

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月30日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656227

研究課題名（和文） 実環境の中で自立する集積システムのための
複合エネルギーハーベスティング技術研究課題名（英文） SYNERGISTIC ENERGY HARVESTING TECHNOLOGY FOR AUTONOMOUS
INTEGRATED SYSTEMS IN REAL ENVIRONMENT

研究代表者

小谷 光司 (KOTANI KOJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20250699

研究成果の概要（和文）：

本研究では、実環境に同時に存在する複数の環境エネルギー源を協調的に活用して効率的にエネルギー獲得を実現する複合エネルギーハーベスティング技術確立した。一例として、環境電波から直流電力を獲得する高周波整流回路において、太陽電池セルを複合集積した回路を開発した。太陽電池として動作する pn 接合により、光エネルギーを直流電圧に変換し、整流回路の効率に大きな影響を与える MOS トランジスタのしきい値を補償することが可能となる。その結果、低入力電力領域においても電力変換効率が向上することが確認された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a synergistic energy harvesting technology, in which multiple energy sources being simultaneously available at the same place are utilized in a cooperative manner, has been developed. As an example, a high frequency rectifier equipped with a photovoltaic (PV) cell has been developed for highly efficient energy harvesting from ambient radio waves. A p-n junction diode acting as a PV cell converts light energy to a dc bias voltage, which compensates the threshold voltage of the MOSFETs and enhances the RF to DC power conversion efficiency (PCE) of the rectifier even under extremely low input power condition.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：エネルギーハーベスティング、環境エネルギー発電、複合環境エネルギー、電子デバイス・集積回路

1. 研究開始当初の背景

1970年代の大型計算機の時代には、数百人が一つのプロセッサを共用していたが、

1990年代においてパーソナルコンピュータが普及し、一人1個のプロセッサを占有することが可能となった。現在、われわれの周辺

には 10 個程度のプロセッサが存在し、それらを意識しながら使いこなしている状況である。10 年後には、あらゆる場所に集積回路 (LSI) が埋め込まれ、人はそれと意識せずに数十個から数百個のプロセッサに囲まれて高度なエレクトロニクス技術の恩恵を受けることが可能なユビキタス情報化社会の到来が間近である。

特に、環境に埋め込まれて自立的な動作が望まれる用途では、処理回路は低消費電力で動作し、動作に必要なエネルギーを熱や振動、光、電磁波などの環境から獲得して自立的に動作するための高効率電源回路を搭載する必要がある。これまで、様々な環境エネルギーを用いた電源技術、たとえば、光のエネルギーを電力に変換する太陽電池や、振動のエネルギーを変換する振動発電、アンテナで受けた電磁波を直流電力に変換する技術等が研究されている。しかしそれらは、単に単一のエネルギーを用いているにすぎず、環境に存在する利用可能なエネルギーを効果的に収集しているとはいえない。さらに、このような用途の集積回路の消費電力は一般的に微小であるが、従来の電源回路では、微小電力領域での効率が極めて悪いという問題があった。環境エレクトロニクス技術を実用化するためには、環境からより一層のエネルギーを効率的に獲得して処理回路に供給する必要があり、そのための高効率電源回路の実現が急務である。

2. 研究の目的

環境から最大限のエネルギーを効率的に獲得するために、これまでは考慮されてなかった複数の環境エネルギーを組み合わせて同時に利用する「複合エネルギーハーベスティング」技術を確立する。特に、複数の環境エネルギーのそれぞれの特徴を吟味し、それぞれを最適な形で「適材適所」に活用し、それらの相乗効果を引き出して、効率的に環境からエネルギーを獲得する技術を確立する。

具体的には、複数の環境エネルギーそれぞれを最適な形で同時に活用して効率的に環境からエネルギーを獲得する技術を確立し、複合エネルギーハーベスティング技術として実証することを目的とする。光、振動、熱、電磁波のエネルギー源を想定し、その中のいかなる組合せが環境からの高効率エネルギー獲得に効果的か、検討を行なう。理論計算やシミュレーション等である程度定量的に検討を行なったうえで、有望ないくつかの組合せに対して実験的にシステム試作、検証を実施して、実用的な側面からも検討を行なう。

