

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686053

研究課題名(和文)高耐圧化CMOS回路のMEMS集積で創るエネルギー自立型分散水上走行素子

研究課題名(英文)An Energy-Autonomous Distributed Water Strider by High-Voltaged Standard VLSI and MEMS Integration

研究代表者

三田 吉郎(MITA, Yoshio)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40323472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,000,000円

研究成果の概要(和文)：水上走行する小型の昆虫類に着想を得て、環境から電気エネルギーを収集する回路によって動力を得て水上移動できる、エネルギー自立型の超小型アクチュエータ素子を試作し、整列順序入れ替えなどの協調動作を行なうトップダウン研究を通じて、自律分散マイクロシステム研究分野に基本素子が自走し組換え可能という新規概念を提供すると共に、集積化マイクロシステム(MEMS)向け集積回路(VLSI)ポストプロセス加工技術の新たな展開に資するボトムアップ的な革新的成果、特にシリコンの物理限界を超える高電圧を発生する集積化太陽電池を実現し、信号とエネルギーとを光の波長に乗せて電送しMEMSを駆動する無線制御方式を実証できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, the applicant attempted to realize an energy autonomous, which means that harvesting energy in nature to electricity, water striding microrobot. The research was inspired by water-striding tiny insects in nature, and attempted to realize cooperative functions by independent tiny agents. The new philosophical contribution by the research is the idea of autonomous distributed system by self-moving micro agents. By means of such "top-down" research, a critical advancement in VLSI integrated MEMS technology was achieved. The device technology proven by this Kakenhi research includes a VLSI on-chip high-voltage generating solar cells, that produces high voltage which is beyond the physical limit of Silicon material, thanks to CMOS-MEMS post-process. A new energy and information transfer scheme was also demonstrated with CMOS integrated MEMS devices.

研究分野：マイクロマシン

キーワード：マイクロマシン CMOS-MEMS VLSI ポストプロセス オンチップ太陽電池 自律分散システム

1. 研究開始当初の背景

自然界の生物に着想を得て、それらを工学的に実現しようと試みる種類の研究は長い歴史を持つ。特に、MEMS 技術によって生物の細胞や小器官と同等の大きさの微小機械構造を現実に作製できるようになったことから研究が加速的に進歩し、1990 年代より継続的に多くの新規素子が発表されている。代表的なものとして、(1)《運ぶ》細胞の繊毛を模擬した物体搬送素子[1]、(2)《歩く》自重の 16,000 倍以上の物体を乗せられる「アリ型」マイクロマシン[2]、(3)《飛ぶ》交番磁界によって回転するプロペラを持つヘリコプターロボット[3] が知られている。これらの研究では自然界の生物を模倣する MEMS という (A) 研究対象そのものの学術的な価値と (B) 対象実現のために開発されたパイプロダクトとしての新規技術との両面で関連分野の発展に資することを目指して研究が盛んに行われている。

- [1] M. Ataka et., al., *J. Microelectromech. Sys.*, **2**, No.4, pp. 146-150 (1993).
- [2] T. Ebefors et., al., *J. Micromech. Microeng.*, **10**, No.3 pp. 337-349 (2000).
- [3] N. Miki and I. Shimoyama, *J. Microelectromech. Sys.* **12**, No. 2, pp. 221-227 (2003).

2. 研究の目的

本研究では、水上走行する小型の昆虫類に着想を得て、環境から電気エネルギーを収集する回路によって動力を得て水上を移動することができる、エネルギー自立型の超小型 (1cm 以下) アクチュエータ素子を実現し、更に複数のチップによって整列、順序入れ替えなどの協調動作デモンストレーションを行なうことを目的としたトップダウン研究により、自律分散マイクロシステムの研究分野に基本素子が自走し組み換えが可能という新規概念を提供し、実現の過程で集積化マイクロシステム (MEMS) 向け集積回路 (VLSI) ポストプロセス後加工技術の新たな展開に資する要素技術のボトムアップ的な革新的成果を得ることを目的に研究を行った。

3. 研究の方法

具体的には、(1) 環境からエネルギーをもらって (2) 自走し、(3) コミュニケーションを行なって、(4) 協調動作を創発する MEMS 融合 VLSI 素子の実現を目指し、以下に示す 4 つのタスクによって目的を達成することとした。(Task 1) 10V 級 EWOD アクチュエータを電圧変換器無しで駆動可能とするオンチップ高電圧発生素子、(Task 2) 水面に浮かび、チップに抱かせたバブルレット (小泡) の形状を切り替えて推力を発生する、表面張力制御型アクチュエータ素子と制御回路、制御手法、(Task 3) チップ同士が隣接したときにデータ通信を行なう近傍素子通信路とプ

