

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22844

研究課題名（和文）環境光駆動マイクロノードによるボトムアップ型IoTの基礎実証

研究課題名（英文）Proof of concept of bottom-up IoT with energy-harvesting micro-nodes

研究代表者

徳田 崇（Tokuda, Takashi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：50314539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本提案研究では、CMOS回路による適応的な動作制御と、機能を最小限に絞り込んで消費電力をマッチングさせた情報処理回路を組み合わせることで、『どんなに弱い光でも、超低速ながら必ず動く』マイクロIoTノード技術を実現することを目指した。特に、マイクロデバイス(数mm以下)のサイズで環境光により間欠動作を行うエネルギーハーベスティング回路の実現を最重要課題とした。具体的な手法として、従来研究で採用した電源電圧判定回路をベースに、超低消費電力バイアス源の開発と導入、2キャパシタトポロジの独自回路の開発を行った。研究機関内に提案方式の有効性の確認に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、真のIoT(Internet of Things) = 社会のあらゆるモノを情報化するためのキーテクノロジーとして、“ボトムアップ型IoT”のコンセプトを実証することを目的とした。具体的な取り組みとして最も重要な、環境光で動作可能なマイクロデバイスを実現する光エネルギーハーベスティングプラットフォームに関する研究を行った。

本研究で実現する技術の将来像として、電源を持たない、“全てのモノ”へのIoT化につながる。

研究成果の概要（英文）：We set the ultimate goal of this project to build an IoT framework based on ultra-small edges operated by environmental light. As the most important technical element of the technology, this work focused on a CMOS-based optical energy harvesting circuit that consists of ultra-small photovoltaic cells, energy-storing capacitor(s), CMOS voltage monitoring circuit, bias circuit, and CMOS load-driving switch. In this project, we introduced new circuit topologies on bias generation and voltage monitoring circuit. The dual-capacitor configuration employed for voltage monitoring circuit is unique design in this work. We successfully evaluated and demonstrated the basic functionalities of the circuits.

研究分野：電気電子工学

キーワード：IoT エネルギーハーベスティング 光電力伝送 CMOS センサ

1. 研究開始当初の背景

Society5.0 やデジタル・トランスフォーメーション(DX)といった言葉に象徴されるように、今世紀に入ってコンピュータやスマートフォンといった情報端末のほか、家電や自動車といった民生向け装置群のネットワーク接続が進んだ。しかし一方で、家具・建材・そして生物(人間・ペット・家畜)といった本質的に非エレクトロニクスな要素の情報ネットワークへの接続は端緒についたばかりである。これらの非エレクトロニクス要素については、現在のIoT技術の主流である、『既存情報端末を小型化して組み込む』アプローチはサイズ・コスト面から不合理である。

2. 研究の目的

本研究は、真のIoT(Internet of Things)= 社会のあらゆるモノを情報化するためのキーテクノロジーとして、超小型軽量で、環境光のエネルギーで半永久的に自律動作可能なIoTマイクロノード技術を実現し、これを用いた”ボトムアップ型IoT”のコンセプトを実証することを目的とする。そのなかでもとりわけ重要なのが、環境光で動作可能なマイクロデバイスを実現する光エネルギーハーベスティングプラットフォームである。

本研究で実現する技術の将来像として、現在のIoT技術の主流である、『従来型情報処理システムを超小型化して、モノに組み込む or 取り付ける』というアプローチが宿命的に抱えるサイズ、コスト面での限界を突破し、真の意味でのIoT、すなわち『”全てのモノ”に情報処理・通信機能を搭載し、情報ネットワークに組み入れる』ことが可能となる。

3. 研究の方法

本提案研究では、CMOS回路による適応的な動作制御と、機能を最小限に絞り込んで消費電力をマッチングさせた情報処理回路を組み合わせることで、『どんなに弱い光でも、超低速ながら必ず動く』マイクロIoTノード技術を実現することを目指した。特に、マイクロデバイス(数mm以下)のサイズで環境光から発電した電力をキャパシタに蓄積し、十分なエネルギーが蓄積された状態でエレクトロニクスシステムの間欠動作を行うエネルギーハーベスティング回路の実現を最重要課題とする。

