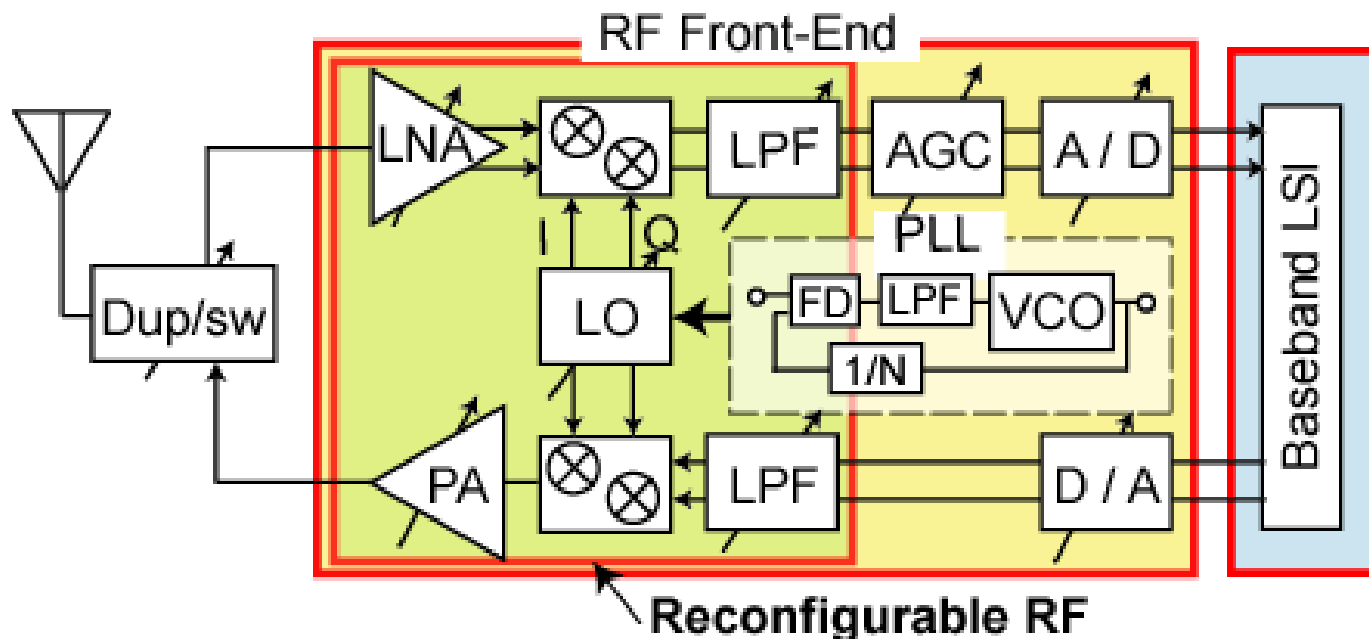


多分周を考慮した電圧制御発振器の 低位相雑音化の検討

原 翔一, 岡田 健一, 松澤 昭

東京工業大学大学院理工学研究科

1. 背景・目的
2. 電圧制御発振器(VCO)の動作原理
3. インダクタの性能
4. VCOの低位相雑音化



[1]岡田:信学技報, Vol.SR2007-40, pp.121-128, 2007.

$$\omega_{BB} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$$

所望波

$$= (\omega_{RF} + \Delta\omega) - (\omega_{LO} + \Delta\omega)$$

妨害波

位相雑音

雑音により妨害波がBB信号にダウンコンバートされる

Si CMOSプロセス

- 微細化によるトランジスタの周波数特性の向上
- 低コスト
- デジタル回路との混載が可能であること
- 微細化による配線抵抗の増大
- 化合物半導体と比べ基板の損失が大きい

受動素子の性能改善が課題

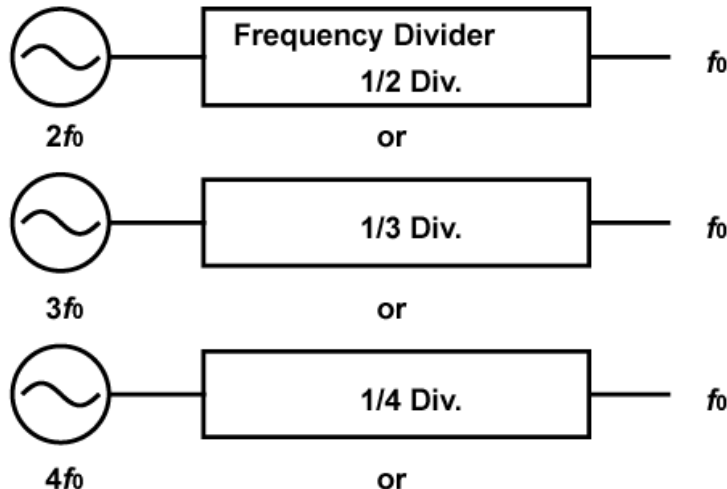
従来は所望の周波数で発振するVCOを設計

問題点: 周波数によっては性能が出ない

提案手法

VCOの性能が最大となる周波数で発振させ、
分周器で分周することにより所望の周波数を生成

Core-VCO



Merit: 位相雑音特性の向上
Demerit: 消費電力の増大

Leesonの式から位相雑音 $L(\Delta f)$ が求まる

$$L(\omega) = 10 \log \left[\frac{2kT}{P_{\text{sig}}} \left(\frac{f_0}{2Q_{\text{tank}} \Delta f} \right)^2 \right], Q_{\text{tank}} = \frac{Q_L \cdot Q_C}{Q_L + Q_C}$$

k : ボルツマン定数, T : 絶対温度, P_{sig} : 発振振幅電力,
 f_0 : 発振周波数, Δf : 離調周波数, Q_{tank} : 共振器のQ値

