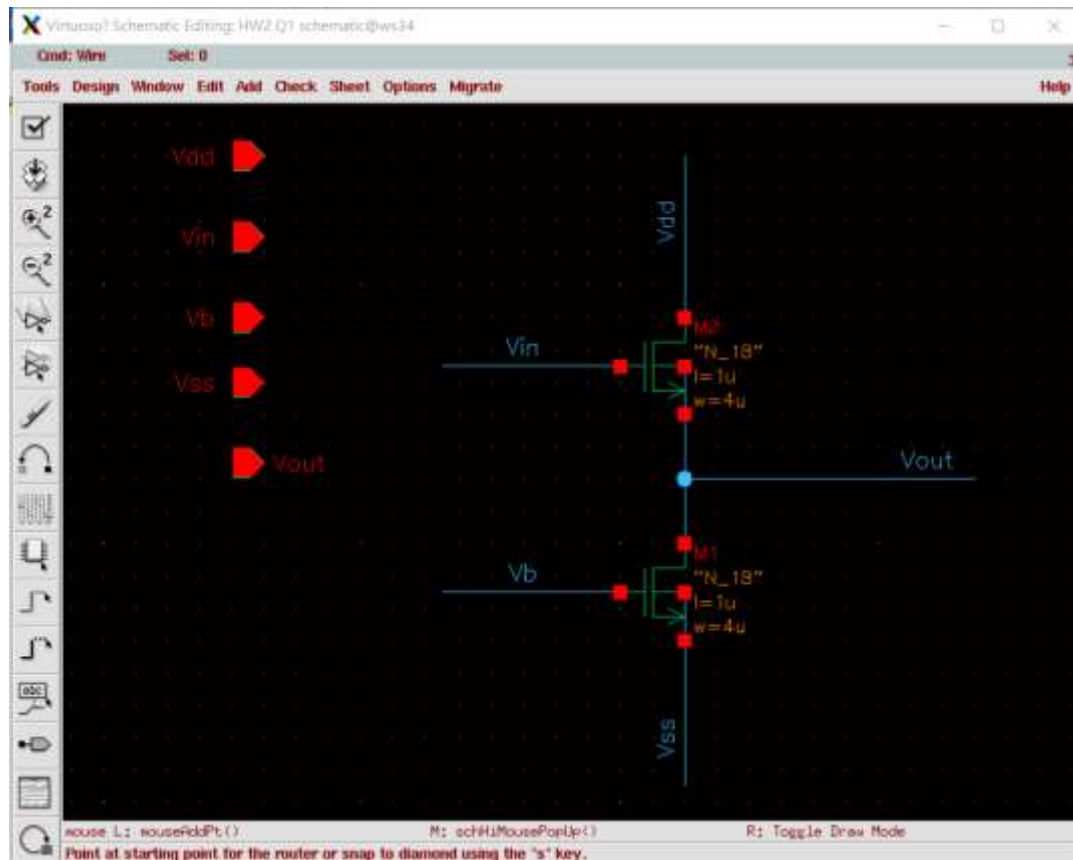
可以使用 deep-n well 後，上方的 MOS 的 body 和 source 就能相接在一起。這樣 body effect 就不見了，這個電路的 gain 變成

$$A_v = \frac{r_{on} || r_{on}}{\frac{1}{g_m} + r_{on} || r_{on}} = \frac{\frac{g_m r_{on}}{2}}{1 + \frac{g_m r_{on}}{2}} = \frac{\frac{V_A}{V_{ov}}}{1 + \frac{V_A}{V_{ov}}}$$

可以發現如果維持原先的 size 和 bias point，gain 應該會變大。但是經過模擬我們會發現不太夠，沒辦法達到 0.96(大概到 0.9)。這時我們有兩個調整方法：1. 調小 V_{ov} 2. 調大 V_A 。第一個方法很容易讓 mos 掉出 saturation，而且我發現對 gain 影響不大，所以我後來嘗試第二個方法。調大 V_A -

> λ 變小 \rightarrow channel length modulation effect 不明顯 \rightarrow 加長 channel length, 調大 L

Schematic



```

subckt
element 0:mm3      0:mm2
model   0:n_18.1   0:n_18.1
region  Saturation Saturation
id      9.1313u     9.1313u
ibs     -1.685e-21  -1.685e-21
ibd     -296.8116a  -341.9690a
vgs     495.0000m    493.6235m
vds     836.3765m    963.6235m
vbs     0.           0.
vth     386.4356m    385.4728m
vdsat   122.7910m    122.5156m
vod     108.5644m    108.1507m
beta    1.2435m      1.2435m
gam_eff 507.4460m    507.4460m
gm       121.6321u    121.7259u
gds      1.3268u      1.3071u
gmb      24.4191u     24.3729u
cdtot    5.2745f      5.1721f
cgtot    27.2742f     27.2674f
cstot    30.6090f     30.5937f
cbtot    14.9684f     14.8695f
cgs      23.6446f     23.6242f
cgd      1.4188f      1.4182f

```

```

****      small-signal transfer characteristics

```

```

v(vout2)/vin2          = 978.8200m
input resistance at    vin2      = 1.000e+20
output resistance at v(vout2)    = 8.0418k

```

- (c) 兩者最大的區別在於(a)有 body effect，在同樣的 size 和 V_{ov} 之下，gain 會比較大。在(b)小題中加入了 deep N-well 讓我們免去 body effect，但也同是造成 gain 變小，此時我們透過改變 channel length(L)，使得 V_A 變小，進而使 gain 達到預期

2.

