

「先進的統合センシング技術」

平成 17 年度採択研究代表者

石田 誠

豊橋技術科学大学工学部・教授

社会の安全・安心に貢献するユビキタス集積化マイクロセンサの開発

1. 研究実施の概要

本研究は、社会の安全・安心に貢献するユビキタスセンサネットワークにおけるセンサ・マイクロノードの実現を目的として、要素技術となるRF回路集積型スマートセンサ形成プロセスの確立、自立発電システムの開発、ならびに、マイクロセンサノードの応用に関する実証実験を行う。最終的に、マルチモーダルセンサデバイス技術の開発、ならびにユビキタスセンサ・マイクロノードの形成と実証評価を実施する。

豊橋技術科学大学を中心とし、セイコーインスツル、理化学研究所、ならびに産業技術総合研究所から構成されるチームにおいて、**無線発電機構の集積回路化実現、RF 集積回路・MEMS 統合技術の確立、マルチモーダルセンサの集積化技術開発**、ならびに、**マイクロセンサノードの応用評価に関する実験**を行った。今後は、これら開発した要素技術の統合化を目指す。

2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

(1) 無線発電機構の集積回路化実現:

本研究では、開始からの 2 年間にわたってセンサ・ノードの駆動電力を電磁波による無線電力伝送で実現する技術の開発を行ってきた。本年度は、その無線発電回路技術の基礎を完成し、その集積回路化による実現を行った。我々独自のものである、マイクロチップ上への高性能表面実装素子(SMD)の一括形成技術¹³⁾を活かし、セイコーインスツルとの協力体制で無線発電機構の集積回路実現を進めた。図1は、0.6 ミクロン CMOS 技術で実現した制御用低電圧CMOS電源集積回路のチップ写真である。

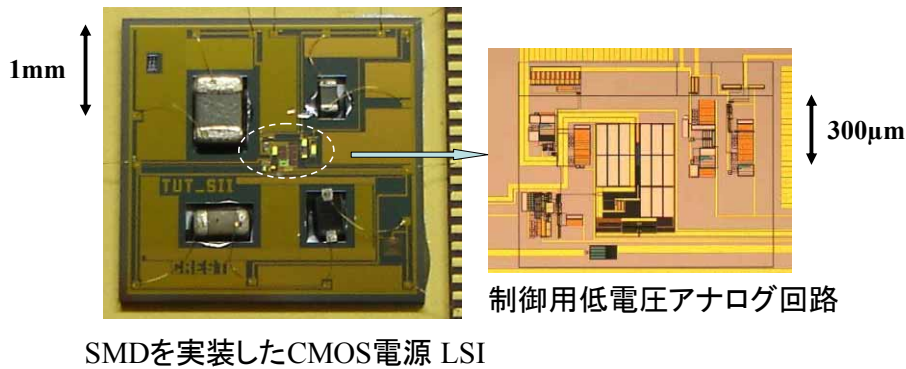


図1 CMOS上にSMDを一体化した無線発電機構の試作チップ写真

チップ中央部に CMOS 回路が集積されており、その周辺に、実装された SMD が埋め込まれている。800MHz の携帯電話から 7.5mm の距離に置かれたチップにおいて、電界強度は約 140V/m 程度であり、蓄電によって 4mW の電力を約 10msec の時間、負荷に供給することに成功した。図2は、チップにおける電界強度と 10msec の時間に本回路が供給可能な最大電力の関係についての実測結果を示している。電界強度の増加とともに、チップが受信し、負荷に供給できる最大電力が増加していることが明白であり、センサ負荷の用途と必要電力量に応じて必要な供給電力の関係が明らかとなった。

