

主論文の要約

論文題目 電源電圧モニタ回路を用いた
バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステム
に関する研究
(A study on a biofuel-cell-powered
biosensing system with a supply voltage
monitor circuit)

氏名 小林 敦希

論文内容の要約

本研究では、外部からの電力供給を必要としないバイオセンシングを実現するための、電源電圧モニタ回路を用いたバイオ燃料電池で駆動するバイオセンサシステムの集積回路実装について検討を行う。

バイオ燃料電池は、血液中に存在するグルコースや汗に含まれる乳酸などの、健康状態の指標となる生体分子を燃料として、その化学エネルギーを利用して発電することができるデバイスとして知られている。バイオ燃料電池の発電量は、燃料である生体分子の濃度に相関して変化する。そのため、バイオ燃料電池から得られる電力を集積回路の動作に利用しながら、電源電圧をモニタリングし、発電量を把握することができれば、外部からの電力供給を必要としないバイオセンシングを行うことができる。

しかしながら、バイオ燃料電池が出力できる電圧は、既存の CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスによる集積回路の定格電源電圧よりも低く、一般的な電池のように扱うことができない。したがって、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムの集積回路実装には、バイオ燃料電池を用いた動作に適した低電源電圧動作・低消費電力化のための回路技術および回路設計が必要である。

本研究では、動作可能な電源電圧の範囲が広い発振器回路に着目し、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステム専用の電源電圧モニタ回路の開発と低消費電力化に取り組んだ。電源電圧モニタ回路の開発により、従来手法と比べて、高精度・低消費電力なバイオ燃料

電池の出力に対する信号変換手法を提案した。そして、開発した電源電圧モニタ回路を用いて、オンチップ太陽電池を導入したときの、小型なバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムを構築するための設計指針を提案した。

本論文は、以下の7章から構成される。

第1章では、序論として、本研究の背景と目的について述べる。まず、本研究の背景として、CMOS集積回路を低消費電力化する回路技術の研究展開と、回路動作に利用可能な電源の関係について述べる。CMOS集積回路技術の発展により、様々な電子機器の高性能化・小型化が進んでいる。身につけたまま健康に関する様々な情報を絶えず収集する、スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスを開発する上で、CMOS集積回路技術は必要不可欠である。一般的なウェアラブルデバイスは、定期的な充電や電池の交換を避けることができず、動作時間が限られていることが課題である。さらに、ウェアラブルデバイスの装着感を向上するために、電源の小型化が求められている。このような課題を解決する、低消費電力化のための回路技術の研究展開について述べる。また、低消費電力化のための回路技術による、集積回路における、電源の小型化、光・熱・振動などから電力を得る環境発電素子の利用、生体電位の利用について述べる。そして、ウェアラブルデバイスに適した電源として、さらなる応用展開が期待されているバイオ燃料電池に関する回路技術の展開について述べる。以上のような研究背景から、バイオ燃料電池の出力を読み取ることに特化した回路技術が未だ提案されていないことに着目し、本研究の目的をバイオ燃料電池で駆動するバイオセンサシステム専用の電源電圧モニタ回路の開発、そして電源電圧モニタ回路を用いた設計指針の提案とした。

第2章では、発振器回路を用いたバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムについて述べる。発振器回路の電源としてバイオ燃料電池を用いることで、バイオ燃料電池の発電量に応じて変化するバイオセンサシステムの電源電圧を、パルス信号の周期に変換することができる。従来のリング発振器回路を用いてバイオ燃料電池の出力を読み取るバイオセンサシステムの消費電力に着目し、電力を最適化する設計指針を構築した。一般的なCMOS論理回路の消費電力を表す理論式を応用し、リング発振器回路を構成するインバータゲートの段数とバイオセンサシステム全体の消費電力の関係を明らかにした。さらに、0.25- μm CMOSプロセスで試作した評価用チップの測定結果と回路シミュレーションの結果を比較することで、提案設計指針の有効性を確認した。次に、リング発振器回路の代わりに、従来のMOSキャパシタのゲートリーク電流を利用して動作する発振器回路を用いて、バイオ燃料電池の出力を読み取るバイオセンサシステムの開発および試作したプロトタイプの評価結果について述べる。リング発振器回路と比べて、ゲートリーク電流利用型発振器回路は低速動作において消費電力が低く、実装に必要な回路面積も小さいため、よりバイオセンサシステムを構成する要素回路として適している。65-nm CMOSプロセスで試作した評価用チップを含む送信機のプロトタイプは、電源電圧190 mVにおいて、消費電力53 μW で動作することに成功し、リング発振器回路を用いた構成と比較して、大幅な消費電力の

