



Title	IoTエッジノードデバイスに向けた極低電圧エネルギーハーベスティングのための集積回路技術に関する研究
Author(s)	瀬部, 光
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105455
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 （ 瀬 部 光 ）

論文題名

IoTエッジノードデバイスに向けた極低電圧エネルギーハーベスティングのための集積回路技術に関する研究

論文内容の要旨

本論文は、自立分散型のIoT（Internet of Things）エッジノードデバイスの実現に向けて、極低電圧エネルギーハーベスティングのため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求められるシステム構成と集積回路技術について議論し、その技術課題について検討した。次世代情報社会では莫大な数のIoTエッジノードデバイスの活用が求められており、バッテリーを用いた従来のデバイスではバッテリーの充電や交換、廃棄コストから運用可能なデバイスの数が大きく制限されることを述べた。これらの観点から、バッテリーレスIoTエッジノードデバイスは、次世代情報社会のキーデバイスとなりうることを指摘した。小型バッテリーに代わるエネルギー源として、電磁波、振動、熱などを電気エネルギーに変換して利用するエネルギーハーベスティング技術が注目されており、特に、身に着けた状態でエレクトロニクスデバイスを運用するウェアラブルデバイスにおいては、体温と大気との温度差を利用する熱エネルギーハーベスティングが期待されていることを議論した。しかし、熱エネルギーハーベスティングのハーベスタである熱発電素子の出力は100 mV以下と低く、センサや集積回路を直接駆動することができないため、パワーマネジメント回路（PMC）、またPMCのためのコールドスタート回路が必要となることを述べた。コールドスタート回路は、チャージポンプ回路、リングオシレータ、ノンオーバーラップ（NOL）クロックジェネレータ、そしてチャージポンプ回路を駆動するドライバ回路から構成されることを述べた。熱発電素子の極めて低い電圧からエネルギーハーベスティングを実現するためには、極低電圧でコールドスタート回路を動作させる必要があり、これらの回路技術の低電圧化に課題があることを議論した。

第2章では、ボディバイアス技術を用いた極低電圧論理回路の設計手法について検討した。従来のCMOS論理ゲートは、低電圧下で信号振幅波形が劣化し、正しく動作しない課題があった。そこで本研究では、論理ゲートをメイン論理ゲートとフィードバックインバータで構成し、フィードバックインバータでメイン論理ゲートの基板電位を制御するボディバイアス論理ゲートを提案した。基板バイアス効果によってメインインバータを構成するMOSFETのしきい値電圧が変化し、メインインバータの駆動力が向上し、論理ゲートの入出力特性を改善する手法を提案した。提案手法を用いた応用回路として、NOLクロック回路の構築設計を行った。提案回路のチップ試作評価により、提案するNOLクロック生成回路は60 mVの極めて低い電源電圧でも、電源電圧の80%の信号振幅を維持し、提案手法の有効性を確認した。

第3章では、極低電圧で動作するオンチップチャージポンプ回路の検討を行った。チャージポンプ回路を駆動するクロック信号は、ドライバ回路を用いて増幅したクロック信号を用いる。従来のドライバ回路は、n段のドライバ回路を縦続接続して、n+1倍の増幅率を実現した。しかし、電源電圧が低下すると、トランジスタの性能劣化や信号遅延により、十分な振幅を持つNOLクロック信号が得られない課題があった。そこで本研究では、極低電圧で動作し、NOLクロック信号を増幅できるドライバ回路を提案した。ドライバ回路の電源をチャージポンプ回路から取得することにより、n段のドライバ回路で2ⁿ倍の増幅率を実現した。さらに、最終段のドライバ回路から得られるクロック信号を用いてドライバ回路内のトランジスタを制御することにより、極低電圧から動作できる回路構成とした。提案回路のチップ試作評価を行い、提案回路を用いたチャージポンプ回路は全チップが56 mVの低電圧で動作できることを確認した。

第4章では、リカーシブスタッキング・ボディバイアス・インバータ（RS-BBI）を用いた極低電圧発振回路を検討した。従来のリングオシレータ（ROSC）は、低電圧下ではインバータのゲインが低下し、発振しない課題があった。そこで本研究では、従来の低電圧インバータで提案されたスタック技術を拡張し、再帰的に適用するリカーシブスタッキング・インバータ（RS-INV）を提案した。さらに、RS-INVにボディバイアス技術を適用したRS-BBIを提案した。提案回路のチップ試作評価を行い、提案回路を用いたROSCは、30 mVの低電源電圧で全チップが発振することを確認した。

