

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 20 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420338

研究課題名(和文) 準ミリ波帯以上の高周波領域における電圧制御LC発振器の低位相雑音化の研究

研究課題名(英文) A Study of Low-Phase Noise Voltage-Controlled Oscillators beyond Quasi-millimeter Wave

研究代表者

伊藤 信之 (Itoh, Nobuyuki)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：10598519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、準ミリ波帯以上の周波数におけるCMOS無線通信用電圧制御発振器(VCO)の低位相雑音化を検討した。具体的には、VCOの増幅器回路の位相雑音に対する寄与と雑音伝搬の経路、およびLC共振器の位相雑音に対する寄与をバラクタとインダクタについて解析・改善を行った。バラクタの解析においてはサイズ依存性を明確にし、高Qバラクタを実現することで位相雑音を約10dB改善した。また、インダクタの解析においては準ミリ波帯以上において表皮効果が課題になることを解明し、ストライプ構造をとることで位相雑音を約4dB改善した。以上本研究により準ミリ波帯以上のVCOの位相雑音を約14dB改善できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the realization of low phase-noise CMOS voltage-controlled oscillators (VCO) above quasi-millimeter wave have been studied. Practically, the influence for the phase noise of the noise of the gain-cell and its propagation path and that of the LC resonator, particularly the varactor and the inductor, was analyzed and improved. By the varactor analyzing, the high-Q varactor was realized by size optimization of varactor. As a result, the phase noise of VCO was improved approximately 10 dB. Also, by the inductor analyzing, the influence of skin effect was depicted, and it was improved using proposed striped inductor in this research. As a result, the phase noise of VCO was improved approximately 4 dB. By this research, the overall improvement of phase noise of quasi-millimeter wave VCO was approximately 14 dB.

研究分野：半導体集積回路

キーワード：電圧制御発振器 位相雑音 MOSバラクタ インダクタ 表皮効果 準ミリ波 ミリ波

1. 研究開始当初の背景

CMOS プロセスはスケージングに則り素子の微細化が進んできており、微細化と同時に MOSFET の高周波特性も向上している。このような技術的背景と、情報量増大によるキャリア周波数の高周波化に伴い、無線通信用高周波アナログ CMOS 集積回路は数 GHz 帯の量産のみならず、準ミリ波帯、ミリ波帯、テラヘルツ波帯応用の研究開発も進んでいる。

無線通信回路にとって電圧制御発振器 (Voltage Controlled Oscillator 以下、VCO とする) を含む局部発振器回路は心臓部であり、その位相雑音特性は送受信器の回路特性を左右する。しかしながら図 1 に示すように、発振周波数約 10GHz 以下の領域では位相雑音は発振周波数に対して約 20dB/dec. の依存性を示すのに対して、発振周波数約 10GHz 以上の領域では位相雑音は発振周波数に対して約 30dB/dec. の依存性を示すことがわかる。これは、(i)共振器回路の Q 値、(ii)能動回路の雑音パラメータが、発振周波数 10GHz 以上の領域において、劣化していることを示している。

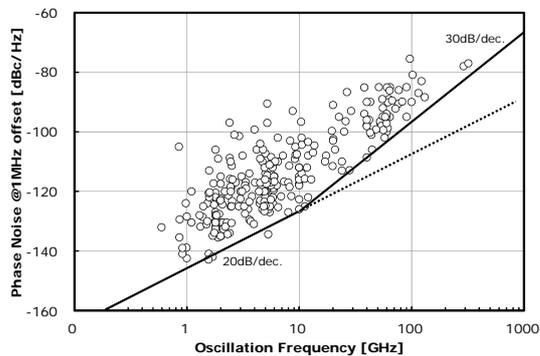


図 1 過去 20 年間に発表された CMOS LC 発振器の発振周波数と 1MHz 離調における位相雑音

そこで、上記二点に着目して、準ミリ波帯以上の発振周波数における CMOS LC-VCO の位相雑音の劣化原因を明らかにするとともに、それらの改善方法を提案することが急務である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、準ミリ波帯以上の周波数における CMOS 無線通信用高周波電圧制御発振器の低位相雑音化である。無線通信用トランシーバは、近年、小型化の観点からシリコンの CMOS 集積回路に実現されているが、無線通信による情報量の爆発的な増大によりキャリア周波数は高周波化の一途を辿っており、ミリ波領域、テラヘルツ波領域に至っている。電圧制御発振器は無線通信回路にとって、心臓部であり低位相雑音特性が要求されるが、高周波化に伴い位相雑音特性は理論値よりも悪化している。そのため、このような周波数領域における、低位相雑音化の