提案手法による位相雑音

$$L(\omega) = 10 \log \left[\frac{2kT}{P'_{\text{OSC}}} \left(\frac{f'_0}{2Q'_{\text{tank}} \Delta f} \right)^2 \right] - 20 \log N$$

$$f'_0 = Nf_0$$

発振振幅を維持しつつ、Q値の向上が求められる
インダクタの性能改善が課題

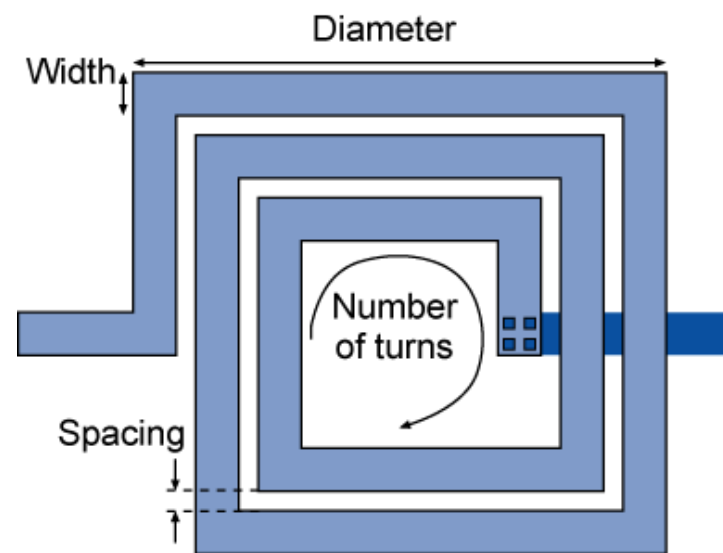
スパイラルインダクタの構造

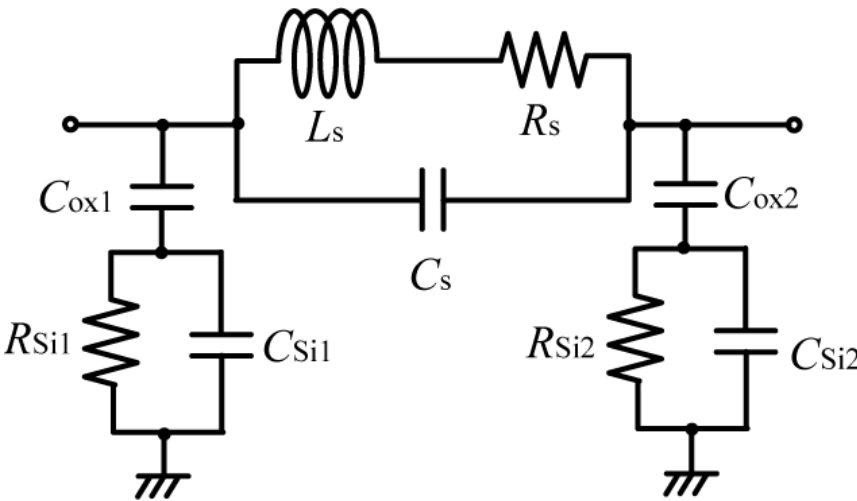
直径 $100\mu\text{m} - 600\mu\text{m}$

巻き数 0.5巻 - 3.5巻

線幅 $5\mu\text{m} - 20\mu\text{m}$

線間距離 $1\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$





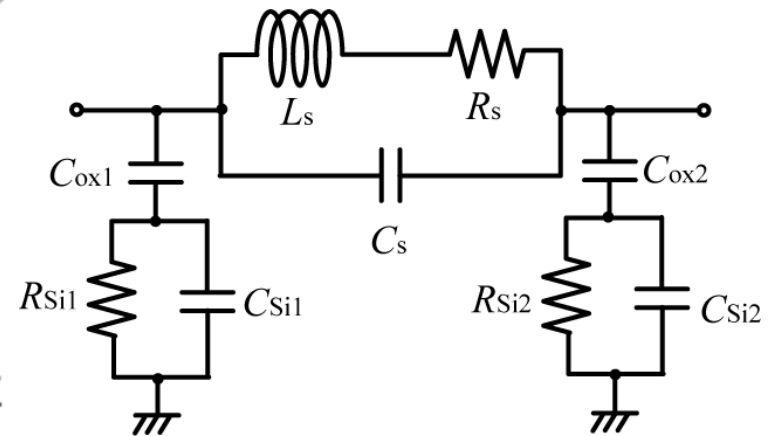
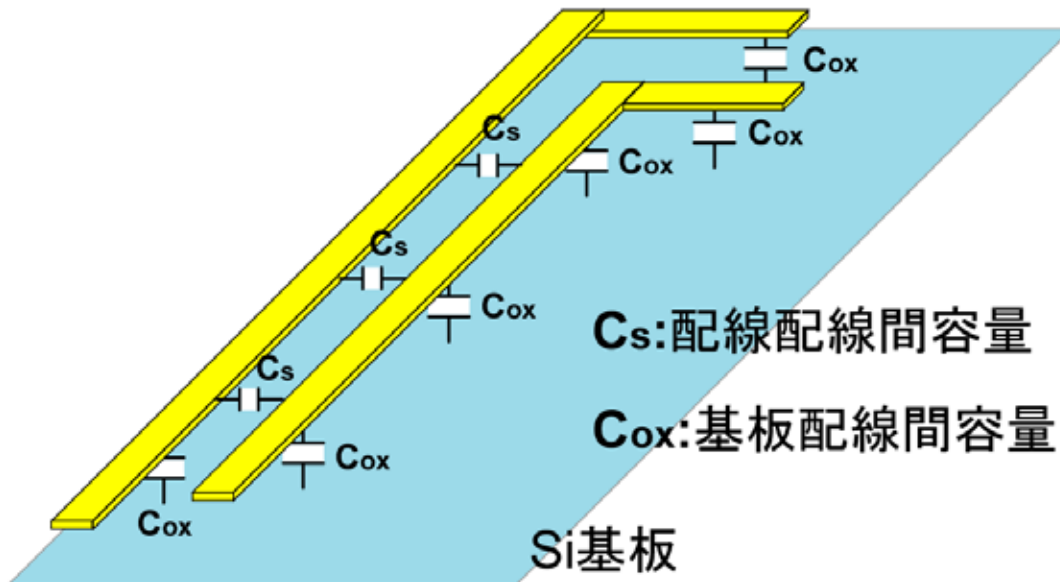
- L_S : インダクタンス-(渦電流による損失)
 R_S : 配線抵抗+(基板渦電流による抵抗)
 C_S : 配線間容量
 C_{OX} : 基板-配線間容量
 R_{Si} : 基板抵抗
 C_{Si} : 基板容量

$$Q(\omega) = \frac{\text{Im}(Z_d)}{\text{Re}(Z_d)} = \frac{\omega L}{R} (1 - \omega^2 LC) - \omega CR$$