具体的な手法として、従来研究で採用した電源電圧判定回路をベースに、超低消費電力バイアス回路を組み合わせるとともに、低照射時に状態反転スイッチ回路に流れる電流が光電流と相殺して準安定状態に陥ることを避ける回路を実現する。従来型ではキャパシタ1個に充電を行い、そのキャパシタの放電によりスイッチ電流を供給する回路方式であったが、本研究ではキャパシタ2個構成とし、スイッチ用の判定電圧を追加したあらたなキャパシタで保持する回路トポロジーを採用する(図1)。これによりスイッチ開始時に主キャパシタの放電が生じて電圧が下がっても判定用電圧が維持されるため相対的にスイッチングが促進されることになり、環境光駆動を期待することができる。

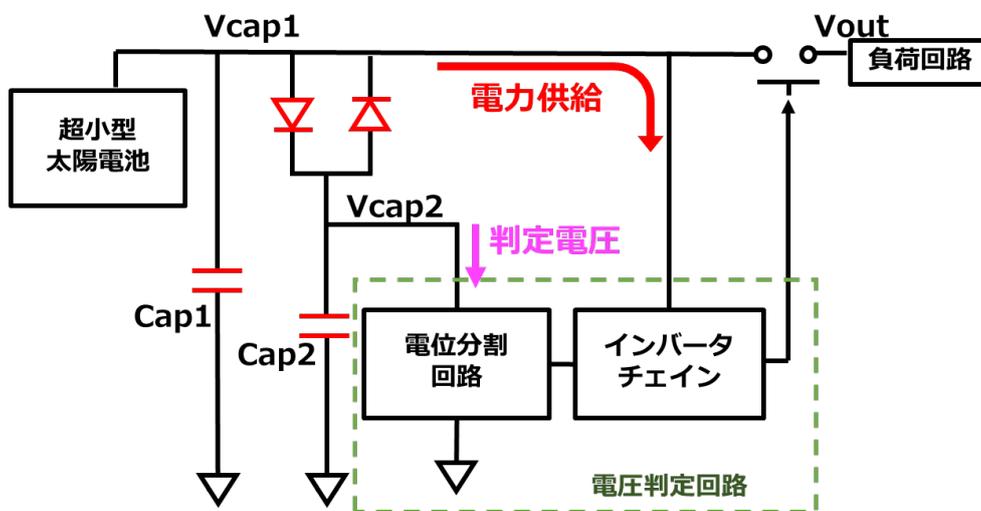


図1: 本研究で実現した独自の光エネルギーハーベスティングプラットフォーム

4. 研究成果

光エネルギーハーベスティングの判定基準となるバイアス電圧発生方式として、MOS トランジスタのリーク電流を基準電流とする超低消費電力バイアス回路を採用・評価した(図2)。当該回路は一般のバンドギャップリファレンス等と比較すると PVT 変動耐性等の機能は劣るが、確実な間欠動作のための電源非依存電位を得ることが最大の目的であり、有効な選択となる。評価の結果、正常なバイアス生成(図2右)と最大 50pA 程度の動作電流を確認した。環境光動作に求められる最小駆動電流は 10nA オーダであるため、本バイアス回路のトポロジーは目的仕様を満たすことが確認できた。