研究を系統的に行う必要がある。

3. 研究の方法

準ミリ波帯以上の高周波領域における LC-VCO の低位相雑音化手法の研究を遂行するために、以下の方法を用いて本研究を実施した。

(1) 準ミリ波帯以上の高周波領域における、LC-VCO の位相雑音に対する能動素子の雑音の重畳過程と能動素子の雑音の寄与を明確にする。

(2) 準ミリ波帯以上の高周波領域において LC 共振回路の Q 値に対するインダクタの Q 値、キャパシタの Q 値の寄与を明確にする。

(3) 上記(1)、(2)を鑑みて改善案を導入した VCO の設計・試作を行う。

4. 研究成果

(1) LC-VCO の位相雑音に対する能動素子の雑音の寄与とその改善

Leeson によると、発振周波数  $f_{osc}$ 、離調周波数  $\Delta f$  における VCO の位相雑音  $PN$  は式(1)のように示すことができる。なお、ここで  $F$  は MOSFET のチャネル雑音による雑音ファクタを示し、 $P_{osc}$  は発振電力、 $Q$  は LC 共振器の Q 値、 $f_c$  は位相雑音のフリッカ雑音領域と熱雑音領域のコーナー周波数である。

$$PN(\Delta f) = \frac{2kTF}{P_{osc}} \left[ 1 + \left( \frac{f_{osc}}{2Q\Delta f} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{f_c}{\Delta f} \right) \quad (1)$$

したがって位相雑音の離調周波数依存性は図 2 のような特性を示す。

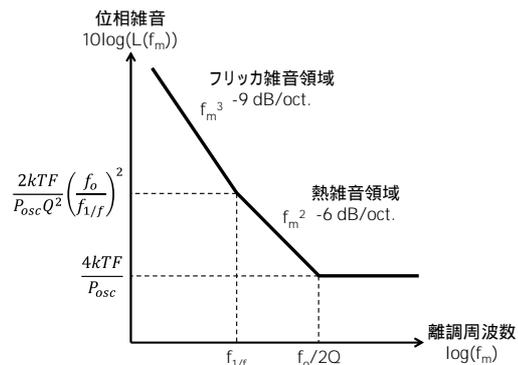


図 2 LC 発振器の位相雑音の離調周波数依存性

ここで発振器の位相雑音の回路電流依存性を考えると、回路の電流が低く  $P_{osc}$  が十分に大きくない領域では位相雑音は式(1)に示すように  $P_{osc}$  の増大に伴い改善するが、更に回路電流を大きくした場合、 $P_{osc}$  は飽和し、一方、MOSFET のチャネル雑音の増大により発振器の位相雑音は熱雑音領域において劣化すると考えられる。さらに回路電流の増大による MOSFET のフリッカ雑音による影響も重畳するため、フリッカ雑音領域では熱雑音領域における位相雑音の劣化に対してその影響は二乗になる。したがって、様々な回路電流における発振器の位相雑音を

100kHz および 1MHz 離調において測定する事により、雑音の重畳の状態を観測する事ができる。図 3 に実験に用いた発振周波数 23GHz の発振器の回路を示す。

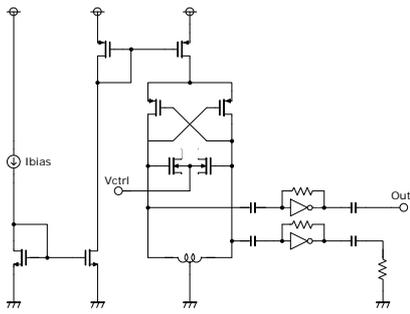


図 3 測定した発振器回路

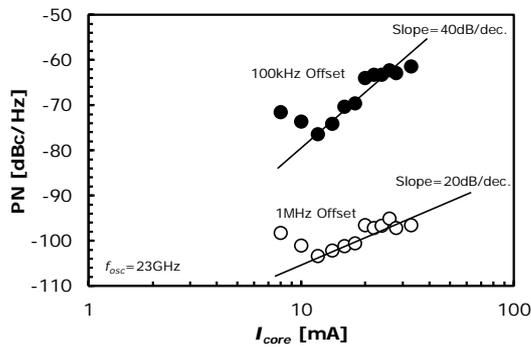


図 4 LC 発振器の 100kHz および 1MHz における位相雑音の回路電流依存性

その結果、図 4 に示すように、回路電流の高い領域における位相雑音の回路電流依存性は離調周波数 1MHz において 1 次、離調周波数 100kHz においては 2 次になっていることが分かる。