構造によりスパイラルインダクタの性能が決定される

- 寄生容量の低減：
- 基板配線間容量 ==> 配線長短・配線幅狭
 - 配線配線間容量 ==> 巻き数小・配線厚小
 - 基板容量 ==> 基板配線間容量小

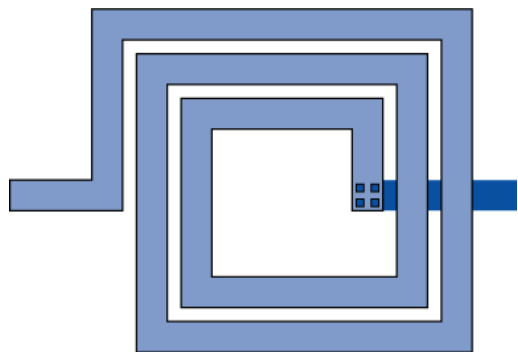
スパイラルインダクタ



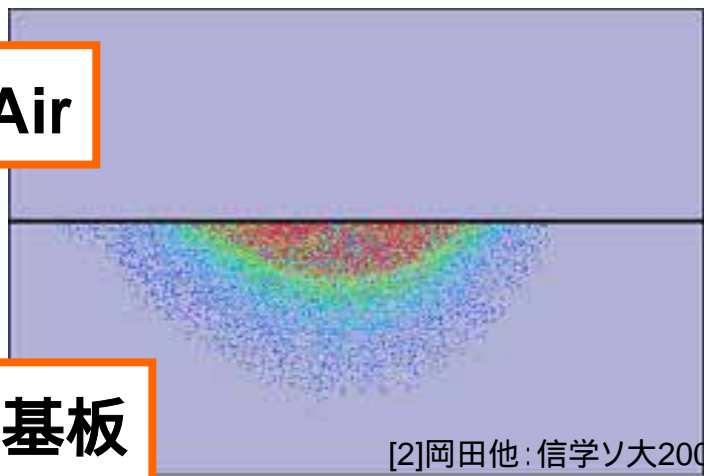
寄生抵抗の低減：

- 配線抵抗
- 基板渦電流
- 基板抵抗

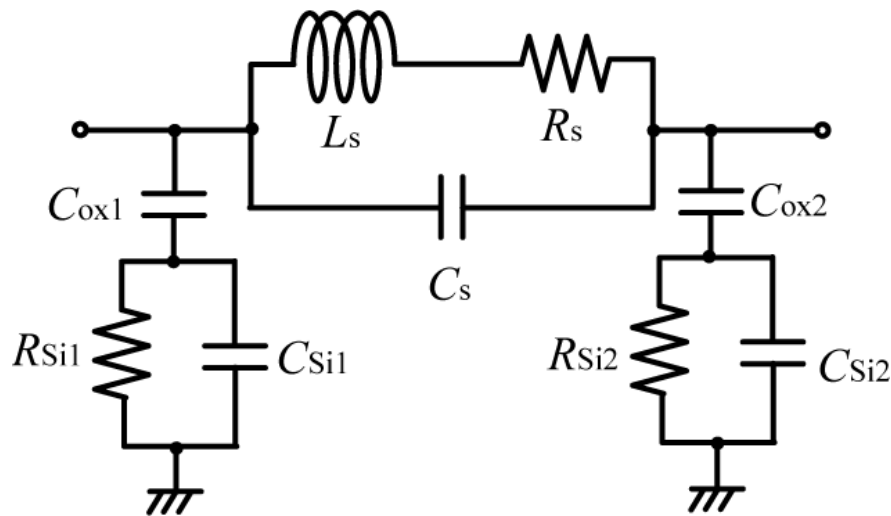
- ==> 配線長短・配線幅広
- ==> 半径小
- ==> 基板配線間容量小



Air



[2]岡田他：信学ソ大2002



インダクタンスの増大： •半径大 ==> 基板配線間容量増大

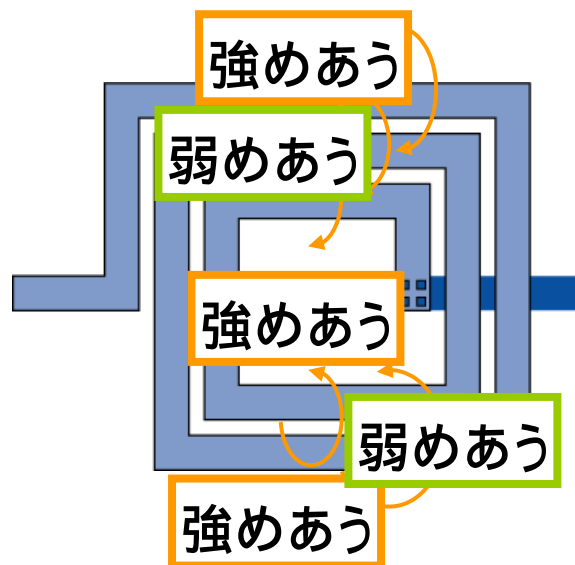
配線抵抗増大
基板渦電流増大

•巻き数大 ==> 基板配線間容量増大

配線抵抗増大

配線間の相互インダクタンス

•配線幅狭 ==> 配線抵抗増大



インダクタンスは配線の面積に比例するため、
インダクタンスを大きくすると寄生のパラメータも大きくなる

