

## レーザー光を用いた IoT デバイス向け微小電力伝送技術の研究

## レーザー光による電力伝送効率とオンチップ太陽電池の特性評価

小谷光司<sup>1</sup>, 菊地杜斗<sup>2</sup>, 小宮山崇夫<sup>1</sup><sup>1</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部知能メカトロニクス学科<sup>2</sup> 秋田県立大学大学院システム科学技術研究科電子情報システム学専攻

電池や有線による給電が困難な IoT デバイスやセンサーノード向けに様々なワイヤレス電力伝送技術の研究が行われている。本研究では、数 m の距離のノードに対して、センサーや処理回路の動作に十分な数 10～数 100  $\mu\text{W}$  の微小電力を伝送する技術としてレーザー光を用いることを想定する。現状で最も高い実用性を有する発電デバイスである太陽電池をチップ上に集積回路技術で集積し、小型で極めて高い指向性により光エネルギーを集中して照射することが可能なレーザー光源と組み合わせることにより、極めて高効率なワイヤレス電力伝送技術の確立を目指して研究を実施した。波長 685 nm、出力 4.5 mW の赤色レーザー光源とオンチップ太陽電池を用いた原理検証実験により、数 m の範囲で伝送距離によらず 500  $\mu\text{W}$  程度の一定電力が伝送可能であること、集積回路技術で構成可能な複数層の pn 接合を直列・並列に組み合わせることにより、様々な電圧・電流として出力可能であることが実証された。

**キーワード：**ワイヤレス電力伝送, レーザー光源, 太陽電池, 集積回路, IoT デバイス, センサーネットワーク

## 1. はじめに

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 IoT 社会の到来が間近である。そのような時代の代表的アプリケーションである、ユビキタスセンサーネットワーク等の用途では、集積回路チップは環境中に分散配置され、センサー回路および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ことが望まれる。そのための高効率環境エネルギーハーベスティング技術は、現在世界中で活発に開発が進められている (Rincón-Mora, 2011)。

一方、センサーノードに安定して電力を供給する手段として、様々なワイヤレス電力伝送技術の研究も行われている (Kazmierkowski, and Moradewicz,

2012; Xie, Shi, Hou, and Lou, 2013)。一般的なワイヤレス電力伝送には電磁界結合原理が用いられるが、効率や伝送距離の面で十分な技術とはなっていない。電磁波 (電波) を用いれば遠距離の電力伝送も可能であるが、実用的なサイズの受信アンテナでは指向性が十分ではなく、数 m の距離にある RFID タグに数 10  $\mu\text{W}$  の電力を届けるために、送信側では数 W の送信電力が必要であり、電力伝送効率は極めて悪い。一方、近距離の 1 対 1 の電力伝送には、静電誘導や電磁誘導原理が用いられるが、距離が離れると電界は距離の 2 乗、磁界は 3 乗に反比例して強度が減少するため、数 10 cm 以上の遠距離の電力伝送には原理的に適用困難である。

このように、従来のワイヤレス電力伝送の問題点は、指向性と伝送距離を両立するエネルギー伝送媒体が利用されていなかったことである。そこで、本研究では、受動的な環境光エネルギー獲得技術と融合する形で、究極の指向性を持った電磁波であるレ

レーザー光を必要時に能動的に用いることで、高効率なワイヤレス電力伝送を実現し、高信頼性エネルギー源として活用可能とする技術を確認することを目的としている。

より具体的には、環境エネルギーハーベスティング技術の中で、現状で最も高い実用性を有する発電デバイスである太陽電池をチップ上に集積回路技術で集積し、小型で極めて高い指向性により光エネルギーを集中して照射することが可能なレーザー光源と組み合わせ、IoT センサーノード向けの高効率なワイヤレス電力伝送技術を確認する。太陽電池による太陽光や室内光をエネルギー源とする発電技術は現状でも実用レベルに達しているため、本研究ではレーザー光を用いたワイヤレス電力伝送技術にフォーカスするものである。