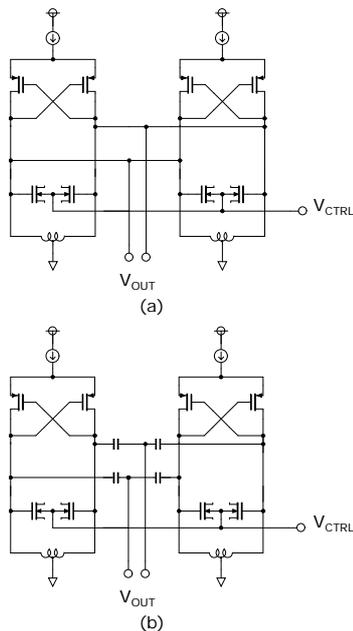


図 5 発振器の等価回路、(a)DC 結合回路、C 結合回路

しかしながら、これだけでは熱雑音領域とフリッカ雑音領域に重畳している雑音がそれぞれ、MOSFET のチャネル雑音およびチャネル雑音+フリッカ雑音であることを示しているに過ぎない。特にフリッカ雑音の重畳が、従来論じられているコモンノードから  $2f_{osc}$  に重畳し発振器回路でダウンコンバートされる経路と直流電流に重畳しそのまま  $f_{osc}$  にアップコンバートされる経路かが明確にできない。

そこで、二つの発振器を直接結合(DC 結合)と容量結合(C 結合)の異なる結合方法で電力合成した回路を検討した。この二つの回路の位相雑音の離調周波数を解析することにより、フリッカ雑音の重畳においてどちらの経路が支配的であるか明確になると考えられる。ここで用いた回路は、図 5 に示す回路および図 3 に示した単体の回路である。

その結果を図 6 に示す。図 6 からわかるように、単体回路と比較して 1 MHz 離調においては、DC、C 結合回路のどちらにおいても電力合成によって位相雑音が改善した。

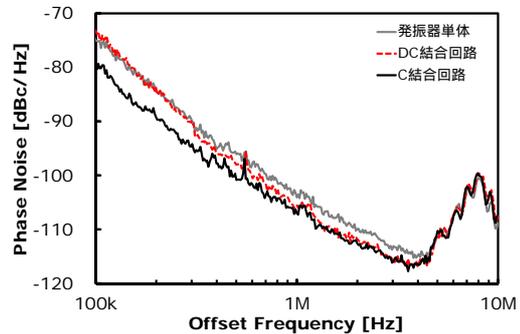


図 6 測定された位相雑音の離調周波数依存性

一方、100 kHz 離調においては DC 結合回路では位相雑音が改善しなかったのに対して、C 結合回路では位相雑音が改善した。したがって、DC 結合回路においてフリッカ雑音が重畳する要因としては、偶数次高調波に重畳した高周波信号によるものよりも、低周波雑音が直接アップコンバージョンすることが支配的であると考えられる。つまり、単体回路においても同様な事が起きており、もちろんフリッカ雑音の重畳経路としては両方が考えられるが、どちらかという低周波雑音が直接アップコンバージョンする経路が支配的であることが分かった。

(2) 準ミリ波帯以上の高周波領域における LC 共振回路の Q 値に対するインダクタの Q 値、キャパシタの Q 値の寄与

発振器に用いられる LC 共振器は、MOS バラクタと配線層で構成されるインダクタにより構成され、その等価回路を図 7 に示す。また、インダクタ、バラクタ、LC 共振器の Q 値はそれぞれ式(2)~(4)で示される。