(a) 這題最困難的地方在於：讓 4 個 MOS 都 bias 在 saturation region。我的思路如下：

我們一開始先不考慮 body effect，這樣 bias point 比較好找，而且離實際結果不會差距太大。

(1) $V_{out-swing} = V_{dd} - V_{ov1} - V_{ov2} - V_{ov3} - V_{ov4} > 1.2$ ，假設我們取 4 者 V_{ov} 相同，那 V_{ov} 就大約 $0.1V - 0.15V$ 。 $V_{out-swing}$ 是這樣算的原因在於我們考慮 V_{out} 這個點的最大電壓為 $V_{dd} - V_{ov1} - V_{ov2}$ (上方兩顆 MOS 在 saturation region)，最低電壓為 $V_{ov3} + V_{ov4}$ (下方兩個點在 saturation region)，因此 maximum $V_{out-swing}$ 就是兩者相減。

(2) 根據上面的 V_{ov} 與 $I_{bias} = 10\mu A$ ，我們可以估計出各個 MOS 的 size，我們可以直接假設上面兩顆 PMOS 的 size 一樣，下面兩顆 NMOS 的 size 一樣。

(3) 此時我們已經有 V_{in} 和 V_{b3} 了，接著考慮 body-effect，調整 V_{b1} , V_{b2} 讓中間兩顆 MOS 都位在 saturation，這部分花最多的時間。目前有得到一個經驗法則：若固定 V_{b1} ，下面在 Sat，上面在 Linear 那要調高 V_{b2} ，反之要調低。

基本上做完第三步之後我們就達到所有的規格了(至少我的狀況是如此，調完就是 $gain = 5000 \gg 300(50dB)$)，若 $gain$ 不夠大，可考慮在 W/L 固定的情況下調高 L ，避免 channel length modulation effect 的影響(固定 I_{bias} ，long channel 能提高 r_o)，這樣 $gain$ 也會隨之上升。

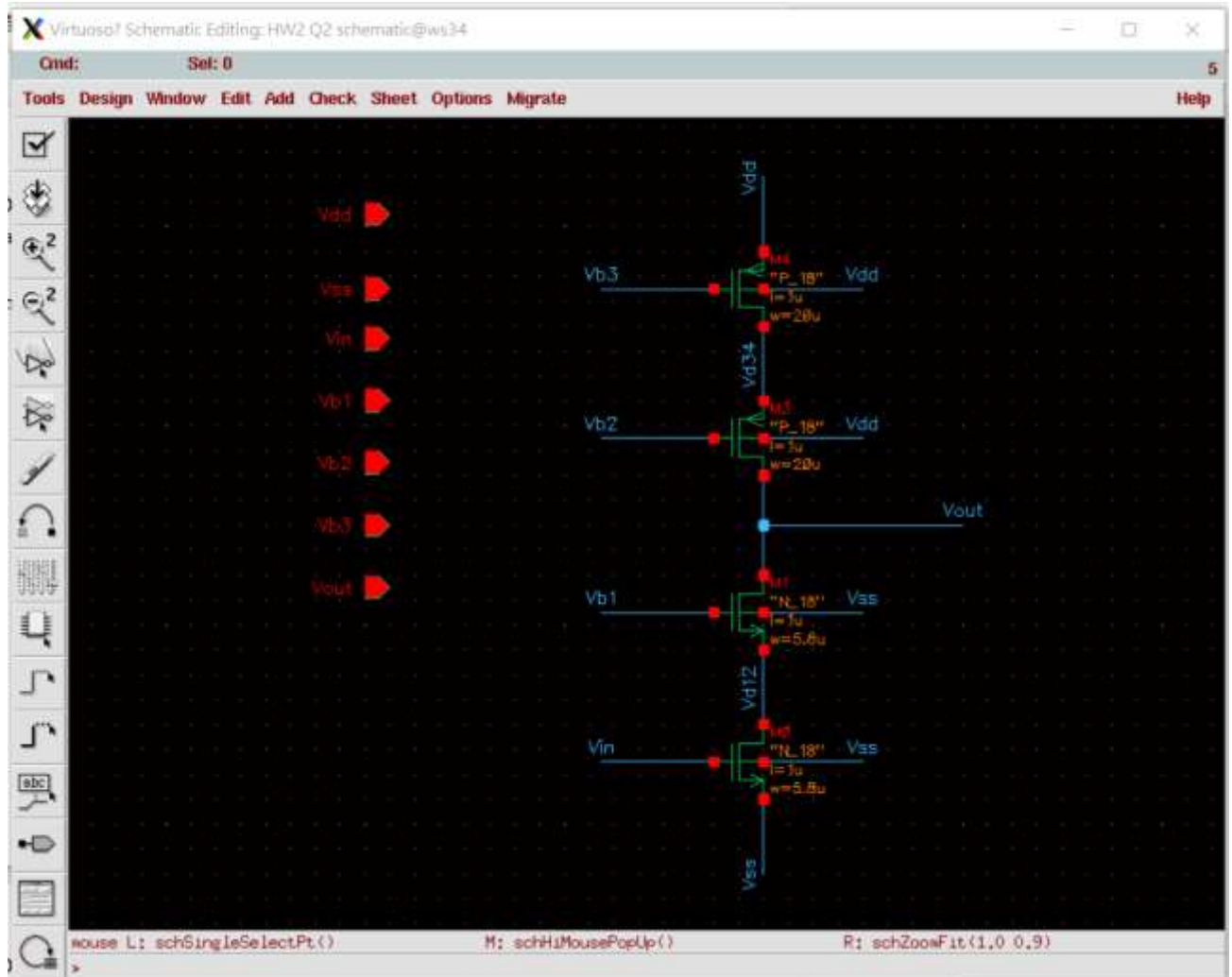
四者的 g_m 應該非常接近，因為 $g_m = 2I_{bias} / V_{ov}$