低減を達成した。

第 3 章では、低電源電圧動作に適したゲートリーク電流利用型発振器回路について述べる。従来のゲートリーク電流利用型発振器回路において、低電源電圧動作と安定した出力周波数の両立は難しく、低電源電圧動作におけるゲートリーク電流利用型発振器回路の性能向上が課題であった。そこで、低電源電圧動作に不向きなアナログ回路を必要としない、レプリカバイアススイッチング手法を提案し、低電源電圧動作において安定した周波数を出力する発振器回路を開発した。開発した発振器回路の回路構成は、第 4 章で述べる電源電圧モニタ回路で利用される。55-nm DDC (Deeply Depleted Channel) CMOS プロセスで試作した提案発振器回路の評価用チップの評価結果と、従来のゲートリーク電流利用型発振器回路との比較より、レプリカバイアススイッチング手法を用いた提案発振器回路が低電源電圧動作に適していることを示した。

第 4 章では、ゲートリーク電流利用型発振器回路を用いた電源電圧モニタ回路について述べる。発振器回路を用いて温度をデジタル信号に変換する手法を応用し、バイオ燃料電池の出力を読み取るのに特化した電源電圧モニタ回路を開発した。電源電圧モニタ回路の出力をデジタル信号とすることで、様々なデジタル信号を用いて動作する回路技術との組み合わせが容易になる。2 種類の電源電圧依存性が異なるゲートリーク電流利用型発振器回路と CMOS 論理回路を用いて、電源電圧モニタ回路を構成した。65-nm CMOS プロセスと 55-nm DDC CMOS プロセスで試作した評価用チップの評価結果より、電源電圧モニタ回路は、従来の 1 つの発振器回路を用いて信号変換を行う手法と比べて、非直線性誤差が小さく、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムにおいて、より正確なバイオ燃料電池出力の読み取りを行えることを示した。さらに、従来の $\Delta\Sigma$ ADC を用いてバイオ燃料電池の出力を読み取る手法と比べて、低消費電力・小回路面積で電源電圧モニタ回路をバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムに応用できることを示した。

第 5 章では、第 4 章の電源電圧モニタ回路を低消費電力化したバーストパルスカウンティング電源電圧モニタ回路について述べる。参照クロック信号より生成したバーストパルスを電源電圧に相関した時間分だけカウントすることで、デジタル信号を出力する回路構成を提案した。180-nm CMOS プロセスで試作した評価用チップの評価結果より、第 4 章の電源電圧モニタ回路と比べて、消費電力の低減と信号変換に要する時間を大幅に短縮できることを確認した。この結果から、バーストパルスカウンティング電源電圧モニタ回路は、消費電力の要求が厳しいバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムへの応用に適していることを明らかにした。

第 6 章では、電源電圧モニタ回路を用いたバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムを小型化するための設計指針について述べる。バイオ燃料電池の電力密度が極端に小さい場合や実装面積の制約が厳しい場合、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムの小型化が必須である。バイオセンサシステムの構成要素である、無線通信のための送信機回路の消費電力に着目し、第 4 章で説明した電源電圧モニタ回路とチップ上に集積可能なオンチップ

プ太陽電池を組み合わせたときの、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムを小型化するための設計指針の検討を行った。オンチップ太陽電池による電力をエネルギーハーベスタ回路経由で送信機回路に供給することで、バイオ燃料電池を用いてすべての要素回路を動作させるのではなく、送信機回路の動作にバイオ燃料電池の電力を利用しない手法を提案した。65-nm CMOS プロセスで試作した評価用チップを用いて、オンチップ太陽電池とエネルギーハーベスタ回路の評価を行った。涙液に含まれるグルコースを用いて発電するバイオ燃料電池など、バイオ燃料電池の電力密度が極端に小さくなる場合は、オンチップ太陽電池の電力密度の方が大きくなることを確認した。そして、オンチップ太陽電池とバイオ燃料電池を併用することで、チップ面積と動作に必要なバイオ燃料電池の面積の合計を大幅に削減できることを示した。

第 7 章では、本研究の結論および今後の課題と展望について述べる。本研究では、外部からの電力供給を必要としないバイオセンシングのための、バイオ燃料電池駆動バイオセンサシステム専用の電源電圧モニタ回路の開発とその電源電圧モニタ回路を用いた設計指針を提案し、有用性を示した。残された課題として、電源電圧モニタ回路の非直線性誤差の改善、バイオ燃料電池がもつ内部抵抗や出力電圧を考慮した電源電圧モニタ回路の回路動作調整などがある。しかし、発振器回路を用いた回路構成をとる電源電圧モニタ回路の回路動作の調整は容易である。そのため、以上の研究成果は、既存の、または今後のウェアラブルデバイスの低消費電力化に向けた様々な回路技術と組み合わせて、より実用的なバイオ燃料電池駆動バイオセンサシステムの開発に貢献することができる。