



丸文研究奨励賞 受賞者

廣瀬 哲也

神戸大学 大学院工学研究科  
准教授

## サブスレッショルド動作 超低消費電力LSI設計技術

ナノワットの超低消費電力で動作するLSI設計技術確立を目指して

### ■ 研究の背景

これまで、半導体集積回路(LSI)の消費電力は素子の微細化と電源電圧の低減によって実現されてきた。これにより、LSIの高集積化、高性能化、高機能化が実現され、近年では小型バッテリーで数日間動作する電子デバイスが実現されている。一方で、IoT (Internet of things)のキーワードに代表されるように、様々なセンサを活用したセンシング技術が注目されている。このようなセンサは、超小型で、長期間にわたって「バッテリーレス」かつ「メンテナンスフリー」で動作できることが求められ、デバイスの骨格をなすLSIを極めて低いエネルギーで動作させる超低消費電力回路設計技術が必要となる。図1に示すとおり、このようなLSIが実現できれば、小型環境発電デバイス(ハーベスタ)を用い、太陽光、室内光、温度差、振動、電磁波といった身の回りの微弱な環境エネルギーで動作する小型集積デバイスを実現できると期待される。

### ■ 研究の成果

超低消費電力で動作するLSIの実現に向けて、従来の設計手法とは異なり、MOSTランジスタをサブスレッショルド領域で動作させる設計手法の開拓研究に取り組んできた。図2に示すとおり、サブスレッショルド領域におけるMOSTランジスタの電流はナノアンペアオーダーの微小電流であり、超低消費電力で動作するLSIを実現できる。一方、製造プロセスばらつきや温度変化に対してトランジスタ特性が敏感に変化し、実用化への課題となっていた。しかし、その魅力的な超低消費電力特性を活かすことができれば、バッテリーレス・メンテナンスフリーを実現する集積システムが期待できる。そこで、これらの課題を考慮したLSI設計研究の蓄積を行ってきた。

1. 超低電力で動作するリファレンス回路  
アナログ信号処理を行う上で、基本回路ブロック(例えば、オペアンプやコンパ

レータなど)を動作させるために、バイアス電流や信号処理用リファレンス電圧をオンチップで生成する必要がある。従来は、MOSTランジスタとともにバイポーラトランジスタと抵抗を利用した。しかし、ナノアンペアオーダーの極低電流動作を実現する場合、電流量が低いため、抵抗を用いると大きな抵抗が必要となる課題があった(例えば、10 nAの電流で0.5 Vの電位差を生成するためには50 MΩの抵抗が必要となる)。

これらの課題を解決するために、抵抗を用いないリファレンス回路技術を開拓した[1, 2]。提案回路は、温度と共に減少する電圧に、温度と共に増大する電圧を加算し、温度に対して一定のリファレンス電圧を生成する。従来は抵抗を用いて温度と共に増大する電圧を生成していたが、これを差動対回路で生成する手法を開拓した。差動対回路により、小面積化とばらつきの影響を緩和する構成とした。測定評価により、出力電圧745 mV、消費電力

図1 LSIの消費電力の動向と研究分野。これまでの設計技術では実現できなかったナノワットオーダーでの設計技術開拓を目指す。

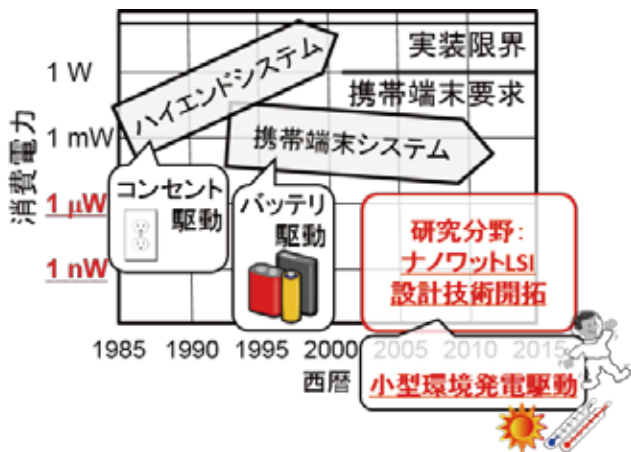
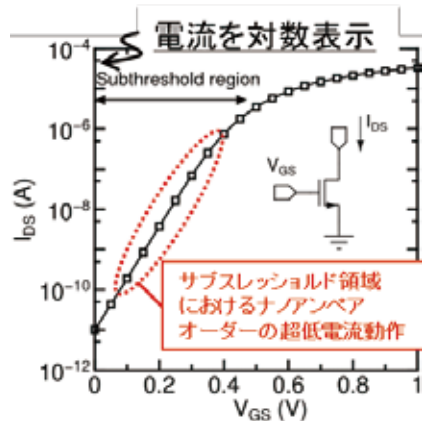


図2 MOSTランジスタの電流特性の例。しきい値電圧以下のサブスレッショルド領域で回路システムを動作させることでナノワットオーダーで動作する超低消費電力LSIを実現できる。



