

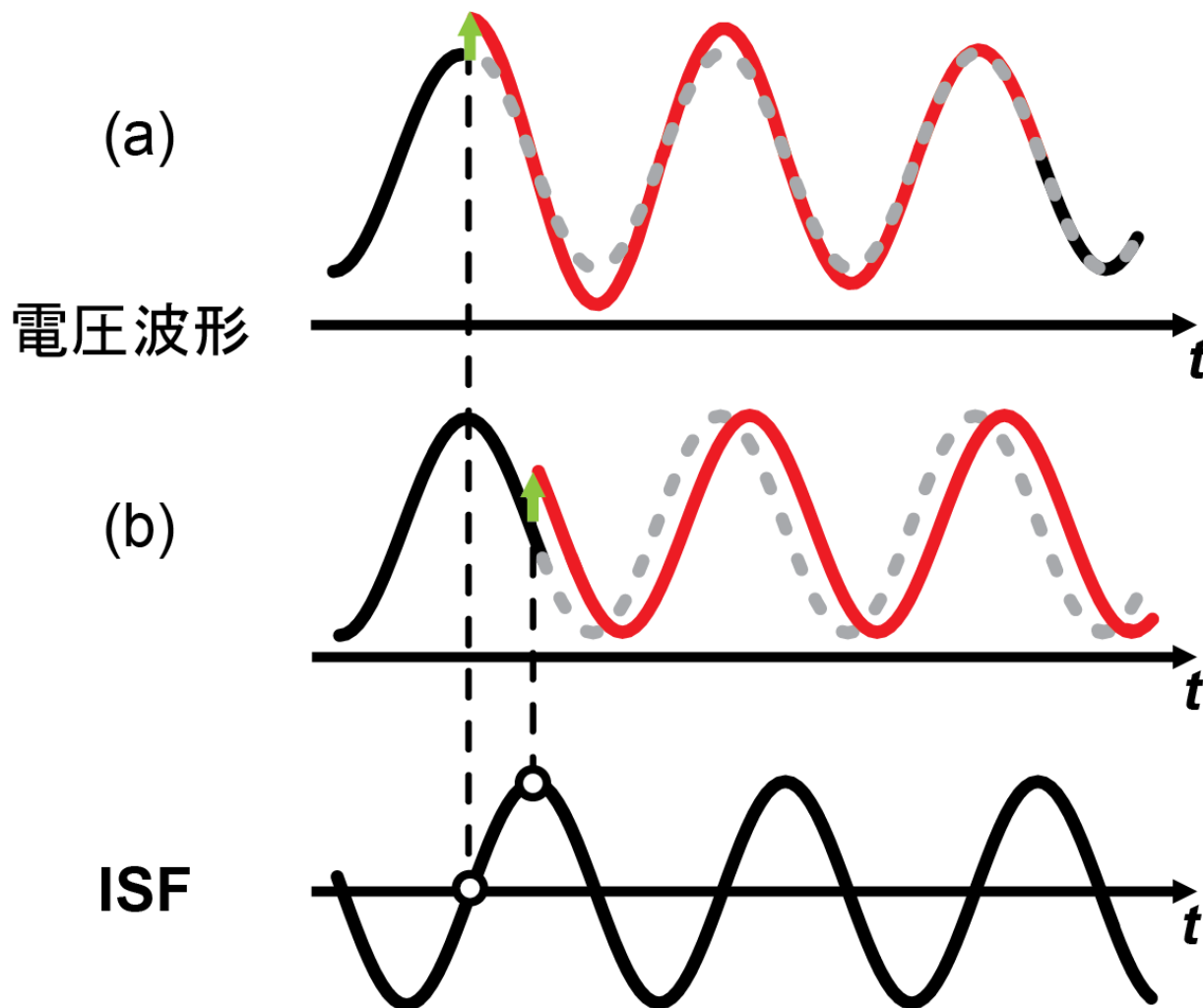
C級動作時における電圧制御型発振器の 新位相雑音式の提案

○木村 健将, 中田 憲吾, 岡田 健一, 松澤 昭

東京工業大学大学院 理工学研究科
電子物理工学専攻 松澤・岡田研究室

- 研究背景
- Class-C VCO
- バイアス回路
- 雑音性能劣化原因
- 位相雑音の理論式の提案
- 比較・検証
- 結論

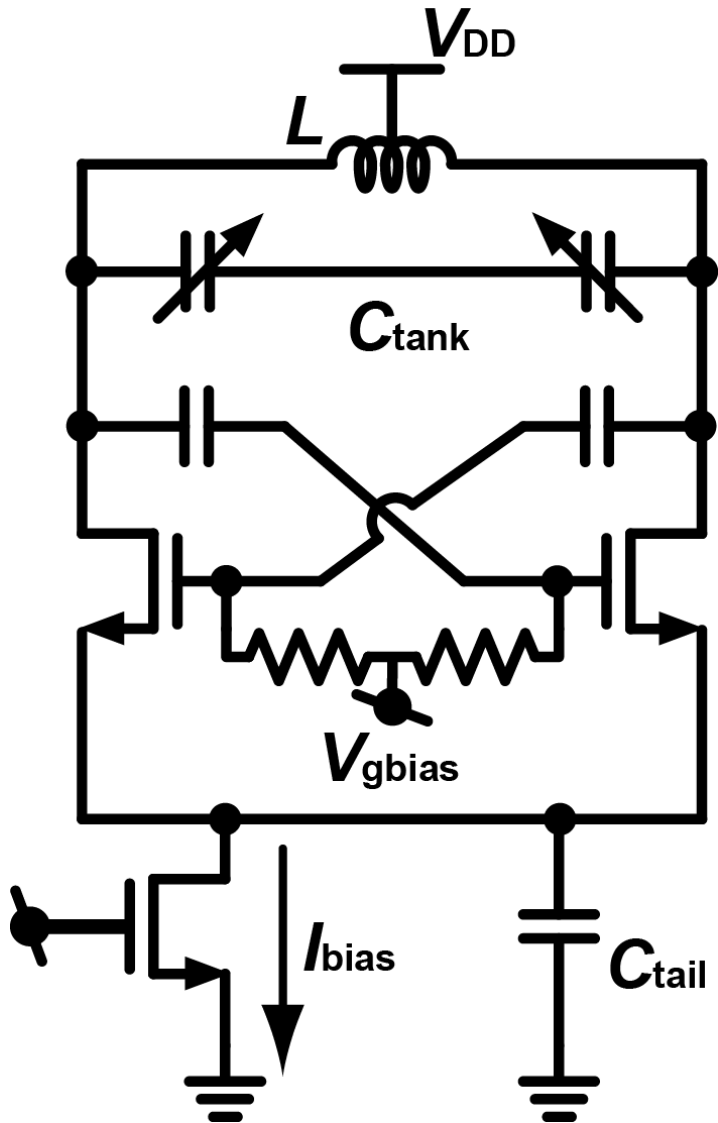
-ISF(Impulse Sensitivity Function)



