

# インダクタの自己共振補正を考慮したLC-VCOの最適化

A Design Optimization of Low-Phase-Noise LC-VCO Considering Self-resonance Correction

村上 塁                      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。従来用いられる設計手法ではインダクタのインピーダンスの実数部と虚数部の比から Q 値を導出する [1]。しかし、この手法では自己共振周波数付近でインダクタ本来の性能よりも Q 値が小さくなるため、文献 [2] の評価手法が提案されている [2, 3]。本研究では、シミュレーション結果を元に、従来のインダクタの評価方法で VCO を設計した場合とインダクタの自己共振補正を考慮して LC-VCO を設計した場合の性能差について報告する。

## 2 Q 値の定義による差

VCO の性能評価には FoM を用いる。VCO の FoM は次式で表される [4]。

$$FoM = 10 \log \left[ \frac{2kT}{P_{sig}} \left( \frac{f_0}{2Q_{tank}f_{offset}} \right)^2 \right] - 20 \log \left( \frac{f_0}{f_{offset}} \right) + 10 \log \left( \frac{P_{DC}}{1mW} \right) \quad (1)$$

ここで  $P_{sig}$  は出力電力、 $f_0$  は発振周波数、 $f_{offset}$  はオフセット周波数、 $P_{DC}$  は消費電力である。式 (1) から FoM は  $Q_{tank}$  の値が高いほど良くなる。 $Q_{tank}$  はインダクタの Q 値  $Q_L$  とキャパシタの Q 値  $Q_C$  の並列で決まる。Si CMOS プロセスでは  $Q_C \gg Q_L$  であるため  $Q_{tank}$  はほぼ  $Q_L$  で決まる。 $Q_L$  の定義としては、次式 (2) が広く用いられている [1]。

$$Q_1 = \frac{\text{Im}[Z]}{\text{Re}[Z]} \quad (2)$$

$\text{Im}[Z]$  がリアクタンスを、 $\text{Re}[Z]$  が損失である抵抗を表す。式 (2) の定義の場合、自己共振周波数でインダクタンスとキャパシタンスが打ち消し合い虚数成分が 0 になり、 $Q_1=0$  となるため自己共振周波数よりも十分低い周波数でしか  $Q_{tank}$  としての評価ができない。そこで、次のような Q 値の評価手法が提案されている [3]。

$$Q_2 = \frac{\omega}{2} \frac{1}{Z} \left| \frac{\partial Z}{\partial \omega} \right| \quad (3)$$

式 (3) の定義を用いることによって、インダクタンスとキャパシタンスが自己共振周波数周辺でも打ち消し合わないような評価が可能である。式 (3) は共振点でのみの Q 値であるため、インダクタに理想のキャパシタを並列に接続し共振点を変化させ、各周波数で  $Q_2$  を求めることにより  $\omega$  の関数である  $Q_2(\omega)$  が得られる。

## 3 シミュレーション

CMOS 90nm プロセスを用いてシミュレーションを行った。図 1 に、3 巻で内径が  $60\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$  のインダクタの Q 値を上述の  $Q_1$  及び  $Q_2$  の式を用いて評価した結果を示す。4GHz において、式 (2) の定義ではどちらも  $Q_1=11$  となるが、式 (3) の定義による  $Q_2$  では、内径の大きなインダクタの方が高い値を示す。次に、これらのインダクタを用いて CMOS クロスカップル型の LC-VCO を設計し、シミュレーションを行った。FoM を図 2 に、結果のまとめを表 1 に示す。表 1 及び式 (1)

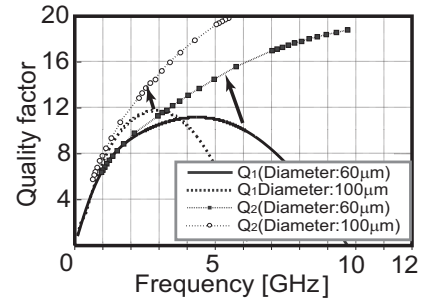


図 1 インダクタの Q 値

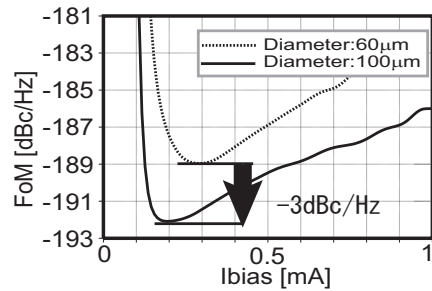


図 2 Q 値の差異による FoM の差

表 1 シミュレーション結果

内径 [ $\mu\text{m}$ ]	$L$ [nH]	$Q_1$	$Q_2$	FoM[dBc/Hz]
60	3.1	11	13	-189
100	6.9	11	17	-192

を元に計算を行った結果、FoM の差は  $7\text{dBc/Hz}$  になる。しかし、図 2 の結果では  $3\text{dBc/Hz}$  の差となっている。この差はバイアス条件の違い、出力振幅差によると考えられる。

## 4 まとめ

インダクタの Q 値の異なる 2 種類の定義による自己共振周波数周辺での Q 値の差異を確認した。 $Q_1$  が同じ値でも  $Q_2$  が高いインダクタの方が VCO に用いた場合に FoM が下がり、高い性能が出ることを示した。

## 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、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し、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] A. M. Niknejad and R. G. Meyer, *IEEE JSSC*, Vol. 33, No.10, pp. 1470–1481, Oct. 1998.
- [2] Behzad Razavi, *IEEE JSSC*, Vol. 31, No. 3, pp. 331–343 March 1996.
- [3] T. Ohira, *IEEE TCAS-II*, Vol. 52, No.12, pp. 846–850, Dec. 2005.
- [4] P. Kinget, “Integrated GHz voltage controlled oscillators,” pp. 353–381, Kluwer Academic Publishers, 1999.