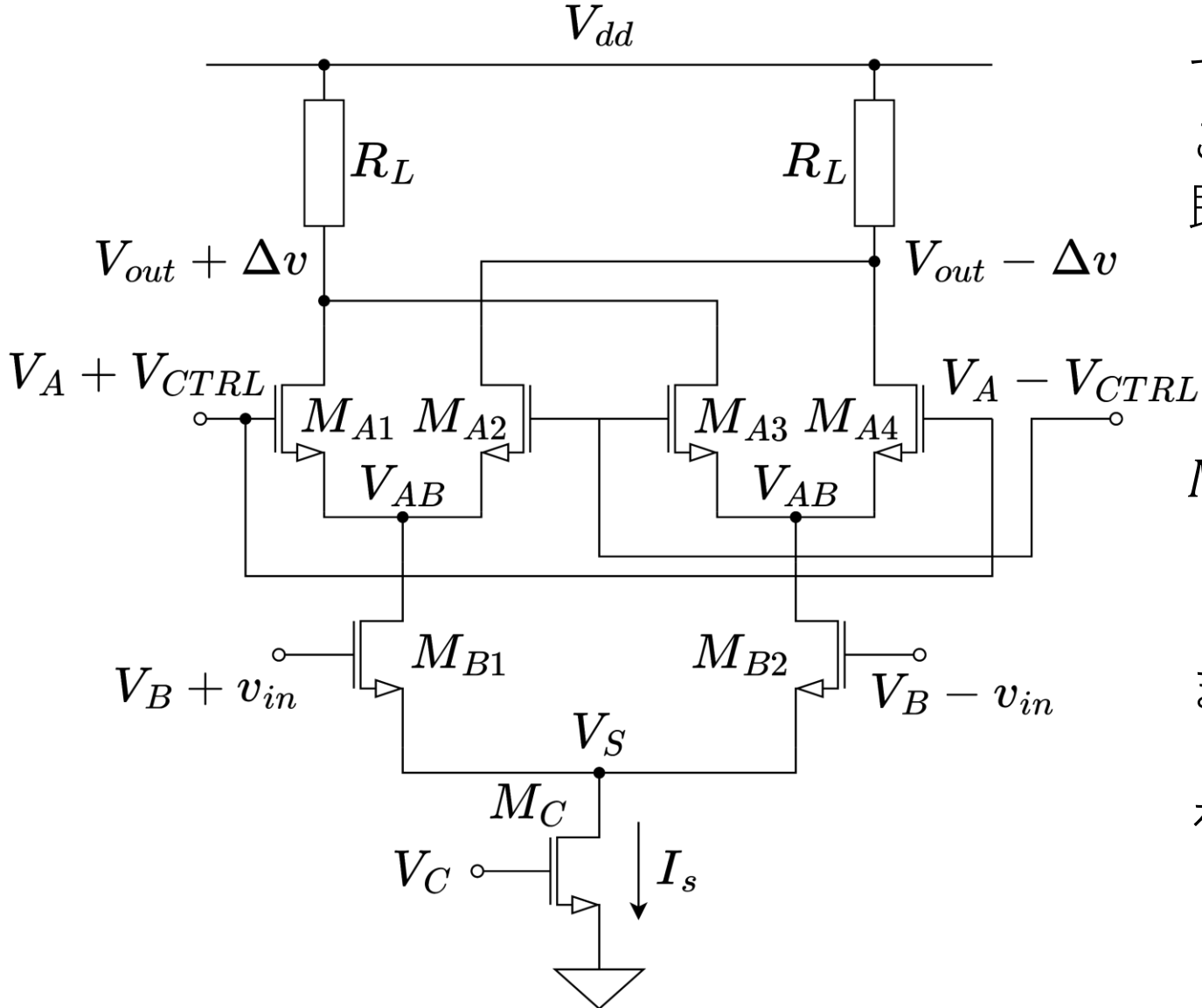


# 進捗報告

従来型ギルバート乗算回路の設計

2023/07/04 小島 光

# 直流設計－電圧範囲



すべてのMOSを飽和領域で動作させることが条件

即ち、以下の2式が制約となる。

$$V_{th} < V_{GS} \quad (1)$$

$$V_{GS} - V_{th} < V_{DS} \quad (2)$$

$M_B$ について、(1)式より

$$V_{th} < (V_B - v_{in}) - V_S$$

$$V_{th} + V_S + v_{in} < V_B \quad (1_B)$$

また、(2)式より

$$(V_B + v_{in}) - V_S - V_{th} < V_{AB} - V_S \quad (2_B)$$

を得る。

# 直流設計－電圧範囲

$$V_{th} + V_S + v_{in} < V_B \quad (1_B)$$

$$(V_B + v_{in}) - V_{th} - V_S < V_{AB} - V_S \quad (2_B)$$

(1<sub>B</sub>)、(2<sub>B</sub>)より  $V_B$  の範囲(3)式と  $V_{AB}$  の下限(4)が導かれた。

$$V_{th} + V_S + v_{in} < V_B < V_{AB} + V_{th} - v_{in} \quad (3)$$

$$V_B + v_{in} - V_{th} < V_{AB} \quad (4)$$

$M_A$ について同様に(1)式より

$$V_{th} < (V_A - V_{CTRL}) - V_{AB}$$

$$V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} < V_A \quad (1_A)$$

(2)式より

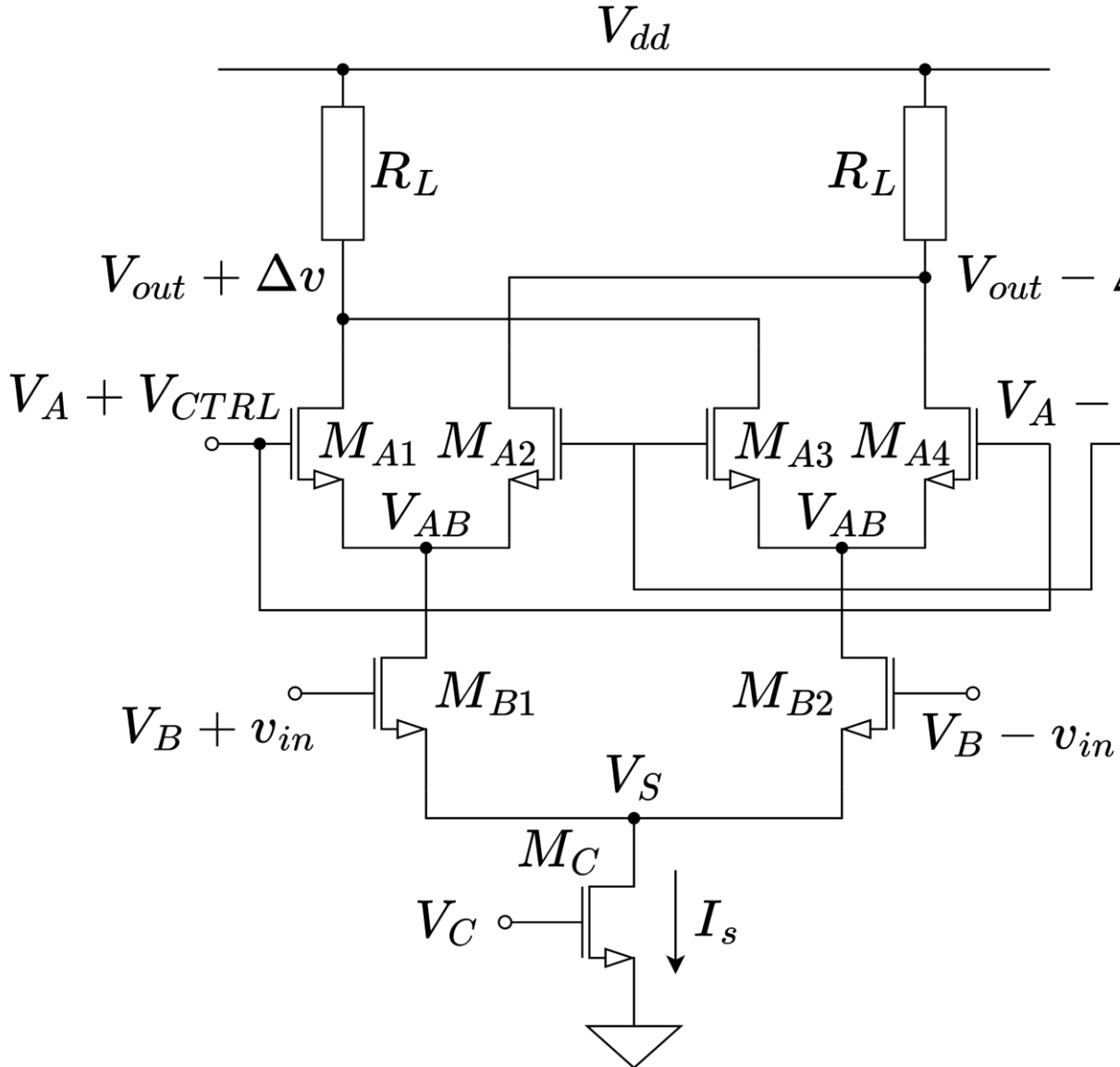
$$(V_A + V_{CTRL} - V_{AB}) - V_{th} < V_{out} - \Delta v - V_{AB} \quad (2_A)$$

(1<sub>A</sub>)、(2<sub>A</sub>)より  $V_A$  の範囲(5)式と  $V_{out}$  の下限(6)が導かれた。

$$V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} < V_A < V_{out} - \Delta v - V_{CTRL} + V_{AB} + V_{th} \quad (5)$$

$$V_A + V_{CTRL} - V_{th} < V_{out} - \Delta v \quad (6)$$

# 直流設計 - 電圧範囲



設計要件

- $v_{in} = \pm 200 \text{ mV}$
- $V_{CTRL} = \pm 200 \text{ mV}$

$$V_{th} + V_S + v_{in} < V_B < V_{AB} + V_{th} - v_{in} \quad (3)$$

$$V_B + v_{in} - V_{th} < V_{AB} \quad (4)$$

$$V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} < V_A < V_{out} - \Delta v + V_{AB} - V_{CTRL} + V_{th} \quad (5)$$

$$V_A + V_{CTRL} - V_{th} < V_{out} - \Delta v \quad (6)$$