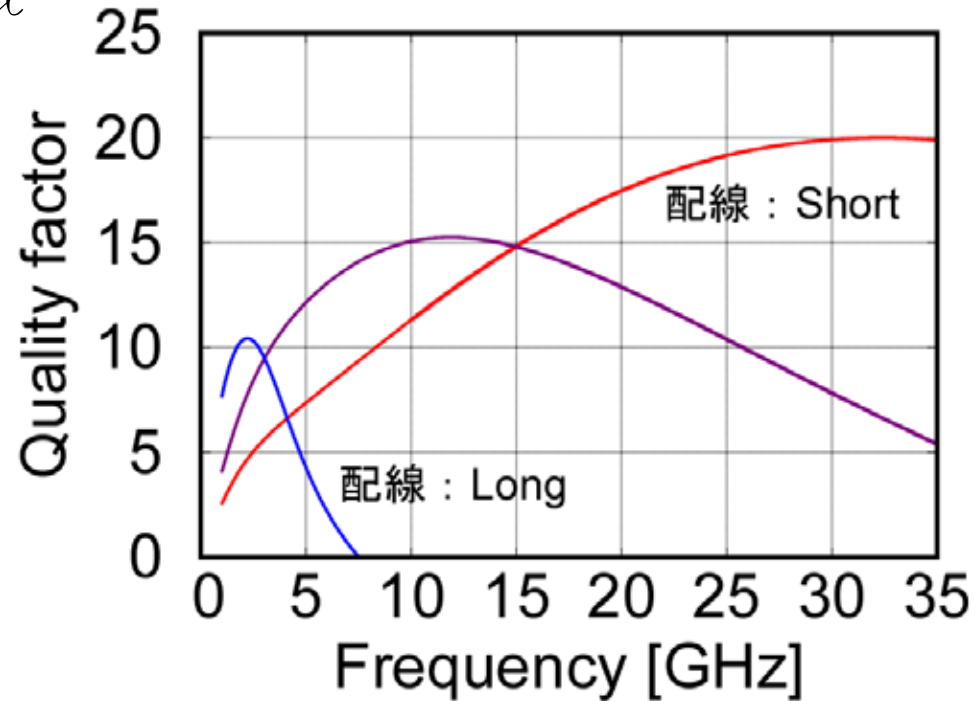
寄生抵抗、及び寄生容量はスパイラルインダクタの構造上
インダクタンスと相関がある

$$L = k_L \ell \quad C_L = k_C \ell \quad R = k_R \ell$$

$$Q_{\text{peak}} \cong \frac{\omega_{\text{peak}} L(\omega_{\text{peak}})}{R}$$

$$\omega_{\text{peak}} \cong \frac{1}{\sqrt{3LC_L}}$$

$$Q_{\text{peak}} \cong \frac{1}{k_R \ell} \cdot \frac{\sqrt{k_L}}{\sqrt{k_C}}$$



周波数が高くなると k_L が向上するとともに k_C が小さくなりQ値が向上する

VCOの性能指標

$$FoM = L(\Delta f) - 20 \log \left(\frac{f_o}{\Delta f} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{DC}}{1 \text{mW}} \right)$$

