

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」
平成17年度採択研究代表者

黒田 忠広

慶應義塾大学理工学部・教授

高性能・超低電力短距離ワイヤレス可動情報システムの創出

§ 1. 研究実施の概要

磁気結合チャネルを用いたチップ間通信の研究においては、磁気結合を用いて 10Tbps/100mW のチップ間通信を可能にする技術を創出する。これまでに、1Tbps/100mW の高速チップ間通信を達成した。また、ナノダイジー・チェーン技術、パルス波形最適化技術により送信電力を削減し、0.14pJ/bit と 1/20 の電力削減に成功した。また、バースト転送技術により、11Gbps/ch のチップ間通信を実現した。昨年度、当該技術を NAND フラッシュメモリに適用し、消費電力を 1/2、実装面積を 1/8 に低減したが、今年度は、チャネル配列を改良し、さらに 1/2 の電力削減、1/11 の実装面積削減に成功した。最新の研究成果において、128 枚の積層方式で、さらに 1/3 の電力削減に成功した。また、DRAM インタフェース応用でも、1/8 の電力削減に成功した。

60GHz 帯を用いた偏波変調パルス通信方式を提案し、10Gbps/10mW のワイヤレス通信用 CMOS 回路の試作・実証を目指している。1Gbps を超える高速無線通信では変調および復調における超高速 DA 変換回路および AD 変換回路の消費電力が問題となるが、本研究では無線パルス信号をデジタル符号から直接生成する送信回路と無線パルス信号からデジタル信号を直接生成する受信回路を組み合わせることにより AD/DA 変換回路を省略し、低電力化を図っている。今年度、本研究ではミリ波パルス送受信回路を用い送受信モジュールの設計を行った。

CMOS デジタル回路でアナログ回路を積極的に置き換えた、電力効率に優れた新しいワイヤレス通信方式を提案し、100Mbps/1mW のワイヤレス通信用 CMOS トランシーバ回路の試作・実証を目指している。今年度は、昨年度までに開発したインパルス UWB トランシーバの低電力性を損なわずに妨害波耐性を向上する新しい受信回路方式の研究に取り組んだ。

大面積かつフレキシブルな有機ワイヤレス給電シートによって空間を動き回る情報システムに高効率かつ利便性高く電力伝送する手法を供するためには、特に有機トランジスタが重要な役割を果たしている。本年度は、電力供給のルートを低消費電力でプログラムするために、有機フローティングゲートトランジスタ型の不揮発性メモリを作製し、非破壊読み出しのメモリマトリックスを実現した。

§ 2. 研究実施体制

(1)「慶應」グループ

① 研究分担グループ長:黒田 忠広(慶應義塾大学、教授)

② 研究項目

磁気結合チャネルを用いたチップ間通信の研究

(2-1)「柏」グループ(H21.7 まで)

① 研究分担グループ長:藤島 実(東京大学大学院、准教授)

② 研究項目

偏波変調通信を用いた超高速無線通信の研究

(2-2)「広島」グループ(H21.8 から)

① 研究分担グループ長:藤島 実(広島大学大学院、教授)

② 研究項目

偏波変調通信を用いた超高速無線通信の研究

(3)「本郷」グループ

① 研究分担グループ長:染谷 隆夫(東京大学大学院、教授)

② 研究項目

ワイヤレス給電シートの超低消費電力化に関する研究

(4)「駒場」グループ

① 研究分担グループ長:高宮 真(東京大学、准教授)

② 研究項目

超低消費電力の無線通信を実現するオールモスト・デジタル無線に関する研究

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

3. 1 ナノコイル配列を用いたチップ間通信

本研究においては、最終的な成果として 1/1000 の低電力化を達成すると共に、ワット級の電力で毎秒ペタビットのチップ間通信を可能にすることを目標としている。そのためには速度と電力のトレードオフを改善する新回路技術の創出と、トレードオフを最適化するための設計理論の確立が重要な鍵となる。

これまでの研究において、磁気結合チャネルを用いたチップ間通信技術は、デジジー・チェーン技術とパルス整形技術を利用することで、従来の 1/20 に相当する 0.14pJ/b のエネルギー効率を実現し、1Tbps/150mW のチップ間通信を達成可能にした。さらに、面積ペナルティを低減するための高速送受信回路技術について研究し、1 チャネルあたりのデータ伝送速度を 11Gbps/ch まで高めることに成功した。また、昨年度は、磁気結合を応用した積層フラッシュメモリ間のリピータ伝送方式を研究し、多段積層における 3 チップ以上のチップ間通信が行えることを確認した。

今年度は、積層フラッシュメモリ応用に関し、磁気結合チャネルを 3 つのコイルにより配列し、他チャネルからのクロストークを低減し、シールドを取り除く技術を開発した。これにより、昨年度の結果との比較において、1/2 の電力削減、1/11 の実装面積削減に成功した。最新の研究成果においては、128 枚のフラッシュメモリチップ積層で、さらに 1/3 の電力削減に成功した。