在不考慮 body effect 的情況下，四者的

$$gain \approx g_m \cdot (g_m r_{ON} r_{ON} // g_m r_{OP} r_{OP}) = \frac{\frac{1}{V_{ov}^2}}{\frac{1}{V_{AN}^2} + \frac{1}{V_{AP}^2}}$$

從第一題的經驗我們可以知道 long channel 可以有效的提高 V_{AN} , V_{AP} ，進而使 $gain$ 變大

Schematic



**** mosfets

subckt

element	0:mm4	0:mm3	0:mm1	0:mm0
model	0:p_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1	0:n_18.1
region	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation
id	-10.1233u	-10.1233u	10.1233u	10.1233u
ibs	9.676e-22	360.1866a	-162.8437a	-1.749e-21
ibd	360.1847a	988.3628a	-349.1344a	-162.8402a
vgs	-600.0000m	-708.1054m	542.0246m	480.0000m
vds	-391.8946m	-683.4799m	386.6501m	337.9754m
vbs	0.	391.8946m	-337.9754m	0.
vth	-494.5685m	-602.2607m	453.7139m	388.7452m
vdsat	-125.6152m	-131.4422m	113.6898m	111.6222m
vod	-105.4315m	-105.8446m	88.3106m	91.2548m
beta	1.4431m	1.3433m	1.8151m	1.8039m
gam_eff	557.0846m	554.4778m	516.1566m	507.4460m
gm	133.7546u	132.9549u	150.0785u	147.4955u
gds	786.7980n	502.6754n	2.1573u	2.0553u
gmb	40.3458u	34.5870u	25.4026u	30.1005u
cdtot	24.5307f	21.5574f	7.7939f	8.4478f
cgtot	127.2912f	126.0916f	38.6850f	39.2080f
cstot	147.4923f	141.2533f	41.9028f	43.7876f
cbtot	75.1540f	63.5110f	19.6095f	22.3759f
cgs	109.9588f	110.5904f	33.6101f	33.8751f
cgd	7.2830f	7.1939f	2.0421f	2.0977f

**** small-signal transfer characteristics

v(vout)/vin	=	-5.3963k
input resistance at	vin	= 1.000e+20
output resistance at v(vout)	=	37.0121x

(b) $m = 2$

```
**** mosfets

subckt
element 0:mm4      0:mm3      0:mm1      0:mm0
model   0:p_18.1   0:p_18.1   0:n_18.1   0:n_18.1
region  Saturation Saturation Saturation Saturation
id      -20.2466u  -20.2466u   20.2466u   20.2466u
ibs     1.935e-21  720.3732a  -325.6874a -3.498e-21
ibd     720.3693a  1.9767f   -698.2688a -325.6804a
vgs     -600.0000m -708.1054m 542.0246m 480.0000m
vds     -391.8946m -683.4799m 386.6501m 337.9754m
vbs     0.         391.8946m -337.9754m 0.
vth     -494.5685m -602.2607m 453.7139m 388.7452m
vdsat   -125.6152m -131.4422m 113.6898m 111.6222m
vod     -105.4315m -105.8446m 88.3106m  91.2548m
beta    2.8862m    2.6866m    3.6301m    3.6077m
gam_eff 557.0846m  554.4778m  516.1566m  507.4460m
gm       267.5093u  265.9099u  300.1571u  294.9910u
gds      1.5736u    1.0054u    4.3147u    4.1106u
gmb      80.6917u   69.1740u   50.8051u   60.2010u
cdtot    49.0615f   43.1147f   15.5879f   16.8957f
cgtot    254.5825f   252.1832f   77.3699f   78.4160f
cstot    294.9845f   282.5066f   83.8057f   87.5752f
cbtot    150.3080f   127.0220f   39.2190f   44.7519f
cgs      219.9175f   221.1808f   67.2202f   67.7503f
cgd      14.5660f   14.3878f    4.0842f    4.1955f

**** small-signal transfer characteristics

v(vout)/vin = -5.3963k
input resistance at vin = 1.000e+20
output resistance at v(vout) = 18.5061x
```