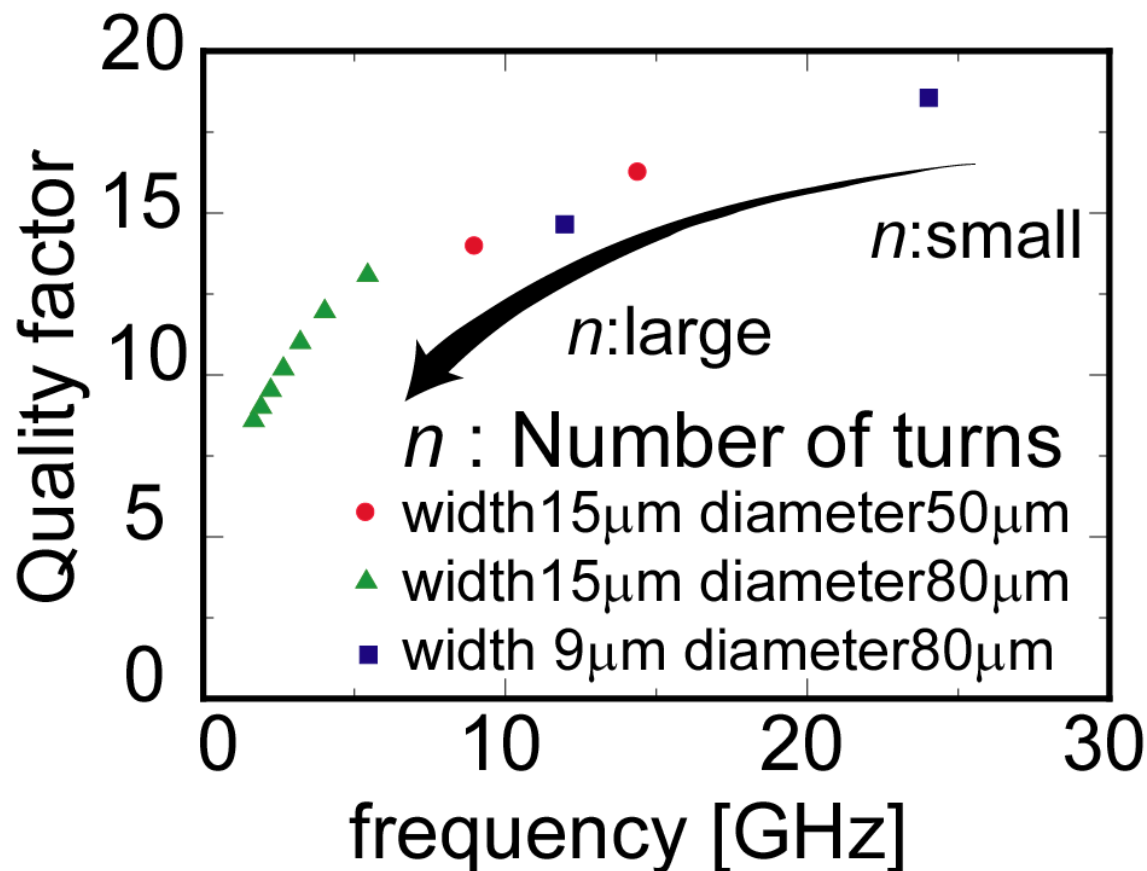
位相雑音を発振周波数、消費電力で規格化

$$FoM' < FoM$$

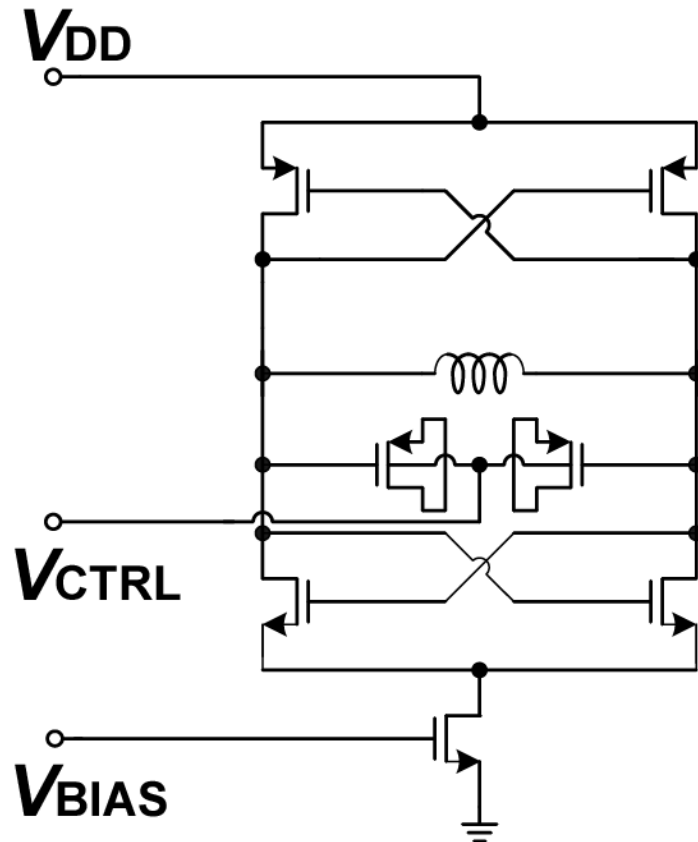
$$\frac{P'_{VCO} + P_{Div}}{P_{VCO}} < \frac{P_{OSC}}{P'_{OSC}} \left(\frac{Q_{\text{tank}} f'_0 / N}{Q'_{\text{tank}} f_0} \right)^2$$

$$f'_0 = N \cdot f_0 \quad P_{OSC} = \frac{2}{\pi^2} I_D^2 R_p \quad R_p = Q \cdot 2\pi f \cdot L$$

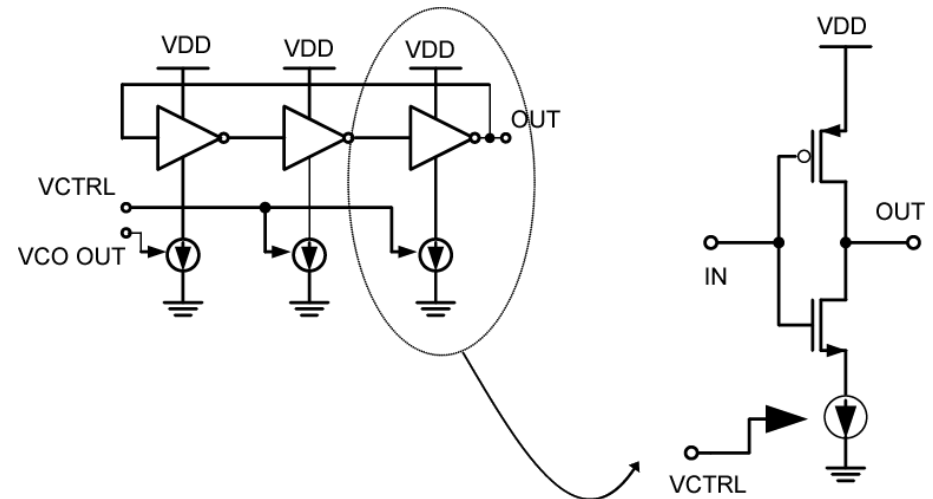
$$\frac{P'_{VCO} + P_{Div}}{P_{VCO}} < \frac{I_D'^2 Q'^3 N L'}{I_D^2 Q^3 L}$$