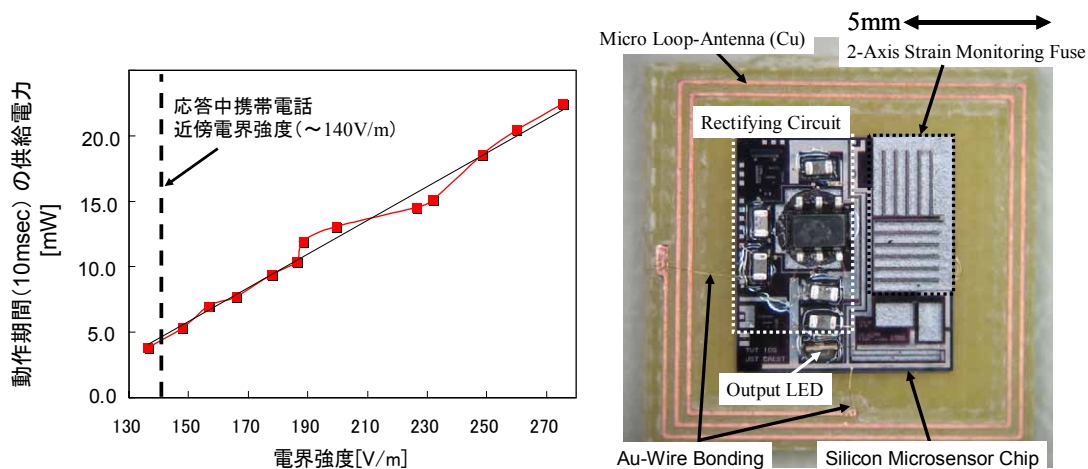


図2 電界強度と動作時における供給電力の関係

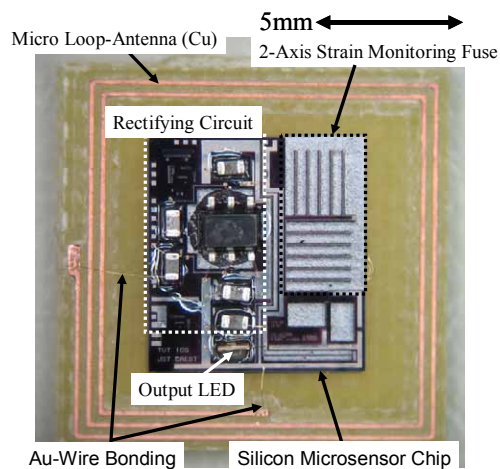


図3 無線駆動による変形計測センサ

図3は、シリコン MEMS 加工により形成した 2 軸変形計測センサ(歪みヒューズ)と無線発電機構を1チップ化した素子のチップ写真である。フィン状の変形計測センサと SMD の埋込孔形成工程を同一にして製造プロセスを単純化している。試作の結果、指向性アンテナによる無線電力供給(10W@1.29GHz)とLED素子の表面実装化により、1m以上離れた位置におけるチップの無線電力駆動(LEDの発光)に成功した。

以上の結果より、シリコンチップ上へ無線発電回路システムの一体化形成を行う集積化技術が確立されたといえる。本成果は 2007 年 6 月のネットワークセンシングに関する国際学会、ならびに、

Transducers 国際会議において成果発表を行った。

(2) RF 集積回路・MEMS 統合技術の確立:

プロジェクトのこれまでの成果により、MEMS と CMOS を含む全てのデバイス製造装置が 4 インチ対応に移行され、全製作工程が4インチウェハ対応となった。本年度においては、RF 集積回路に加えて信号通信アンテナ部分の集積化をすすめ、センサ用の信号処理回路と無線通信機能、ならびに、300MHz 帯用無線アンテナをチップ上で一体化集積化可能な集積化技術を確認することができた。さらに、電力放射効率の改善のために VCO とアンテナ間のインピーダンスマッチング用に使われるインダクターを SMD の代わりに、集積化可能なボンドワイヤ(BW)インダクターを製作し、製作した BW インダクターを利用してマッチングを行なった³⁾。図 4 は製作した BW インダクターを含む集積化可能なマイクロチップのプロトタイプの写真である。CMOS 回路とセンサの一体化による信号処理機能の搭載だけでなく、無線伝送用変調回路と集積化アンテナの一体化を可能とする新しいデバイス技術を開発したことで、様々なマイクロセンサの無線化実現の可能性が示された。特に、本研究でシリコンチップ上の超小型集積化アンテナで、300MHz という比較的波長の長い電波に対しても、応用上目標とした1mを超える3mの距離においても、10mV/m 以上の電界強度で等方性に近い電力放射であることを実証している⁸⁾。これらの成果は、来年度のネットワークセンシングに関する国際会議で発表が予定されている。

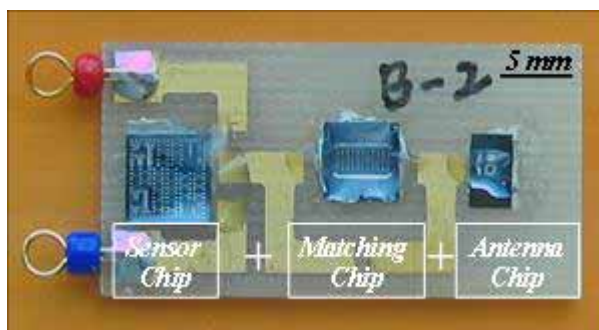


図 4 BW インダクターとアンテナを含む無線送信器の試作チップ

(3) マルチモーダルセンサの集積化技術開発:

