

トランジスタの寄生容量を考慮した 電圧制御発振器の最適設計手法の検討

Design Optimization of LC-VCO in Consideration of Parasitic Capacitance

村上 壘 原 翔一 岡田 健一 松澤 昭
Rui Murakami Shoichi Hara Kenichi Okada Akira Matsuzawa

東京工業大学 大学院理工学研究科 電子物理学専攻
Department of Physical Electronics, Tokyo Institute of Technology

1 はじめに

Si CMOS プロセスではインダクタの特性によって電圧制御発振器 (VCO) の性能が制限される。そのため、VCO を設計する際、インダクタの構造最適化を行う必要がある。しかし高周波での動作や広帯域化を考慮した際、キャパシタの影響が無視できない。広帯域化の際に一般的に用いられるスイッチトキャパシタ回路において、トランジスタサイズを大きくすることで Q 値は向上するが、寄生容量により高周波でスイッチがオフしない場合や周波数可変範囲が狭くなるというトレードオフが存在する。本研究では、VCO におけるスイッチトランジスタの寄生容量と周波数可変範囲、キャパシタの Q 値との関係を数式から導出し、プロセス微細化による影響を検討する。

2 周波数可変比率とキャパシタの Q 値

図 1(a)、図 1(b) にそれぞれオフ時とオン時のスイッチトキャパシタの等価回路を示す。 C_L はインダクタ、 C_{tr} はクロスカップルトランジスタの寄生容量を表す。キャパシタの Q 値 Q_C は $Q_C = \text{Im}(Y)/\text{Re}(Y)$ と表される。図 1(a) において MIM 容量 C_{mim} とスイッチの寄生容量 WC_{ov} の比を $1:\alpha$ とする。必要な周波数可変比率を γ とすると、 C_{mim} は以下のように表すことができる。

$$C_{mim} = \frac{8\alpha(C_L + C_{tr})\gamma}{(\alpha - 1)\gamma^2 - 2(\alpha + 1)\gamma + (\alpha - 1)} \quad (1)$$

トランジスタのオン抵抗 R_{on} は式 (2) のように書ける。

$$R_{on} = \frac{L}{\mu C_{ox} W (V_{gs} - V_{th})} = \frac{K_R}{W} \quad (2)$$

式 (1)(2) からスイッチをオンした際の Q_C は次式で求められる。

$$Q_C = \frac{2}{\omega K_R \alpha C_{ov}} + \frac{4 + (\omega K_R \alpha C_{ov})^2 (\alpha - 1)\gamma^2 - 2(\alpha + 1)\gamma + (\alpha - 1)}{\omega K_R \alpha C_{ov} 8\alpha\gamma} \quad (3)$$

3 計算結果

式 (3) について、CMOS 180 nm と 65 nm プロセスのデータを用いて計算を行った。ここでは $\alpha = 1/10$, $\gamma = 0.1$ とし計算を行った。その結果を図 2 に示す。共振器の Q 値は $Q_{tank} = 1 / \left(\frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_C} \right)$ で計算され、その結果を図 3 に示す。ここでは共通のインダクタのデータを使用しており、 Q 値の算出には [1] の手法を用いている。VCO の性能指標である FoM は、次式 (4) の様に表される [2]。

$$FoM = 10 \log \left(\frac{kTV_{DD}}{2AQ_{tank}^2 \times 1mW} \right) \quad (4)$$

A は VCO の出力振幅であり、 V_{DD}/A が一定ならば FoM の差は Q_{tank} の差から求めることができる。これより、65 nm CMOS プロセスを用いた場合、180 nm プロセスの場合と比較して、15 GHz において、FoM が 2 dB 低減することがわかった。

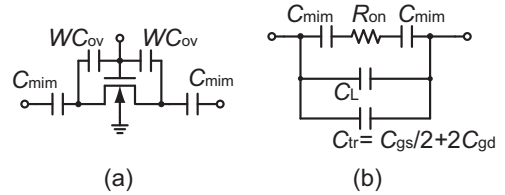


図 1 (a) スwitchトキャパシタ (b) スwitchオン時の等価回路

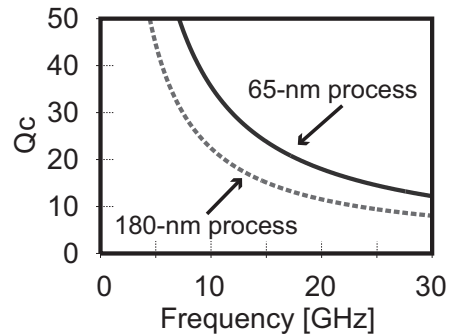


図 2 容量の Q 値

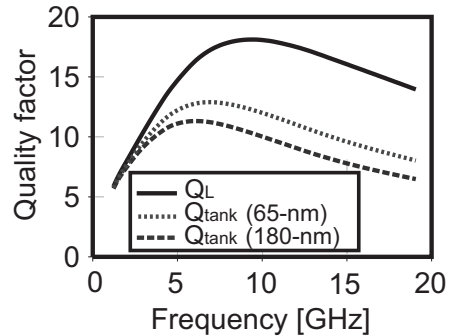


図 3 LC 共振器の Q 値

4 まとめ

スイッチトランジスタの寄生容量と周波数可変範囲、キャパシタの Q 値との関係を数式から導出し、より微細なプロセスを用いることで VCO の性能が改善することがわかった。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究『電波資源拡大のための研究開発』、半導体理工学研究センター、NEDO、並びに東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通じ、日本ケイデンス株式会社およびアジレント・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。

参考文献

- [1] T. Ohira, *IEEE TCAS-II*, Vol. 52, No.12, pp. 846–850, Dec. 2005.
- [2] P. Kinget, “Integrated GHz voltage controlled oscillators,” pp. 353–381, Kluwer Academic Publishers, 1999.