ロトコル、(Task 4) 個々の自立水上歩行素子の協調によって、意味のある (例えば集合離散文字形状を作るなど) 動作を行なわせるための自律分散アルゴリズム。

上記 4 つのタスクによって、シリコン半導体による微小電気機械素子 (MEMS) ならびに集積回路 (VLSI) の新規半導体加工プロセスならびにそれを利用した電子デバイスを提案・実現することを目指して研究を行った。

4. 研究成果

5 年間の研究の結果、特に (Task 1) に関連した大きな成果を得ることが出来た。

【成果物 1】本研究によって「**集積化 MEMS 向け相乗り VLSI 試作とクリーンルームによる MEMS 後加工による素子の高機能化**」という、今後の様々な研究に活用可能な研究基盤の構築に成功した。これは、大規模集積回路：VLSI 素子と微小電気機械：MEMS 素子とが同一チップまたは同一基板上に集積化して動作する「集積化 MEMS」と称される分野の研究を、実際に素子を試作して動作させることで実証することを可能とする試作手法であり、研究者のデザインによる VLSI 素子を商用の安定した試作サービスで行い、MEMS 後加工によって VLSI 単体では実現不可能な高い付加価値をもたらすことが可能である。特に、Silicon-On-Insulator (SOI) とよばれる二酸化ケイ素 (SiO_2) 薄膜によってシリコン基板裏面を絶縁した基板上に VLSI を試作することで、MEMS 構造体と VLSI との試作が容易になるだけでなく、後加工によって機能素子を絶縁できるため、単体素子の限界を超えた高い機能を回路・システム全体として実現できる高機能集積回路素子の機能検証を、新たに VLSI 作製技術を開発せずとも行えるようになったことは大きな成果である。本成果は東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) が提供する相乗りチップ試作サービスならびにナノテクノロジー・プラットフォームによる微細加工技術代行・技術補助メニューに引き継がれており、本邦をはじめとする集積化 MEMS 研究コミュニティに対して将来にわたって大きな貢献ができるものである。【成果物 2】上記集積化 MEMS 試作手法を利用して、商用品質の半導体 PN 接合を多数直列に接続することによって、これまでの常識であった電圧変換素子 (DC-DC コンバータ回路) を通さずに MEMS 駆動に必要な高い電圧を発生する「**オンチップ高電圧シリコン太陽電池**」を提案し、実証した。結果として直列段数に比例して発生電圧を選択可能な太陽電池の設計論を得ることが出来、8V ~ 65V、電力効率 %、開口率 (皮相電力と実最大電力の比) 70% 以上という、高い性能を得ることができた。次いで、(Task 2) に関連して【成果物 3】高電圧太陽電池素子を利用して「**静電駆動 MEMS 素子や EWOD 液滴移動デバイスのリモート光駆動デモンストレーション**」に成功した。実験の結果、太陽電

池へ光を与えたり切ったりするいわゆる00K(On-Off-Keying)手法では、太陽電池の性能が良いことが仇となって光の非照射時に電荷の放電に時間がかかりすぎるため、高速動作が出来ないという問題が明らかになった。この問題を解決するために【成果物4】充電のための太陽電池、放電のためのフォトランジスタ構造を同一基板上に集積化した「**高速動作向け太陽電池集積化回路素子**」を提案実現した。光の波長を切り替えることによって駆動エネルギーと制御信号とを同時にリモート転送してMEMSの動作を行わせることに成功した。以上のように、本研究期間においては主に、新規素子試作のためのプロセスや新規素子の提案実証について大きな成果が得られた。Task3,4に掲げた自律分散処理については、類似の研究を行っているフランス国立科学研究センター(CNRS)の研究者とのネットワーキングを得ることに成功し、水上走行には至らなかったものの、【成果物5】平坦な地上平面を自走し、組み換え可能という「**Smart Blocks コンセプトの実証モデル**」を作製、Micronora2014というフランスの展示会で発表し注目を得ることが出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7件)

