

〈特別研究課題〉 都市環境モニタリングに向けた小型可搬型微細CMOS適応
ウィルスセンシング集積システムの礎をなす基盤技術の構築
助成研究者 名古屋大学 新津 葵一



都市環境モニタリングに向けた小型可搬型微細CMOS適応 ウィルスセンシング集積システムの礎をなす基盤技術の構築

新津 葵一
(名古屋大学)

Development of Portable Virus Sensing Integrated System for Urban Environment Monitoring

Kiichi Niitsu
(Nagoya University)

Abstract :

This paper presents development of portable virus sensing integrated system for urban environment monitoring. The proposed bio-sensing system includes a biofuel cell as a power source and a sensing frontend that is associated with the CMOS integrated supply-sensing sensor. The sensor consists of a digital-based gate leakage timer, a supply-insensitive time-domain temperature sensor, and a current-driven inductive-coupling transmitter and achieves low-voltage operation. The timer converts the output voltage from a biofuel cell to frequency. The temperature sensor provides a pulse width modulation (PWM) output that is not dependent on the supply voltage, and the associated inductive-coupling transmitter enables proximity communication. A test chip was fabricated in 65 nm CMOS technology and consumed 53 μ W with a supply voltage of 190 mV. The low-voltage-friendly design satisfied the performance targets of each integrated sensor without any trimming.

1. はじめに

都市環境モニタリングに向けた小型可搬型微細CMOS適応ウィルスセンシング集積システムが今まさに求められている。本研究開発においては、この礎をなす基盤技術の構築を行った。

2. 提案手法

65nm CMOSプロセス(相補型金属酸化膜半導体大規模集積回路：Complementary Metal Oxide Semiconductor)での計算機シミュレーションと実デバイス動作により実証した。送信器回路技術とともに、受信器回路技術の開発にも成功した。費用対効果を考慮し、製造は外部業者に委託し、設計についてはすべての構成回路において研究代表者において遂行した。さらに、送信器内において電源電圧と温度を高精度に独立してモニタリング出来る回路技術の開発に成功した。図2に本研究開発を用いた継続乳酸モニタリングシステムの想定イメージを示す。

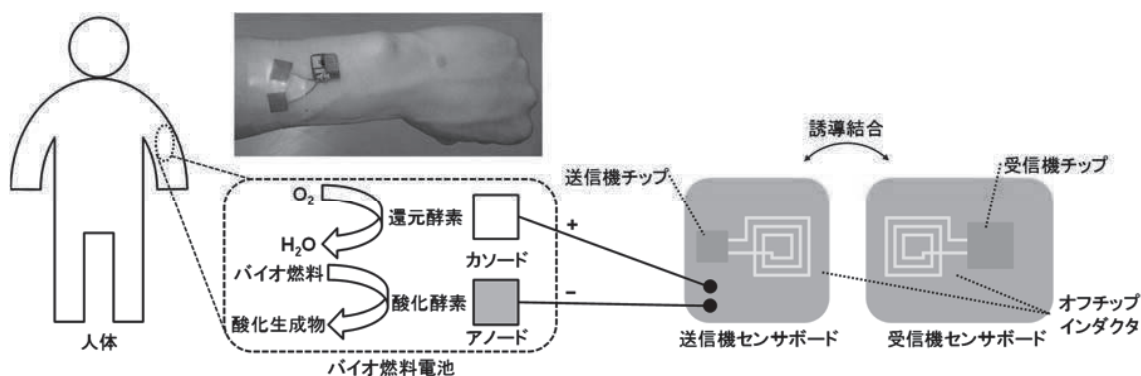


図1 研究開発成果を用いたシステム構築の想定イメージ

下記の項目について、研究開発を実施した。

1-1 高しきい値トランジスタを用いたデジタルベース・ゲートリーク活用型発振器の開発

低消費電流で動作し、なおかつ低い発振周波数を出力可能な高しきい値トランジスタを用いたデジタルベース・ゲートリーク活用型発振器(下図)の開発に成功した。研究開始当初に計画していたリング発振器では、消費電流が大きいという問題があったが、図に示すゲートからのリーク電流を積極的に活用したゲートリーク活用型発振器回路を採用することで大幅な低消費電流化・低発振周波数化に成功した。高しきい値トランジスタを用いたデジタルベースの回路で構成を行うことで、さらなる消費電流の低減を達成した。