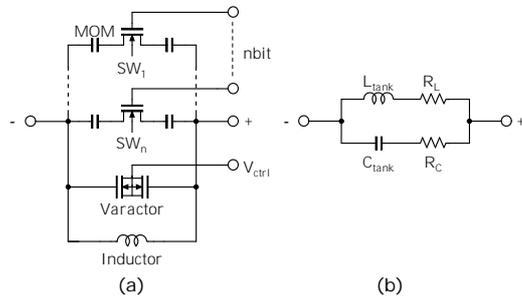


図 7 CMOS LC-VCO に多く用いられる LC 共振器(a)とその等価回路(b)

$$Q_L = \frac{2\pi fL}{R_L} \quad (2)$$

$$Q_C = \frac{1}{2\pi fCR_C} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{Q_L^{-1} + Q_C^{-1}} = \frac{2\pi fL}{R_L + (2\pi f)^2 LCR_C} \quad (4)$$

式(4)より  $Q$  は、 $Q_L$  と  $Q_C$  により構成されており、低周波領域では  $Q_L$  が支配的となり、高周波領域では  $Q_C$  が支配的となる。典型的な例として、 $f = 1$  GHz において  $Q_L$  は約 10、 $Q_C$  は約 100 であるのに対して  $f = 20$  GHz において  $Q_L$  は約 20、 $Q_C$  は約 7 となり、高周波領域において  $Q_C$  は非常に低くなる(式(3))。さらに、周波数の高い領域では、CMOS 集積回路の配線層で構成されるインダクタの表皮効果が顕在化する。

ここで、表皮深さを  $d_s$ 、表皮効果が顕在化する周波数領域におけるインダクタの直列寄生抵抗を  $R_{LS}$ 、インダクタメタルの配線幅  $W_L$ 、厚さ  $T_L$ 、全長  $l$ 、抵抗率  $\rho_L$ 、透磁率  $\mu$  を用いてあらわしたインダクタの  $Q$  値を  $Q_{LS}$  とすると、それぞれ式(5)~(7)であらわせる。

$$d_s = \sqrt{\frac{\rho_L}{\pi \mu f}} \quad (5)$$

$$R_{LS} = \rho_L \frac{l}{2(W_L + T_L + 2d_s)d_s} \quad (6)$$

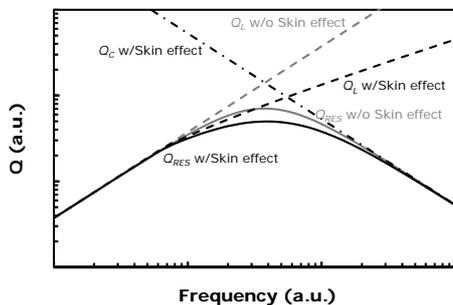


図 8 表皮効果を考慮した場合と考慮しない場合の LC 共振器の  $Q$  値の周波数依存性

$$Q_{LS} \approx \frac{4(W_L + T_L)L}{l} \sqrt{\frac{\pi f}{\rho_L \mu}} \quad (7)$$

式(5)~(7)により計算した LC 共振器の  $Q$  値の周波数依存性は図 8 に示すように、低周波領域では、 $Q_C$  が非常に大きいため  $Q_L$  のみを考慮すれば良いが、高周波領域では、 $Q_C$  および  $Q_L$  の両者を考慮する必要がある。

### 高周波領域における $Q_C$ 改善

$N$  個のバラクタを並列接続した場合のバラクタのキャパシタンス、寄生抵抗値は式(8)~(9)で示すことができる。

$$C = NC_{OX}W_vL_v \quad (8)$$

$$R_C = \frac{(R_G + R_B)}{N} = \frac{1}{12N} \left\{ 4\rho_g \frac{W_v}{L_v} + \rho_b \left( \frac{W_v}{L_v} \right) \right\} \quad (9)$$

ここで  $R_G$ : ゲート抵抗、 $R_B$ : 基板抵抗、 $\rho_g$ : ゲートポリシリコンのシート抵抗、 $\rho_b$ : バルクのシート抵抗、 $C_{OX}$ : ゲート酸化膜の単位面積当たりの容量、 $L_v$ : バラクタのゲート長、 $W_v$ : バラクタのゲート幅である。

式(3)、(8)、(9)よりバラクタを  $N$  個並列接続し容量値を変えても  $Q$  値は一定となり、さらに式(9)よりバラクタの寄生抵抗値は  $W_v/L_v$  に対して極小値をもつと考えられる。

