

令和元年6月19日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06301

研究課題名(和文) 第5世代移动通信対応オンチップアンテナ付き異種集積化フロントエンドの開発

研究課題名(英文) Development for CMOS Front End Circuits for 25GHz 5G Applications

研究代表者

Pokharel R. K. (Pokharel, R. K.)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：60398568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：これまでは準ミリ波帯フロントエンドの開発のため、65nm CMOSプロセスのような最も最先端なプロセスを使用することは一般的であったが、比較的到低コストの0.18 μ m CMOSプロセスを用いるとノイズが悪化してしまい、システム全体の性能が悪くなるという問題があった。本問題に対処するため、まず本研究では、DGSと言われる欠陥をシリコン基板の帰路面に導入することによってインダクタや配線等のQ値の改善手法を提案した。シリコン基板内に新たなDGSを提案し、そのDGSで実現した仮想Lを準ミリ波帯以降のフロントエンド回路の開発ができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年最先端なCMOSプロセスによる準ミリ波帯の回路やシステムが開発されている、65nmプロセスを使用するため、コストが増加する傾向があった。LSIをチップ外のアンテナにボンディングワイヤで接続する必要されるため、ミスマッチや寄生共振が起きてしまい、性能が悪化する。本研究では、0.18 μ m CMOSプロセスでフロントエンド開発する手法を提案し、コストが削減できることを示した。CMOSプロセスで高い効率のオンチップアンテナを実現し、ボンディングワイヤで発生する寄生共振という問題が解消できることを示し、これにより、オンチップアンテナ付き低コストフロントエンドの開発ができることを示した。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research was the development of a quasi-millimeter wave front end using a 0.18 μ m CMOS technology to reduce the cost. In order to address this issue, we first proposed (i) a method to improve the Q factor of on-chip inductor (L) by introducing defects called DGS and use them to develop a quasi-millimeter wave band oscillator of low phase noise. Its performance is world class, (ii) L realized by the proposed DGS has a smaller parasitic capacitance than the conventional spiral L which results in the higher self-resonance frequency, so that it was possible to develop an circuit components including oscillator at quasi-millimeter wave band and above, which was difficult to realize by conventional spiral L. (iii) We will also proposed new design methodology of power amplifier (PA), phase shifter, antenna and on-chip power combiner, which are indispensable for development of quasi-millimeter wave band front end circuits.

研究分野：無線通信用CMOS集積回路

キーワード：CMOS 準ミリ波フロントエンド 発振器 オンチップアンテナ 位相雑音 パワーアンプ

科学研究費助成事業 研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

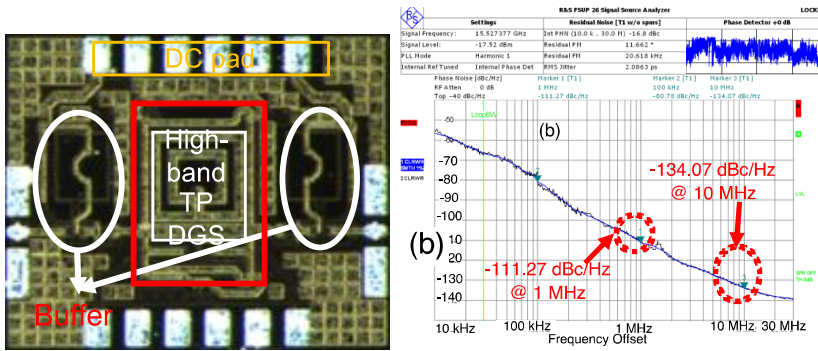
日本国内においては、LTE(Long Term Evaluation)や WiMAX(Worldwide Interoperability Microwave Access)技術の普及に伴い、日常生活の中でワイヤレスブロードバンドは重要な役割を果たすようになってきているが、ビッグデータを始めトリリオン・センサー社会の実現や東京オリンピック対応 SNS や動画アップロードサービスの提供など様々な目的のために今後は更なる大容量のデータをより低消費電力でかつ経済的に転送できる無線通信技術が第一に要求されている。国内外では従来の第 5 世代移動通信端末に検討されている周波数帯である準ミリ波帯を利用する 5G 無線端末への研究開発の検討が始まったばかりであり、既存のアプリケーションを確保しつつ、更なる低コスト・低消費電力の 5G 無線通信システムの実現のために、CMOS プロセスによる準ミリ波(24GHz)対応高性能のフロントエンドの研究開発が不可欠である。本研究の主な目標である準ミリ波帯のフロントエンドにおいては、これまで CMOS プロセスによる増幅器や発振器といったフロントエンド回路がいくつか報告されているが、準ミリ波帯では CMOS 上のインダクタ(L)の Q 値(Quality Factor)が落ちてしまうため、PA や発振器においては、効率、利得と出力電力が劣化してしまう。本研究では、上記のような問題の解決し低コストでの実現を測るため、まず 0.18 μm CMOS プロセスを使用して高 Q 値の L を開発し、その L の性能を準ミリ波帯まで活かすことによって、高性能、低コスト、低消費電力の準ミリ波帯フロントエンド用集積回路を開発する。