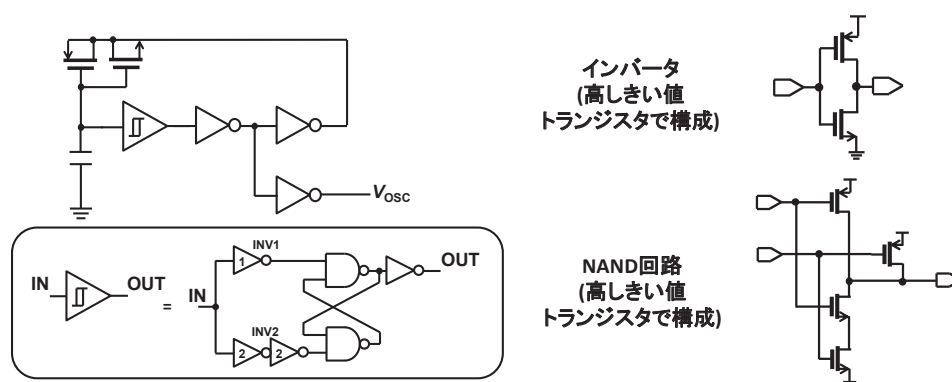


図2 新規開発した高しきい値トランジスタを用いたデジタルベース・ゲートリーク活用型発振器

1-2 低しきい値トランジスタを用いた小サイズ誘導結合送信ドライバ回路の開発

従来のオンチップインダクタにおいてはアンテナのゲイン(利得)が小さく、大きなサイズのドライバが必須であった。大きなサイズのドライバはリーク電流が大きく、そのリーク電流による消費電流が全体の消費電力低減を阻むボトルネックとなっていた。新たにオフチップアンテナを導入す

ることアンテナゲインを大きくすることができ、そのためにドライバを小さくすることができた。ドライバを小さくしたことが寄与して、全体の消費電力を $18.2\mu\text{A}$ まで低減されることに成功した。

1-3 電源電圧0.19V、消費電流 $18.2\mu\text{A}$ で動作する送信器回路技術(1-1,1-2を基にして開発)

1-1の発振器回路ならびに1-2の誘導結合送信器回路を用いて電源電圧0.19V、消費電流 $18.2\mu\text{A}$ で動作する送信器回路技術の開発に成功した。

1-4 温度モニタリング機能の搭載

バイオ燃料電池は発電に選択性に優れる酵素を用いるのが一般的であり、本研究開発にて応用を模索している血糖モニタリングや乳酸モニタリングにおいても酵素の活用を検討している。しかし、酵素はその活性の温度依存性が高く正確なバイオ濃度測定には温度モニタリング機能が必須である。提案システムにおいては電源電圧情報をバイオ濃度情報として読み取っているために、電源電圧不感型温度センサの実現が必須であり、開発において取り組んだ。図2に示すように、温度依存性が小さい発振器と電源電圧依存性の小さい温度センサを組み合わせることで、正確な発電センシングが可能となる。温度依存性の小さいゲートリーク型発振器と電源電圧依存性の小さい電源電圧不感型温度センサを導入することにより、温度モニタリング機能の搭載・実証に成功した。