第5章では、本研究で得られた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 (瀬 部 光)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	廣瀬 哲也
	副 査	教授	小島 一信
	副 査	教授	森 勇介
	副 査	教授	丸山 美帆子
	副 査	教授	福田 憲二郎
	副 査	教授	片山 竜二
	副 査	教授	近藤 正彦
	副 査	教授	森 伸也
	副 査	准教授	兼本 大輔
論文審査の結果の要旨			
本論文は、自立分散型の IoT (Internet of Things) エッジノードデバイスの実現に向けて、極低電圧エネルギーハーベスティングのため集積回路技術に関する研究内容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求められるシステム構成と集積回路技術について議論し、その技術課題について検討している。次世代情報社会では莫大な数の IoT エッジノードデバイスの活用が求められており、バッテリーを用いた従来のデバイスではバッテリーの充電や交換、廃棄コストから運用可能なデバイスの数が大きく制限されることを議論している。これらの観点から、バッテリーレス IoT エッジノードデバイスは、次世代情報社会のキーデバイスとなりうることを指摘した。小型バッテリーに代わるエネルギー源として、電磁波、振動、熱などを電気エネルギーに変換して利用するエネルギーハーベスティング技術が注目されており、特に、身に着けた状態でエレクトロニクスデバイスを運用するウェアラブルデバイスにおいては、体温と大気との温度差を利用する熱エネルギーハーベスティングが期待されていることを述べている。しかし、熱エネルギーハーベスティングのハーベスタである熱電発電素子の出力は 100 mV 以下と低く、センサや集積回路を直接駆動することができないため、パワーマネジメント回路 (PMC)、また PMC のためのコールドスタート回路が必要となることを指摘している。コールドスタート回路は、チャージポンプ回路、リングオシレータ、ノンオーバーラップ (NOL) クロックジェネレータ、そしてチャージポンプ回路を駆動するドライバ回路から構成されることを述べている。熱電発電素子の極めて低い電圧からエネルギーハーベスティングを実現するためには、極低電圧でコールドスタート回路を動作させる必要があり、これらの回路技術の低電圧化に課題があることを議論している。 第 2 章では、ボディバイアス技術を用いた極低電圧論理回路の設計手法について提案している。従来の CMOS 論理ゲートは、低電圧下で信号振幅波形が劣化し、正しく動作しない課題があった。そこで本研究では、論理ゲートをメイン論理ゲートとフィードバックインバータで構成し、フィードバックインバータでメイン論理ゲートの基板電位を制御するボディバイアス論理ゲートを提案している。基板バイアス効果によってメインインバータを構成する MOSFET のしきい値電圧が変化し、メインインバータの駆動力が向上し、論理ゲートの入出力特性を改善する手法を提案している。提案手法を用いた応用回路として、NOL クロック回路の構築設計を行っている。提案回路のチップ試作評価により、提案する NOL クロック生成回路は 60 mV の極めて低い電源電圧でも、電源電圧の 80% の信号振幅を維持し、提案手法の有効性を確認している。 第 3 章では、極低電圧で動作するオンチップチャージポンプ回路を提案している。チャージポンプ回路を駆動するクロック信号は、ドライバ回路を用いて増幅したクロック信号を用いる。従来のドライバ回路は、n 段のドライバ回路を縦続接続して、n+1 倍の増幅率を実現した。しかし、電源電圧が低下すると、トランジスタの性能劣化や信号遅延に			

より、十分な振幅を持つ NOL クロック信号が得られない課題があった。そこで本研究では、極低電圧で動作し、NOL クロック信号を増幅できるドライバ回路を提案している。ドライバ回路の電源をチャージポンプ回路から取得することにより、 n 段のドライバ回路で $2n$ 倍の増幅率を実現している。さらに、最終段のドライバ回路から得られるクロック信号を用いてドライバ回路内のトランジスタを制御することにより、極低電圧から動作できる回路構成としている。提案回路のチップ試作評価を行い、提案回路を用いたチャージポンプ回路は全チップが 56 mV の低電圧で動作できることを確認している。

第 4 章では、リカーシブスタッキング・ボディバイアス・インバータ (RS-BBI) を用いた極低電圧発振回路を提案している。従来のリングオシレータ (ROSC) は、低電圧下ではインバータのゲインが低下し、発振しない課題があった。そこで本研究では、従来の低電圧インバータで提案されたスタック技術を拡張し、再帰的に適用するリカーシブスタッキング・インバータ (RS-INV) を提案している。さらに、RS-INV にボディバイアス技術を適用した RS-BBI を提案している。提案回路のチップ試作評価を行い、提案回路を用いた ROSC は、 30 mV の低電源電圧で全チップが発振することを確認している。

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、本論文は自立分散型の IoT エッジノードデバイスの構築を目的として極低電圧エネルギーハーベスティングのため集積回路技術に関する研究を行ったものであり、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極低電圧 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。