$\Delta v = \pm 300 \text{ mV}$  とすると

$$V_{out} = V_{dd} - \Delta v = 1.5 \text{ V}$$

と決められた。

# 直流設計－電圧範囲

今回はしきい電圧を $V_{th} = 0.5 \text{ V}$ と一定値として計算した。

(6)式より

$$\begin{aligned} V_A + V_{CTRL} - V_{th} &< V_{out} - \Delta v \\ V_A &< V_{out} - V_{CTRL} + V_{th} - \Delta v = 1.5 - 0.2 + 0.5 - 0.2 = 1.6 \\ \therefore V_A &< 1.6 \quad (7) \end{aligned}$$

(5)式、(7)式より

$$\begin{aligned} V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} &< V_A < 1.6 \\ V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} &< 1.6 \\ V_{AB} &< 1.6 - V_{th} - V_{CTRL} = 1.6 - 0.5 - 0.2 = 0.9 \\ \therefore V_{AB} &< 0.9 \quad (8) \end{aligned}$$

(4)式、(8)式より

$$\begin{aligned} V_B + v_{in} - V_{th} &< V_{AB} < 0.9 \\ V_B &< 0.9 - v_{in} + V_{th} = 0.9 - 0.2 + 0.5 = 1.2 \\ \therefore V_B &< 1.2 \quad (9) \end{aligned}$$

# 直流設計－電圧範囲

(3)式、(9)式より

$$\begin{aligned} V_{th} + V_S + v_{in} &< V_B < 1.2 \\ V_S &< 1.2 - V_{th} - v_{in} = 1.2 - 0.5 - 0.2 = 0.5 \\ \therefore V_S &< 0.5 \quad (10) \end{aligned}$$

$V_S$ を定数と考えると、(3)式より

$$\begin{aligned} V_{th} + V_S + v_{in} &< V_B < 1.2 \\ 0.5 + V_S + 0.2 &< V_B \\ V_S + 0.7 &< V_B < 1.2 \quad (11) \end{aligned}$$

(4)式、(11)式より

$$\begin{aligned} V_B + v_{in} - V_{th} &< V_{AB} < 0.9 \\ V_S + 0.7 + v_{in} - V_{th} &< V_{AB} \\ V_S + 0.7 + 0.2 - 0.5 &< V_{AB} \\ V_S + 0.4 &< V_{AB} < 0.9 \quad (12) \end{aligned}$$

# 直流設計－電圧範囲

(5)式、(12)式より

$$\begin{aligned} V_{th} + V_{AB} + V_{CTRL} &< V_A < 1.6 \\ V_{th} + V_S + 0.4 + V_{CTRL} &< V_A \\ 0.5 + V_S + 0.4 + 0.2 &< V_A \\ V_S + 1.1 &< V_A < 1.6 \end{aligned} \quad (13)$$