位相誤差が
小さい

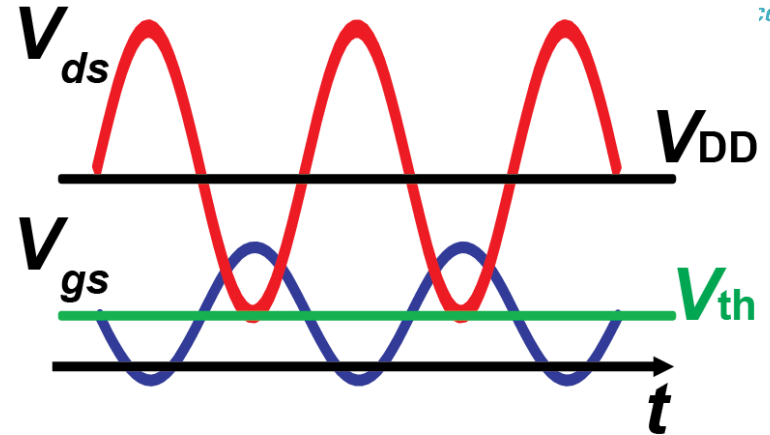
位相誤差が
大きい

Class-C VCO

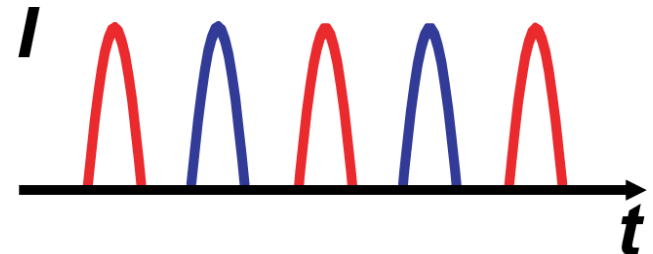


[1] A. Mazzanti, et al., JSSC 2008

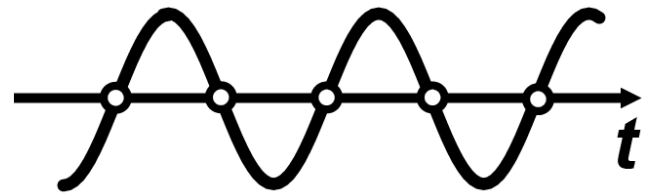
電圧



電流



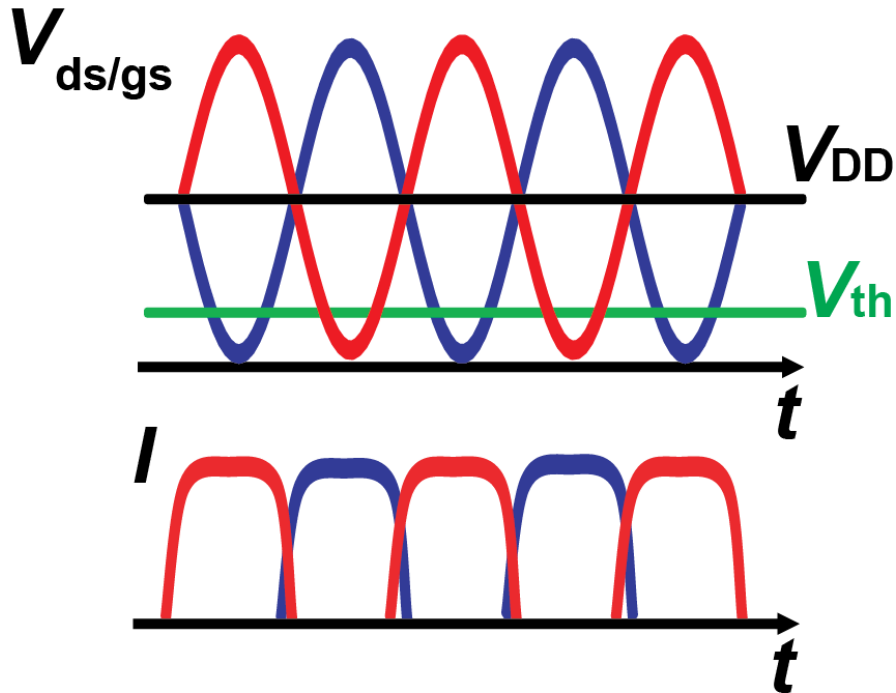
ISF