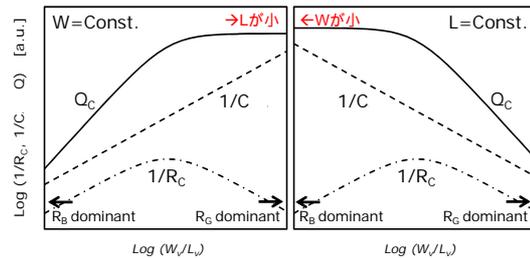


図 9 MOS バラクタの  $Q$  値の  $W_v/L_v$  依存性

図 9 にバラクタの  $Q$  値の  $W_v/L_v$  依存性を示す。つまり、 $L_v$  が一定の場合(図 15 右)、 $W_v/L_v$  を減少させると、 $R_B$  は増大するものの  $R_G$  は減少し、 $R_G$  が支配的であるこの領域の直列寄生抵抗  $R_C$  は減少する。同時に  $W_vL_v$  積に比例する  $C$  も減少するため  $Q_C$  は上昇する。しかしながら、さらに  $W_v/L_v$  を減少させると、 $R_G$  の減少よりも  $R_B$  の増大の方が支配的となるため、 $Q_C$  の上昇は飽和する。 $W_v$  が一定の場合はその逆となる。

$R_C$  の極小値を与える  $W_v/L_v$  は式(10)で示され、ゲートポリシリコンのシート抵抗とバルクのシート抵抗の比によって決定され、 $W_v/L_v$  を微細化することによって  $Q_C$  の向上が見込まれる。

$$\left( \frac{W_g}{L_g} \right)_{at \ Q_{max}} = \sqrt{\frac{\rho_b}{4\rho_g}} \quad (10)$$

そこで、サイズの異なる 3 種類のバラクタ

を用いた発振器回路を設計・試作し、その位相雑音の離調周波数依存性を評価した結果を図 10 に示す。図 10 に示すように、発振周波数 22GHz において 1 MHz 離調の位相雑音は、 $W_v/L_v = 0.5 \mu\text{m} / 0.26 \mu\text{m}$  のバラクタを用いた VCO で -106 dBc/Hz、 $W_v/L_v = 2.0 \mu\text{m} / 0.36 \mu\text{m}$  のバラクタを用いた VCO で -102 dBc/Hz、 $W_v/L_v = 2.0 \mu\text{m} / 2.0 \mu\text{m}$  のバラクタを用いた VCO で -97 dBc/Hz となり、最大約 10dB の改善が確認された。

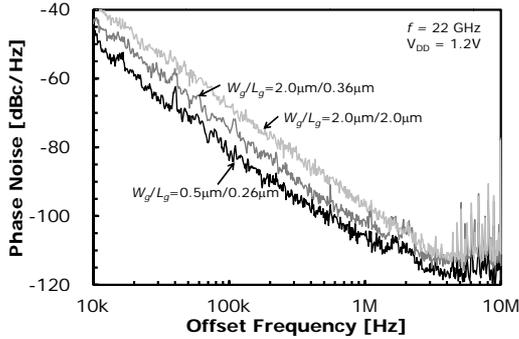


図 10 サイズの異なる 3 種類のバラクタを用いた発振器の位相雑音の離調周波数依存性

#### 高周波領域における $Q_L$ 改善

表皮効果によって  $Q_L$  は劣化し、しいては LC 共振器の  $Q$  は劣化する。これはインダクタの導体断面の周囲部分にのみ高周波電流が流れることに起因している。そこで、図 11 に示すように表皮効果を低減するために、通常のインダクタを 3 分割し、導体断面の周囲面積が大きいインダクタ (ストライプインダクタ) を用いた発振器を設計・試作した。

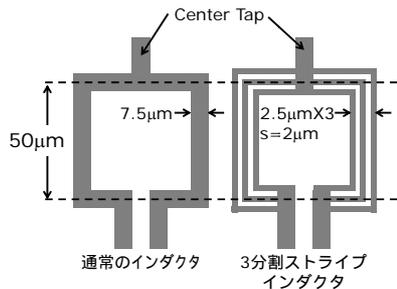


図 11 通常のインダクタとストライプインダクタの構造

これらのインダクタを電磁界解析で解析した結果を図 12 に示す。

図 12 からわかるように、通常のインダクタでもストライプインダクタでも電流はインダクタメタルの周囲にしか電流が流れていないが、ストライプインダクタの場合はその経路が通常インダクタの 3 倍であることが分かる。これによりインダクタの寄生抵抗が低減され  $Q$  値の向上が見込まれた。