與(a)小題相比，gain 不變，因為根據上述的 gain 公視推導，可發現 gain 與 W/L 無關， $m = 2$ 等效於 W 兩倍(所有 MOS 並連一個與自己一樣的 MOS)，這樣會改變的有： I_{bias} , R_{out} , g_m , r_o 以及各個電容的大小。首先，因為並聯且 V_{ov} 不變，所以電流 double，這造成 g_m 也 double，而 r_o 則因並聯變成 $1/2(g_{ds}$ 變兩倍)，電容則因並聯變兩倍。最後我們看 R_{out} 的部分，

$$R_{out} = (g_m + g_{mb})r_{ON}r_{ON} // (g_m + g_{mb})r_{OP}r_{OP}$$

根據上面提到的 g_m , r_o 的變化，可以清楚的看到 R_{out} 會變成原本的一半

3.

(a) 這題最困難的點在於讓 gain 突破 100，有了前幾題的經驗，我們可以透過調整 V_b, V_{in} ，很輕易的讓兩者都控制在 saturation，但它的 gain 會受到 r_{ON}, r_{OP} 限制，所以我們要盡量讓他們的值大，但同時也要確保 g_m 不能太小。

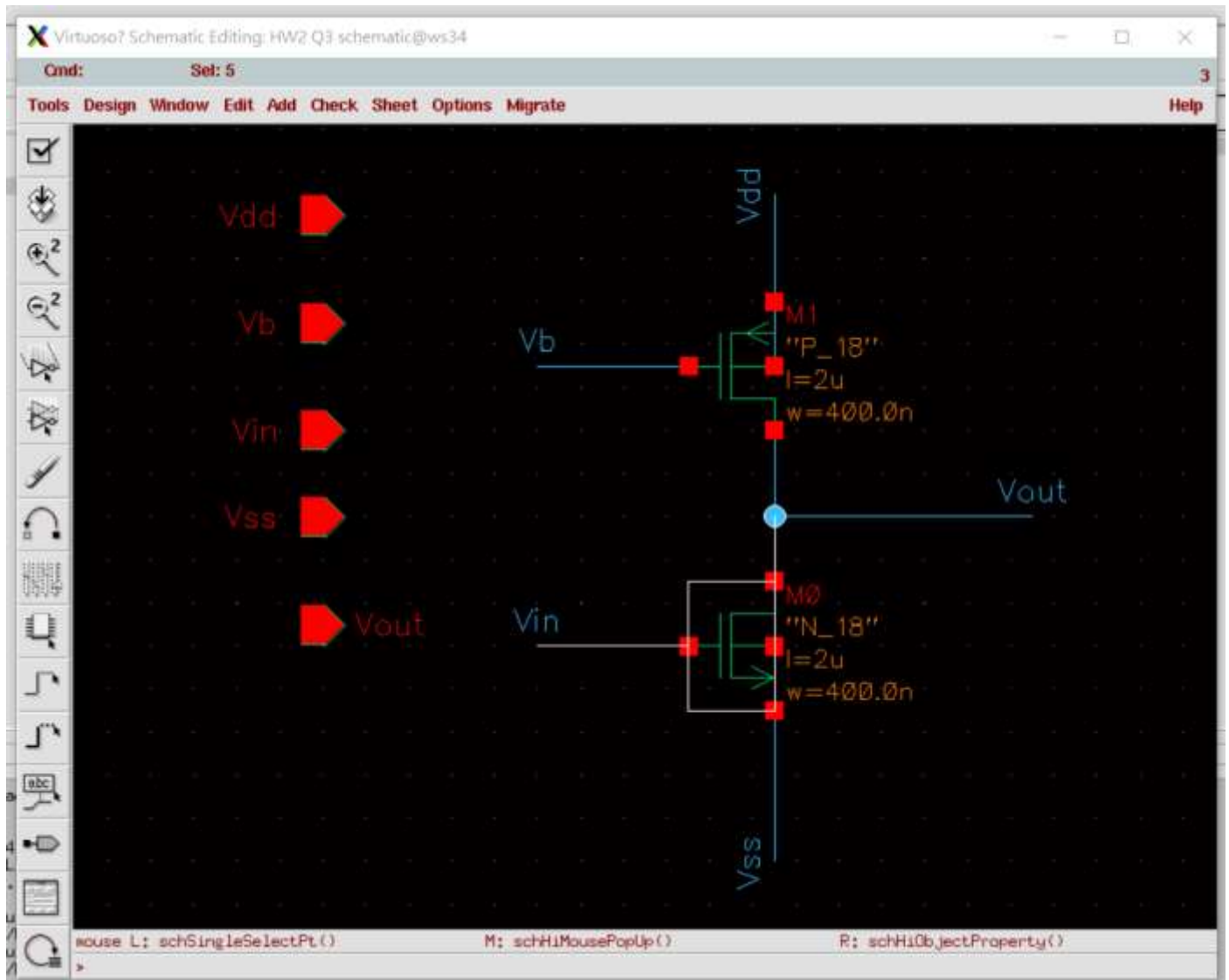
$$gain = g_m(r_{ON} // r_{OP}) = \frac{\frac{2}{V_{ov}}}{\frac{1}{V_{AN}} + \frac{1}{V_{AP}}}$$