2. 研究の目的

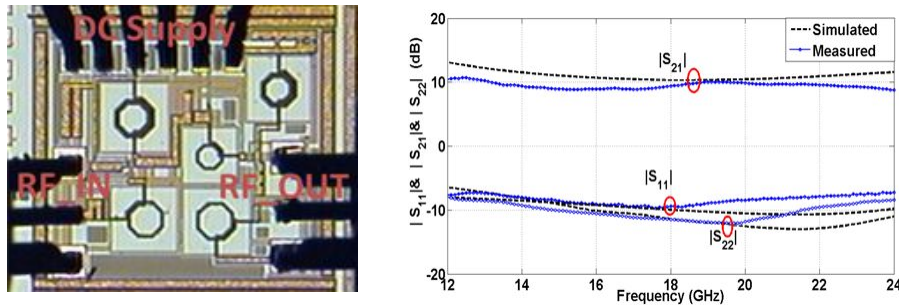
本研究の主な目標は、コストの削減のために 0.18 μm CMOS プロセスを用いて準ミリ波帯高性能の CMOS フロントエンド集積回路の開発であった。

3. 研究の方法

まず、0.18 μm CMOS プロセス CMOS の基板内に仮想インダクタ(L)の設計手法を提案し、Q 値の改善手法を提案した。高性能なフロントエンドの開発のために不可欠である発振器やパワーアンプにおいては、提案の仮想 L を用いることで、位相雑音の削減手法を提案した。その手法を以下にまとめる。(i) DGS と言われる欠陥をシリコン基板の帰路面に導入することによってインダクタや配線等の Q 値の改善手法を提案した。DGS の等価的な L と C は、その欠陥のサイズやパターンに依存するため、伝送線路と組み合わせて電磁波の伝搬特性を制御することができる。シリコン基板内に新たな DGS を提案し、その DGS で実現した仮想 L を用いて -111dBc/Hz の位相雑音を有する準ミリ波帯発振器を開発した。この性能は世界標準的な値である。(ii) 提案の DGS で実現する L は、従来のスパイラル L に比べて寄生容量が小さい。これに伴い、高い自己共振周波数の L が実現できるため、スパイラル L で実現が困難であった準ミリ波帯以降の発振器、パワーアンプ、位相器、オンチップフィルタと言ったフロントエンド集積回路の開発ができることを示した。



(a) 0.18 μm CMOS プロセスで試作したチップ (b) その位相雑音の測定結果
 図 1: 本研究で開発した準ミリ波帯フロントエンド回路の一例と評価結果 (IEEE TCAS-I に投稿中)



(a) 12GHz-25GHz 帯 P A チップ (b) 測定結果
 図 2. 超広帯域 (12-25GHz) 帯 P A の開発 (2016 年度 IEICE ELEX Best Paper Award 受賞)

4. 研究成果

CMOS の基板内に仮想インダクタ(L)の設計手法を提案し、Q 値の改善手法を提案した。高性能のフロントエンドの開発のために不可欠である発振器やパワーアンプにおいては、提案の仮想 L を用いることで、位相雑音の削減手法を提案した。本研究で得た主な成果は以下にまとめる。(i) DGS とされる欠陥をシリコン基板の帰路面に導入することによってインダクタや配線等の Q 値の改善手法を提案した。DGS の等価的な L と C は、その欠陥のサイズやパターンに依存するため、伝送線路と組み合わせることで電磁波の伝搬特性を制御することができる。シリコン基板内に新たな DGS を提案し、その DGS で実現した仮想 L を用いて -111dBc/Hz の位相雑音を有する準ミリ波帯発振器を開発した。この性能は世界標準的な値である。(ii) 提案の DGS で実現する L は、従来のスパイラル L に比べて寄生容量が小さい。これに伴い、高い自己共振周波数の L が実現できるため、スパイラル L で実現が困難であった準ミリ波帯以降の発振器の開発ができることを示した。(iii) 並列共振特性を持つ共振器の共振周波数の低域側、高域側または両側に新たに直列共振特性を付加することにより、共振器の外部 Q 値が向上し、発振器の位相雑音を更に低減できることが分かった。そのチップと測定結果を図 1 に示す。(iv) 準ミリ波帯フロントエンドの開発のために不可欠であるパワーアンプ(PA)、位相器、アンテナ、オンチップパワコンバイナと言った他の回路素子においても、新たな設計論を提案し、0.18 μm CMOS プロセスを用いてチップの試作し、測定結果と比較することに伴い、その有効性を確認した。その一例として図に開発したパワーアンプ(PA)のチップ写真と評価結果を示す。本成果が 2016 年度 IEICE ELEX Best Paper Award で受賞された。多くの成果を IEEE 論文誌・レターに掲載することができ、深く感謝する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 23 件)

