

氏名	板野 由佳
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第127号
学位授与の日付	平成30年3月23日
学位論文の題目	準ミリ波・ミリ波領域における低位相雑音電圧制御発振器の LC共振器に関する研究
学位審査委員会	主査 伊藤 信之 副査 有本 和民 副査 末岡 浩治 副査 森下 賢幸

学位論文内容の要旨

携帯電話、WLAN 等に代表されるように、無線通信は日々進歩し、この 20 年間で 10,000 倍以上の高速化が達成されている。このような無線通信の高速化を達成するには信号帯域幅の広帯域化が重要であり、そのためには基本的には搬送波周波数の高周波化が最も効果的である。このような背景の元、近年は IEEE802.ay に代表される 60GHz を用いるミリ波帯の無線通信規格、第五世代携帯電話に導入される 28GHz を用いる準ミリ波帯の無線通信規格の開発が進んでいる。しかしながら、無線通信を支える集積回路上の受動デバイスの周波数特性は高周波化とともに劣化するため小型化・高性能化を求められる携帯端末機器にとっては大きな課題となっている。特に無線通信の通信品質に大きく寄与する局部発振器を構成する電圧制御発振器の低位相雑音化は、重要な課題であり、その回路の主要な部分を構成する LC 共振器のミリ波・準ミリ波領域における低雑音化（=Q 値の向上）は直近の課題である。

そこで本論文では、LC 共振器を構成する、可変容量キャパシタ、固定容量キャパシタ、インダクタ、の Q 値の向上を目的とした。

一般にキャパシタの Q 値は $Q = 1/2\pi fCR$ で定義され高周波化とともに劣化するのに対して、インダクタの Q 値は $Q = 2\pi fL/R$ で定義され、インダクタンスがスケールアップされれば高周波化とともに向上する。したがって、準ミリ波・ミリ波領域における LC 共振器の Q 値の向上を目指すにはキャパシタの Q 値を向上させることが先決である。

そこで本論文の第 2 章では、差動型 MOS バラクタの Q 値の改善について焦点を当てている。差動型 MOS バラクタの Q 値は容量および寄生抵抗に反比例する。そのため容量に関しては L、W を微細化することで高い Q 値を得ることができる。一方、寄生抵抗を構成する要素としてはゲート抵抗およびバックゲート抵抗があり、それぞれの W/L 依存性が逆になるため、Q 値は W/L に対して極大値を持つ。つまり MOS バラクタの Q 値は微細化により向上するものの、飽和することを見いだしている。また、L および W を微細化すると、高い Q 値を得る代わりに容量可変範囲が低下するため、アプリケー

ション毎にそのトレードオフを勘案する必要があるが、現行の SPICE モデルではそのような広い範囲のサイズに対するスケラビリティが確保されていない。そのため本研究では、現行のモデルを拡張し新たに独自の PSP SFC モデルを提案している。PSP SFC モデルは広いサイズをカバーし、 N^+ MOS バラクタの最小サイズの精度を 18.9%から 0.2%まで向上し、 P^+ MOS バラクタの最小サイズの精度も 22.1%から 0.8%まで改善した。さらに提案したモデルを用いて 22GHz の VCO を 3 種類のバラクタを用いて設計・試作した結果、オフセット周波数 1MHz における位相雑音は、 $W/L=0.5\ \mu\text{m}/0.26\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}/0.36\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}/2.0\ \mu\text{m}$ (従来形) の MOS バラクタを用いた VCO でそれぞれ $-106\ \text{dBc}/\text{Hz}$ 、 $-102\ \text{dBc}/\text{Hz}$ 、 $-97\ \text{dBc}/\text{Hz}$ となり、約 9dB の改善を得られることを見だし、そのモデルの正確さを確認している。