各周波数に最適な構造が存在する
周波数が高くなるほどQ値がよくなる傾向

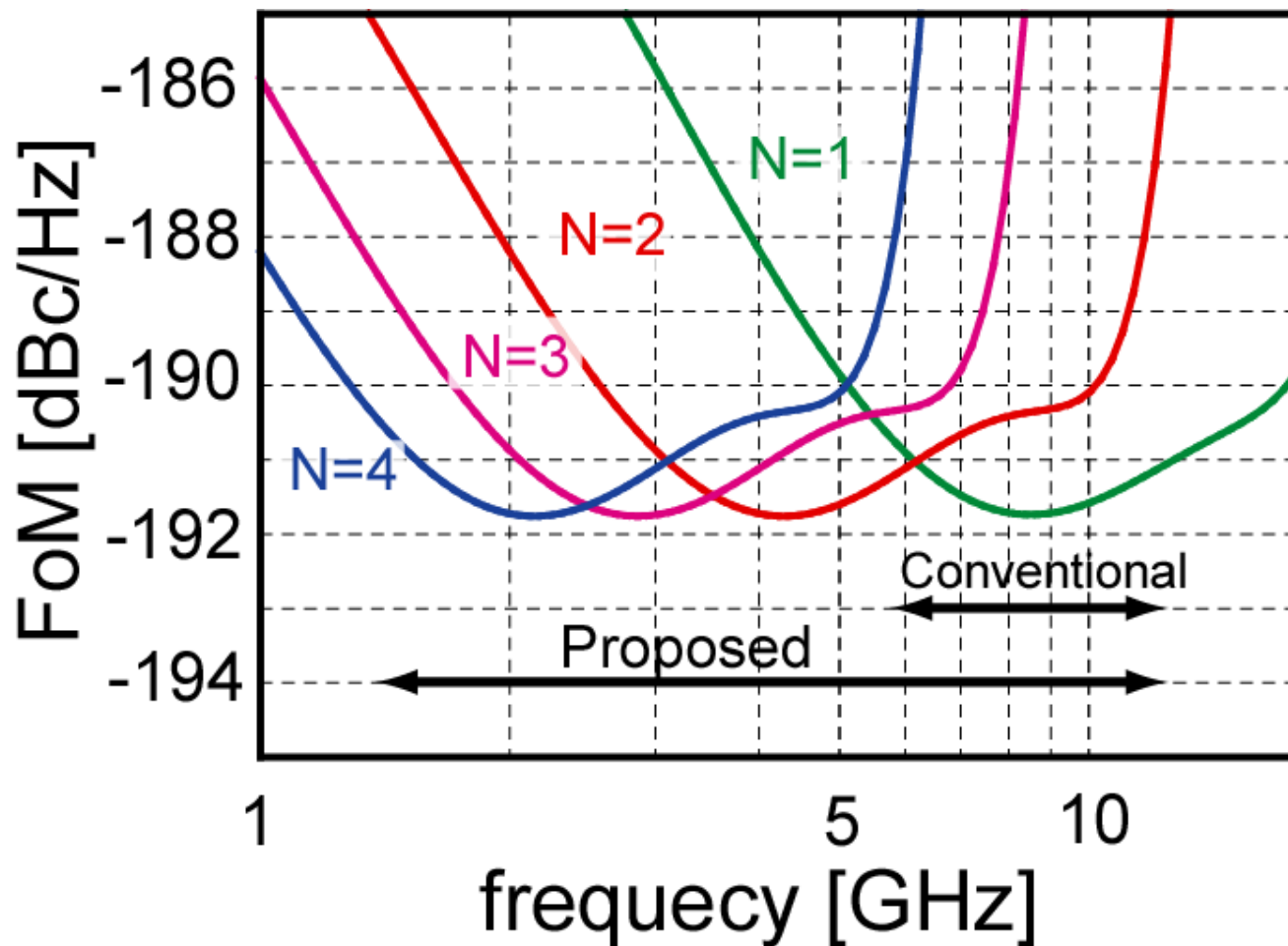


CMOS型LC発振器