また、新たなアプリケーション応用として、DRAM インタフェース応用においても、磁気結合チャネルの適用により、1/8 の電力削減に成功した。

3. 2 偏波変調通信による端末間至近距離通信

60GHz 帯を用いた偏波変調パルス通信方式を提案し、10Gbps/10mW のワイヤレス通信用 CMOS 回路の試作・実証を目指している。1Gbps を超える高速無線通信では変調および復調における超高速 DA 変換回路および AD 変換回路の消費電力が問題となるが、本研究では無線パルス信号をデジタル符号から直接生成する送信回路と無線パルス信号からデジタル信号を直接生成する受信回路を組み合わせることにより AD/DA 変換回路を省略し、低電力化を図っている。

今年度は昨年度までに試作した送信回路、低雑音増幅回路、ミリ波パルス検出回路を組み合わせ、送受信モジュールの設計を行った。送受信モジュールでは左円偏波のアンテナと右円偏波のアンテナを組み合わせることにより 10Gbps(5Gbps×2 チャンネル)を実現する。現在送受信モジュールを試作中である。

3. 3 有機トランジスタを用いた大面積無線給電シート

大面積かつフレキシブルな有機ワイヤレス給電シートを試作し、空間を動き回る情報システムに高効率かつ利便性高く電力伝送する手法を供するための研究を推進している。特に、本プロジェクトにおいては、電力伝送シートを構成するデバイスである有機トランジスタとプラスチック微小機械式スイッチを低消費電力化するための研究を進めている。

今年度は、特にワイヤレス電力伝送システムの伝送ルートを超低消費電力でプログラムするために、有機フローティングゲートトランジスタ型の不揮発性メモリを作製し、非破壊読み出しのメモリマトリックスを実現した。この不揮発性メモリは、分子の自己組織化単分子膜(SAM)を絶縁層に用いることで低電圧駆動の有機フローティング(浮遊)ゲート型メモリトランジスタを作製し、有機半導体層として用いたペンタセンの膜厚を変えることで閾値電圧制御を実現した。絶縁層は、Al 表面の O₂ プラズマアッシングして作製される AlO_x (4 nm)と SAM (2 nm)からなっている。書き込み、消去に必要な電圧はそれぞれ-5 V、+3 Vである。また、ペンタセンの膜厚を変化させることにより、書き込み状態と消去状態の閾値電圧の差(ΔV_{th})を 1.6 V~3 V までコントロールすることに成功した。

さらに、高宮チームとの連携をより深め、有機トランジスタとシリコンの集積化を進めることによって、通常のインクジェットプリンタでビア配線を作製し、有機トランジスタ集積回路をカスタマイズするための新手法を提案し、原理実験に成功した。

3.4 オールモスト・デジタル無線

従来の無線アーキテクチャでは、大部分が DC 的に電力を消費するアナログ回路により構成されているため、消費電力の低減が困難であった。本研究では、DC 電力を消費しない CMOS デジタル回路で、アナログ回路を積極的に置き換えたオールモスト・デジタル無線という、電力効率に優れた新しいワイヤレス通信方式の提案と実証を目指す。昨年度までに、送信回路のデジタル波形整形回路と、受信回路の DC 電力を消費しないパルス検出回路を提案し、これを適用した DC-960MHz 帯向けのインパルス UWB トランシーバ LSI の設計・試作を行い、100Mbps の通信時に、送信回路で 220uW、受信回路で 190uW の低消費電力を実証してきた。これは、1ビット当たりのエネルギーで比較すると、UWB トランシーバとしては世界最低記録を達成した。また、インパルス UWB トランシーバの低電力性を損なわずに通信品質(ビットエラーレート)を低減する新しい受信回路方式としてサンプリング型相関回路の提案を行い、100Mbps, 1.28mW という相関回路付きの UWB 受信回路としては世界最小電力をチップ試作により実証した。

本年度は、これらの研究成果をさらに発展させ、インパルス UWB トランシーバの低電力性を損なわずに妨害波耐性を向上する新しい受信回路方式の研究に取り組んだ。具体的には微調と粗調の2種類の時間精度を有する新しい位相同期回路を提案し、チップ試作により動作実証を行った。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. K. Niitsu, Y. Yuxiang, H. Ishikuro, and T. Kuroda, "A 33% Improvement in Efficiency of Wireless Inter-Chip Power Delivery by Thin Film Magnetic Material for Three-Dimensional System Integration," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, 04C073 (5 pages), Apr.