😊 $V_{g\text{bias}}$ を小さくするほど
雑音性能が改善する。

Class-C VCO

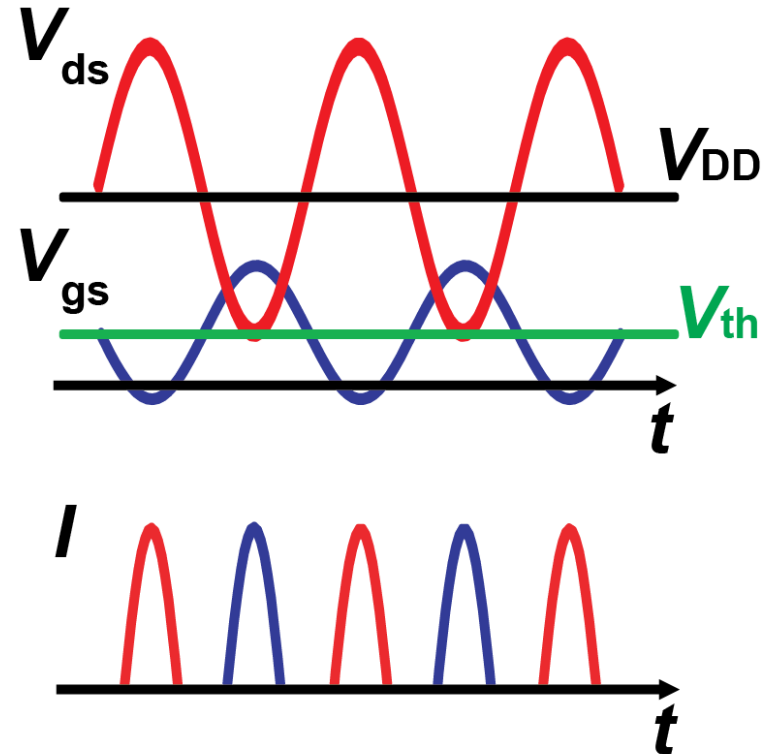
normal-VCO



☹ 電力効率が悪い

$$A_t \propto I_{\omega_0} = \frac{2}{\pi} I_{bias}$$

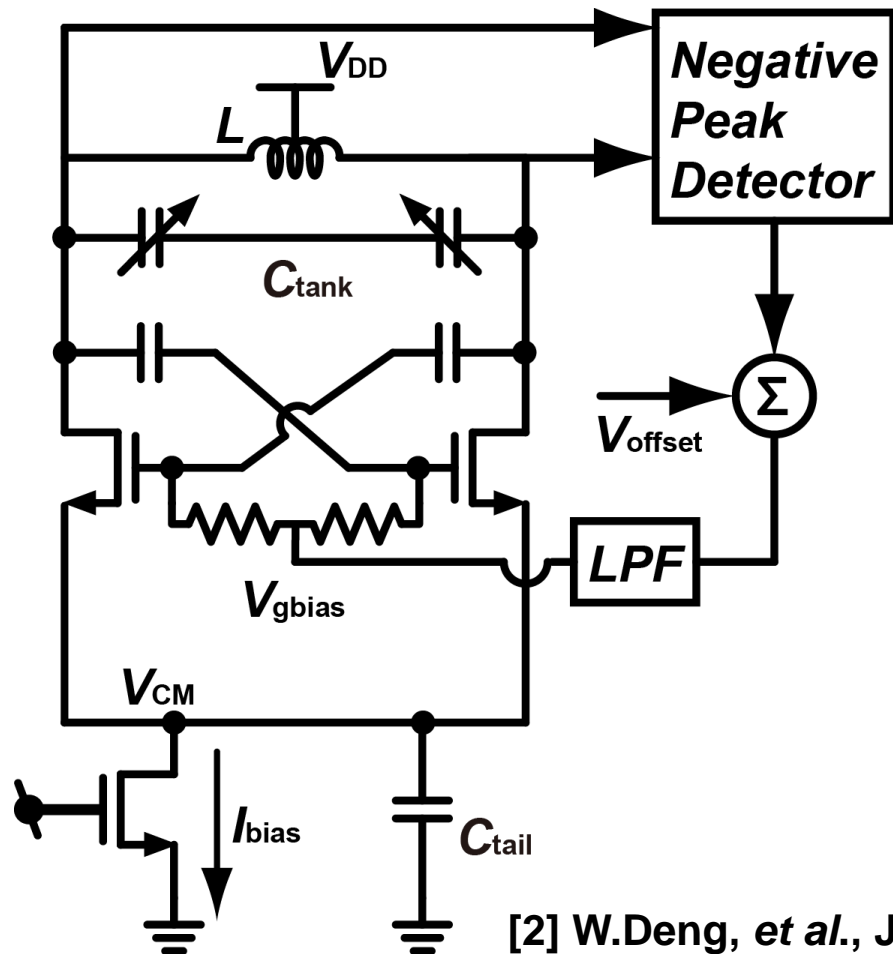
Class-C VCO



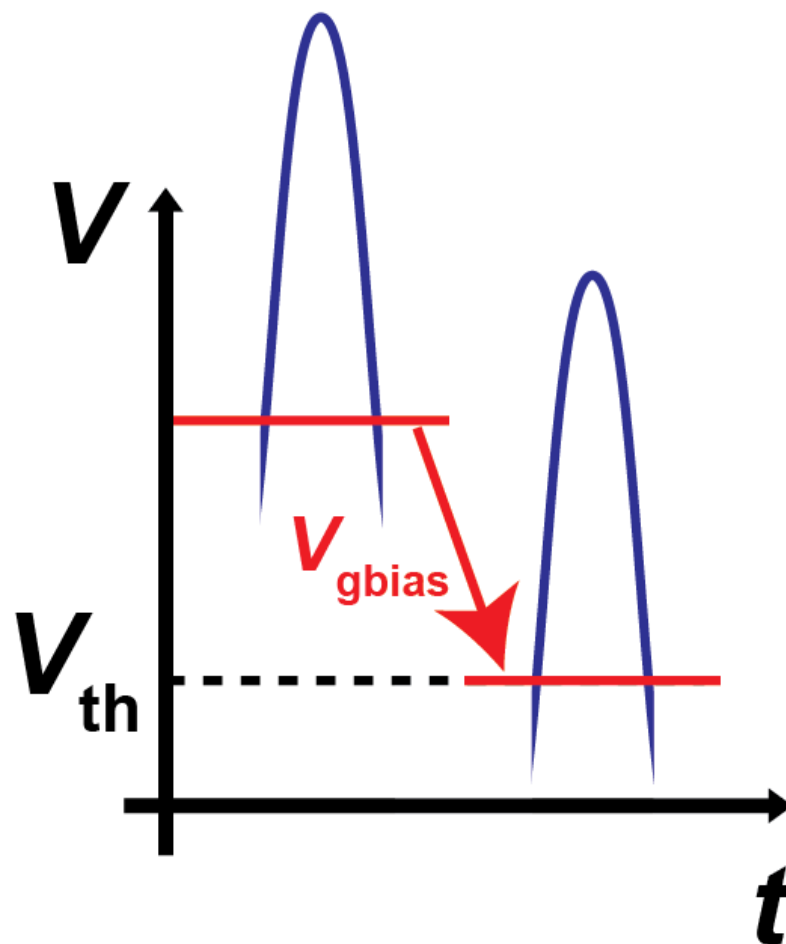
☺ 電力効率が改善