複数のセンサを有機的に組み合わせることで融合的な信号統合処理を行うマルチモーダルセンシング技術について、シリコン集積回路技術の機能集積性^{4) - 5), 9), 11) - 12)}, 国内¹⁾, ならびに各種の材料技術^{1) - 2), 7), 10)}を活かして、本研究の開発ターゲットとなるセンサ・ノードへ一体化する技術の開発を開始した。本年度は、多数のセンサ情報を組み合わせた効果的な統合センシングを実現する信号処理回路とシステム構成について検討を行った。

マルチモーダルセンサの情報を一つのキャリア波に載せて搬送するため、本研究室における集積回路技術を用いて、2チャンネルの AM-FM 変調トランスミッタ回路を設計した。そして、その回路と一体化可能な温度センサ、ならびに磁気センサを標準集積回路工程で設計した。次年度以

降, 設計したセンサの製作と評価を進めてゆく。

(4) マイクロセンサノードの応用評価に関する実験:

本研究プロジェクトの測定応用の候補である、生体埋め込み型の神経測定デバイスの研究を継続して行っている。本年度は新たに、細胞電位記録と薬液投与を同時に実現するデバイス構造、生体組織内において 3 次元細胞電位分布取得を可能とする微細プローブ電極の 3 次元構造化、及び細胞電位用 IC の同一基板上へ集積化に着手した。

(1) 薬液投与用のマイクロチューブアレイをシリコン酸化膜で製作するプロセスを確立した。また、これらの薬液チューブアレイを電位記録プローブと同一基板上に集積化するプロセスを確立し、細胞電位記録と薬液投与を同時に実現するデバイス構造を新たに提案・実現した。製作したデバイスの評価とし、チューブ薬液吐出特性、機械的特性を考察し、実際の生理実験で使用できることを示した (図 5)。これらの研究成果に関しては、国際会議、研究論文 (1 件は新規性、重要性、将来の研究への潜在的ポテンシャルなどの観点をもとに英国物理学会(IOP)の Editor が選抜する “IOP Select” に選出される) で発表した。

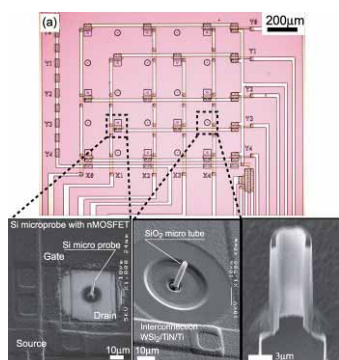


図 5 電位記録マイクロプローブ、薬液マイクロチューブの NMOS FET 集積化

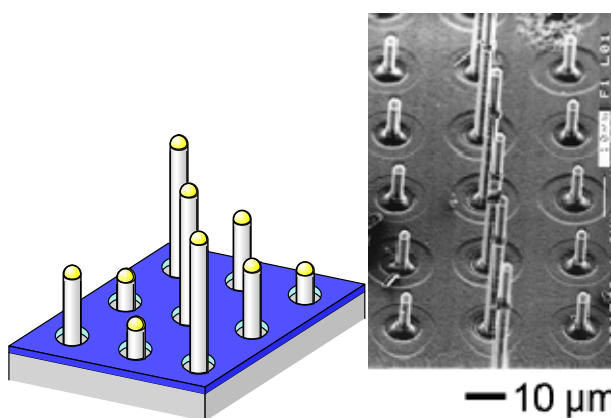


図 6 生体組織内 3 次元細胞電位分布取得用プローブ電極アレイ

(2) 微細プローブ電極アレイの 3 次元構造の実現のため、3 次元形状用のリソグラフィプロセス、結晶成長の観点での議論、及びシリコン再結晶成長モデルの適用により、プローブの 3 次元化プロセスを確立した。デバイス製作として、このような長さの異なる 3 次元プローブを既存の IC プロセスにより配線チップ上に形成、またプローブの電気特性、機械的特性を評価し、実際の生理実験で試用できることを示した (図 6)。これらの研究成果に関しては、国際会議、研究論文⁶⁾として発表した。

(3) 本学 IC プロセスを用いて、同一シリコン基板上に信号処理回路として神経電位測定用のインピーダンス変換回路を搭載するテーマを進めた。実際の生理実験を考慮し、チップ被覆、実装までを行い生体同様の生理溶液中での電気的特性を検討した。回路設計と同

