

超低消費電力 LSI 設計技術開拓

大阪大学大学院工学研究科

電気電子情報工学専攻 教授

廣瀬 哲也

1. はじめに

筆者は、平成12年に本研究科の谷口研二先生（現名誉教授）の研究室に卒研生として配属され、半導体集積回路（LSI）に関する研究を開始しました。学部・博士前期課程でトランジスタのプロセス技術に関する研究に、博士後期課程で回路設計技術に関する研究に取り組みました。その後、平成16年から北海道大学大学院情報科学研究科で助手・助教として、平成20年から神戸大学大学院工学研究科で講師・准教授として、超低消費電力で動作するLSI設計技術の研究開拓活動を推進し、平成31年3月1日付で本研究科電気電子情報工学専攻 教授を拝命いたしました。この場をお借りして、研究の一部をご紹介します。

2. 超低電力LSI設計技術開拓

LSIの消費電力は、トランジスタ素子の微細化と電源電圧の低減によって実現されてきました。高集積化、高速化、低消費電力化、そして小型バッテリー技術の進化により、近年では数日間連続動作する携帯端末システムが実現されています。一方で、IoT（Internet of things）に代表されるように、様々なセンサを活用する技術が注目されています。超小型で、長期間に渡って「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

させる必要があります。

図1に示すとおり、マイクロワット以下の、ナノワットレベルの超低消費電力で動作するLSIを実現できれば、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、新しいLSI応用が拓けると期待されています。

このようなLSIの実現に向けて、従来の設計手法とは異なり、ト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研究に取り組んでいます。図2に示すとおり、MOSトランジスタのサブスレッショルド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を実現できます。しかし、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指数関数的に敏感に変化するため、この点が実用化への課題となっていました。しかし、こ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ので、これらの設計課題を考慮し、研究成果の蓄積を行っています。以下では、これまでの取り組みの例をいくつかご紹介いたします。

2-1. 超低電力で動作するアナログ・デジタル回路技術開拓

アナログ信号処理を行なう上で、基本回路ブロック

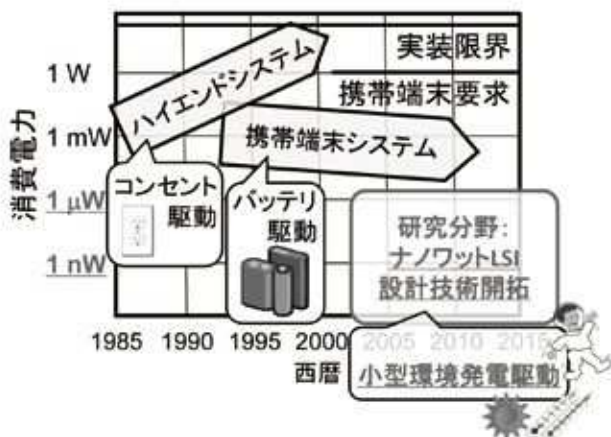


図1 LSIの消費電力の動向と研究対象分野

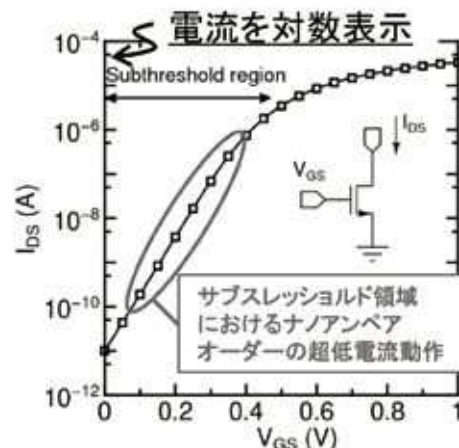


図2 トランジスタの電流特性（縦軸：対数表示）

(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の参照電圧をオンチップで生成する必要があります。従来はMOSト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ていました。しかし、ナノアンペアオーダーの極低電流動作とする場合、電流量が極めて低いため、抵抗を用いると大きな抵抗が必要となり、チップ面積のほとんどを抵抗が占めてしまう課題がありました(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の大抵抗が必要)。また製造プロセスばらつきの影響で、安定な出力電圧を得ることが難しい課題がありました。これらの課題を解決するために、抵抗を用いない設計技術を開拓しました。提案回路は、温度と共に減少する電圧に、差動対回路を利用して温度と共に増大する電圧を生成し、これらの電圧を加算することで、温度に対して一定の参照電圧を生成します。差動対回路で生成するアーキテクチャを採用することにより、小面積化とばらつきの影響を緩和する構成を実現しています。

また、集積システムを構築していくうえで、アナログ回路のみならず、デジタル回路技術開発も不可欠となっています。電源電圧の低減は消費電力の削減に極めて有効であることから、デジタル回路の極低電圧動作に係る技術開発を行っています。100 mVを切る極低電圧で動作するデジタル要素技術や高効率に動作する信号レベル変換回路等、新規デジタル要素回路技術の開拓研究を推進しています。

2-2. 小型ハーベスタを利用した環境エネルギー利用システム

先に説明した超低電力で動作するアナログ・デジタル回路技術を利用して、小型ハーベスタを動力源として利用するバッテリーレス集積システムの構築に向けた技術開発を行っています。小型ハーベスタの出力電圧は低く、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ります。これまで様々な昇圧コンバータが提案されてきましたが、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した。そこで、バッテリーレスセンサ

応用に向けた高効率パワーマネジメントシステムを開発しています。図3に示すとおり、MOSFETドライバを利用した高効率チャージポンプ昇圧回路、リファレンス回路、信号レベル変換回路を利用し、また極低電力で動作する最大電力追従制御(MPPT: Maximum Power Point Tracking)を組み込み、完全オンチップ集積した3端子パワーマネジメントシステムを開発しました。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ています。

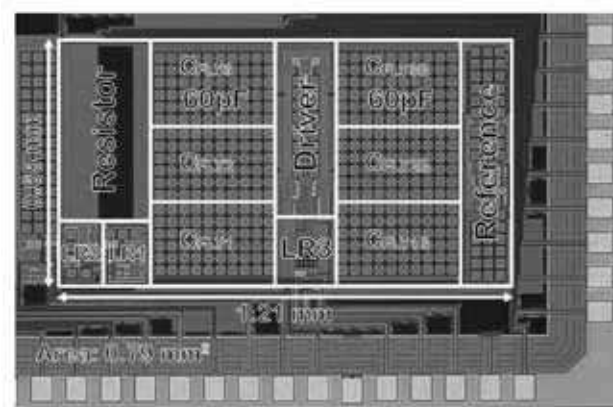


図3 微弱環境エネルギー利用システムのための
パワーマネジメントシステム

3. おわりに

これまで、MOSト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ました。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応用が期待できます。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ます。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ます。

(電子情報エネ 平成12年卒 14年前期 17年後期)