本論文の構成は以下の通りである。第2節では、全体システム構成について述べる。第3節ではレーザー光を用いた電力伝送効率の実測結果について述べる。第4節では、集積回路上のオンチップ太陽電池で受電することを想定し、集積回路技術で構成した多層 pn 接合にレーザー光を照射し、複数の pn 接合での光電変換特性を評価した結果について述べる。最後にまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 全体システム構成

図1に、提案するレーザー光を用いた電力伝送システムのイメージ図を示す。電力の送信部はレーザー光源、受信部はオンチップ太陽電池となる。レーザー光の出力は使用に際して特段の制約のない数 mW 程度を想定し、数 m 先にある電力の受信部であ

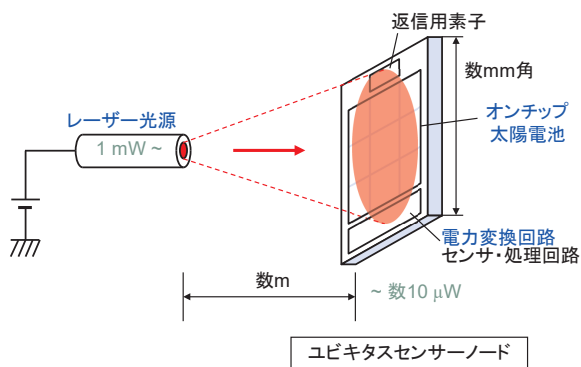


図1 レーザー光を用いた電力伝送システム

る太陽電池に電力を伝送する。受信部では、一般的なセンサーノードの消費電力を想定して数 10~数 100  $\mu\text{W}$  程度の電力を取り出すことを目的としている。また、太陽電池はセンサーチップ向けとしてセンサー・処理回路とオンチップ一体集積化するために、CMOS 集積回路製造プロセスで pn 接合を形成して太陽電池セルとして利用する構成を検討する。

## 3. 伝送効率および電力変換効率評価

レーザー光を用いた電力伝送システムにおいて、伝送電力の伝送距離依存性（伝送効率）やレーザー光から電力へのエネルギー変換効率は重要なパラメータである。ここではそれらを実験的に評価した結果について述べる。

レーザー光源としては、容易に入手可能な波長 685 nm（赤色）の半導体レーザーを用いた。出力は 4.5mW で、レーザーポインターなどに使用されるものと同程度である。日本工業規格（JIS）ではクラス 3R に該当し、保護具の使用や光路の隔離などは必要ない。また、この半導体レーザーはスポット径が 5 mm の真円かつ平行光（コリメート）になるように調整がされた光学系を装備している。本研究では、全ての実験をこのレーザー光源を用いて行った。

伝送効率および電力変換効率評価に用いた太陽電池は、市販の汎用多結晶シリコン太陽電池を 5 mm  $\times$  5 mm に切り出して配線したものをを用いた。太陽電池セルに半導体パラメータアナライザを接続し、レーザー光照射下で電圧電流特性（I-V 特性）を評価し、その電圧電流積が最大となる最大出力電力値をもって太陽電池出力電力とした。

レーザー光源と太陽電池の距離を、0 cm から 200 cm まで変化させて太陽電池出力電力を測定した結果を図2に示す。太陽電池の出力電力は、数 m の範囲においては伝送距離によらず一定となっていることがわかる。これは、レーザー光を用いた電力伝送が、ほぼ 100%の極めて高い伝送効率を有することを示しており、距離の2乗分の1や3乗分の1で減衰する電波や磁界による従来の電力伝送技術では実現不可能な、レーザー電力伝送技術でのみ可能となる優れた特性である。