ストライプ形状のインダクタを用いることによる寄生抵抗  $R_{LHFS}$ 、 $Q$  値  $Q_{LHFS}$ 、コーナー周波数  $f_{CS}$  を式(11)-(13)に示す。また、通常形状インダクタに対する寄生抵抗、 $Q$  値、

コーナー周波数の比を式(14)-(16)に示す。

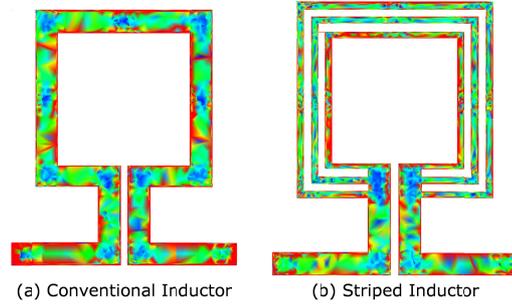


図 12 通常のインダクタとストライプインダクタの  $f=33\text{GHz}$  における電流の流れ

$$R_{LHFS} \approx \sqrt{\pi\mu\rho f} \frac{l}{2(W+nT)} \quad (11)$$

$$Q_{LHFS} \approx \frac{4L_{\text{tank}}(W+nT)}{l} \sqrt{\frac{\pi f}{\mu\rho}} \quad (12)$$

$$f_{CS} = 4 \left( \frac{n}{W} + \frac{1}{T} \right)^2 \frac{\rho}{\pi\mu} \quad (13)$$

$$\frac{R_{LHFS}}{R_{LHF}} = \frac{W+T}{W+nT} \quad (14)$$

$$\frac{Q_{LHFS}}{Q_{LHF}} = \frac{W+nT}{W+T} \quad (15)$$

$$\frac{f_{CS}}{f_C} = \frac{W+nT}{W+T} \quad (16)$$

同様に VCO の位相雑音については、式(1)および式(15)より、ストライプ形状のインダクタを用いた VCO の熱雑音領域における位相雑音  $L_S(\Delta f)$  は、通常形状のインダクタを用いた位相雑音  $L(\Delta f)$  に対して式(17)で示す改善が期待できる。

$$\frac{L_S(\Delta f)}{L(\Delta f)} = \left( \frac{Q_{LHF}}{Q_{LHFS}} \right)^2 = \left( \frac{W+T}{W+nT} \right)^2 \quad (17)$$

測定したインダクタの  $Q$  値の周波数依存性を図 12、VCO の位相雑音の離調周波数依存性を図 13 に示す。

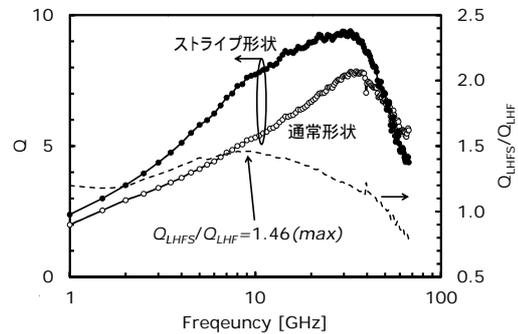


図 13 通常形状のインダクタとストライプ形状のインダクタの測定値から求めた  $Q$  値の周波数依存性と  $Q$  値の比の周波数依存性

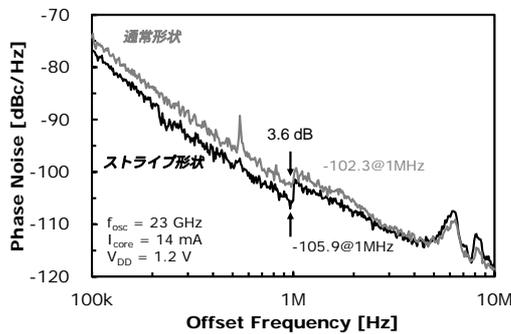


図 14 通常形状インダクタとストライプ形状インダクタを用いた PMOS-VCO の位相雑音の離調周波数依存性。

図 13 から明らかなように、測定された全ての周波数領域において、ストライプ形状のインダクタの  $Q$  値は通常形状のインダクタの  $Q$  値より高い値を示している。また、図 14 に示した結果より、1 MHz 離調における位相雑音は通常形状のインダクタを用いた VCO で  $-102.3$  dBc/Hz、ストライプ形状のインダクタを用いた VCO で  $-105.9$  dBc/Hz であり、その差は  $3.6$  dB であった。この値は見積もられた値と良い一致を示した。