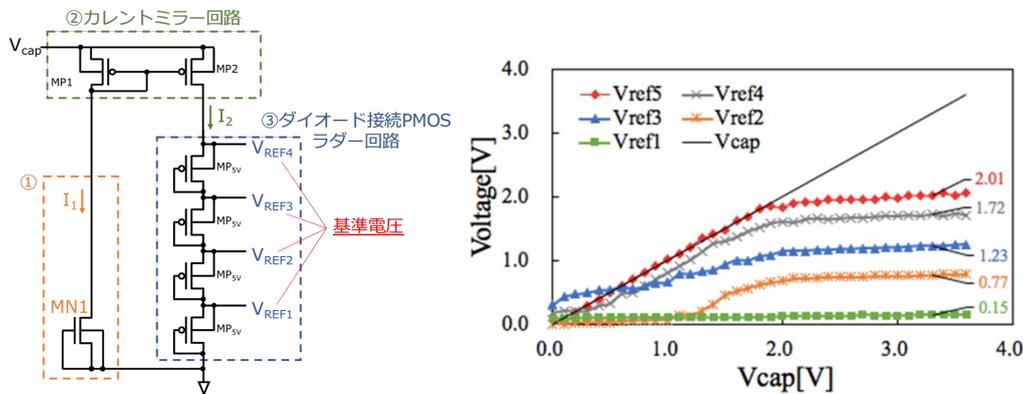


図2: 本研究で実現した超低消費電力バイアス回路

2 キャパシタトポロジによる光エネルギーハーベスティング回路について 0.35 μm 標準 CMOS プロセスを用いた回路設計・評価を行った(図3)。

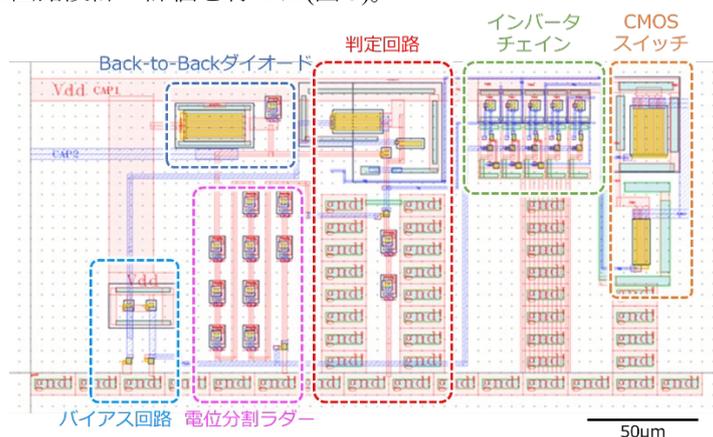


図3: 環境光駆動のための2キャパシタ構成対応光エネルギーハーベスティング用電圧判定・スイッチ回路のレイアウト。

開発した回路の動作例を図4に示す。(b)拡大波形にみられるように、スイッチ開始時にキャパシタ1が放電するために V_{cap1} が低下するのに対し、キャパシタ2の電圧 V_{cap2} は維持されている。そのためスイッチ動作は維持されるのみならず電源電圧低下により促進効果を示し、確実なスイッチング得ることに成功した。ただし当該データにおいてスイッチ電流の低減効果は1桁以内であり、当初目的とした20分の1には及ばなかった。今後の課題としてさらなる改善が必要である。