以上をまとめると

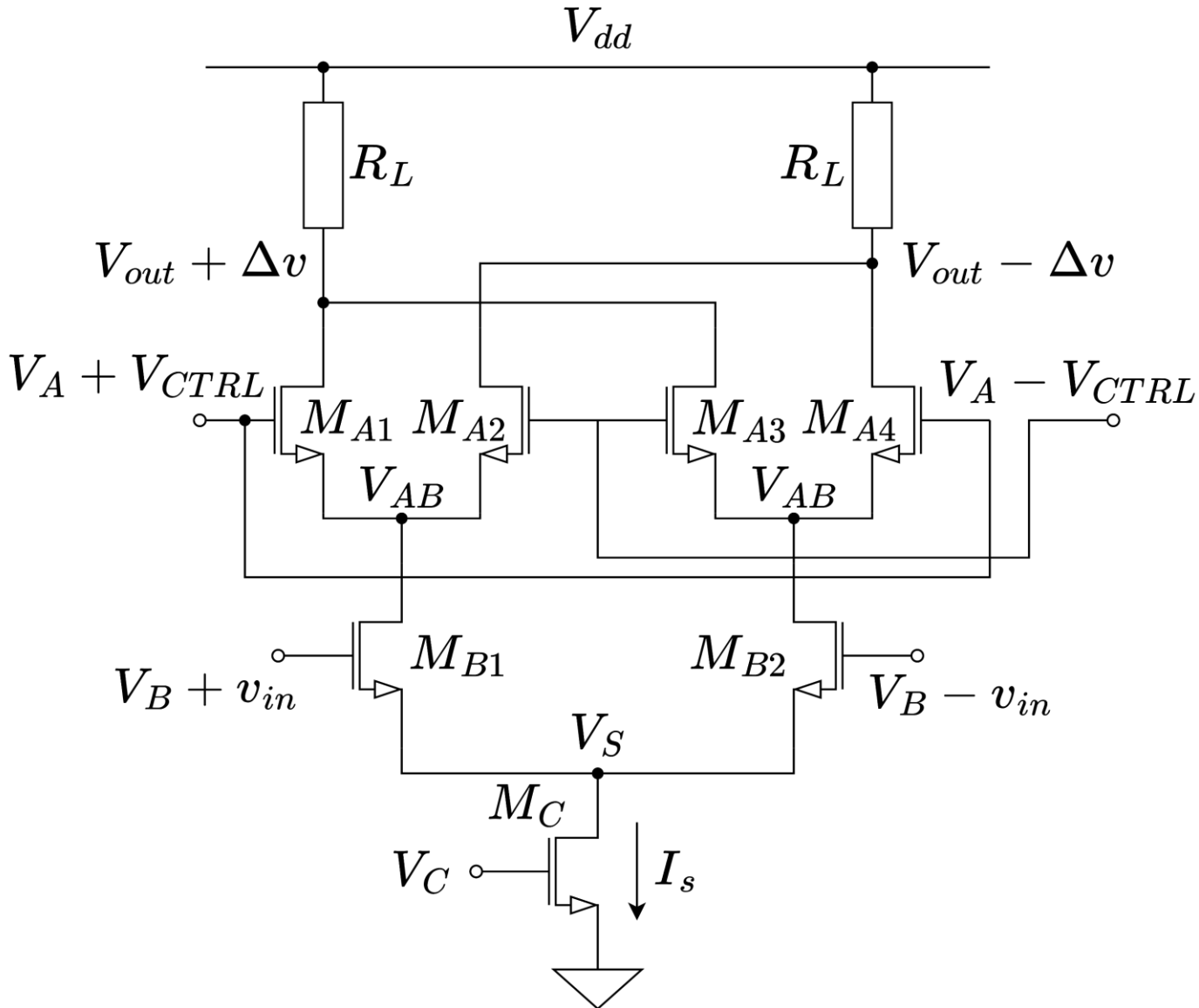
$$V_S < 0.5 \quad (10)$$

$$V_S + 0.7 < V_B < 1.2 \quad (11)$$

$$V_S + 0.4 < V_{AB} < 0.9 \quad (12)$$

$$V_S + 1.1 < V_A < 1.6 \quad (13)$$

# 直流設計 - 電圧範囲



ギルバート乗算回路の利得について、

$$v_{out} \equiv \Delta v - (-\Delta v) = 2\Delta v$$

$$= 4\sqrt{2K_A K_B} \cdot V_{CTRL} \cdot v_{in}$$

で計算できる。ただし、 $K_A, K_B$ はそれぞれ  $M_A, M_B$  の  $\frac{\mu C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L}$  である。

$M_A, M_B$  の  $V_{GS}$  がそれぞれ等しいとき、電流の比から

$$K_B = 2K_A$$

である。したがって

$$v_{out} = 8K_A \cdot V_{CTRL} \cdot v_{in}$$

と書ける。



# 直流設計－電圧範囲

今回は $V_S = 0.3 \text{ V}$ 、 $I_S = 1 \text{ mA}$ とした。  
この時、

$$1.0 < V_B < 1.2$$

$$0.7 < V_{AB} < 0.9$$

$$1.4 < V_A < 1.6$$

であり、 $V_B - V_S = V_A - V_{AB}$ を仮定している。 $V_B, V_{AB}, V_A$ を範囲の中間で使えば、 $V_B = 1.1 \text{ V}, V_{AB} = 0.8 \text{ V}, V_A = 1.5 \text{ V}$ と決められる。

実際には基板バイアス効果により、 $M_A$ と $M_B$ のしきい電圧が異なるので、mos単体でのシミュレーションを行いゲートソース間電圧を調整した。

# $M_C$ の設計

$V_{GS} - V_{th} < V_{DS}, V_{th} < V_{GS}, V_{th} = 0.5 \text{ V}$  より

$$0.5 < V_C < 0.8$$

したがって  $V_C = 0.65 \text{ V}$  程度でシミュレーションし、値を合わせこんだ。その結果が右の  $I_D - V_{GS}$  特性であり、 $V_C = 0.65 \text{ V}$  の時約  $4 \text{ mA}$  となっている。