3. 研究の方法

本研究では、複合エネルギーハーベスティングにより実環境の中で自立する集積回路

技術を確立することを目的として以下の研究を実施する。

(1) 各種環境エネルギー源の特性検証

各種環境エネルギー源の特性を検討し、利点、欠点、制約条件等を総合的に検証する。様々な環境エネルギー源の組合せにおいて、その適応性を原理的に検討すると共に、シミュレーション等で定量的に評価する。それぞれのエネルギー源の効果的な使用法について方針をまとめる。

(2) 複合エネルギー獲得の具体例に関する試作評価

具体的な組合せに対して試作評価を通して実際の効果を評価検証する。具体的なターゲットとしては、環境電磁波から直流電力を獲得する整流回路を取り上げる。申請者の開発した、整流回路を構成する MOS トランジスタのゲート電極に直流電圧を印加して MOS トランジスタのしきい値を補償する回路形式において、想定される様々なエネルギー源組合せ手法に関して、具体的な性能、制約条件等を詳細に検討する。太陽電池利用の場合においては、MOS トランジスタのゲートバイアスに必要な電力を発電するための素子構成と素子面積を、整流回路との同一集積回路集積を念頭に検討する。具体的な回路仕様が固まれば、VDEC 等の集積回路試作サービスを利用して集積回路試作を行ない、測定評価を実施する。

(3) 電力安定化技術・制御技術への適用

環境エネルギー利用の観点からは、実用化上不可欠の電力安定化技術・制御技術としての DC-DC コンバータ技術において、複合環境エネルギーを活用して電力変換を高効率化する技術を確立する。

(4) 検討結果の取り纏めと実用化に向けての課題整理

2 年間で得られた検討結果をまとめ、複合環境エネルギーハーベスティング技術として、応用分野と具体的な複合構成例の関係を、適用範囲、性能、実現可能性、実用化へ向けての課題としてまとめを行なう。

4. 研究成果

(1) 各種環境エネルギー源の特性検証

各種環境エネルギー源の特性を検討し、利点、欠点、制約条件等を総合的に検証し、以下のことが明らかになった。

TV 放送局や携帯電話等から放射される高周波の電磁波から電力を獲得する環境電波発電では、整流回路の効率が重要であるが、整流素子であるダイオードの ON 電圧による損失により、特に低入力電力領域において電

力変換効率が悪い、という欠点がある。

太陽光や室内光から、太陽電池セル (PV セル) によって発電する光発電では、高抵抗負荷に対しては比較的高い電圧を生成可能だが、低抵抗負荷に対して電力を供給するには大面積が必要である。

ゼーバック効果による温度差発電では、単一セルの生成電圧が極めて小さく、有効に活用するには、何らかの昇圧回路が必須である。

運動エネルギーを電力に変換する振動発電では、MEMS 等の機械的機構が必要で、また、振動周波数も低く、電力変換回路との集積化に難がある。

(2) 複合エネルギー獲得の具体例に関する試作評価

各種環境エネルギー源の特性検討結果を踏まえ、複合エネルギーハーベスティング技術の代表例として、環境電磁波から直流電力を獲得する整流回路において、図 1 に示すように、整流回路を構成する MOS トランジスタのゲート電極に、PV セルによる光発電によって生成された直流電圧を印加して MOS トランジスタのしきい値を補償する回路を設計・試作し、その動作を検証した。

具体的な PV セルの構造を図 2 に示す。nMOS トランジスタをバイアスする PV セルと pMOS トランジスタをバイアスする PV セルに、同じ構造を用いている。同一の p 基板に集積化するため、n ウェルを用いて電位的に絶縁している。

図 3 に、試作した PV セル閾値補償回路を備えた整流回路のチップ写真を示す。0.18 μm ルールの 5 層金属配線層 CMOS 製造技術で試作した。トランジスタサイズは、nMOS は $W/L = 3.6 \mu\text{m} / 0.18 \mu\text{m}$ 、pMOS は $W/L = 10.8 \mu\text{m} / 0.18 \mu\text{m}$ で、トランジスタ領域は金属配線層上層の 2 層を用いて遮光されている。PV セルのサイズは、7 μm 角である。