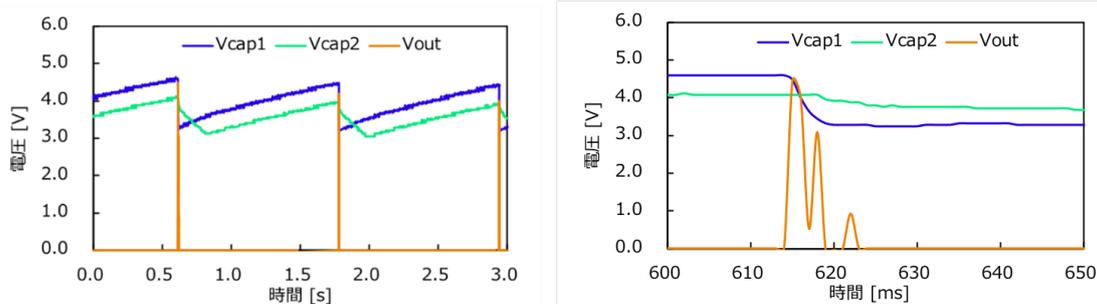


図4: 動作電圧波形例。(a)スイッチシーケンスの様子、(b)拡大。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wuthibenjaphonchai Nattakarn, Haruta Makito, Sasagawa Kiyotaka, Tokuda Takashi, Carrara Sandro, Ohta Jun	4. 巻 21
2. 論文標題 Wearable and Battery-Free Health-Monitoring Devices With Optical Power Transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 9402 ~ 9412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSEN.2021.3050139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tokuda Takashi, Yokoshiki Yasufumi, Takehara Hironari, Haruta Makito, Sasagawa Kiyotaka, Ohta Jun	4. 巻 141
2. 論文標題 Optical Powering Platform for Ultra-Small Implantable Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines	6. 最初と最後の頁 63 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejsmas.141.63	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 徳田 崇, 横式 康史, 太田 淳	4. 巻 36
2. 論文標題 CMOS集積回路技術を用いたオンチップ光・電気イメージセンサ研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学センサ研究会機関紙"Chemical Sensors"	6. 最初と最後の頁 120-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 徳田 崇	4. 巻 2021
2. 論文標題 インプラントブル電子デバイス技術の最前線!	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本電子回路工業会機関紙"JPCA News"	6. 最初と最後の頁 4-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 徳田 崇, 春田 牧人, 笹川 清隆, 太田 淳	4. 巻 2019-12
2. 論文標題 光電力伝送による超小型インプラントブル光神経刺激デバイス	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 89-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Takashi Tokuda
2. 発表標題 CMOS-based ultra-small devices for biomedical and IoT applications
3. 学会等名 9th imec Handai International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳田 崇
2. 発表標題 バイオとIoTのための光電力伝送・エネルギーハーベスティング技術
3. 学会等名 電子情報技術産業協会 (JEITA) スマートセンシング・デバイス融合技術分科会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳田 崇
2. 発表標題 バイオ & IoT応用を目指した光駆動マイクロエレクトロニクス
3. 学会等名 2020年度第2回センサ & IoTコンソーシアム技術委員会オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳田 崇
2. 発表標題 超小型生体埋め込みデバイス向け光給電技術
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内瑞希, 深町賢人, 横式康史, 徳田 崇
2. 発表標題 光電力伝送用CMOS制御回路の改善
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深町 賢人, 竹内 瑞希, 横式 康史, 徳田 崇
2. 発表標題 光駆動バッテリーレスマイクロデバイス向け電圧計測回路の改善
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳田 崇, Pakpuwadon Thanet, Wuthibenjaphonchai Nattakarn, 春田 牧人, 笹川 清隆, 太田 淳
2. 発表標題 バッテリーレス超小型光刺激デバイス
3. 学会等名 第57回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳田 崇
2. 発表標題 生体遠隔光操作のための超小型光刺激デバイス
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reyhan Ramadhan、Kosuke Takamatsu、Yasufumi Yokoshiki、Takashi Tokuda
2. 発表標題 Digital-based Design of Optical Power Transfer-based Biomedical and Internet-of-Things Devices
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深町 賢人、竹内 瑞希、横式 康史、徳田 崇
2. 発表標題 生体埋め込みマイクロデバイス向け光電力伝送回路の開発
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 堯之、三浦 良、深町 賢人、横式 康史、徳田 崇
2. 発表標題 CMOS制御光駆動による小型連続血糖センサの評価
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内瑞希, 深町賢人, 横式康史, 徳田 崇
2. 発表標題 超小型 IoT エッジ向け 光エネルギーハーベスティング回路
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会 3-111
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳田 崇
2. 発表標題 CMOS集積回路を搭載した小型バイオデバイス技術
3. 学会等名 第28回次世代医工学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦 良, 竹内 瑞希, 深町 賢人, 横式 康史, 徳田 崇
2. 発表標題 超小型光駆動CGMSセンサ用CMOSセンシング回路の検討
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reyhan Ramadhan, Yasufumi Yokoshiki, Takashi Tokuda
2. 発表標題 Functional Improvements of Optically-powered ID Transmission Node for Internet-of-Things Devices
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li Jiawen、深町 賢人、竹内 瑞希、横式 康史、徳田 崇
2. 発表標題 チップ分離型ワイヤレス光刺激デバイス向けの回路評価
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 発電装置およびデバイス	発明者 徳田崇	権利者 東京工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-079843	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関