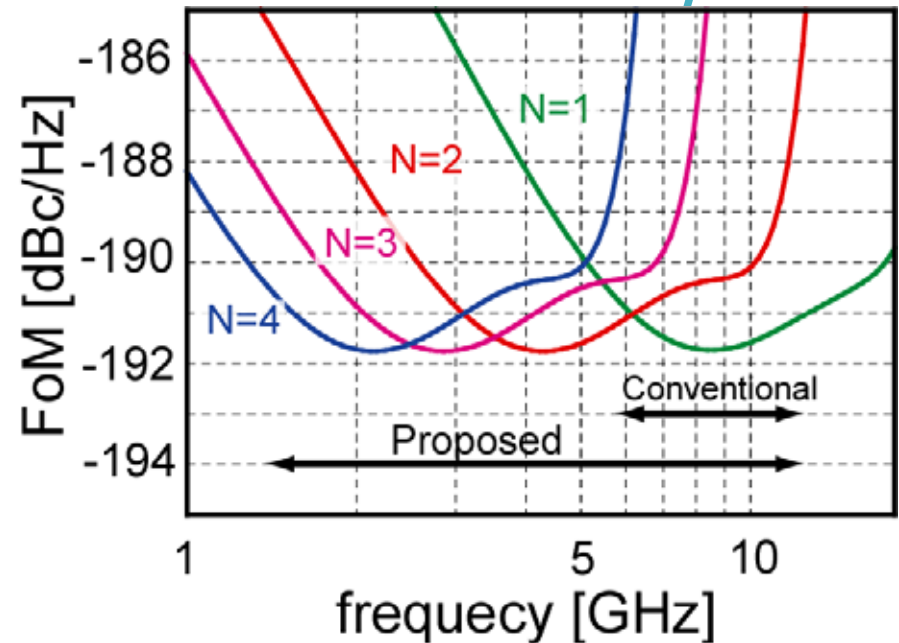
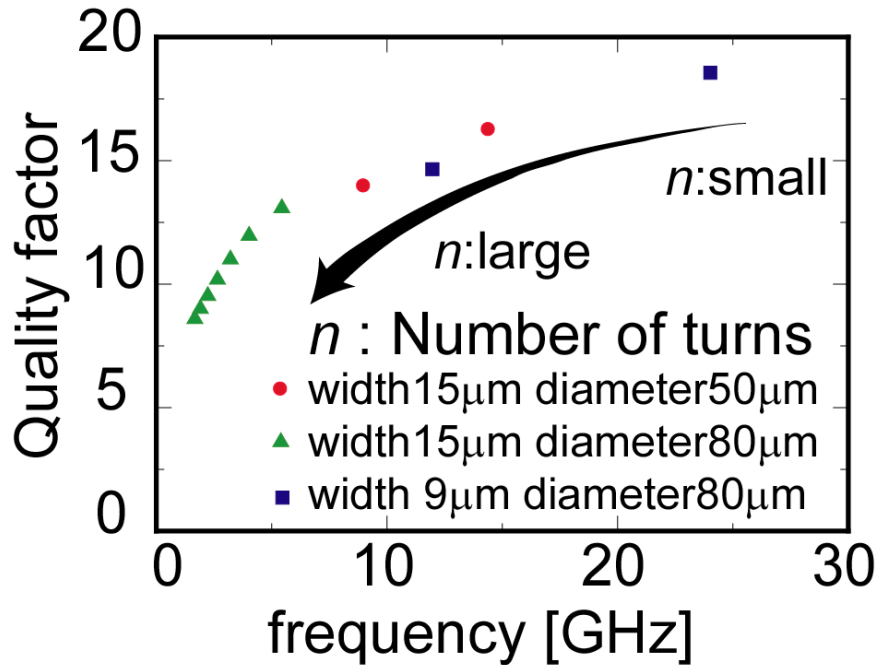