第 3 章では、MOM キャパシタの Q 値の改善について焦点を当てている。MOM キャパシタの容量、寄生抵抗、寄生インダクタンス、の各成分は、フィンガーの L と W およびその本数 N に強く依存し、容量は LWN 積に比例、寄生抵抗は L、W、N 間でのトレードオフ、寄生インダクタンスは L に対しては強く正の依存性を示し N に対しては若干の負の依存性を示すため、Q 値および自己共振周波数は L、W、N に対して複雑な依存性を示すため、それをモデル化している。そのモデルを用いて、Q 値の向上に最適なフィンガー長もそれぞれ異なることを見だし、例えば $f=60\ \text{GHz}$ 、 $C=50\ \text{fF}$ 、 $M=3$ の MOM キャパシタでは $L=5\ \mu\text{m}$ において Q 値は最大値を示し、それは寄生抵抗のサイズ依存性が支配的であることが結論されている。また、ミリ波領域においても寄生インダクタンスの影響は無視できず、レイアウトには注意が必要であることも示している。

第 2 章、第 3 章においてキャパシタの Q 値の改善策が見いだされたため、第 4 章では LC 共振器の Q 値のさらなる向上をめざして、インダクタの Q 値を改善するため、高周波領域に対応したインダクタについて検討している。インダクタの Q 値は寄生抵抗に反比例するため、寄生抵抗を低下させるためにメタル幅を厚くしても、高周波領域では表皮効果の影響で効果が無い。そこで、寄生抵抗をモデル化し高周波領域におけるインダクタの Q 値を改善するために、インダクタに用いるメタルの周辺長を長くすることが有効であることを見だし、その実現のために、ストライプ構造のインダクタを提案し、インダクタメタルを 3 分割することで、Q 値としては 1.6 倍程度の改善を目指し、設計・試作したインダクタの測定により、ほぼ期待通りの Q 値の改善を得ている。また、同時にそれらのインダクタを用いた 20~40GHz の電圧制御発振器を設計・試作し、1MHz 離調の位相雑音を約 4dB 改善することを示している。

以上のように本論文では、集積回路上のキャパシタ、インダクタの Q 値を改善することにより、LC 共振器の Q 値を改善し、具体的には電圧制御発振器の位相雑音を約 13dB 改善できることを示している。

主業績

No.1	
論文題目	High-Q MOS-Varactor Modeling for mm-Wave VCOs
著者名	<u>Y. Itano</u> , N. Itoh, S. Yoshitomi, H. Hoshino
発表誌名	Proc. of the 2012 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.202-204, Kaohsiung, Dec. 2012.
No.2	
論文題目	Striped Inductor for Quasi Millimeter Wave Voltage-Controlled Oscillator
著者名	N. Itoh, <u>Y. Itano</u> , S. Morimoto, S. Yoshitomi
発表誌名	Proc. of the 2013 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.319-321, Seoul, Nov. 2013.
No.3	
論文題目	High-Q MOS Varactor Models for Quasi- Millimeter-Wave Low- Noise LC-VCOs
著者名	<u>Y. Itano</u> , S. Morimoto, S. Yoshitomi, N. Itoh
発表誌名	IEICE Transaction on Fundamentals, Vol. E97-A, No.3, pp. 759-767, Mar. 2014.
No.4	
論文題目	Modeling and Layout Optimization of MOM Capacitor for High-Frequency Applications
著者名	<u>Y. Itano</u> , T. Kitano, Y. Sakamoto, K. Komoku, T. Morishita, N. Itoh
発表誌名	IEICE Transaction on Fundamentals, Vol.E101-A, No. 2, pp. 441 - 446, Feb. 2018.

副業績

No.1	
論文題目	Millimeter-Wave VCO using Striped Inductor
著者名	H. Tsuji, <u>Y. Itano</u> , K. Komoku, T. Morishita, S. Yoshitomi, N. Itoh
発表誌名	Proc. of the 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.959-961, Sendai, Nov. 2014.
No.2	
論文題目	A Study of Flicker Noise Suppression of K-Band VCO using

	Striped Inductor
著者名	H. Tsuji, <u>Y. Itano</u> , K. Komoku, T. Morishita, S. Yoshitomi, N. Itoh
発表誌名	Proc. of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference, WE4E-1, Nanjing, Dec. 2015.
No.3	
論文題目	A Study of Striped Inductor for K- and Ka-band Voltage-Controlled Oscillators
著者名	N. Itoh, H. Tsuji, <u>Y. Itano</u> , T. Morishita, K. Komoku, S. Yoshitomi
発表誌名	IEICE Transaction on Electronics, Vol.E99-C, No.6, pp.614-622, Jun. 2016.