我們一樣可以從調大 L 來提升 V_A, V_P ，但我發現這樣不太夠常常 gain 卡在 80 上不去，此時我們就要考慮調整 V_{OV} ，這時就要注意一些事情：

- (1) 兩顆 MOS 的 V_{ov} 不一定一樣，因為 u_n 不等於 u_p (假設他們的 size 相同的情況下)
- (2) 要確保兩者都在 saturation，不要掉到 linear 或是 subthreshold

這部分的調整就很花時間，最後的結果如下：

Schematic



**** mosfets

subckt		
element	0:mm1	0:mm0
model	0:p_18.1	0:n_18.1
region	Saturation	Saturation
id	-91.8768n	91.8790n
ibs	2.933e-23	-4.826e-23
ibd	88.2248a	-36.6585a
vgs	-588.0000m	390.0000m
vds	-1.4371	362.9270m
vbs	0.	0.
vth	-495.8879m	369.3614m
vdsat	-128.2670m	69.4655m
vod	-92.1121m	20.6386m
beta	13.6816u	58.3880u
gam_eff	557.0847m	507.4459m
gm	1.2457u	1.8629u
gds	1.6213n	15.3353n
gmb	367.1297n	383.2179n
cdtot	533.8527a	691.0850a
cgtot	4.8084f	4.1673f
cstot	5.6748f	4.2547f
cbtot	2.6251f	2.4815f
cgs	4.1139f	3.3014f
cgd	143.5632a	143.8402a

**** small-signal transfer characteristics

v(vout)/vin		=	-109.8354
input resistance at	vin	=	1.000e+20
output resistance at v(vout)		=	58.9609x

(b)

SF

```
**** mosfets
```

subckt		
element	0:mm1	0:mm0
model	0:p_18.1	0:n_18.1
region	Linear	Subth
id	-25.4139n	25.4103n
ibs	7.903e-24	-1.385e-23
ibd	7.882e-19	-178.0104a
vgs	-588.0000m	390.0000m
vds	-12.7036m	1.7873
vbs	0.	0.
vth	-448.8844m	418.7983m
vdsat	-163.6996m	51.0524m
vod	-139.1156m	-28.7983m
beta	15.5487u	44.5381u
gam eff	557.0847m	507.4459m
gm	171.5901n	594.6450n
gds	1.9155u	4.1279n
gmb	52.4060n	125.4936n
cdtot	6.0048f	565.4610a
cgtot	6.8167f	2.6069f
cstot	6.6495f	2.1291f
cbtot	2.9551f	2.4622f
cgs	3.9907f	1.3301f
cgd	2.6987f	133.5148a

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

v(vout)/vin		= -309.7711m
input resistance at	vin	= 1.000e+20
output resistance at v(vout)		= 520.9365k

```
**** mosfets
```

```
subckt
element 0:mm1      0:mm0
model   0:p_18.1   0:n_18.1
region  Linear      Saturation
id      -64.0642n   64.0608n
ibs     2.010e-23   -3.427e-23
ibd     2.9188a     -175.8100a
vgs     -588.0000m   390.0000m
vds     -47.2068m    1.7528
vbs     0.          0.
vth     -473.6299m   387.3796m
vdsat   -144.1300m   62.0088m
vod     -114.3701m   2.6204m
beta    14.5820u     54.7645u
gam_eff 557.0847m    507.4459m
gm       550.0913n    1.3715u
gds      1.0784u      10.1745n
gmb      169.1522n    275.7447n
cdtot    3.8297f      586.2832a
cgtot    6.0783f      3.5011f
cstot    5.9982f      3.4338f
cbtot    2.8706f      2.3993f
cgs      4.1876f      2.5062f
cgd      1.6514f      141.9329a
```

