

| | |
|--------------|---|
| Title | IoTエッジノードデバイスのための低電圧CMOS集積回路技術に関する研究 |
| Author(s) | 松塚, 凌 |
| Citation | 大阪大学, 2023, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/92954 |
| rights | |
| Note | |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (松 塚 凌)

論文題名 IoTエッジノードデバイスのための低電圧CMOS集積回路技術に関する研究

論文内容の要旨

本論文は、IoTエッジノードデバイスのメンテナンスフリー化に向けて、低電圧CMOS集積回路技術に関する研究内容をまとめたものである。全編は以下の5章で構成した。

第1章では、IoTエッジノードデバイスに適した集積回路のシステムアーキテクチャと技術課題について検討した。無数に配置されるIoTエッジノードデバイスにはメンテナンスフリーであることが求められ、消費電力を極限まで低減することによる長期間動作、もしくはエナジーハーベスティングによるエネルギーの自活化が必要となることを述べた。そこでIoTエッジノードデバイスには、SC型降圧コンバータによるバッテリー出力電圧の降圧、マルチ電源電圧設計による低消費電力化、昇圧コンバータによる発電電圧の昇圧を組み合わせたシステムアーキテクチャが適していることを議論した。また、このようなアーキテクチャを実現するためには、SC型降圧コンバータの入力電圧範囲の拡大および電力変換効率の向上、レベルシフタの低電圧化および低消費電力化、そしてリング発振器の低電圧化の技術課題があることを議論した。

第2章では、SC型降圧コンバータについて、入力電圧範囲の拡大および広範囲の負荷電流に対する高効率化を検討した。従来のSC型降圧コンバータは降圧比率が一定であったため、バッテリーの出力電圧の変動に伴ってコンバータの出力電圧も変動し、負荷回路の動作に悪影響を与える問題があった。また、外付け部品を用いた降圧方式と比較して、電力変換効率が低い問題があった。提案するSC型降圧コンバータは、入力電圧に応じて降圧比率をコントロールすることで、広い入力電圧範囲に対して一定の出力電圧を得ることを可能にした。また、負荷電流に応じて内部の動作周波数をコントロールすることで、広い負荷電流範囲に対する高い電力変換効率を実現した。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行った。提案回路は、1.2-2.5 Vの幅広い入力電圧範囲と69%の最大電力変換効率を実現した。実測により提案手法の有効性を確認した。

第3章では、レベルシフタの低電圧化および低消費電力化を検討した。従来のレベルシフタは、入力信号がラッチ回路を駆動する構成であるため、低電圧な入力信号を扱う際に、出力信号の生成に時間を要し、消費電力の増加や動作不能を招く問題があった。提案するレベルシフタ回路は、入力信号を増幅してラッチ回路を駆動する構成とすることで、極めて低電圧な入力信号に対する電圧レベル変換を可能にした。また、フィードバック制御によって増幅回路を必要時のみ動作させることで、低消費電力化を実現した。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行った。提案回路は極めて低い電圧80 mVでレベル変換動作可能であることを確認した。提案回路は低い消費エネルギーでの動作を実現しており、特に $V_{DDL} = 0.3$ V時において従来回路から88%のエネルギーを削減した。提案手法の有効性を回路シミュレーションならびに実測により確認した。

第4章では、超低電圧で動作可能なリング発振器を検討した。エナジーハーベスティングでは得られる電圧が極めて低い場合が多い。しかし、従来のリング発振器は、電源電圧の低減に伴いインバータの電圧利得が低下し、発振動作不能に陥る問題があった。提案するリング発振器には、メインインバータとフィードバックインバータによって構成する自己バイアスインバータを使用した。提案する自己バイアスインバータでは、フィードバックインバータを用いてメインインバータの基板電位を制御する。基板バイアス効果によってメインインバータのしきい値電圧が増減し、インバータの入出力特性を変化させることで、電圧利得の改善を実現した。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行った。提案回路は42 mVの極めて低い電源電圧で動作する結果を得た。実測により提案回路の有効性を確認した。

第5章では、本研究で得られた研究成果について総括した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

| | |
|---------------|-----------------|
| 氏 名 (松 塚 凌) | |
| | (職) 氏 名 |
| 論文審査担当者 | 主 査 教授 廣瀬 哲也 |
| | 副 査 教授 森 勇介 |
| | 副 査 招へい教授 光井 將一 |
| | 副 査 准教授 兼本 大輔 |