$$A_t \propto I_{\omega_0} = I_{bias}$$

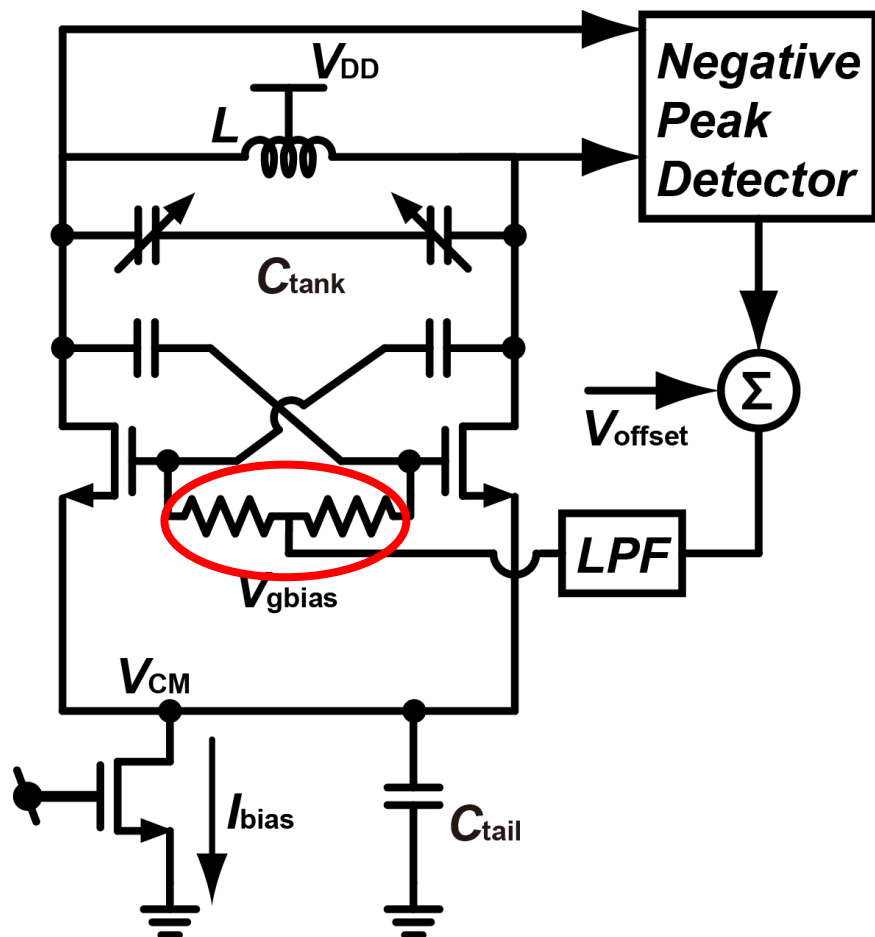
😊 $V_{g\text{bias}}$ を V_{th} より下げられる



[2] W.Deng, et al., JSSC 2013



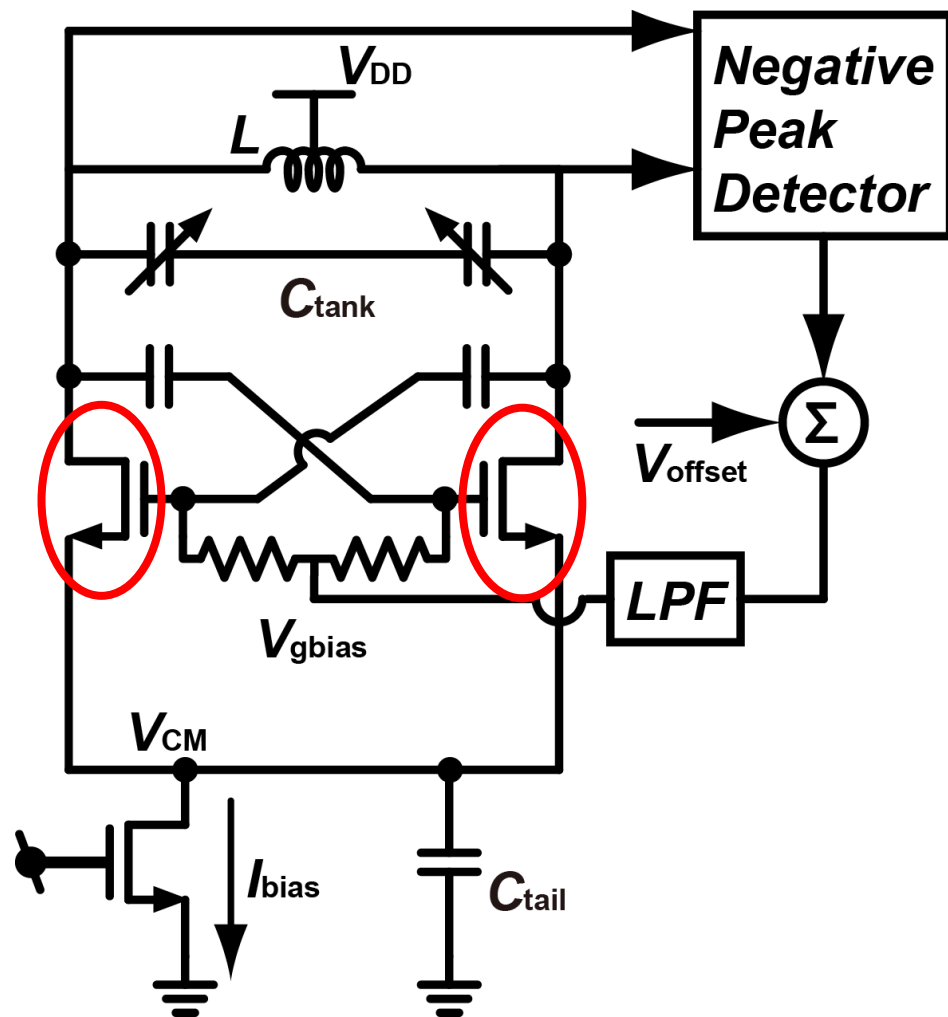
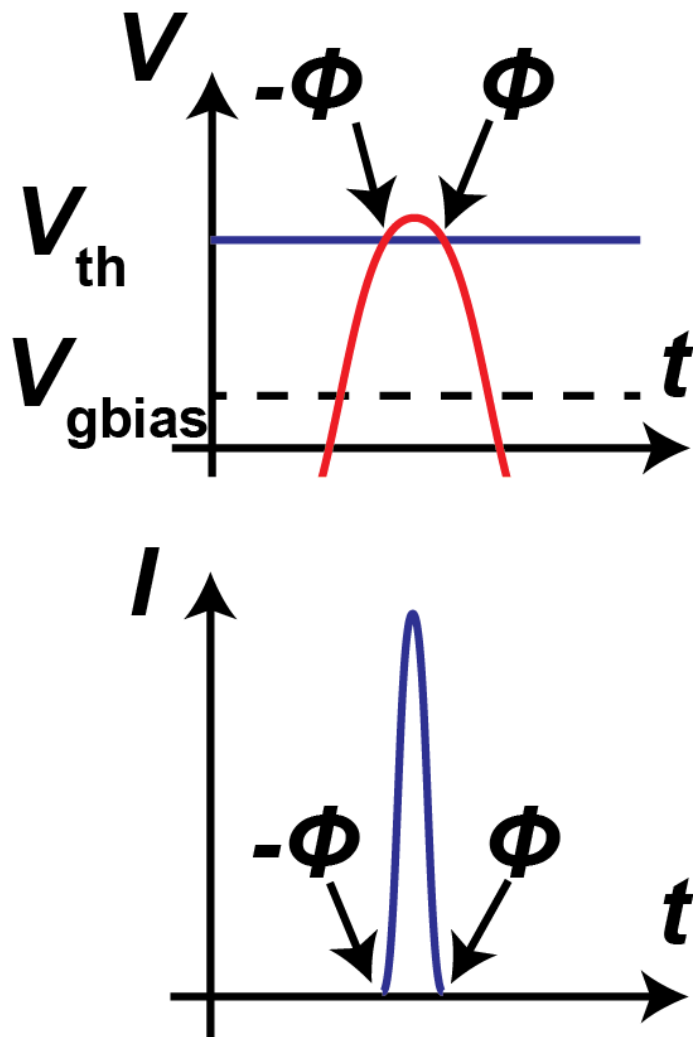
☹ V_{gbias} が小さいほど
位相雑音が劣化する