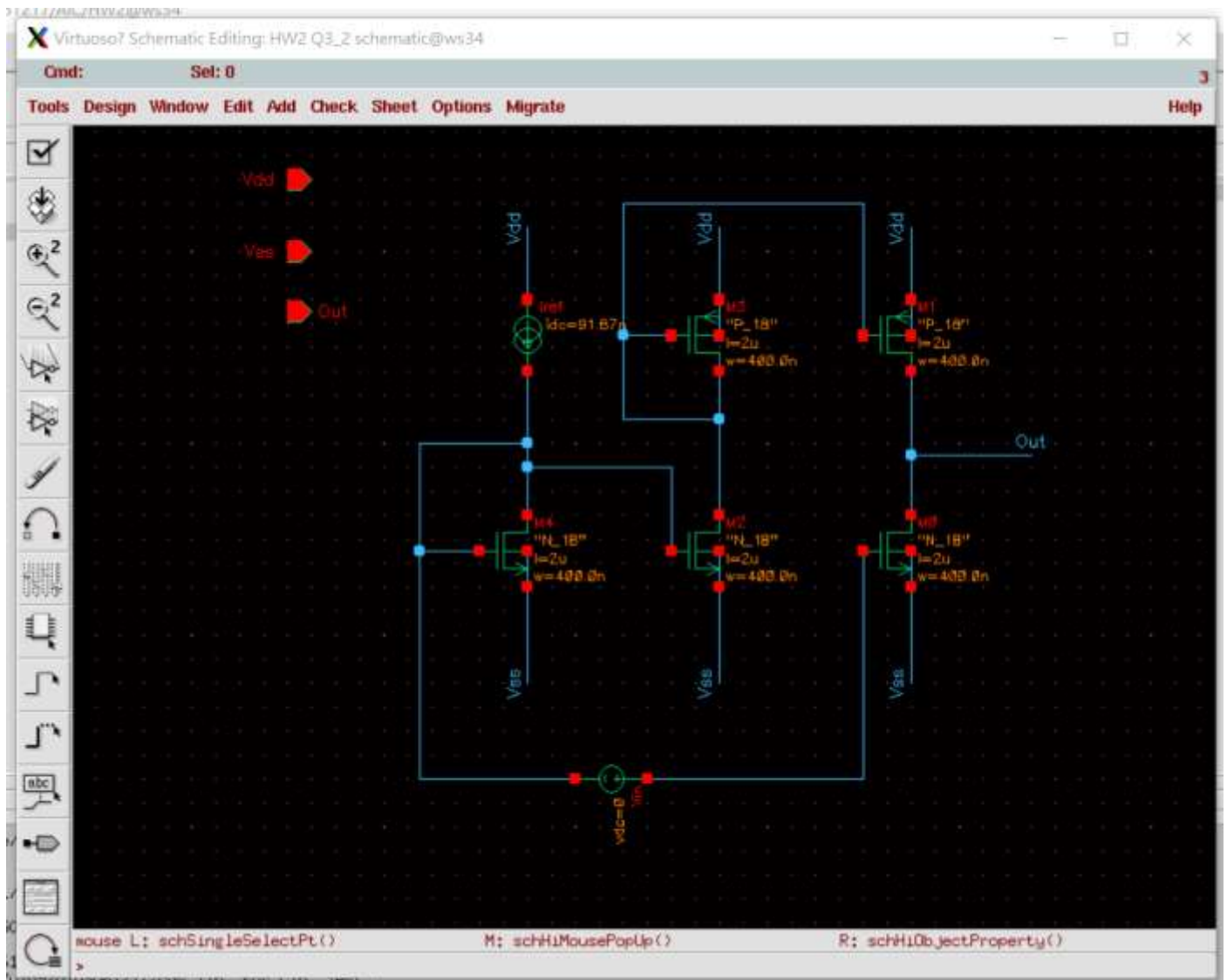
```
****      small-signal transfer characteristics
```

```
v(vout)/vin      =  -1.2599
input resistance at vin      =  1.000e+20
output resistance at v(vout) =  918.6708k
```

(c)

我們保持所有的 MOS 的 size 與(a)一樣，取 $I_{ref} = (a)$ 的 I_{bias} 。這樣取的原因在於：三者的 NMOS 的 V_{ov} 是一樣的，只要三者的 size 是相同的，流過三者的電流應該是一樣的(都是 I_{ref})。這樣我們就能利用在(a)找到的 operating point 和 I_{bias} 來幫我們達到規格($gain > 100$)。

Schematic



TT

**** mosfets

subckt					
element	0:mm4	0:mm3	0:mm2	0:mm1	0:mm0
model	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1
region	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation
id	91.8692n	-104.2286n	104.2274n	-104.2286n	104.2274n
ibs	-4.825e-23	3.327e-23	-5.475e-23	3.327e-23	-5.475e-23
ibd	-39.3704a	36.7641a	-121.3265a	36.7641a	-121.3265a
vgs	389.7752m	-598.8423m	389.7752m	-598.8423m	389.7752m
vds	389.7752m	-598.8423m	1.2012	-598.8423m	1.2012
vbs	0.	0.	0.	0.	0.
vth	369.2289m	-495.8879m	365.2234m	-495.8879m	365.2234m
vdsat	69.4242m	-136.0541m	71.2456m	-136.0541m	71.2456m
vod	20.5463m	-102.9544m	24.5518m	-102.9544m	24.5518m
beta	58.3867u	13.6592u	58.3684u	13.6592u	58.3684u
gam_eff	507.4459m	557.0847m	507.4459m	557.0847m	507.4459m
gm	1.8631u	1.3503u	2.0695u	1.3503u	2.0695u
gds	15.1435n	2.8946n	15.7670n	2.8946n	15.7670n
gmb	383.0599n	398.1065n	418.1479n	398.1065n	418.1479n
cdtot	686.2722a	611.5877a	595.0012a	611.5877a	595.0012a
cgtot	4.1638f	4.8648f	4.2776f	4.8648f	4.2776f
cstot	4.2512f	5.7562f	4.4044f	5.7562f	4.4044f
cbtot	2.4771f	2.7020f	2.3902f	2.7020f	2.3902f
cgs	3.2970f	4.1863f	3.4265f	4.1863f	3.4265f
cgd	143.6265a	144.8952a	142.1157a	144.8952a	142.1157a