- [1] Shu Inoue, Matthieu Denoual, Hussein Awala, Julien Grand, Sveltana Mintova, Agnès Tixier-Mita and Yoshio Mita, “Characterization of zeolite-trench-embedded microcantilevers with CMOS strain gauge for integrated gas sensor applications”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume **55**, Number 4S, 04EF14 (2016). doi:10.7567/JJAP.55.04EF14
- [2] Isao Mori, Eric Lebrasseur and Yoshio Mita, “Discharging-phototransistor-integrated high-voltage Si photovoltaic cells for fast driving demonstration of an electrostatic MEMS actuator by wavelength modulation”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume **55**, Number 4S, 04EF12 (2016). doi: 10.7567/JJAP.55.04EF12
- [3] Isao Mori, Eric Lebrasseur, Masanori Kubota and Yoshio Mita, “On-chip High-voltage Silicon Photovoltaic Cell Array Made by a CMOS Post-processed Device Isolation Method for Driving a MEMS Actuator in a Remote Manner”, *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, **136(2)**, pp.24-30, (2016). doi:10.1541/ieejsmas.136.24
- [4] Wenjun Xia, Yoshio Mita, Tadashi Shibata, “A Nearest Neighbor Classifier Employing Critical Boundary Vectors for Efficient On-Chip Template Reduction”, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Volume: **27**, No.5, pp. 1094-1107 (2016). doi: 10.1109/TNNLS.2015.2437901
- [5] M.Denoual, D.Brouard, A.Veith, O.De Sagazan, M.Pouliquen, P.Attia, E. Lebrasseur, Yoshio Mita and G.Allegre, “A heat balanced sigma-delta uncooled bolometer”, *Meas. Sci. Technol.* **25**, 065101 (8pp) (2014). doi:10.1088/0957-0233/25/6/065101
- [6] Julien Malapert, Satoshi Morishita, Manabu Ataka, Hiroyuki Fujita, Dominique Collard and Yoshio Mita, “Power Regulated Thermal Actuator based on UV-Patterned Polyimides for Ciliary Motion System”, *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, Vol.**133**, No.3, pp.77-84 (2013). doi:10.1541/ieejsmas.133.77.
- [7] Masanori Kubota, Yoshio Mita, and Masakazu Sugiyama, “Silicon sub-micron-gap deep trench Pirani vacuum gauge for operation at atmospheric pressure”, *J. Micromech. Microeng.*, **21**, 45034 (2011). doi: 10.1088/0960-1317/21/4/045034

〔学会発表〕(計 20件)

- [1] Yuki Okamoto, Eric Lebrasseur, Isao Mori, and Yoshio Mita, “An End-point Visualization Test Structure for All Plasma Dry Release of Deep-RIE MEMS”, *2016 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMETS)*, Mar. 28-31 pp.6 - 9, **メルパルク横浜 (神奈川県横浜市)**.
- [2] Matthieu Denoual, M. Pouliquen, Julien Grand, Hussein Awala, Sveltana Mintova, O. de Sagazan, Shu Inoue, Agnès Tixier-Mita, Yoshio Mita, and D. Robbes, “Microfabricated test structures for thermal resonant gas sensor”, *2016 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMETS)*, 2016 Mar. 28-31 pp.16 – 19, **メルパルク横浜 (神奈川県横浜市)**.
- [3] Shu Inoue, Ryota Setoguchi, Matthieu Denoual, Sveltana Mintova, and Yoshio Mita, “Zeolite-trench-embedded micro cantilevers for CMOS strain-gauge integrated gas sensors”, *The 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sep. 28-30, **札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)**.
- [4] Isao Mori and Yoshio Mita, “Discharging-Phototransistor-Integrated High-Voltage Si Photovoltaic Cells for Fast Driving of an Electrostatic MEMS Actuator by Wavelength Modulation”, *The 2015*