Order	Name	Noise
0	TOTAL	-95.526
1	Rbias_1	-101.727
2	Rbias_2	-101.727
3	CCTr_1	-104.818
4	CCTr_2	-104.818
5	CCTr_1_rg	-116.532
6	CCTr_2_rg	-116.532
7	L_rg	-118.026
8	TailTr_1	-118.713
9	TailTr_2	-118.713

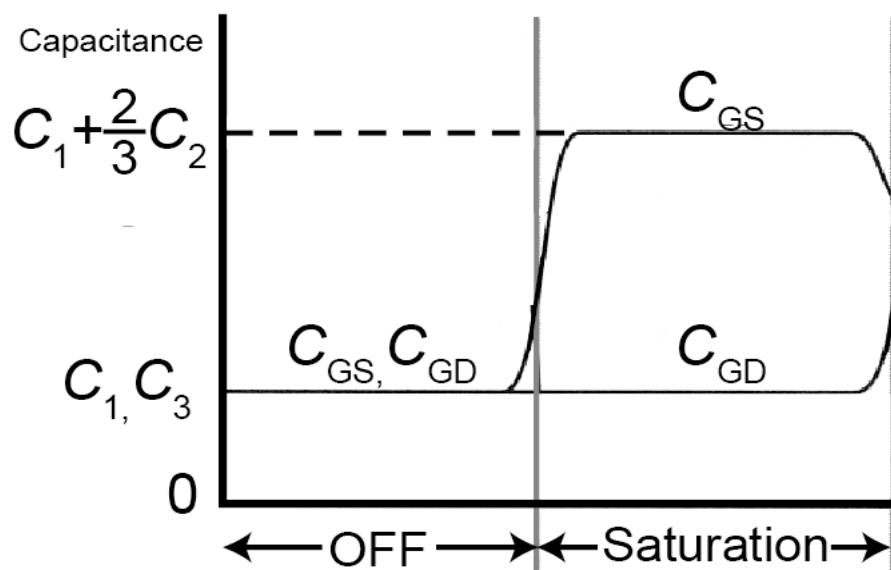
この原因を解析し
その影響を理論化した

☹️ 大きなトランジスタが必要



線形領域で動作しないと仮定した場合

$$C_{gs} = \begin{cases} \frac{2}{3} WLC_{ox} (\text{飽和領域}) \\ WL_{ov}C_{ox} (\text{オフ領域}) \end{cases}$$

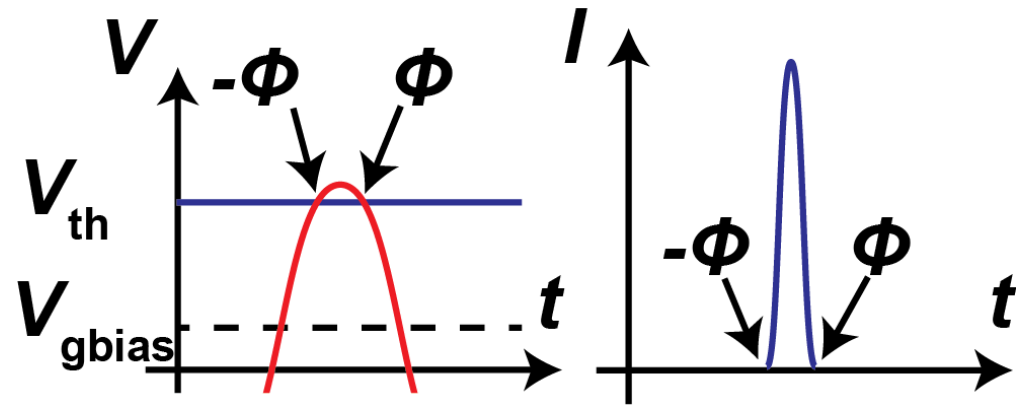


容量の推移が**周期的**ならば
雑音性能への影響はない。

ノイズによって**非周期的**に
推移すると影響が大きい。

[3] 松澤昭, 基礎電子回路工学, 電気学会 2009

$$\cos\Phi = \frac{V_{th} - V_{gbias}}{A_t}$$



$$C_{gs_ave} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\Phi}^{\Phi} (C_{sat}) d\phi + \int_{\Phi}^{2\pi-\Phi} (C_{off}) d\phi \right\}$$

$$\frac{\partial C_{gs_ave}}{\partial V_{gs}} = \frac{\partial C_{gs_ave}}{\partial \Phi} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial V_{gs}} = \frac{1}{\pi} W C_{ox} \left(\frac{2}{3} L - L_{ov} \right) \cdot \frac{-1}{A_t \sin \Phi}$$