**** small-signal transfer characteristics

v(out)/vin		=	-110.8713
input resistance at	vin	=	1.000e+20
output resistance at v(out)		=	53.5753x

```
**** mosfets
```

subckt	0:mm4	0:mm3	0:mm2	0:mm1	0:mm0
element	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1
model	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation
id	91.8692n	-104.2286n	104.2274n	-104.2286n	104.2274n
ibs	-4.825e-23	3.327e-23	-5.475e-23	3.327e-23	-5.475e-23
ibd	-39.3704a	36.7641a	-121.3265a	36.7641a	-121.3265a
vgs	389.7752m	-598.8423m	389.7752m	-598.8423m	389.7752m
vds	389.7752m	-598.8423m	1.2012	-598.8423m	1.2012
vbs	0.	0.	0.	0.	0.
vth	369.2289m	-495.8879m	365.2234m	-495.8879m	365.2234m
vdsat	69.4242m	-136.0541m	71.2456m	-136.0541m	71.2456m
vod	20.5463m	-102.9544m	24.5518m	-102.9544m	24.5518m
beta	58.3867u	13.6592u	58.3684u	13.6592u	58.3684u
gam_eff	507.4459m	557.0847m	507.4459m	557.0847m	507.4459m
gm	1.8631u	1.3503u	2.0695u	1.3503u	2.0695u
gds	15.1435n	2.8946n	15.7670n	2.8946n	15.7670n
gmb	383.0599n	398.1065n	418.1479n	398.1065n	418.1479n
cdtot	686.2722a	611.5877a	595.0012a	611.5877a	595.0012a
cgtot	4.1638f	4.8648f	4.2776f	4.8648f	4.2776f
cstot	4.2512f	5.7562f	4.4044f	5.7562f	4.4044f
cbtot	2.4771f	2.7020f	2.3902f	2.7020f	2.3902f
cgs	3.2970f	4.1863f	3.4265f	4.1863f	3.4265f
cgd	143.6265a	144.8952a	142.1157a	144.8952a	142.1157a

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

v(out)/vin	=	-110.8713
input resistance at	vin	= 1.000e+20
output resistance at v(out)	=	53.5753x


```
**** mosfets
```

subckt	0:mm4	0:mm3	0:mm2	0:mm1	0:mm0
element	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1
region	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation
id	91.8692n	-104.2286n	104.2274n	-104.2286n	104.2274n
ibs	-4.825e-23	3.327e-23	-5.475e-23	3.327e-23	-5.475e-23
ibd	-39.3704a	36.7641a	-121.3265a	36.7641a	-121.3265a
vgs	389.7752m	-598.8423m	389.7752m	-598.8423m	389.7752m
vds	389.7752m	-598.8423m	1.2012	-598.8423m	1.2012
vbs	0.	0.	0.	0.	0.
vth	369.2289m	-495.8879m	365.2234m	-495.8879m	365.2234m
vdsat	69.4242m	-136.0541m	71.2456m	-136.0541m	71.2456m
vod	20.5463m	-102.9544m	24.5518m	-102.9544m	24.5518m
beta	58.3867u	13.6592u	58.3684u	13.6592u	58.3684u
gam_eff	507.4459m	557.0847m	507.4459m	557.0847m	507.4459m
gm	1.8631u	1.3503u	2.0695u	1.3503u	2.0695u
gds	15.1435n	2.8946n	15.7670n	2.8946n	15.7670n
gmb	383.0599n	398.1065n	418.1479n	398.1065n	418.1479n
cdtot	686.2722a	611.5877a	595.0012a	611.5877a	595.0012a
cgtot	4.1638f	4.8648f	4.2776f	4.8648f	4.2776f
cstot	4.2512f	5.7562f	4.4044f	5.7562f	4.4044f
cbtot	2.4771f	2.7020f	2.3902f	2.7020f	2.3902f
cgs	3.2970f	4.1863f	3.4265f	4.1863f	3.4265f
cgd	143.6265a	144.8952a	142.1157a	144.8952a	142.1157a