図 4 に、PV セルの起電圧の照射光強度依存性測定結果を示す。nMOS トランジスタをバイアスする電圧 V_{PN} と、pMOS トランジスタをバイアスする電圧 V_{PP} を照度 E の関数としてプロットしてある。なお、照射光は、室内環境を想定し、一般的な蛍光灯を利用した。 V_{PP} を評価する際には、整流回路の動作状態の変化を考慮し、 $V_p = 0 \text{ V}$ の場合と、 $V_p = 1 \text{ V}$ の場合を評価した。nMOS バイアス、pMOS バイアス双方とも、数 100 lx の室内光程度の照度でも、しきい値補償に十分な電圧が生成できていることがわかる。ただし、 V_{PN} よりも V_{PP} の絶対値が大きく、 V_{PP} は V_p 依存性があり、流回路の効率に何らかの影響を与えていると考えられる。

図 5 は、PV セルによるしきい値補償回路を備えた整流回路の電力変換効率 (PCE) を入力

電力の関数としてプロットしたものである。高周波入力信号の周波数は 920 MHz、直流負荷抵抗は 47 k Ω で評価を行った。PV セルを集積化していない整流回路に比べて、PV セルによるしきい値補償回路を備えた整流回路では、特に -20 dBm 以下の低入力電力範囲で PCE の顕著な増大が得られている。必要な光量は、PV セル単独の評価結果から予想されるとおり、300 lx 以下の室内光程度で十分であることがわかる。逆に、照度がそれ以上に増大すると、PCE は劣化している。これは、過大なしきい値補償バイアス電圧により、ダイオードの逆方向リーク電流が増大して損失が増大するためと考えられる。

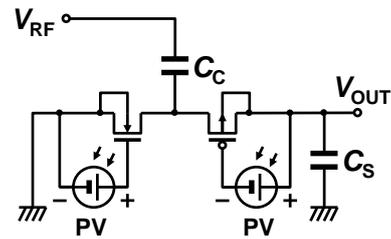


図 1 PV セルによるしきい値補償回路を備えた整流回路

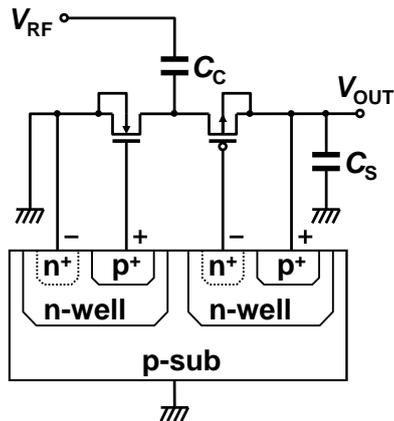


図 2 nMOS および pMOS トランジスタにバイアス電圧を供給する PV セル構造

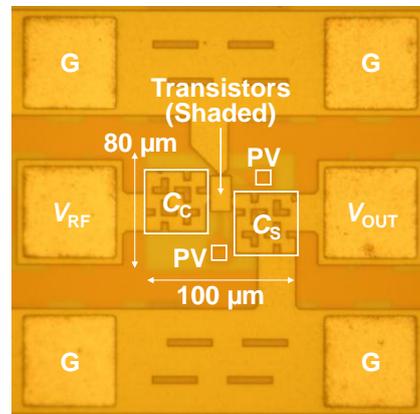


図 3 PV セルによるしきい値補償回路を備えた整流回路のチップ写真。

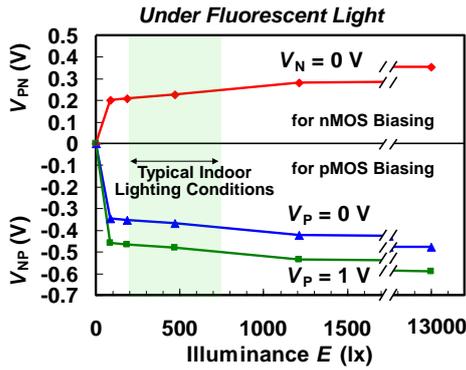


図 4 PV セルの起電圧の照射光照射度依存性測定結果

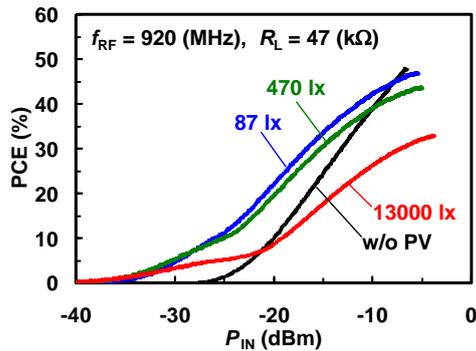


図 5 PV セルによるしきい値補償回路を備えた整流回路の電力変換効率 (PCE) の入力電力依存性

以上の評価結果から、環境電磁波からのエネルギー獲得において、光エネルギーを協調的に活用することにより、シナジー効果によってエネルギー獲得効率が向上することが実証され、複合エネルギー獲得技術の有用性が示された。