トランジスタが大きく、駆動時間が短いとき
容量感度が大きくなる。

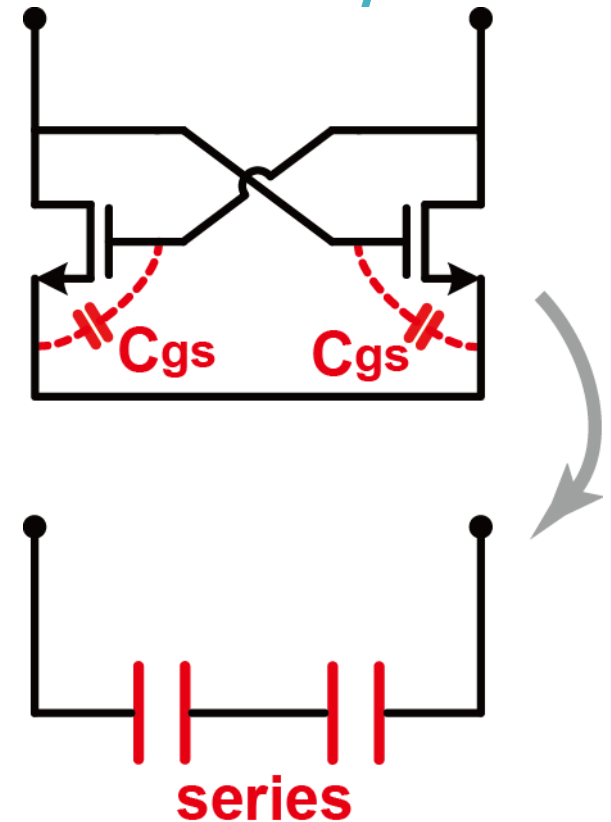
周波数推移は

$$\Delta\omega = \frac{1}{\sqrt{L\left(C + \frac{1}{2} \frac{\partial C_{\text{gs_total}}}{\partial V_{\text{gs}}} \Delta V\right)}} - \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\cong -\frac{1}{4\sqrt{LC}} \cdot \frac{\partial C_{\text{gs_total}}}{\partial V_{\text{gs}}} \Delta V$$

$$K_{V_{\text{gbias}}} = \frac{\partial\omega}{\partial V_{\text{gs}}}$$

$$\cong \frac{1}{4\sqrt{LC}} \cdot \frac{WC_{\text{OX}}}{\pi} \cdot \left(\frac{2}{3}L - L_{\text{OV}}\right) \cdot \frac{1}{kA_t \sin\Phi}$$



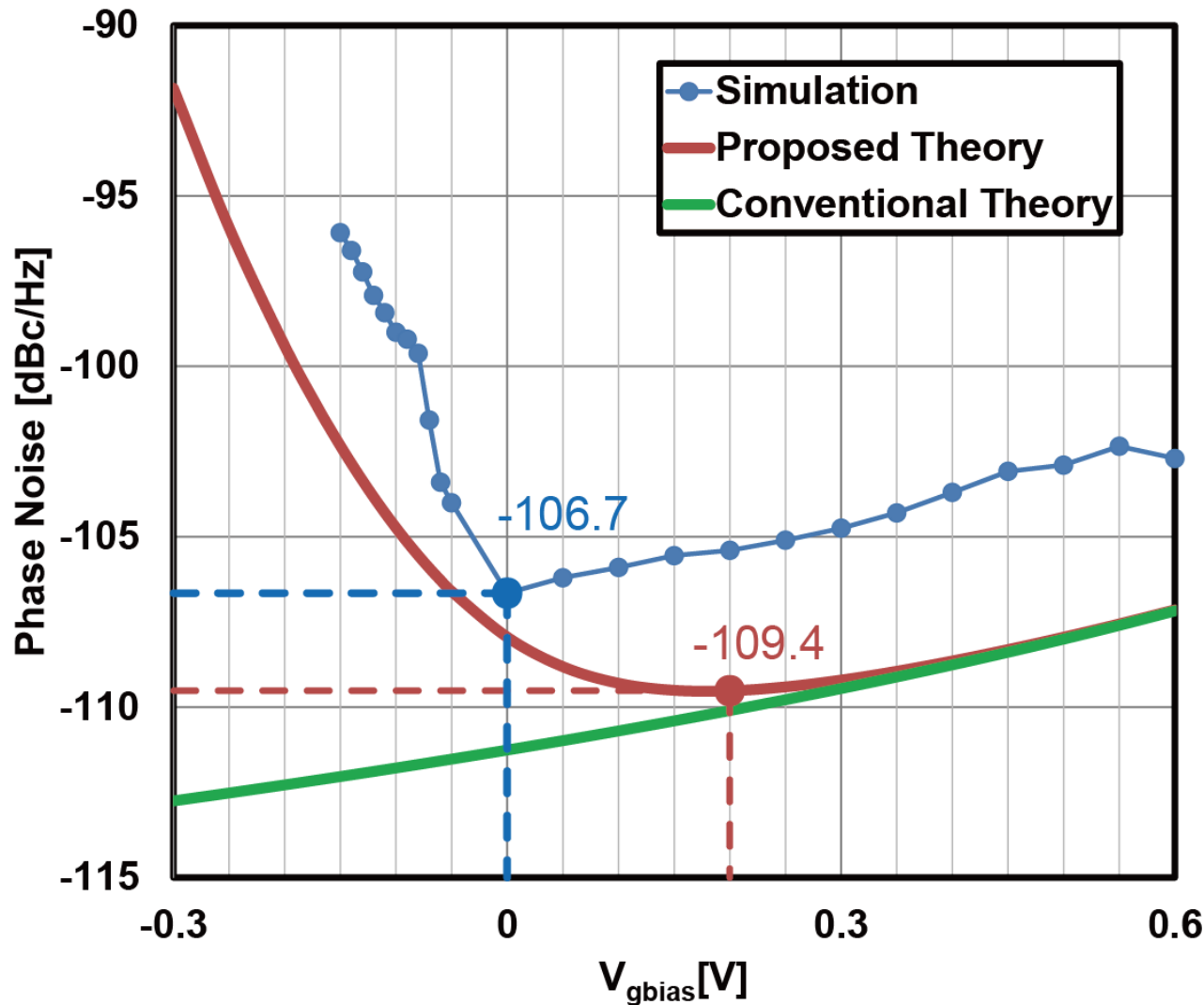
スペクトラムあたりのノイズ雑音は $A_t \frac{K_{V_{g\text{bias}}} V_m}{2\omega_m}$