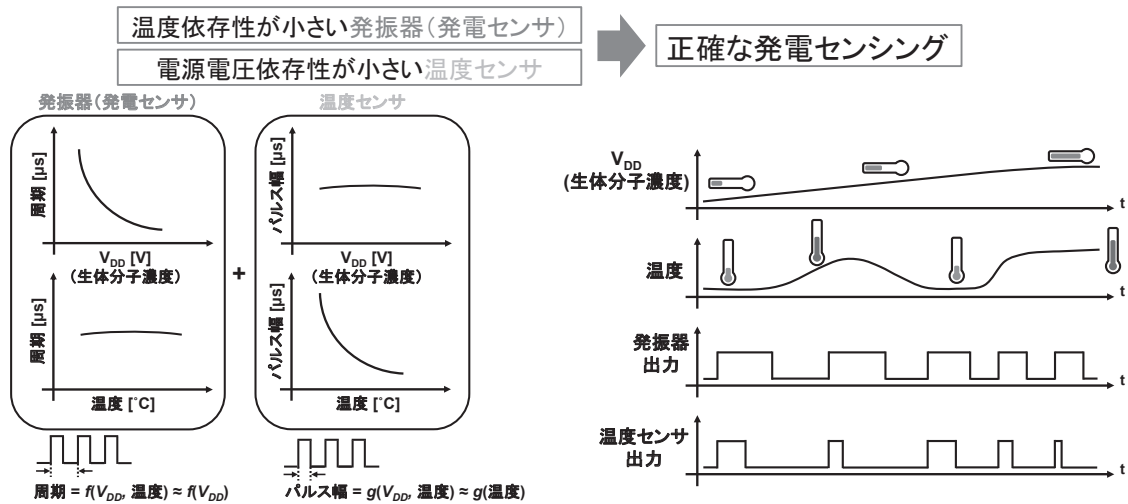


図2 温度モニタリング機能の搭載

温度センサの回路図・動作原理を図3ならびに図4において示す。

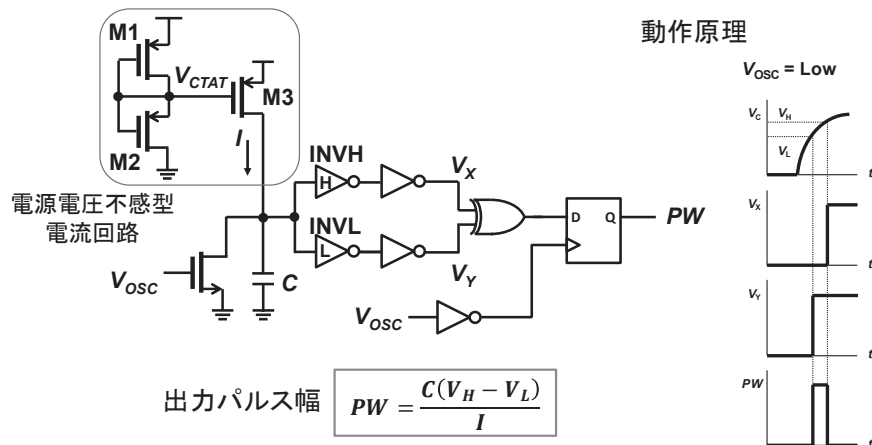


図3 電源電圧不感型温度センサの回路図・動作原理

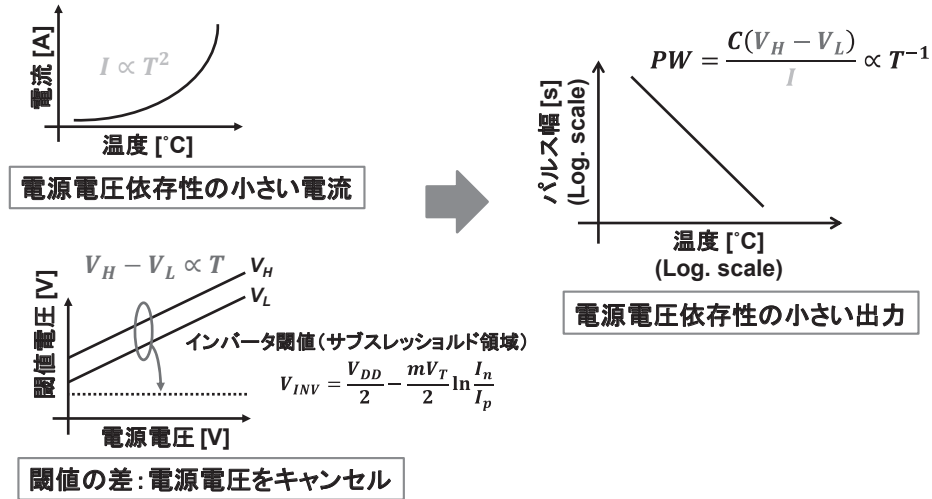


図4 電源電圧不感型温度センサの電源電圧不感性の原理

低電源電圧動作を実現するために出来る限りデジタル回路で構成した。論理しきい値が高・低2つのインバータチェーンを設け、論理しきい値の差による時間差が温度に依存することを利用して温度センシングを行う。時間領域動作回路を採用して、温度によって誘導結合送信ドライバを駆動するパルス信号が変化するアーキテクチャを採用した。