様の増幅率を確認し、更に細胞外電位 100 μ V 以下の電位取得にも成功している。これらの成果は、来年度の国際会議で発表が予定されている。

3. 研究実施体制

(1)「豊橋技術科学大学」グループ

①研究分担グループ長:石田 誠(豊橋技術科学大学、教授)

②研究項目

- ・ 無線発電機構の集積回路化実現
- ・ RF 集積回路・MEMS 統合技術の確立
- ・ マルチモーダルセンサの集積化技術開発
- ・ マイクロセンサノードの応用評価に関する実験

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

国内論文誌

1) W.H. Lee, J.W. Kim, H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida:

“Neo-Transmitter Using Pulse Width Modulation(PWM) Method for Wireless Smart Sensor”,

電気学会 E 部門(センサ・マイクロマシン部門)論文誌, vol.128, No.1, pp.7-11, (2008).

国際論文誌

1) Yiping Guo, D. Akai, K. Sawada and M. Ishida :

“Ferrielectric and pyroelectric properties of highly (110)-oriented Pb(Zr_{0.40} Ti_{0.60}) O₃ thin films grown on Pt/InNiO₃/SiO₂/Si substrates”,

APPLIED PHYSICS LETTERS, 90, 232908, pp.232908-1 – 3, (2007).

2) K. Sawada, C. Oda, H. Takao, and M. Ishida :

“Smart Microfluidic Electrochemical DNA Sensors with Signal Processing Circuits”,

Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 5A, pp. 3135-3138, (May 2007).

3) J.W. Kim, H. Takao, K. Sawada, M. Ishida :

“Development of radio frequency transmitters including on-chip antenna for intelligent human sensing systems”,

IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 365-371,

(May 2007).

4) D. Noda, M. Hatakeyama and Y. Nishijou, K. Sawada and M. Ishida :

“Fabrication of local microvacuum package incorporating Si field emitter array and Ti getter”,

Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol.25, No.3, pp.931-934, (May/Jun, 2007).

5) H. Takao, and M. Ishida :

“Pneumatic MEMS In-Channel Microvalves with In-Plane Control Ports for Micro Fluidic Systems Integrated on a Chip Surface,”

Sensors and Materials, Vol.19, No.1, pp.19-34, (2007).

6) Md. Shofiqul Islam, T. Kawashima, K. Sawada and M. Ishida :

“High-yield growth of p-Si microprobe arrays by selective vapor–liquid–solid method using in situ doping and their properties,”

Journal of Crystal Growth, Vol. 306, Issue pp. 276-282, 2, 15 August (2007),

7) M. Ito, K. Sawada, and M. Ishida :

“High quality epitaxial Pt films grown on γ -Al₂O₃/Si (111) substrates”,

Solid State Phenomena, Vol, 124-126, pp.181-184, (2007).

8) J.W Kim, H. Takao, K. Sawada and M. Ishida :

“Integrated Inductors for RF Transmitters in CMOS/MEMS Smart Microsensor Systems,”

Sensors, 7, pp.1387-1398 (2007).

9) D. Noda, M. Hatakeyama, K. Nishijou, K. Sawada, and M. Ishida :

“Development of Cavity Structure for Field Emission on Si Substrate”,

Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 9B, pp. 6433-6436, (2007).

10) Halima Khatun Mst, Md. Shahjahan, K. Sawada, M. Ishida :

“Capacitance–voltage characteristics and switching time of double barrier resonant tunneling diode fabricated with epi-Si and γ -Al₂O₃”,

Physica E Vol.36, pp. 123–127, (2007).

11) Radhakrishna Vatedka, H. Takao, K. Sawada, M. Ishida :

“Effect of high drain voltage on stress sensitivity in nMOSFETs”,

Sensors and Actuators A, 1, Vol. 40, Issue 1, pp. 89–93, (2007).

12) W.H. Lee, Y.T. Lee, H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida, :

“Fabrication of Thermoelectric Sensor Using Silicon-on-Insulator Structure”,

Japanese Journal of Applied Physics, vol.46, No.11, pp.7232-7236, (2007).

13) M. Sudou, H. Takao, K. Sawada, M. Ishida :

“Wafer-Level Integration Technique of Surface Mount Devices on a Si-Wafer With Vibration Energy and Gravity Force”,

IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 30, Issue 3, pp. 457 – 463, (2007).

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数：3件（CREST 研究期間累積件数：12件）