[1] H. Mosalam, A. Allam, H. Jia, A. B. Abdelrahman, and Ramesh K. Pokharel, "High Efficiency and

- Small Group Delay Variations 0.18 μm CMOS UWB Power Amplifier,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, Express Briefs*, vol. 66, no. 4, pp. 592-596, April 2019.
- [2] E Elsaidy, A Barakat, AB Abdel-Rahman, Ahmed Allam, and Ramesh K. Pokharel, “Ultra Compact CMOS 60GHz Tapped-Line Comblin BPF with Two Transmission zeros using defected ground structures,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 9, pp 1642-1649, Sept. 2018.
- [3] A. S. A. El-Hameed, A. Barakat, A. B. Abdel-Rahman, A. Allam and Ramesh K. Pokharel, “Design of low loss coplanar Transmission Lines Using Distributed Loading for Millimeter-wave Power Divider/Combiner Applications in 0.18 μm CMOS Technology,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 12, pp. 5221-5229, Dec. 2018.
- [4] O. Newwar, H. Shalaby, and Ramesh K. Pokharel, “Photonic Crystal Based Compact Hybrid WDM/MDM (De)multiplexer for SOI Platforms,” *Optics Letters*, Vol. 43, no. 17, pp. 4176-4179, Sept. 2018.
- [5] I. Mansour, M. A. Alalaa, A. Allam, A. B. Abdel-Rahman, M. Abo-Zahhad, and Ramesh K. Pokharel, “Dual Band VCO based on High Quality factor Switched Interdigital Resonator for Ku band using 180 nm CMOS Technology,” *IEEE Transaction on Circuits and Systems-II, Express Brief*, vol 65, no. 12, pp. 1874-1878, Dec. 2018.
- [6] Hany A Atallah, Adel B Abdel-Rahman, Kuniaki Yoshitomi, Ramesh K Pokharel, “Design of compact frequency agile filter-antenna using reconfigurable ring resonator bandpass filter for future cognitive radios,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 10, no. 4, pp. 487-496, May, 2018.
- [7] N. Jahan, S. A. Enche Ab Rahim, H. Mosalam, A. Barakat, T. Kaho, and Ramesh K. Pokharel, “22-GHz-Band Oscillator Using Integrated H-Shape Defected Ground Structure Resonator in 0.18- μm CMOS Technology”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 3, pp. 233-235, March 2018.
- [8] H. A. Atallah, AB Abdel-Rahman, K Yoshitomi, and Ramesh K. Pokharel, “CPW-Fed UWB antenna with sharp and high rejection multiple notched bands using stub loaded meander line resonator,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 83, pp. 22-31, Jan. 2018.
- [9] N Jahan, SAE Ab Rahim, A Barakat, T Kaho, Ramesh K. Pokharel, ‘Analysis and Application of Virtual Inductance of Square-Shaped Defected Ground Structure in 0.18 μm CMOS Technology,” *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 5, no. 5, pp. 299-305, September 2017.
- [10] Anwer S. Abd El-Hameed, Adel Barakat, Adel B. Abdel-Rahman, Ahmed Allam, Ramesh K. Pokharel, “Ultra Compact 60 GHz CMOS BPF Employing Broadside Coupled Open Loop Resonators, *IEEE Microwave and Wireless Components letters*,” vol. 27, no. 9, pp. 818-820, Sept. 2017.
- [11] R. Dong, H. Kanaya and Ramesh K. Pokharel, “A CMOS Ultra-wideband Pulse Generator for 3-5 GHz Applications” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27 no.6 pp. 584-587, June 2017.
- [12] G. Zhang and Ramesh K. Pokharel et al., “A 1.9 GHz Low-Phase-Noise Complementary Cross-coupled FBAR-VCO without Additional Voltage Headroom in 0.18 μm CMOS Technology,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 100. No. 4, pp. 363-369, April 2017.
- [13] Siti Amalina Enche Ab Rahim and Ramesh K Pokharel, “Class-C architecture for cross-coupled FBAR oscillator to further improve phase noise,” *IEICE Electronics Express*. Vol. 14, no.5, pp. 20170056-20170056, 2017.
- [14] M. Aboualalaa, A. B. Abdel-Rahman, A. Allam, H. Elsadek and Ramesh K. Pokharel, "Design of a Dual-Band Microstrip Antenna With Enhanced Gain for Energy Harvesting Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp.-1622-1626, 2017.
- [15] N. Mahmoud and Ramesh K. Pokharel et al., “Compact Size On-chip 60 GHz H-shaped Resonator BPF,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol 26, no. 9, pp. 681-683, Sept. 2016.
- [16] H. A Atallah, A. B Abdel-Rahman, K. Yoshitomi, and Ramesh K. Pokharel, “Compact frequency reconfigurable filtennas using varactor loaded T-shaped and H-shaped resonators for cognitive radio applications,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol.10, no. 9, pp. 991-1001, July 2016.
- [17] H. Mosalam, A. Allam, H. Jia, A. Abdel-Rahman, T. Kaho, and Ramesh K. Pokharel, “A 12 to 24 GHz High Efficiency Fully Integrated 0.18 μm CMOS Power Amplifier,” *IEICE Electronics*