参考文献

1. Kiichi Niitsu, Atsuki Kobayashi, Kenya Hayashi, Yuya Nishio, Kei Ikeda, Takashi Ando, Yudai Ogawa, Hiroyuki Kai, Matsuhiko Nishizawa, and Kazuo Nakazato, "A Self-Powered Supply-Sensing Biosensor Platform Using Bio Fuel Cell and Low-Voltage, Low-Cost CMOS Supply-Controlled Ring Oscillator with Inductive-Coupling Transmitter for Healthcare IoT," accepted to IEEE Transactions on Circuits and Systems I (TCAS-I).
2. Shigeki Arata, Kenya Hayashi, Yuya Nishio, Atsuki Kobayashi, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "Wafer-scale development and experimental verification of 0.36-mm² 228-mV open-circuit-voltage solid-state CMOS-compatible glucose fuel cell for healthcare IoT application," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 4S, pp. 04FM04, Mar. 2018.
3. Atsuki Kobayashi, Kei Ikeda, Yudai Ogawa, Hiroyuki Kai, Matsuhiko Nishizawa, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "Design and Experimental Verification of 0.19 V 53 μ W 65 nm CMOS Integrated Supply-Sensing Sensor with a Supply-Insensitive Temperature Sensor and Inductive-Coupling Transmitter for a Self-Powered Bio-Sensing Using a Biofuel Cell," IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS), vol. 11, no. 6, pp. 1313-1323, Dec. 2017.
4. Maya Matsunaga, Atsuki Kobayashi, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "Design Trade-Off between Spatial Resolution and Power Consumption in CMOS Biosensor Circuit Based on Millimeter-Wave LC-Oscillator Array," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 3S2, pp. 03EC02, Jan. 2018.
5. Taiki Nakanishi, Maya Matsunaga, Atsuki Kobayashi, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "A

- 40-GHz fully integrated circulating tumor cell analysis vector network analyzer in 65-nm CMOS technology with coplanar-line-based detection area," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 3S2, pp. 03EC01, Jan. 2018.
6. Keisuke Itakura, Keisuke Kayano, Kazuo Nakazato and Kiichi Niitsu, "Theoretical Analysis and Simulation Study of Low-Power CMOS Electrochemical Impedance Spectroscopy Biosensor in 55nm DDC Technology for Cell-State Monitoring," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 1S, pp. 01AG02, Jan. 2018.
 7. Kei Ikeda, Atsuki Kobayashi, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "Design and Electrochemical Measurement of a Current-Mode Analog-to-Time Converter with Short-Pulse Output Capability Using Local Intra-Cell Activation for High-Speed Time-Domain Biosensor Array," Analog Integrated Circuits and Signal Processing (ALOG), vol. 92, no. 3, pp. 403-413, Jun. 2017.
 8. Kohei Gamo, Kazuo Nakazato, and **Kiichi Niitsu**, "A Current-Integration-Based CMOS Amperometric Sensor with 1024×1024 Bacteria-Sized Microelectrode Array for High-Sensitivity Bacteria Counting," IEICE Transactions on Electronics, Vol.E100-C, No. 6, pp. 602-606, Jun. 2017.
 9. Kei Ikeda, Atsuki Kobayashi, Kazuo Nakazato, and **Kiichi Niitsu**, "Design and Analysis of Scalability in Current-Mode Analog-to-Time Converter for an Energy-Efficient and High-Resolution CMOS Biosensor Array," IEICE Transactions on Electronics, vol. E100-C, No.6, pp. 597-601, Jun. 2017.
 10. Yuuki Yamaji, Kazuo Nakazato, and **Kiichi Niitsu**, "Sub-1-V CMOS-Based Electrophoresis Using Electroless Gold Plating for Small-Form-Factor Biomolecule Manipulation," IEICE Transactions on Electronics, vol. E100-C, No.6, pp. 592-596, Jun. 2017.
 11. Kiichi Niitsu, Kei Ikeda, Keita Muto, and Kazuo Nakazato, "Design, Experimental Verification, and Analysis of a 1.8-V-Input-range Voltage-to-Current Converter Using Source Degeneration for Low-Noise Multimodal CMOS Biosensor Array," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 1S, pp. 01AH06, Jan. 2017.
 12. Kiichi Niitsu, Atsuki Kobayashi, Kohei Yoshida, and Kazuo Nakazato, "Design and experimental verification of CMOS Magnetic-Based Microbeads Detection Using an Asynchronous Intra-chip Inductive-Coupling Transceiver," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 1S, pp. 01AH05, Jan. 2017.
 13. **Kiichi Niitsu**, Takashi Ando, and Kazuo Nakazato, "Enhancement in open-circuit voltage of implantable CMOS-compatible glucose fuel cell by improving the anodic catalyst," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 1S, pp. 01AH04, Jan. 2017.
 14. Atsuki Kobayashi, Kei Ikeda, Kazuo Nakazato, and Kiichi Niitsu, "Energy-efficient and low-voltage design methodology for a supply-sensing CMOS biosensor using biofuel cells for energy-autonomous healthcare applications," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 1S, pp. 01AH03, Jan. 2017.