- International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sep. 28-30, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市).
- [5] Naoyuki Sakamoto, Antoine Frappé, Bruno Stefanelli, Andreas Kaiser and Yoshio Mita, “Wireless Drive of A Mems Ciliary Motion Actuator via Coupled Magnetic Resonances using Micro Inductors”, *The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '15)*, June 21-25, pp. 1961-1964, Anchorage, AL (USA).
- [6] Ryota Setoguchi, Eric Lebrasseur, Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “A Strain-Sensor-Integrated Test Bed for Electro Mechanical Characterization of VLSI Probe”, *Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, 2015 Apr. 27-30, pp.369-373, Montpellier (France).
- [7] Yoshio Mita, Masanori Kubota, Matthieu Denoual, Eric Lebrasseur, and Tomoki Sawamura, “<<MEMS de Piano>> un TP de conception, de fabrication et test de résonateur MEMS (in French)”, *CETSIS2014 : Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes*, Oct. 27-29, Besançon (France).
- [8] Yoshio Mita, Eric Lebrasseur, Tomoki Sawamura, Naoko Kondo, and Kunihiro Asada, “UTokyo VDEC’s CMOS-MEMS Technology via Nanotechnology Platform for Prospective Integrated Magnetic Sensor”, *20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn*, 2014 Sep. 15-17, Benevento (Italy).
- [9] Yoshio Mita, Masanori Kubota, Matthieu Denoual, Eric Lebrasseur, and Tomoki Sawamura, “<<MEMS de Piano>> - an Experimental Course of Design, Fabrication, and Testing of MEMS Oscillator”, *10th European Workshop on Microelectronics Education (EWME 2014)*, 10-14 May, S05_03, Tallinn (Estonia)
- [10] Isao Mori, Masanori Kubota, Eric Lebrasseur, Yoshio Mita, “Remote power feed and control of MEMS with 58 V silicon photovoltaic cell made by a CMOS post-process dry release and device isolation method”, *Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2014)*, Apr. 1-4, pp.79-82, Cannes Côte d'Azur (France).
- [11] Agnès Tixier-Mita, Takuya Takahashi, Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, Isao Mori, Yoshio Mita, Olivier Français, Bruno Le Pioufle, “Detection of micro-beads by impedance spectroscopy”, *Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2014)*, Apr. 1-4, pp.87-90, Cannes Côte d'Azur (France).
- [12] Isao Mori, Masanori Kubota and Yoshio Mita, “A Test Structure of Bypass Diodes for On-chip High-Voltage Silicon Photovoltaic Cell Array”, *2014 IEEE Int. Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, Mar. 24-27, pp.157-160, Udine (Italy)
- [13] Agnès Tixier-Mita, Eric Lebrasseur, Takuya Takahashi, Yoshio Mita, Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, Olivier Français, and Le Pioufle Bruno, “Compressively-Stressed Test Structures for Opaque Micro-Structures Releasing Visualization”, *2014 IEEE Int. Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, Mar. 24-27, pp.170-174, Udine (Italy)
- [14] Atsushi Hirakawa, Satoshi Morishita, Isao Mori, Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “Experimental Evaluation of High Voltage Hold-off Capability of Post-Mesa-Isolated Standard CMOS Devices”, *The 17th Int. Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '13)*, June 17-20, pp.2423-2426, Barcelona (Spain).
- [15] Masanori Kubota, Kota Hosaka, Masakazu Sugiyama, and Yoshio Mita, “Evaluation of silicon fracture strength dependence on stealth dicing layers for "cleave-before-use" MEMS FREESTANDING cantilever probes”, *The 17th Int. Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '13)*, June 17-20, pp.151-154, Barcelona (Spain).
- [16] Kota Hosaka, Satoshi Morishita, Isao Mori, Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “An Integrated CMOS-MEMS Probe having Two-Tips per Cantilever for Individual Contact Sensing and Kelvin Measurement with Two Cantilevers”, *25th IEEE Int. Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, 2013 Mar. 25-28, pp. 3-6 大阪大学中之島センター(大阪府大阪市)
- [17] Tran Nam Binh, Satoshi Morishita Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “A Stiffness-Defined Silicon Plane Bending Method to Realize Perfectly-Curved Surface Formation for Tunable Parabolic Mirrors”, *2012 IEEE Optical MEMS and Nanophotonics Conference*, Aug. 6-9 Banff, Alberta, (Canada)
- [18] Satoshi Morishita, Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “A Blur-Range Test Structure of Collimation-Controller-Integrated Silicon

Shadow Mask for Three-Dimensional Surface Patterning with Sputtering”, 25th *IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS)*, 2012 Mar. 19-22, San Diego, CA (USA).

- [19] Satoshi Morishita, Masanori Kubota, and Yoshio Mita, “Integration of EWOD Pumping Device in Deep Microfluidic Channels using a Three-Dimensional Shadowmask”, *IEEE Int. Conference on MicroElectroMechanical Systems (MEMS 2012)*, Jan. 30 – Feb. 2, Paris (France).
- [20] Yoshio Mita, Satoshi Morishita, Isao Mori, and Masanori Kubota, “Value-Added VLSI devices by MEMS technology (招待講演)”, *AWAD 2011*, June 28-July 1, Daejeon (Korea).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

受賞 1 : 米田佳佑、久保田雅則、ティクシエ三田アニエス、森下賢志、森功、保坂航太、三田吉郎、2013 年 電子情報通信学会システムとエレクトロニクスのワークショップ IEEE SSCS Kansai Chapter Academic Research Award

受賞 2 : 岡本有貴、森功、久保田雅則、Eric Lebrasseur、三田吉郎、2015 年 電子情報通信学会システムとエレクトロニクスのワークショップ ICD 優秀ポスター賞

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三田 吉郎 (MITA, Yoshio)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 40323472