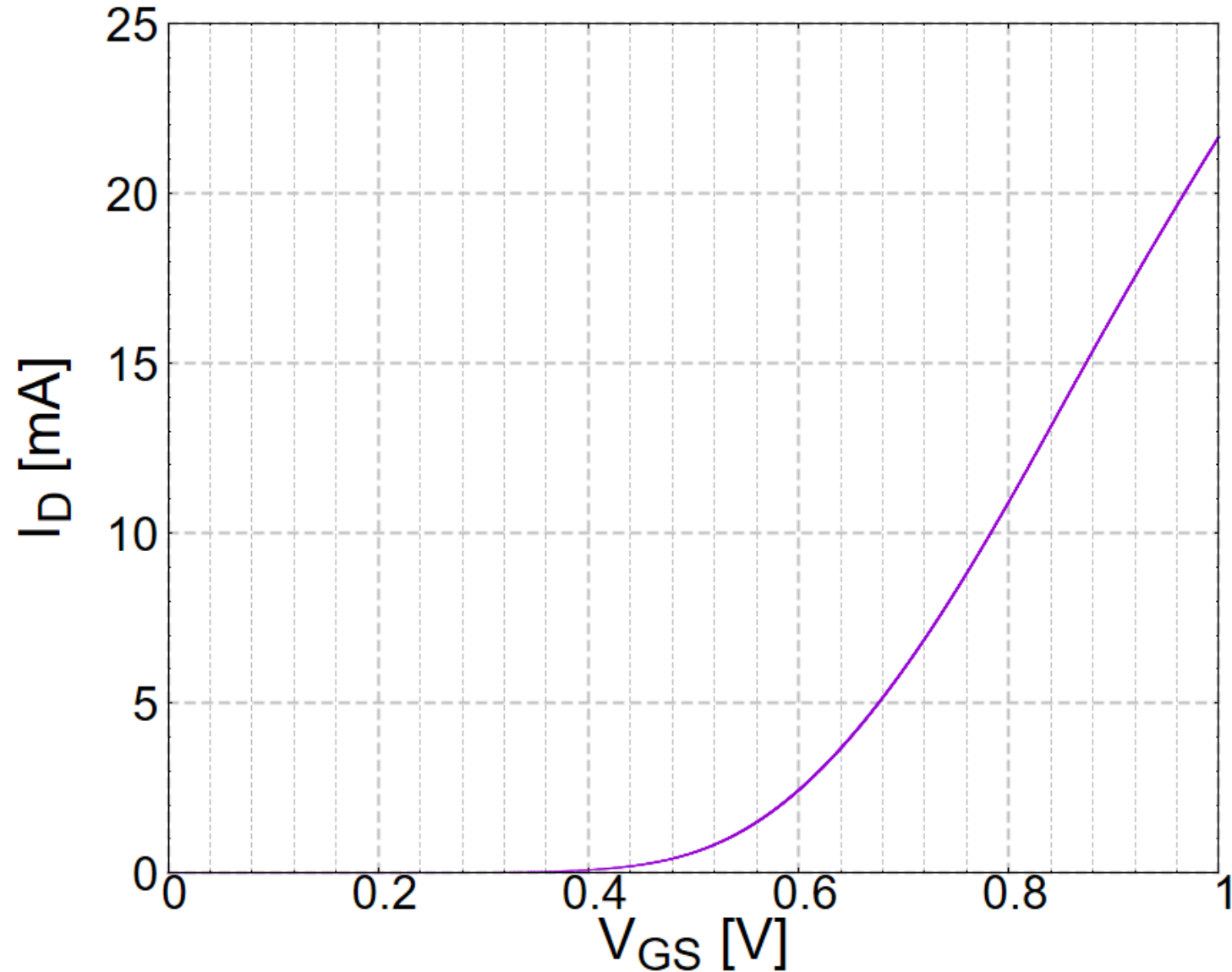
シミュレーションでは  $V_{DS} = 0.3 \text{ V}$  でバックゲートはソースと同電位とした。