リング型注入型周波数分周器

divide-by-#	not-divider	2	3	4
oscillation frequency [GHz]	3.0	6.0	9.0	12.0
phase noise at oscillation frequency [dBc/Hz]	-126.1	-123.0	-119.1	-114.9
phase noise at 3GHz [dBc/Hz]	-126.1	-129.0	-128.6	-127.0
$20\log N$ [dBc/Hz]	+0	+6	+9	+12
P_{VCO} [mW]	4.0	5.3	4.2	3.5
$P_{divider}$ [mW]	0	0.2	0.2	0.2
FoM [dBc/Hz]	-185.9	-191.4	-191.9	-191.1



- インダクタの周波数特性を考慮し、高い周波数で発振させることにより共振器のQ値を向上させ低位相雑音な電圧制御発振器を実現する手法の提案した
- 2分周だけでなく分周比をNと一般化し、分周器を用いることによってVCOのFoMが改善される場合の条件式を導出した
- 実際に回路を設計し、シミュレーションを行いVCOの低位相雑音化が実現できたことを示した



インダクタのQ値は周波数とともに向上

VCOには性能が出しやすい周波数が存在

分周器を用いることで各周波数で性能up

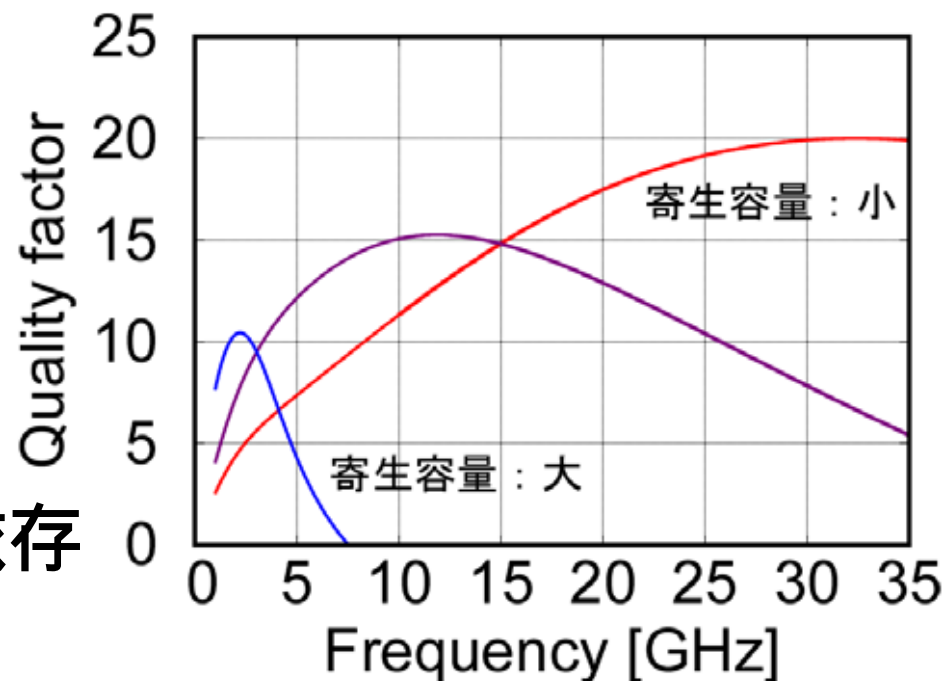
$$Q = \frac{\text{Im}(Z_d)}{\text{Re}(Z_d)}$$

$$Q(\omega) = \frac{\omega L}{R} (1 - \omega^2 LC) - \omega CR$$

インダクタの性能は形状に依存

面積が大きい: 傾き 大, C大

面積が小さい: 傾き 小, C小



所望の発振周波数より高い周波数を利用することで、高性能な共振器を設計できる

寄生容量の低減：
•基板配線間容量 ==> 配線長短・配線幅狭
•配線配線間容量 ==> 巻き数小・配線厚小
•基板容量 ==> 基板配線間容量小

寄生抵抗の低減：
•配線抵抗 ==> 配線長短・配線幅広
•基板渦電流 ==> 半径小
•基板抵抗 ==> 基板配線間容量小

インダクタンスの増大：
•半径大 ==> 基板配線間容量増大
配線抵抗増大
基板渦電流増大
•巻き数大 ==> 基板配線間容量増大
配線抵抗増大
配線間の相互インダクタンス
•配線幅狭 ==> 配線抵抗増大