従来部

提案部

$$\text{PN} = 10\log_{10} \left\{ \frac{2Fk_B T}{P_{\text{sig}}} \left(\frac{\omega_0}{2Q\omega_{\text{offset}}} \right)^2 \right\} + 10\log_{10} \left\{ \frac{P_{\text{noise}}}{P_{\text{sig}}} \right\}$$
$$= 10\log_{10} \left\{ \frac{2Fk_B T}{P_{\text{sig}}} \left(\frac{\omega_0}{2Q\omega_{\text{offset}}} \right)^2 + \left(\frac{V_m K_{V_{g\text{bias}}}}{2\omega_{\text{offset}}} \right)^2 \right\}$$

20GHz帯、5kΩのバイアス抵抗を用いたと仮定



- 結論

- ノイズによって C_{GS} がランダムに変動する影響を考慮した新たな位相雑音の理論式を提案した。
- 提案理論式とシミュレーション結果のグラフは同じ傾向を示したが、最適電圧やその時の位相雑音に誤差があった。

- 今後の課題

- C_{GS} , C_{GD} 以外の寄生容量も考慮することで、提案理論式の精度を改善していく。

ご清聴ありがとうございました

1. 周期的な変化

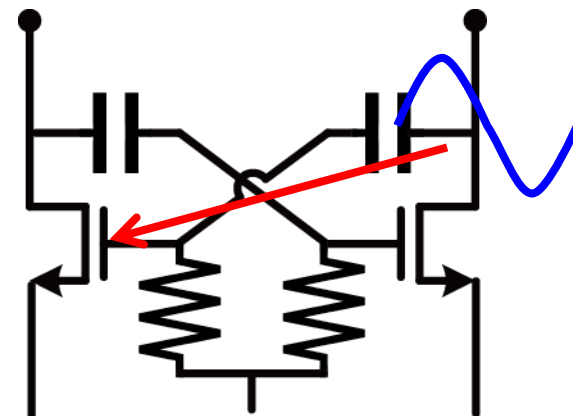
→位相雑音には影響しない

$\Delta V = A_t \cos(\omega_0 t)$ と仮定すると

$$y = A_t \cos \left\{ \left(\omega_0 + \int_{-\infty}^t K_{V_{gbias}} \Delta V dt \right) t \right\}$$

$$= A_t \cos \left\{ \left(\omega_0 + \frac{K_{V_{gbias}} A_t}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right) t \right\}$$

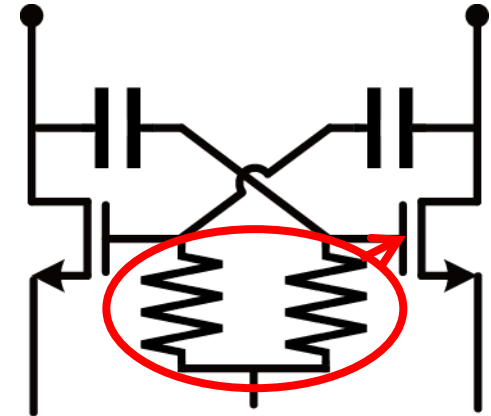
$$\cong A_t \cos(\omega_0 t) + \frac{K_{V_{gbias}} A_t}{2\omega_0} \{ \cos(2\omega_0 t) - 1 \}$$



2. 非周期的なノイズ →雑音へ大きな貢献

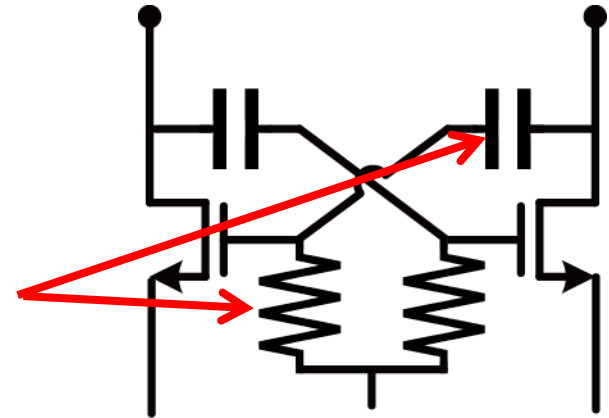
$\Delta V = V_m \cos(\omega_m t)$ と仮定すると

$$\begin{aligned} y &= A_t \cos \left\{ \left(\omega_0 + \int_{-\infty}^t K_{V_{gbias}} \Delta V \right) t \right\} \\ &= A_t \cos \left\{ \left(\omega_0 + \frac{K_{V_{gbias}} A_t}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \right) t \right\} \\ &\cong A_t \cos(\omega_0 t) \\ &\quad + A_t \frac{K_{V_{gbias}} V_m}{2\omega_m} \{ \cos(\omega_0 + \omega_m)t - \cos(\omega_0 - \omega_m)t \} \end{aligned}$$