(3) 電力安定化技術・制御技術への適用

温度差発電など、生成電圧が小さい環境エネルギー源を有効活用するためには電圧を昇圧するための DC-DC コンバータ回路が必要である。さらに、負荷に一定の電力を安定供給するためにも、昇圧/降圧回路は必要である。キャパシタを用いるチャージポンプ方式や、インダクタを用いるブーストコンバータ Buck コンバータ方式などがあるが、動作にはいずれも駆動クロック信号が必要である。当初、振動エネルギーの活用を検討したが、環境に存在する振動の周波数はせいぜい数 kHz 以下であり、効率的にチャージポンプやブーストコンバータを駆動できない（非常に大きなキャパシタやインダクタが必要）ことが明らかになった。そこで、振動エネルギーの代わりに光エネルギーを利用することを検討した。具体的には、PV セルで発電したエネルギーを用いてリング発振回路を駆動し、クロ

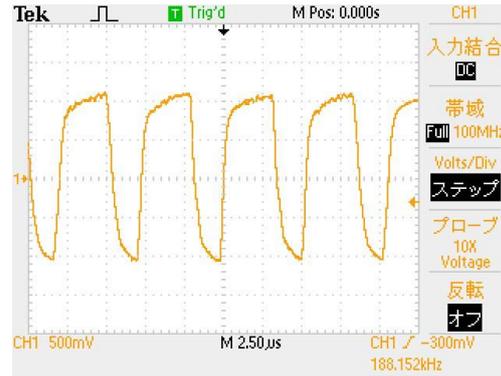


図 6 リング発振回路の発振出力波形

ック信号を生成する手法を検証した。

具体的には、PV セルに接続された 7 段のリング発振回路 (F.O.=2) を試作し、その発振を確認した。PV セルには n+-diffusion / p-substrate 構造を用い、面積は 0.019 mm^2 である。リング発振回路の発振信号は、リングを駆動する PV セル電源とは独立な外部電源駆動のバッファを介して観測した。

0.068 lx の低照度下では 450 Hz、690 lx の室内光程度の照度では 190 kHz の発振波形 (図 6) が観測された。その時の PV セル電圧は、それぞれ 231 mV、398 mV であった。なお、7000 lx 以上の照度の光照射により、3.5 MHz 以上での発振も観測されており、DC-DC コンバータを駆動するために十分な範囲の発振周波数が光エネルギーによるリング発振回路駆動で実現可能であることが実証された。

(4) 検討結果の取り纏めと実用化に向けての課題整理

本研究を通して、複合エネルギー獲得技術の有用性が原理的に実証された。ただし、実用化に際しては更なる検討が必要であることも明らかになった。

環境電磁波エネルギー獲得における、PV セルによる光エネルギー協調活用においては、PV セルの面積の最適化や過大光量時のバイアス電圧制限機構装備などが必要となる。光エネルギーによる DC-DC コンバータ駆動のためのクロック信号生成においては、PV セル面積の最適化や、最適な発振周波数に制御する技術の開発などが必要である。

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)

[学会発表] (計 2 件)

1. Koji Kotani, "Synergistic Ambient Energy Harvesting: Highly Efficient CMOS Rectifier with

Photovoltaic-Assisted Vth Cancellation for Effective Energy Harvesting from Ambient Radio Waves," 2013 Symposium, CMOS Emerging Technologies Research (招待講演), 2013年7月18日, ウィスラー (カナダ)

2. Koji Kotani, Takumi Bando, and Yuki Sasaki, "Photovoltaic-Assisted CMOS Rectifier Circuit for Synergistic Energy Harvesting from Ambient Radio Wave," IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC 2012), 2012年11月13日, 神戸

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小谷 光司 (KOTANI KOJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20250699