以上の結果より、本研究の LC 共振器の改善により、準ミリ波帯以上の周波数における電圧制御発振器の位相雑音を約  $14$  dB 低減できることが確認された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

N. Itoh, H. Tsuji, Y. Itano, T. Morishita, K. Komoku, and S. Yoshitomi, "A Study of Striped Inductor for K- and Ka-band Voltage-controlled Oscillators," To be published IEICE Transaction on Electronics, Vol.E99-C, No.6, pp.614-622, Jun. 2016. (査読有)

DOI:10.1587/transle.E99.C.614

Y. Itano, S. Morimoto, S. Yoshitomi, and N. Itoh, "High-Q MOS Varactor Models for Quasi-Millimeter-Wave Low-Noise LC-VCOs," IEICE Transaction on Fundamentals, vol. E97-A, No.3, pp. 759-767, Mar. 2014. (査読有)

DOI:10.1587/transfun.E97.A.759

〔学会発表〕(計 9 件)

伊藤信之, "高周波領域における LC 共振器の特性改善とそれを用いた電圧制御発振器の特性," URSI-C 委員会 第 23 期 第 5 回公開研究会, 唐津, 2016 年 3 月 14 日. H. Tsuji, Y. Itano, K. Komoku, T. Morishita, S. Yoshitomi, and N. Itoh, "A Study of Flicker Noise Suppression of K-Band VCO using Striped Inductor,"

Proc. of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2015), WE4E-1, Nanjing, Dec. 2015.

伊藤信之, 辻大輝, 板野由佳, 森下賢幸, 小椋清孝, 吉富貞幸, "ストライプ形状のインダクタの高周波特性とそれを用いた電圧制御発振器の特性," 信学技報, vol. 115, no. 260, MW2015-113, pp. 97-102, 2015 年 10 月.

辻大輝, 板野由佳, 小椋清孝, 森下賢幸, 伊藤信之, 吉富貞幸, "準ミリ波帯における容量結合型電力合成 LC-VCO による低位相雑音化に関する研究," 平成 27 年度 (第 66 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 12-2, 宇部, 2015 年 10 月 17 日.

辻大輝, 板野由佳, 小椋清孝, 森下賢幸, 伊藤信之, 吉富貞幸, "準ミリ波帯における容量結合型電力合成 LC-VCO による低位相雑音化に関する研究," 平成 27 年度 (第 66 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 12-2, 宇部, 2015 年 10 月 17 日.

辻大輝, 板野由佳, 小椋清孝, 森下賢幸, 吉富貞幸, 伊藤信之, "ストライプドインダクタを用いた CMOS LC VCO の位相雑音改善に関する研究," 電気学会 電子回路研究会 高周波集積回路の先端化技術と応用技術, ECT-15-001, pp.1-7, 高知, 2015 年 1 月 22 日.

H. Tsuji, Y. Itano, K. Komoku, T. Morishita, S. Yoshitomi, and N. Itoh, "Millimeter-Wave VCO using Striped Inductor," Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2014) 2014, pp. 959-961, Sendai, Nov. 2014.

伊藤信之, 板野由佳, 辻大輝, 小椋清孝, 森下賢幸, 吉富貞幸, "高周波領域における LC 共振器の  $Q$  値向上手法の検討," 信学技報, vol. 114, no. 120, ICD2014-24, pp. 65-70, 2014 年 7 月.

N. Itoh, Y. Itano, S. Morimoto, S. Yoshitomi, "Striped Inductor for Quasi Millimeter Wave Voltage-Controlled Oscillator," Proc. of the 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2013), pp.319-321, Seoul, Nov. 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 信之 (ITOH, Nobuyuki)  
岡山県立大学 情報工学部 教授  
研究者番号: 10598519