2009. (10.1143/JJAP.48.04C073)
2. V. V. Kulkarni, H. Ishikuro, and T. Kuroda, "A 4-Gbps Quasi-millimeter-wave Transmitter in 65nm CMOS and a fast Carrier and Symbol Timing Recovery Scheme," *IEICE Transactions on Electronics*, Jan. 2010. (10.1587/transele.E93.C.120)
 3. M. Saito, Y. Sugimori, Y. Kohama, Y. Yoshida, N. Miura, H. Ishikuro, T. Sakurai, and T. Kuroda, "2Gb/s 15pJ/b/chip Inductive-Coupling Programmable Bus for NAND Flash Memory Stacking," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.45, No.1, pp.134-141, Jan. 2010. (10.1109/JSSC.2009.2034431)
 4. Y. Yuan, Y. Yoshida, and T. Kuroda, "Analysis of Inductive Coupling and Design of Rectifier Circuit for Inter-chip Wireless Power Link," *IEICE Transaction on Electronics*, Vol.E93-C, No.2, pp.164-171, Feb. 2010. (10.1587/transele.E93.C.164)
 5. Y. Manzawa, M. Sasaki, and M. Fujishima, "High-Attenuation Power Line for Wideband," *IEICE TRANS.ELECTRON.*, Vol.E92-C, No.6, pp.792-797, Jun. 2009. (10.1587/transele.E92.C.792)
 6. M. Fujishima, "Recent trends and future prospective on millimeter-wave CMOS circuits," *IEICE Electronics Express*, Vol.6, No.11, pp.721-735, Jul. 2009. (10.1587/elex.6.721)
 7. A. Oncu, C. Inui, Y. Manzawa, and M. Fujishima, "50 GHz S-shaped rat-race balun with 1.4 dB insertion loss in a wafer-level chip-size package process," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies (2009)*, 1 : 347-352. (10.1017/S1759078709990377)
 8. A. Oncu and M. Fujishima, "49 mW 5 Gbit/s CMOS receiver for 60 GHz impulse radio," *Electronics Letters*, Vol.45, Issue.17, pp.889-890, Aug. 2009. (10.1049/el.2009.0041)
 9. L. Liu, Y. Miyamoto, Z. Zhou, K. Sakaida, J. Ryu, K. Ishida, M. Takamiya, and T. Sakurai, "A 100Mbps, 4.1pJ/bit Threshold Detection-Based Impulse Radio UWB Transceiver in 90nm CMOS," *IEICE Transaction on Electronics*, E92-C, No.6, pp.769-776, Jun. 2009. (10.1587/transele.E92.C.769)
 10. L. Liu, M. Takamiya, T. Sekitani, Y. Noguchi, S. Nakano, K. Zaitso, T. Kuroda, T. Someya, and T. Sakurai, "A 107-pJ/bit 100-kb/s 0.18-um Capacitive-Coupling Transceiver With Data Edge Signaling and DC Power-Free Pulse Detector for Printable Communication Sheet," *IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers*, Vol.56, No.11, pp.2511-2518, Nov. 2009. (10.1109/TCSI.2009.2015596)
 11. K. Ishida, N. Masunaga, Z. Zhou, T. Yasufuku, T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk, M. Takamiya, T. Someya, and T. Sakurai, "Stretchable EMI Measurement Sheet With 8 X 8 Coil Array, 2 V Organic CMOS Decoder, and 0.18 um Silicon CMOS LSIs for Electric and Magnetic Field Detection," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.45, No.1, pp.249-259, Jan. 2010. (10.1109/JSSC.2009.2034446)

12. T. Sekitani, T. Yokota, U. Zschieschang, H. Klauk, S. Bauer, K. Takeuchi, M. Takamiya, T. Sakurai, T. Someya, "Organic Nonvolatile Memory Transistors for Flexible Sensor Arrays," *Science*, Vol.326, 11 Dec. 2009. (10.1126/science.1179963)
13. T. Sekitani, H. Nakajima, H. Maeda, T. Fukushima, T. Aida, K. Hata, T. Someya, "Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors," *Nature materials* (2009), Volume: 8 Issue: 6 Pages: 494-9, May. 2009. (10.1038/nmat2459)
14. K. Fukuda, T. Sekitani, and T. Someya, "Effects of annealing on electronic and structural characteristics of pentacene thin-film transistors on polyimide gate dielectrics," *Applied physics letters*, Vol.95, No.2, Jul. 2009. (10.1063/1.3179166)
15. K. Fukuda, T. Hamamoto, T. Yokota, T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk, and T. Someya, "Effects of the alkyl chain length in phosphonic acid self-assembled monolayer gate dielectrics on the performance and stability of low-voltage organic thin-film transistors," *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 95, 203301 (2009). (10.1063/1.3259816)
16. K. Fukuda, T. Yokota, K. Kuribara, T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk, and T. Someya, "Thermal stability of organic thin-film transistors with self-assembled monolayer dielectric," *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 96, 053302 (2010). (10.1063/1.3299017)

(4-2) 知財出願

CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)