Express, vol. 13, issue 14, pp. 20160551-20160560, 2016. (Awarded by BEST 2016 ELEX PAPER)

- [18] A. Barakat, Ramesh K. Pokharel, and T. Kaho, "60 GHz on-chip mixed coupled BPF with H-shaped defected ground structures," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 7, pp. 533-535, April 2016.
- [19] A. Barakat, A. Allam, H. Elsadek, A. B. Abdel-Rahman, Ramesh K. Pokharel, A. Bisognin and C. Luxey, "60 GHz CMOS Circular Patch AoC on Modified Asymmetric AMC," *Microwave Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 90-100, Feb. 2017.
- [20] Hany A Atallah, Adel B Abdel-Rahman, Kuniaki Yoshitomi, and Ramesh K Pokharel, "Tunable band-notched CPW-Fed UWB monopole antenna using capacitively loaded microstrip resonator for cognitive radio applications," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 62, pp. 109-117, 2016.
- [21] Hany A Atallah, Adel B Abdel-Rahman, Kuniaki Yoshitomi, and Ramesh K Pokharel, "Reconfigurable Band-Notched Slot Antenna Using Short Circuited Quarter Wavelength Microstrip Resonators," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 68, pp. 119-127, 2016.
- [22] Hany A Atallah, Adel B Abdel-Rahman, Kuniaki Yoshitomi, and Ramesh K Pokharel, "Design of dual band-notched CPW-fed UWB planar monopole antenna using microstrip resonators," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 59, pp. 51-56, 2016.
- [23] A. Barakat, A. Allam, H. Elsadek, A. Abdel-Rahman, Ramesh K. Pokharel, and T. Kaho, "Improved Gain 60 GHz CMOS Antenna with N-well Grid," *IEICE Electronics Express*, vol. 13, no.5, pp. 20151115-20151115, 2016.

[学会発表](計 16 件)