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

v(out)/vin	=	-110.8713
input resistance at	vin	= 1.000e+20

**** mosfets

subckt	0:mm4	0:mm3	0:mm2	0:mm1	0:mm0
element	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1	0:p_18.1	0:n_18.1
model	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation	Saturation
region	id	id	id	id	id
id	91.8691n	-100.9200n	100.9190n	-100.9200n	100.9190n
ibs	-5.008e-23	3.343e-23	-5.502e-23	3.343e-23	-5.502e-23
ibd	-45.7772a	40.0769a	-113.3176a	40.0769a	-113.3176a
vgs	459.6219m	-662.2453m	459.6219m	-662.2453m	459.6219m
vds	459.6219m	-662.2453m	1.1378	-662.2453m	1.1378
vbs	0.	0.	0.	0.	0.
vth	425.0014m	-546.8086m	421.8331m	-546.8086m	421.8331m
vdsat	75.0564m	-145.4397m	76.6196m	-145.4397m	76.6196m
vod	34.6205m	-115.4367m	37.7887m	-115.4367m	37.7887m
beta	44.6641u	11.2461u	44.6580u	11.2461u	44.6580u
gam_eff	507.4459m	557.0847m	507.4459m	557.0847m	507.4459m
gm	1.7571u	1.2383u	1.8967u	1.2383u	1.8967u
gds	13.2274n	2.4304n	13.6827n	2.4304n	13.6827n
gmb	374.6381n	372.4583n	398.8353n	372.4583n	398.8353n
cdtot	691.9742a	626.5777a	612.0220a	626.5777a	612.0220a
cgtot	4.5906f	4.7652f	4.6606f	4.7652f	4.6606f
cstot	4.8812f	5.7665f	4.9754f	5.7665f	4.9754f
cbtot	2.6129f	2.7799f	2.5362f	2.7799f	2.5362f
cgs	3.7974f	4.1153f	3.8745f	4.1153f	3.8745f
cgd	125.0047a	129.8753a	123.8831a	129.8753a	123.8831a

**** small-signal transfer characteristics

v(out)/vin	=	-117.6852
input resistance at	vin	= 1.000e+20
output resistance at v(out)	=	62.0467x

FF

```
**** mosfets

subckt
element 0:mm4      0:mm3      0:mm2      0:mm1      0:mm0
model   0:n_18.1   0:p_18.1   0:n_18.1   0:p_18.1   0:n_18.1
region  Saturation Saturation Saturation Saturation Saturation
id      91.8693n   -106.6439n  106.6424n  -106.6439n  106.6424n
ibs     -4.644e-23  3.317e-23  -5.391e-23  3.317e-23  -5.391e-23
ibd     -34.0853a   33.7174a  -128.8756a   33.7174a  -128.8756a
vgs     332.3469m  -543.4053m  332.3469m  -543.4053m  332.3469m
vds     332.3469m  -543.4053m   1.2566    -543.4053m   1.2566
vbs      0.         0.         0.         0.         0.
vth     318.4182m  -448.8846m  313.8468m  -448.8846m  313.8468m
vdsat   66.8504m  -130.0708m   68.8398m  -130.0708m   68.8398m
vod     13.9287m  -94.5208m   18.5001m  -94.5208m   18.5001m
beta    67.0037u   15.6835u    66.9689u   15.6835u    66.9689u
gam_eff 507.4459m   557.0847m   507.4459m   557.0847m   507.4459m
gm       1.9164u    1.4356u     2.1729u     1.4356u     2.1729u
gds     16.1374n    3.2684n     16.6435n    3.2684n     16.6435n
gmb     383.1505n   409.6378n   425.6554n   409.6378n   425.6554n
cdtot   678.0369a   597.2091a   579.1750a   597.2091a   579.1750a
cgtot   4.2684f      5.1818f     4.4209f     5.1818f     4.4209f
cstot   4.1824f      5.9802f     4.3882f     5.9802f     4.3882f
cbtot   2.4794f      2.6827f     2.3865f     2.6827f     2.3865f
cgs      3.2924f     4.4536f     3.4673f     4.4536f     3.4673f
cgd     162.1195a   161.3157a   159.9628a   161.3157a   159.9628a

**** small-signal transfer characteristics

v(out)/vin = -109.1024
input resistance at vin = 1.000e+20
output resistance at v(out) = 50.2118x
```

(d) 可以發現由 DC bias voltage generator 產生 V_{in} 的電路在各個 corner(TT, SF, FS, FF, SS)都能達到規格，且所以 MOS 都在 saturation region。而(a)小題的電路則很容易掉出 saturation，改變 corner 主要是讓我們模擬 process variation，第一個電路我們最後在調整 V_{ov} 時就會跟 process variation 很有關係，因為只要有些微 process variation 導致 V_{th} 改變，MOS 就不會 bias 在 saturation region 內了。而運用 DC bias voltage generator 的好處在於它不是依靠直接調整 V_{ov} 來達到目的，而是透過 I_{ref} 來決定 V_{ov} ，再利用 MOS 的 size matching 來將電流特性(I_{bias})和偏壓點

(V_{ov})複製過來，不論 process variation 如何，我們能確保兩顆 MOS 的 size, characteristic 是 matching 的，而且還將某幾顆 MOS 皆呈 diode connect 來確保一定會掉在 saturation region。

然而這樣的缺點也很明顯：運用多顆 MOS，它的 cost 一定比較高、面積比較大以及 power consumption 一定比較高。