この時の形状は以下の通り。

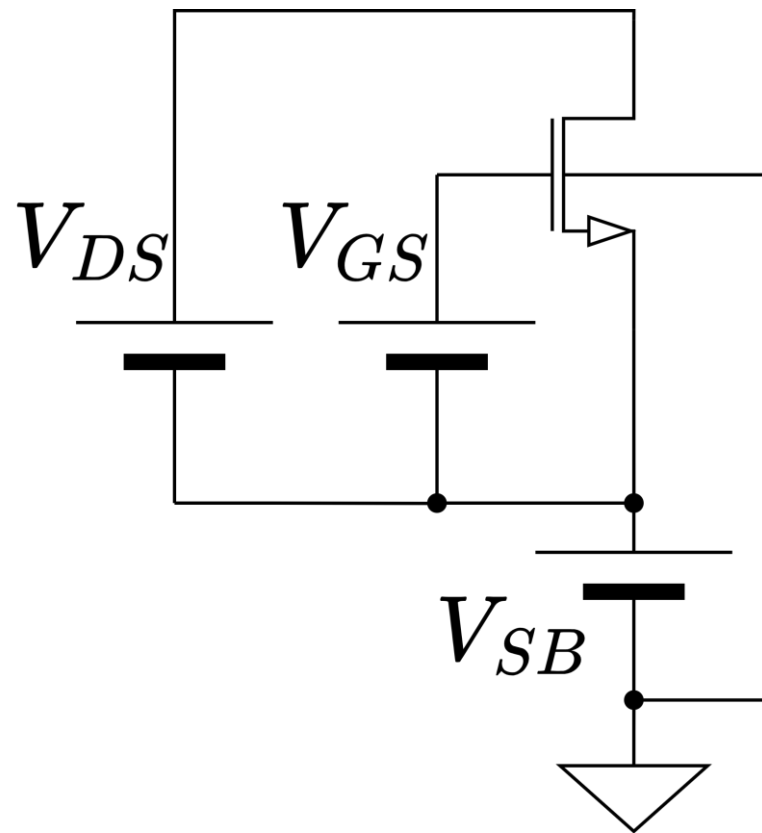
チャネル長： $0.72 \mu\text{m}$

チャネル幅： $11.6 \mu\text{m}$

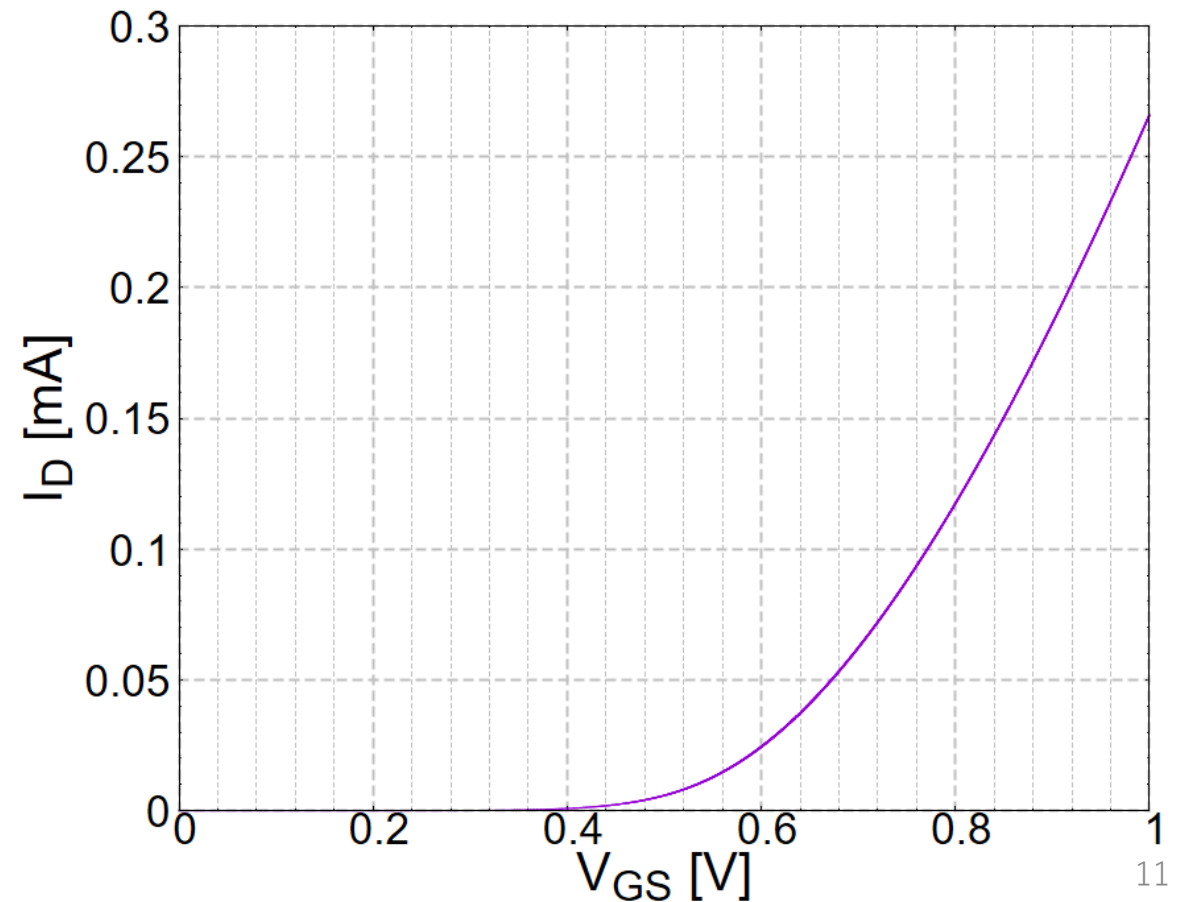
並列数：40



# $M_A, M_B$ の設計



まず、左に示す回路を用いて、  
 $L = 0.74 \mu\text{m}$ ,  $W = 5 \mu\text{m}$ ,  $M = 1$ ,  $V_{SB} = 0 \text{ V}$   
の条件でシミュレーションを行った。  
下のグラフは  $I_D - V_{GS}$  特性である。

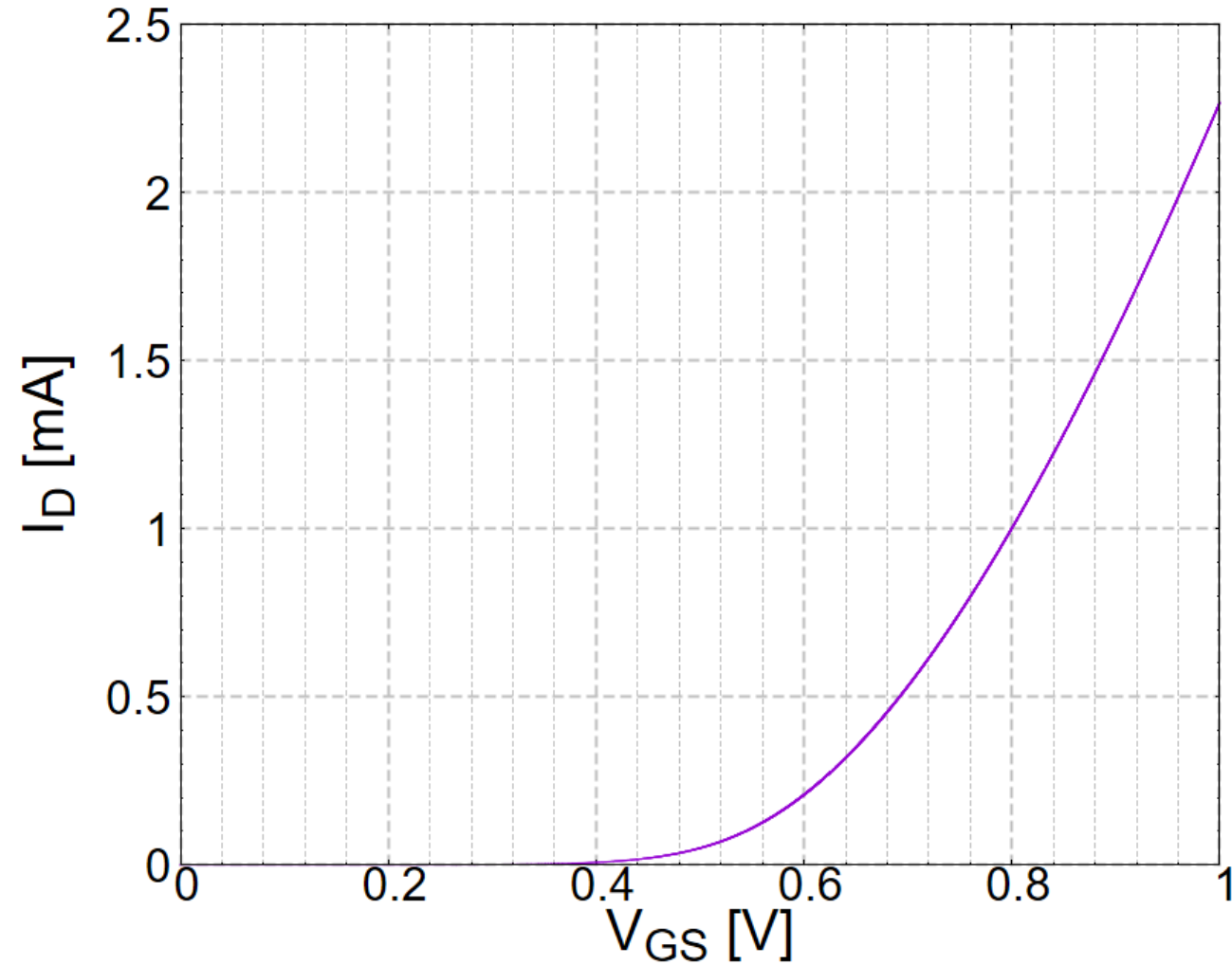


# $M_A, M_B$ の設計

先ほどのシミュレーションでは  $V_{GS} = 0.8 \text{ V}$  の時、 $I_D = 117.4 \cdots \mu\text{A}$  だったので、

$$\frac{100}{117.4} \cdot 5 \times 10 \approx 4.27 \cdots \mu\text{m} \times 10$$

したがって、チャネル幅  $4.27 \mu\text{m}$ 、並列数 **10** とすれば所望の電流が得られる。この形状比での  $I_D - V_{GS}$  特性は右のようになった。