15. Kohei Gamo, Kazuo Nakazato, and **Kiichi Niitsu**, "Design, theoretical analysis, and experimental verification of a CMOS current integrator with $1.2 \times 2.05 \mu\text{m}^2$ microelectrode array for high-sensitivity bacterial counting," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 1S, pp. 01AH01, Jan. 2017.
16. **Kiichi Niitsu**, Tsuyoshi Kuno, Masayuki Takihi, and Kazuo Nakazato, "Well-Shaped Microelectrode Array Structure for High-Density CMOS Amperometric Electrochemical Sensor Array," IEICE Transactions on Electronics, vol. E99-C, no. 6, pp. 663-666, Jun. 2016.
17. **Kiichi Niitsu**, Kohei Yoshida, and Kazuo Nakazato, "Design and experimental demonstration of low-power CMOS magnetic cell manipulation platform using charge recycling technique ," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 3S2, 03DF13 (4 pages), Feb. 2016.
18. Suiki Tanaka, **Kiichi Niitsu**, and Kazuo Nakazato, "A Low-Power Inverter-Based CMOS Level-Crossing A/D Converter for Low-frequency Biosignal Sensing ," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 3S2, 03DF10 (7 pages), Feb. 2016.
19. Yuuki Yamaji, **Kiichi Niitsu**, and Kazuo Nakazato, "Design and Experimental Verification of Low-Voltage Two-Dimensional CMOS Electrophoresis Platform with 32×32 Sample/Hold Cell Array ," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 3S2, 03DF07 (5 pages), Feb. 2016.
20. **Kiichi Niitsu**, Shoko Ota, Kohei Gamo, Hiroki Kondo, Masaru Hori, and Kazuo Nakazato, "Development of Microelectrode Arrays Using Electroless Plating for CMOS-Based Direct Counting of Bacterial and HeLa Cells," IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems (TBioCAS), vol. 9, no. 5, pp. 607-619, Nov. 2015.
21. **Kiichi Niitsu**, Yusuke Osawa, Daiki Hirabayashi, Osamu Kobayashi, Takahiro J. Yamaguchi, and Haruo Kobayashi, "A CMOS PWM Transceiver Using Self-Referenced Edge Detection," IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems (TVLSI), vol. 23, no. 6, pp. 1145-1149. Jun. 2015.
22. Hiroki Ishihara, **Kiichi Niitsu**, and Kazuo Nakazato, "Analysis and Experimental Verification of DNA Single Base Polymerization Detection Using CMOS FET-Based Redox Potential Sensor Array," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, no. 4S, 04DL05 (6 pages), Mar. 2015.