関連業績

No.1	
論文題目	Scalable Analytical MOSFET Model for Analog Circuit Design
著者名	N. Itoh, R. Ohnishi, <u>Y. Itano</u> , T. Ogawa, H. Tsuji, K. Komoku, T. Morishita, S. Yoshitomi
発表誌名	Proc. of the Analog VLSI Circuits, pp. 272-275, Ho Chi Minh City, Oct. 2014.
No.2	
論文題目	A Study of Current-Reuse 800 MHz/1.9 GHz Concurrent Dual-Band Amplifier
著者名	T. Ogawa, T. Morishita, K. Komoku, <u>Y. Itano</u> , S. Yoshitomi, N. Itoh
発表誌名	IEEE Radio and Wireless Symposium 2016, pp.245-247, Austin, Jan. 2016.
No.3	
論文題目	電流再利用同時受信増幅器の研究
著者名	小川巧馬, 森下賢幸, 小椋清孝, <u>板野由佳</u> , 吉富貞幸, 伊藤信之
発表誌名	電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J99-A, No.8, pp.328-331, Aug. 2016.

論文審査結果の要旨

近年、携帯電話・無線 LAN 等の発展によって、動画等の大容量のデータを無線で通信することが日常的となり、その高速化が求められている。通信の高速化のためには、データ帯域幅の広帯域化が求められ、そのため無線通信においては、搬送波周波数の高周波化が必要となる。そこで近年、IEEE802.11ay、第五世代携帯電話のような準ミリ波・ミリ波領域における通信も実用化されようとしている。一方、集積回路を用いた無線通信用アナログ高周波回路の雑音特性は高周波化に伴い劣化するため、その改善が急務である。

本論文では、無線通信用アナログ高周波回路に用いられる、LC 共振器を用いた準ミリ波・ミリ波領域における発振器の低位相雑音化を実現するために、LC 共振器を構成する電圧可変容量キャパシタ（バラクタ）、MOM (Metal-Oxide-Metal) キャパシタ、インダクタの Q 値を向上させる手法を提案し、デバイスモデルの構築、シミュレーションによる検証、およびそれらを用いた 20~40GHz の発振器を設計・試作・評価し検証を行っている。以下が本論文により得られた結果である。なお、用いたプロセスは 65nm CMOS である。

1. バラクタの寄生抵抗のモデル式を構築し、微細化によって Q 値の向上が可能であり、その最適サイズが存在することを明らかにし、更に Q 値と容量可変範囲がトレードオフの関係にあることを見いだした。また、そのコンパクトモデルを改善することで、サイズおよび周波数に対してスケーラブルなモデルを実現した。これらの素子を用いて発振器を設計・評価することにより従来に比較して位相雑音を 9dB 向上できることを確認した。
2. MOM キャパシタの構造解析を行い、キャパシタンス、寄生抵抗、寄生インダクタンスを含むモデルを構築し、 Q 値の最適サイズが存在することを明らかにした。構築したスケーラブルなモデルの妥当性を、チップ測定および電磁界シミュレーションを用いて検証した。
3. 高周波領域における金属配線中の電流の流れは、内部磁界の影響により金属配線周辺に集中するため、従来構造のインダクタに対して、幅方向を分割することにより周辺長を長くし、低寄生抵抗化による Q 値の向上を検討するとともに、そのインダクタを用いた発振器を設計・試作・評価し検証を行った。その結果、モデルの試算とほぼ同様にインダクタの Q 値が約 1.6 倍向上することを確認し、20~40GHz の発振器の位相雑音は、 Q 値の改善に対応する約 4dB 向上することを確認した。