# しきい電圧の推定

チャネル長：0.72 $\mu\text{m}$

チャネル幅：4.27  $\mu\text{m}$

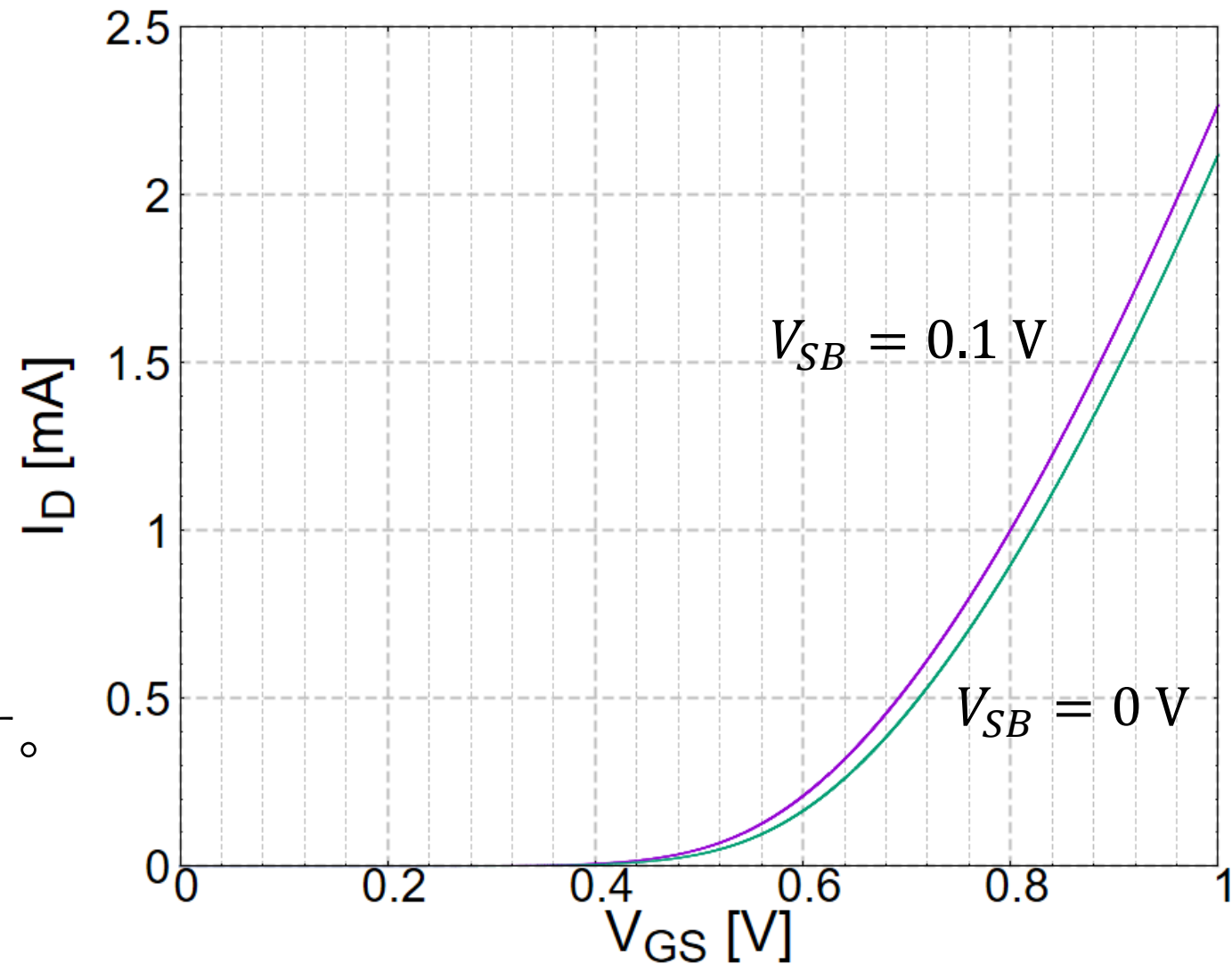
並列数：10

ゲートソース間電圧：0.8 V

ドレインソース間電圧：0.7V

バルクソース間電圧：0 V, 0.1 V

この条件でシミュレーションを行った時の $I_D - V_{GS}$ 特性を右に示す。

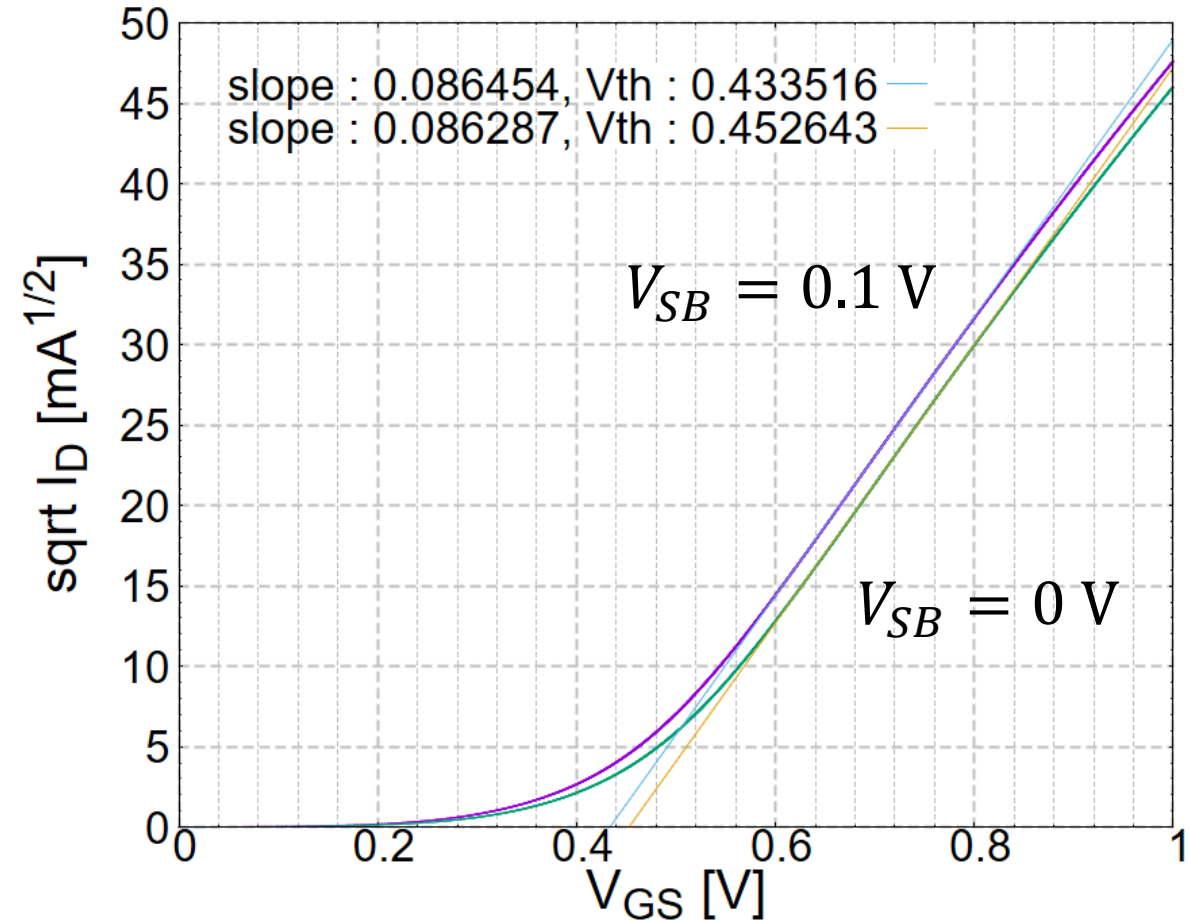


# しきい電圧の推定

先ほどと同条件で $\sqrt{I_D} - V_{GS}$ 特性を見に示す。  
 $V_{GS} = 0.6 \text{ V} \sim 0.8 \text{ V}$ の範囲で線形近似を行い、  
切片を求めた。