2. 非周期的なノイズ → 雑音へ大きな貢献

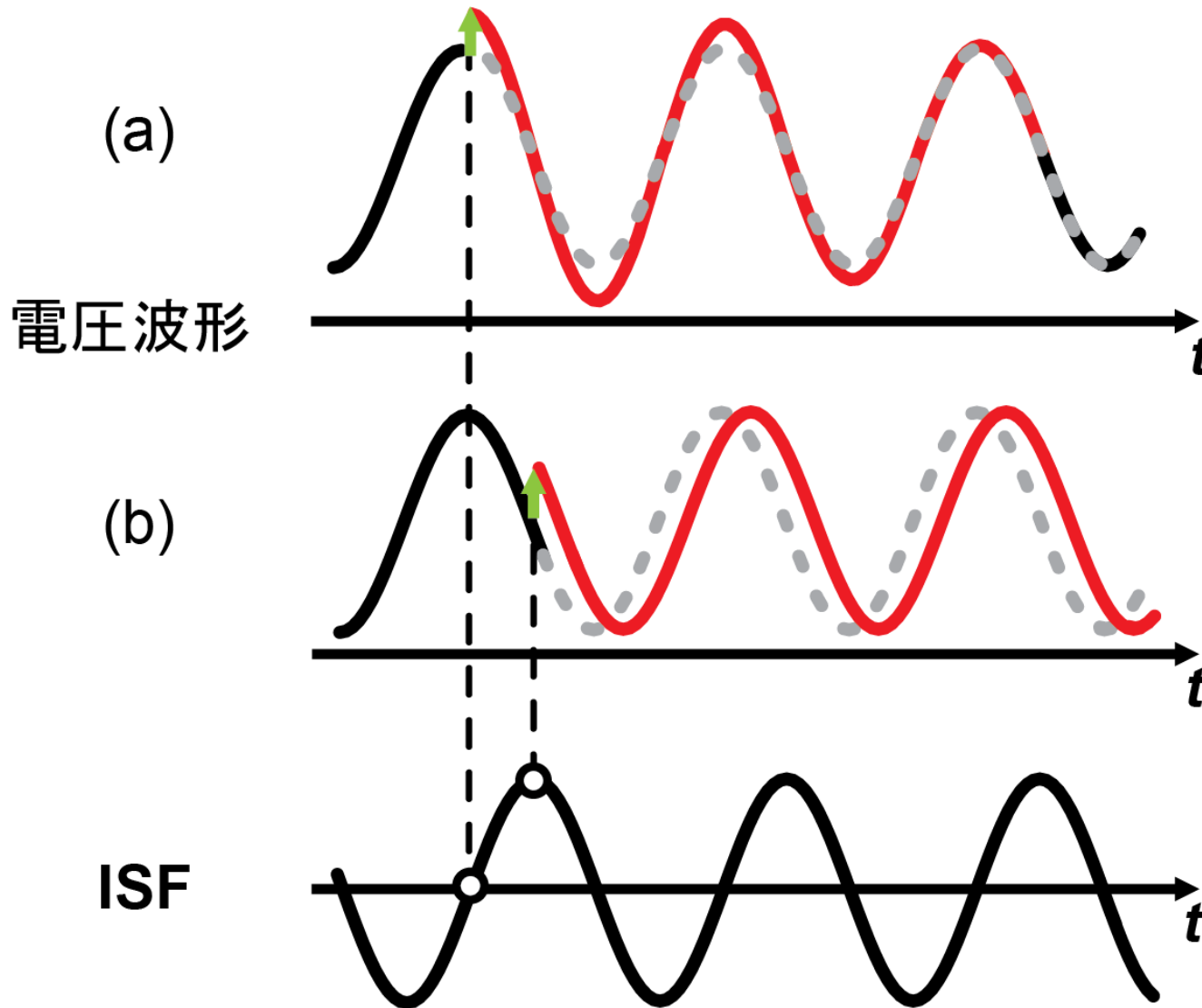
ハイパスフィルタを構成

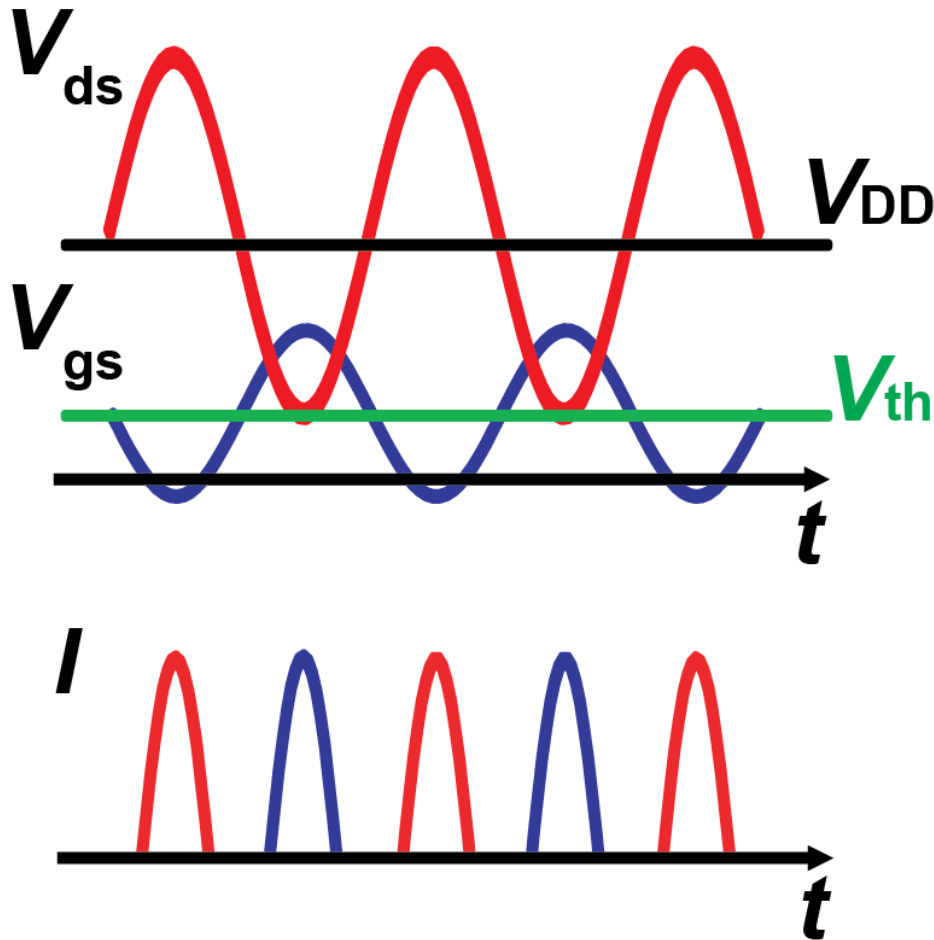


$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi RC} \cong 0.2GHz \ll 20GHz$$

$$R = \frac{1}{2\pi C \cdot 20 \cdot 10^7}$$

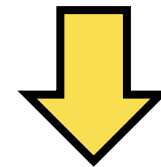
Rを小さくできない
→ 大きなノイズ源になる





雑音性能改善のため
振幅を大きくしたい

$$A_t < \frac{V_{DD} + V_{th} - V_{gbias}}{2}$$



😊 V_{gbias} を小さくするほど
省電力化と低雑音化