- [1] N. Jahan, A. Barakat, and R. K. Pokharel, "Dual Series Resonances based DGS for Low Phase Noise K-Band VCO Design in 0.18 μ m CMOS Technology" In proceeding of *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1-5, June 2019, Sapporo, Japan.
- [2] I Mansour, M Mansour, M Aboualalaa, A Allam, AB Abdel-Rahman, Ramesh K. Pokharel, "70% Improvement in Q-Factor of Spiral Inductor and its Application in Switched K-Band VCO Using 0.18 μ m CMOS Technology", **DOI: 10.23919/APMC.2018.8617138**, 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.1133-1135, Kyoto, Japan, Nov. 6, 2018.
- [3] Ramesh K. Pokharel, N Jahan, A Barakat, "Dual Resonance Circuits by Defected Ground Structure Resonators for Low Phase Noise K-Band CMOS VCO" pp. 1-3, *Proc. of 2018 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology*, **DOI: 10.1109/RFIT.2018.8524088**, Melbourne, Australia, Aug. 15, 2018. (*Invited*)
- [4] I Mansour, M Aboualalaa, N Jahan, A Barakat, and Ramesh K. Pokharel, "Design of Multi-layers DGS Resonator for Phase Noise Improvement of K-Band VCOs in 0.18 μ m CMOS Technology," *Proc. of 2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 178-181, **DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623874**, Windsor, ON, Canada, Aug. 15, 2018.
- [5] N. Jahan, C. Baichuan, R. K. Pokharel, and A. Barakat, "A K-Band VCO Employing High Active Q-factor Defected Ground Structure Resonator in 0.18 μ m CMOS Technology," *Proc. of 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1-5, (Florence, Italy) May, 2018.
- [6] M. Aboualalaa, A. Rahman, A. Allam, R. K. Pokharel, K. Yoshitomi, and H. Elsadek, "Compact 24GHz half-slot antenna for energy combining," *Proc. of 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, pp. 1-2, March 25 2018, USA.
- [7] A. S. A. El-Hameed, A. Barakat, A. B. Rahman, A. Allam, R. K. Pokharel, and Kuniaki Yoshitomi, "Broadband printed-dipole antenna for future 5G applications and wireless communication," *Proc. of 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 106-108, Jan. 15, 2018.
- [8] A Gadallah, A Allam, AB Abdel-Rahman, H Jia, Ramesh K. Pokharel, "A high-efficiency, low-power 2.4 GHz class AB PA for WBAN applications using load pull," *In Proc. of 2017 Japan-Africa Conference on Electronics, Communications and Computers (JAC-ECC)*, pp. 29-32, (Alexandria, Egypt), Dec. 2017.
- [9] M Aboualalaa, Adel B Abdel-Rahman, A Allam, Ramesh K Pokharel, Kuniaki Yoshitomi, H Elsadek, "Compact 24GHz half-slot antenna for energy combining," *In Proc. of 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, pp. 1-2, (Denver, USA), March 25, 2018.

- [10] Anwer S Abd El-Hameed, Adel Barakat, Adel B Abdel-Rahman, Ahmed Allam, Ramesh K Pokharel, and Kuniaki Yoshitomi, "Broadband printed-dipole antenna for future 5G applications and wireless communication," *In Proc. of 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 106-108, Jan. 15, 2018.
- [11] N. Jahan, Adel Barakat, and Ramesh K. Pokharel, "Study of phase noise improvement of K-band VCO using additional series resonance realized by DGS resonator on CMOS technology," *In Proc. of 2017 Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, pp. 1014-1017, (Kuala Lumpur, Malaysia) November, 2017.
- [12] N. Jahan, A. Barakat, and Ramesh K. Pokharel, "CMOS RF Oscillator using Integrated Passive Defected Ground Structure Resonator," *In Proc. of 47th European Microwave Conference*, pp. 763-768, (Nuremberg, Germany), October 2017.
- [13] Adel Barakat, Nessim Mahmoud, Ramesh K Pokharel, "Low insertion loss 60 GHz CMOS H-shaped resonator BPF," *In Proc. of 2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 187-189, Jan. 15, 2017.
- [14] SA Enche Ab Rahim, Adel Barakat, and Ramesh K Pokharel, "Design of 5.5 GHz LC oscillator using distributed grid of N-well in P-substrate inductor," *In proc. of 2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*, pp. 262-264, October 25, 2016.
- [15] H Mosalam, A Allam, Adel Abdel-Rahman, T Kaho, H Jia, and Ramesh K Pokharel, "A high-efficiency good linearity 21 to 26.5 GHz fully integrated power amplifier using 0.18 μ m CMOS technology," *In Proc. of 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pp. 1-4, (Abu Dhabi, UAE), October 15, 2016.
- [16] I. Mansour, H Mosalam, A. Allam, A. B Abdel-Rahman, and Ramesh K Pokharel, "K band low power voltage controlled oscillator using 180 nm CMOS technology with a new high quality inductor," *In Proc. of 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, pp. 1-4, October 16, 2016.

〔図書〕(計 1 件)

Adel Barakat, and Hala Elsadek, Ramesh K. Pokharel, "Innovative techniques for 60 GHz On-chip Antennas on CMOS substrate" Chapter 5 in "Microwave Systems and Applications", Editor: Prof. Sotirios Goudos, Publisher: Intech, Jan. 2017.

受賞 (計 1 件)

2016 年度 IEICE ELEX Best Paper Award

その他]

ホームページ等

<http://rfic.ed.kyushu-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2)研究協力者

研究協力者氏名 :

ローマ字氏名 :

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。