以前の研究でしきい電圧はバルクソース間  
電圧に比例することが分かっているので、

$$\begin{aligned} V_{th}(V_{SB}) &= 0.433516 + \frac{0.452643 - 0.433516}{0.1 - 0} \cdot V_{SB} \\ &= 0.19127 \cdot V_{SB} + 0.433516 \end{aligned} \quad (14)$$



# $M_A, M_B$ のしきい電圧

$M_A, M_B$ のソース電位はそれぞれ0.3 V, 0.8 Vなので、しきい電圧はそれぞれ(14)式より

$$\begin{aligned} V_{thA} &= 0.19127 \cdot 0.8 + 0.433516 \\ &= 0.586532 \approx 0.59 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{thB} &= 0.19127 \cdot 0.3 + 0.433516 \\ &= 0.490897 \approx 0.49 \text{ V} \end{aligned}$$

と求められる。

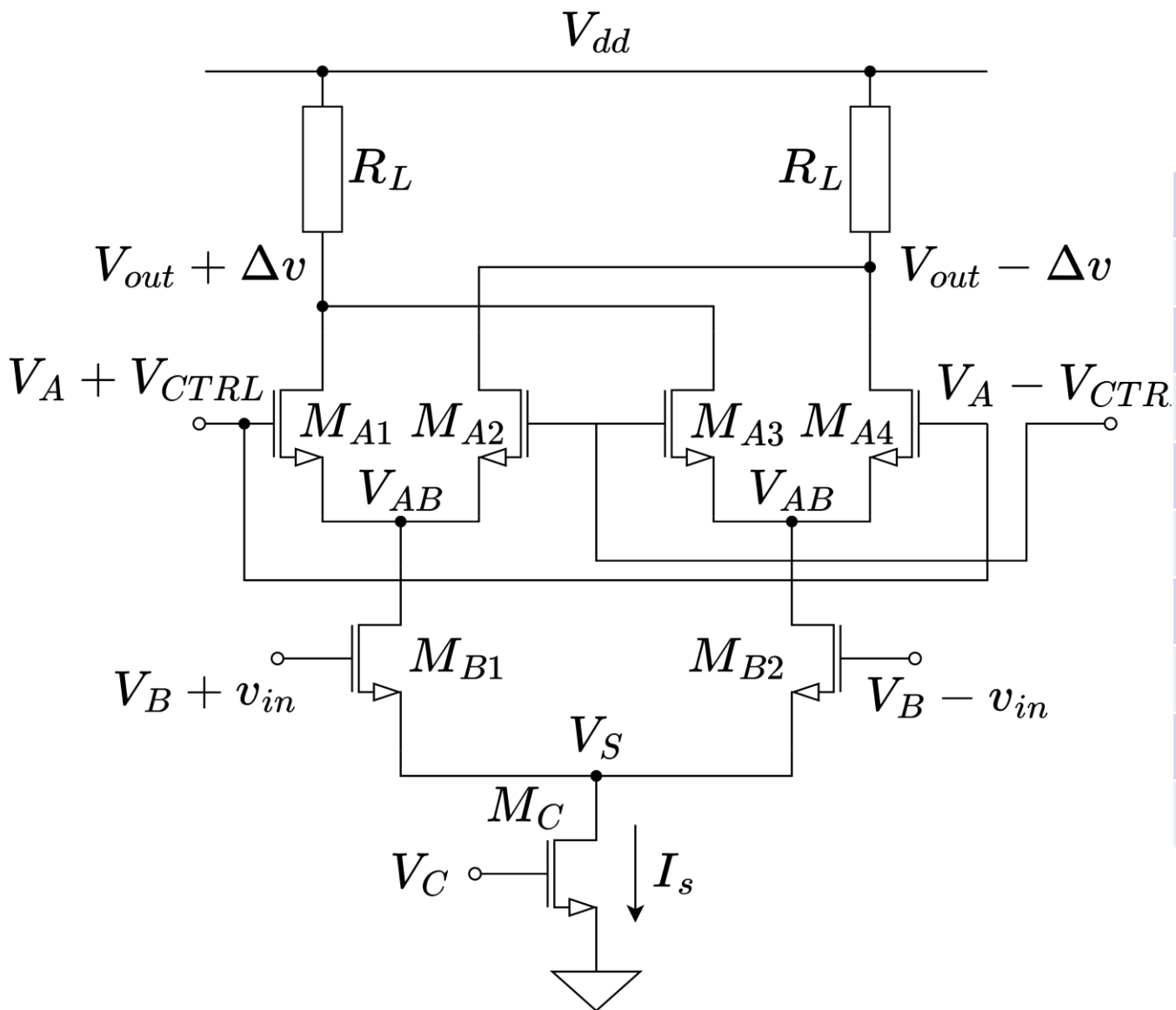
$V_A, V_B$ の電位を計算した時にはしきい電圧を0.5 Vとして $V_{GS} - V_{th} = 0.8 \text{ V}$ になるようにしていた。そのため、 $V_{thA}$ と $V_{thB}$ の0.5 Vとの差を減じると