論文審査の結果の要旨

本論文は、次世代の情報化社会における IoT (Internet of Things) エッジノードデバイスのメンテナンスフリー化に向けて、SC (Switched Capacitor) 型降圧コンバータの入力範囲拡大・高効率化、レベルシフタの低電圧化・低消費電力化、そしてリング発振器の低電圧化に係る CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 集積回路技術の研究をまとめたものである。論文は、序論となる第 1 章から結論を含めて 5 章から構成されている。

第 1 章では、IoT エッジノードデバイスに適した集積回路のシステムアーキテクチャと技術課題について検討している。無数に配置される IoT エッジノードデバイスにはメンテナンスフリーであることが求められ、消費電力を極限まで低減することによる長期間動作、もしくはエナジーハーベスティングによるエネルギーの自活化が必要となる。そこで IoT エッジノードデバイスには、SC 型降圧コンバータによるバッテリー出力電圧の降圧、マルチ電源電圧設計による低消費電力化、昇圧コンバータによる発電電圧の昇圧を組み合わせたシステムアーキテクチャが適していることを議論している。また、このようなアーキテクチャを実現するためには、SC 型降圧コンバータの入力電圧範囲の拡大および電力変換効率の向上、レベルシフタの低電圧化および低消費電力化、そしてリング発振器の低電圧化の技術課題があることをまとめている。

第 2 章では、SC 型降圧コンバータについて、入力電圧範囲の拡大および広範囲の負荷電流に対する高効率化を検討している。従来の SC 型降圧コンバータは降圧比率が一定であったため、バッテリーの出力電圧の変動に伴ってコンバータの出力電圧も変動し、負荷回路の動作に悪影響を与える問題があった。また、外付け部品を用いた降圧方式と比較して、電力変換効率が低い問題があった。提案する SC 型降圧コンバータは、入力電圧に応じて降圧比率をコントロールすることで、広い入力電圧範囲に対して一定の出力電圧を得ることを可能にしている。また、負荷電流に応じて内部の動作周波数をコントロールすることで、広い負荷電流範囲に対する高い電力変換効率を実現している。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行っている。提案回路は、1.2 - 2.5 V の幅広い入力電圧範囲と 69%の最大電力変換効率を実現している。実測により提案手法の有効性を確認している。

第 3 章では、レベルシフタの低電圧化および低消費電力化を検討している。従来のレベルシフタは、入力信号がラッチ回路を駆動する構成であるため、低電圧な入力信号を扱う際に、出力信号の生成に時間を要し、消費電力の増加や動作不能を招く問題があった。提案するレベルシフタ回路は、入力信号を増幅してラッチ回路を駆動する構成とすることで、極めて低電圧な入力信号に対する電圧レベル変換を可能にしている。また、フィードバック制御によって増幅回路を必要時のみ動作させることで、低消費電力化を実現している。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行っている。提案回路は極めて低い電圧 80 mV でレベル変換動作可能であることを確認している。提案回路は低い消費エネルギーでの動作を実現しており、特に 0.3 V での動作時において従来回路から 88%のエネルギーを削減している。提案手法の有効性を回路シミュレーションならびに実測により確認している。

第4章では、超低電圧で動作可能なリング発振器を検討している。エネルギーハーベスティングでは得られる電圧が極めて低い場合が多い。しかし、従来のリング発振器は、電源電圧の低減に伴いインバータの電圧利得が低下し、発振動作不能に陥る問題があった。提案するリング発振器には、メインインバータとフィードバックインバータによって構成する自己バイアスインバータを使用している。提案する自己バイアスインバータでは、フィードバックインバータを用いてメインインバータの基板電位を制御している。基板バイアス効果によってメインインバータのしきい値電圧が増減し、インバータの入出力特性を変化させることで、電圧利得の改善を実現している。提案回路のチップ試作を行い、性能評価を行っている。提案回路は 42 mV の極めて低い電源電圧で動作する結果を得ている。実測により提案回路の有効性を確認している。

第5章では、本研究で得られた成果を総括し、将来展望について述べ、本論文の結論としている。

以上のように、本論文は IoT エッジノードデバイスに向けた低電圧 CMOS 集積回路技術の構築を目的として行ったものであり、IoT エッジノードデバイスに適したシステムアーキテクチャを実現する上での技術課題を明らかにし、これらの課題を解決する手法を確立している。シミュレーション評価ならびに試作チップによる測定評価から、極めて低い電圧かつ低消費電力で動作可能な低電圧 CMOS 集積回路技術を実現しており、学术界・産業界における今後の発展に大きく寄与する研究成果を挙げている。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。