300 nW, 温度依存性7ppm/°C, ラインレギュレーション20ppm/Vを実現した。

## 2. 低電圧デジタル回路のためのレベルシフタ

デジタル回路の低消費電力化を実現するために、回路ブロック毎に異なる電源電圧を利用するマルチ電源設計が利用されてきた。しかし、回路ブロック間の電源電圧の差が大きくなると、従来レベルシフタは消費電力が増大し、また動作不良が生じて信号伝達ができなくなる課題があった。

そこで、幅広い電圧レベル変換を実現する低消費電力レベルシフタを開拓した[3, 4, 5]。提案回路は、プリアンプで入力信号を増幅し、ラッチ回路でフルスイング信号を得る。レベル変換が必要なときのみ動作電流を供給する論理誤り補正回路(LECC:Logic Error Correction Circuit)を開拓することにより、超低消費電力特性を実現した。チップ試作評価の結果、最低入力電圧は0.1 V(入力信号周波数1 kHz)であった。また、入力電圧0.4 V(信号周波数100 kHz)時には、1周期あたり0.26 pJの低エネルギーでの動作を実現した。

## 3. 小型ハーベスタを利用した

### 環境発電利用システム

小型ハーベスタは出力電圧が低く、出力電力も限られるため、高効率な昇圧コンバータを利用する必要がある。これまで様々な昇圧コンバータが提案されてきたが、オフチップデバイスを必要とすることや、電力変換効率が低い課題があり、小

型センサ応用には不十分であった。

そこで、図3に示すとおり、バッテリーレスセンサ応用に向けた高効率昇圧コンバータを開発した[6, 7, 8]。MOSFETドライバを利用した高効率チャージポンプと、ナノワットリファレンス回路、低電力レベルシフタ回路を利用した極低電力で動作する最大電力追従制御(MPPT)回路を新たに構成することで、完全オンチップ集積した3端子昇圧コンバータを開発した。チップ試作と測定評価を行い、提案回路は0.21 Vの低電圧で動作を開始し、348 μWの出力条件において73.6%の高効率での動作を実現した。

## ■ 将来の展望

これまで、MOSTランジスタのサブスレッショルド動作を前提としたLSI設計技術を推進してきた。ナノワットオーダーの超低消

費電力で動作するLSIを実現することで、これまでにない新しいLSI応用が期待できる。特に、小型ハーベスタを利用したシステム構築は現在基盤技術の確立が急務となっている技術分野であり、現在推進中の研究テーマとなっている。今後、本研究成果を応用し、センサ信号の読み出しのみならず、アクチュエータ利用を目指し、次世代エレクトロニクス分野のLSI設計基盤構築を目指して、研究を推進していきたいと考えている。

最後に、本研究成果は、東京大学大規模システム設計教育センターを通し、日本ケイデンス株式会社、シノプシス株式会社、メンター株式会社の協力で行われたものであり、また多くの共同研究者の方々に行ったものである。関係各位の皆様には深く感謝申し上げます。この度の受賞を励みとし、今後さらに研究を推進していきたいと考えています。

図3 小型ハーベスタの利用を前提とした環境発電利用システムの例。ナノワットオーダーの超低消費電力で動作するフルオンチップ昇圧コンバータ。



## References(参考文献)

- [1] T. Hirose, T. Matsuoka, K. Taniguchi, T. Asai, Y. Amemiya, "Ultralow-power current reference circuit with low temperature dependence," IEICE Transactions on Electronics, vol. E88-C, no. 6, pp. 1142-1147, 2005.
- [2] K. Ueno, T. Hirose, T. Asai, Y. Amemiya, "Ultralow-power current reference circuit with low temperature dependence," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 44, no. 7, pp. 2047-2054, 2009.
- [3] T. Hirose, Y. Osaki, T. Mori, "Level converter circuit for use in CMOS circuit device provided for converting signal level of digital signal to higher level," U.S. Patent 8 436 654 B2, May 7, 2013. (Priority Data: Jul. 14, 2014 (JP))
- [4] Y. Osaki, T. Hirose, N. Kuroki, M. Numa, "A Low-Power Level Shifter with Logic Error Correction for Extremely Low-Voltage Digital CMOS LSIs," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 47, no. 7, pp. 1776-1783, 2012.
- [5] R. Matsuzuka, T. Hirose, Y. Shizuku, N. Kuroki, M. Numa, "A 0.19-V minimum input low energy level shifter for extremely low-voltage VLSIs," Proc. of the 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 2948-2951, 2015.
- [6] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "A Fully-Integrated, High-Conversion-Ratio and Dual-Output Voltage Boost Converter with MPPT for Low-Voltage Energy Harvesting," Proc. of Tech. Papers, IEEE Asian Solid-State Circuits Conference 2015, pp. 297-300, Nov. 9-11, 2015.
- [7] Y. Kojima, T. Hirose, K. Tsubaki, T. Ozaki, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "A Fully On-Chip 3-Terminal Switched Capacitor DC-DC Converter for Low-Voltage CMOS LSIs," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, No. 4S, 04EF09, 2016.
- [8] T. Ozaki, T. Hirose, H. Asano, N. Kuroki, M. Numa, "Fully-Integrated High-Conversion-Ratio Dual-Output Voltage Boost Converter with MPPT for Low-Voltage Energy Harvesting," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 51, no. 10, pp. 2398-2407, 2016.