$$V_A = 1.5 - (0.5 - 0.59) = 1.59 \text{ V}$$

$$V_B = 1.1 - (0.5 - 0.49) = 1.09 \text{ V}$$

となる。

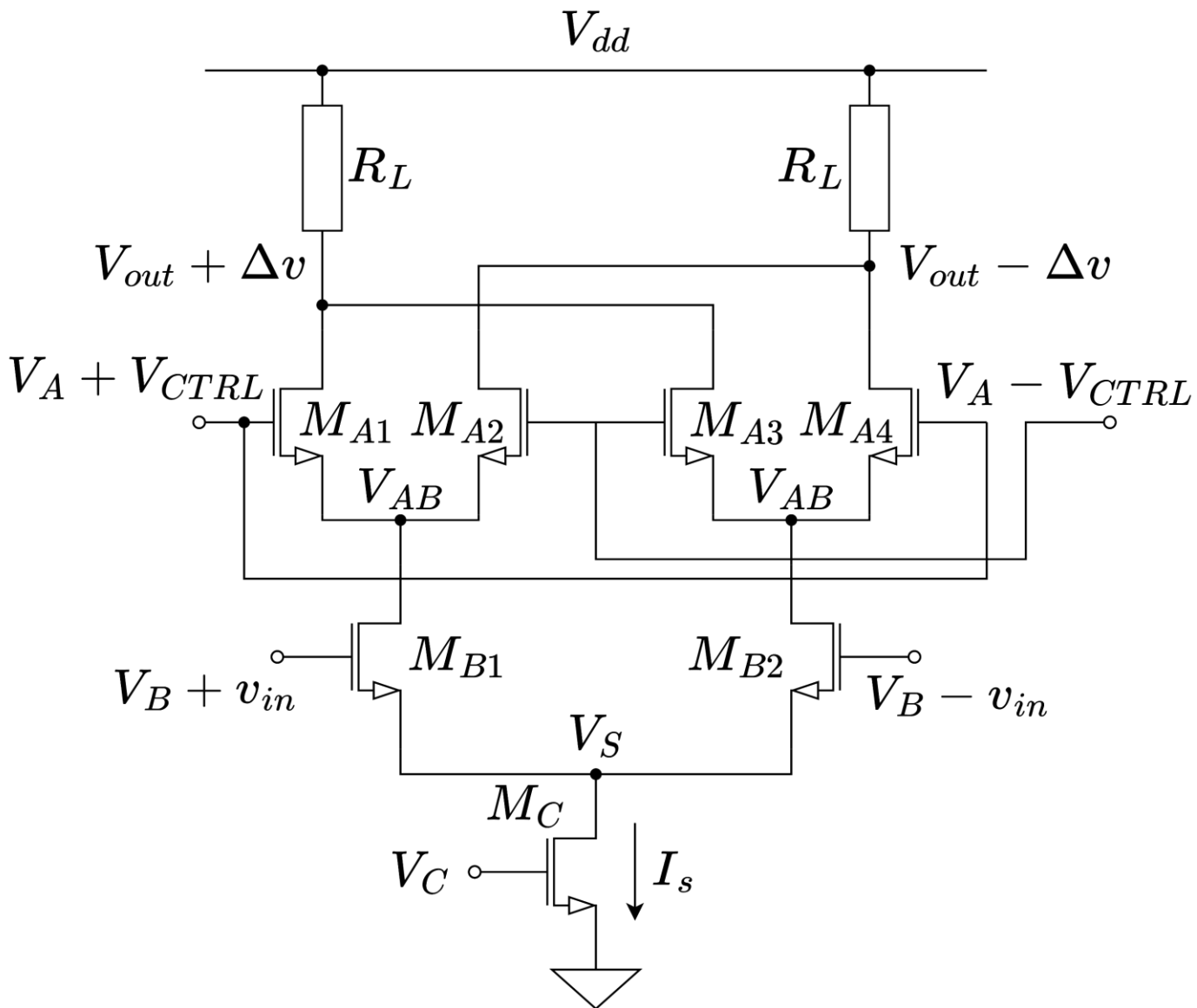
# 設計値



	[V]		[V]
$V_A$	1.59	$V_{out}$	1.5
$V_B$	1.09	$V_{AB}$	0.8
$V_C$	0.65	$V_S$	0.3
	$L[\mu\text{m}]$	$W[\mu\text{m}]$	$M$
$M_A$	0.72	4.27	10
$M_B$	0.72	4.27	20
$M_C$	0.72	11.6	40
	[mA]		$[\Omega]$
$I_s$	4	$R_L$	300



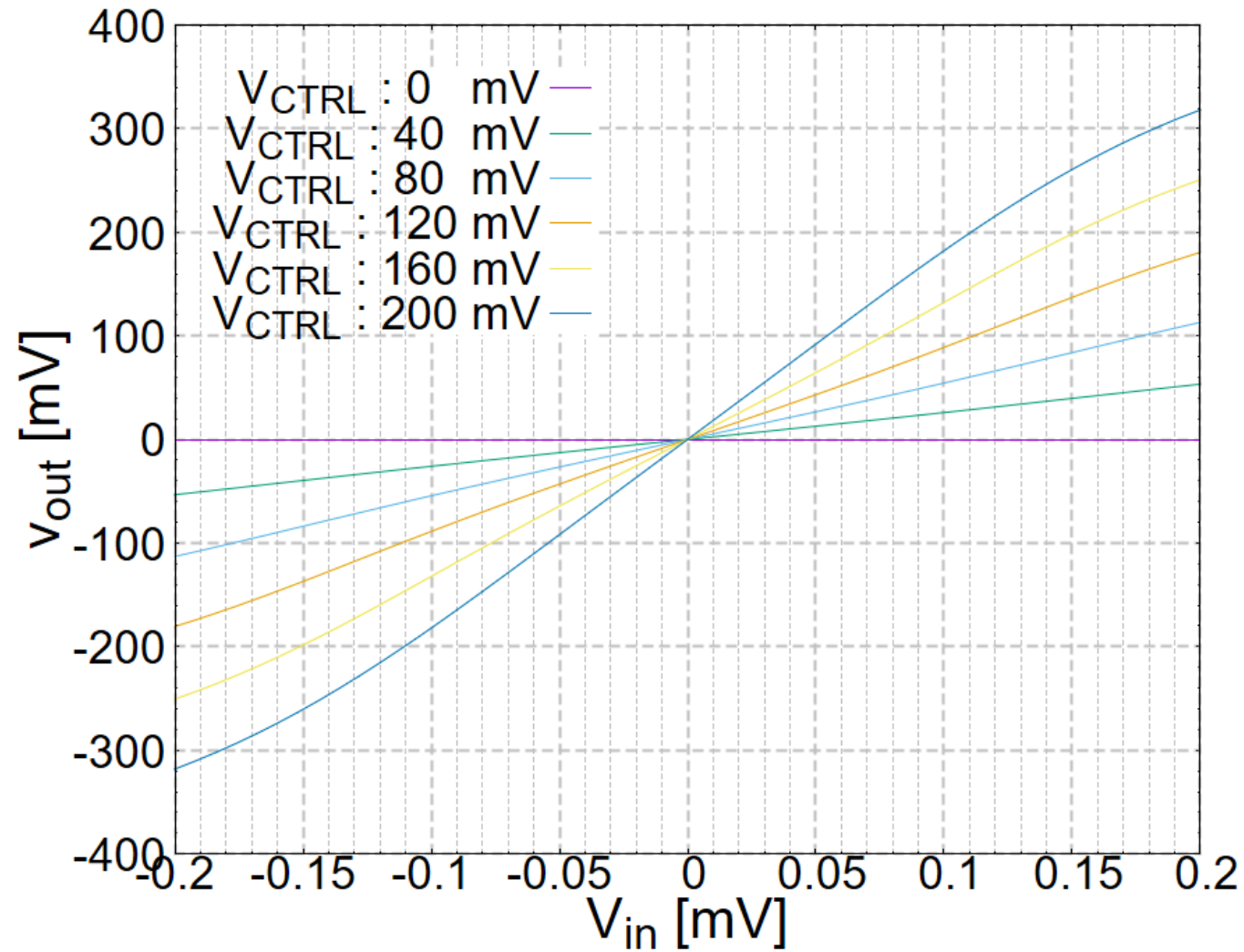
# 直流解析



	設計値[V]	シミュレーション[V]
$V_{out}$	1.5	1.503
$V_{AB}$	0.8	674.4 mV
$V_S$	0.3	238.7 mV
	設計値[mA]	シミュレーション[mA]
$I_S$	4	3.96

$v_{in} = V_{CTRL} = 0 \text{ V}$   
各部の電位は設計とずれているが電流はなぜかかなり設計に近い値になった。

# DC解析



おおよそ  $V_{CTRL} \cdot v_{in}$  に比例した出力が得られた。

# まとめ

- 従来のギルバート乗算回路の設計がおおよそ終わった
- 周波数解析のやり方が分からなかったので確認する
- 折り返し型の設計を行う