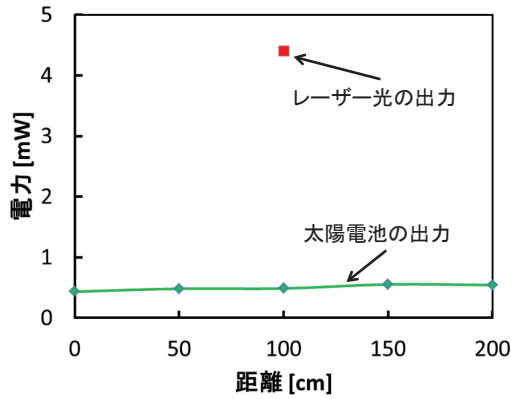


図2 レーザー光の伝送効率測定結果

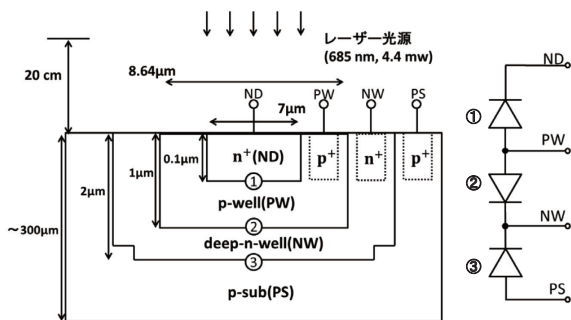


図3 オンチップ pn 接合太陽電池構造

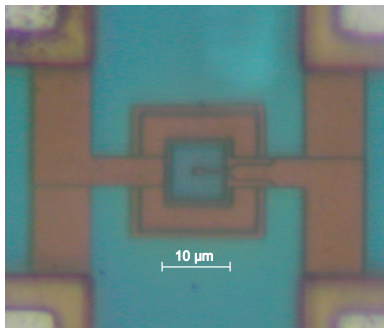


図4 オンチップ pn 接合太陽電池顕微鏡写真

また、図2においては、レーザー光源から距離100 cmの位置に光強度センサーを配置して評価したレーザー光そのものの電力もプロットしている。測定値は、4.4 mWであり、ほぼレーザー光源の定格値が得られている。太陽電池セルで光電変換した後の出力電力は、0.49 mWであり、太陽電池セルの電力変換効率は11.4%となる。ここで、通常の高結晶シリコン太陽電池の電力変換効率評価とは評価条件が異なることに注意を要する。具体的には、一般的な太陽電池の効率評価では、ソーラーシミュレータなど

を用い、太陽光成分を模した広帯域の光を晴天下の日照を模擬した1 SUN (およそ1 kW/m<sup>2</sup>)の電力密度で均一に照射して評価するのに対し、本実験では、波長685 nmの単色光で、電力密度がおよそ230 W/m<sup>2</sup>程度のスポット形状のレーザー光を用いている。

ちなみに、レーザー光源は5 V駆動であり、消費電力を測定すると215 mWであった。測定されたレーザー光の電力が4.4 mWなので、レーザー光源の電光変換効率はわずか2.0%となる。しかし、通常の使用では、レーザー光源側は十分な電力が供給される環境(基地局側)であるため、光源での電力変換効率が低いことはそれほど大きな問題とはならない。

#### 4. オンチップ太陽電池の検討・評価

レーザー光受光素子としては太陽電池の技術を活用する。発電効率的には一般的なポリシリコンあるいは薄膜シリコン太陽電池で十分と思われるが、センサー・処理回路とオンチップ一体集積化するために、CMOSプロセスで単結晶基板上にPN接合を形成して太陽電池セルとして利用する構成を検討した(菊地, 小宮山, 長南, 山口, 小谷, 2018)。

0.18 μm CMOS 集積回路製造技術で作成した接合の断面構造とチップ写真を図3および図4に示す。トリプルウェルプロセスを用いて、通常のCMOSプロセスで集積可能な積層構造である、n形拡散層(ND)/p形ウェル(PW)/n形ディープウェル(NW)/p形基板(PS)の4層からなる小面積太陽電池を用いて、接合深さや不純物濃度プロファイルの異なる様々なpn接合、およびそれらの組み合わせに対して測定を行った。接合表面は、金属配線とのコンタクト部分のみシリサイド化されており、受光部分の大部分はシリサイド化されないようにレイアウト設計し、表面ダメージによる光電変換効率の低下を防止している。

プローバー上にセットした試作チップから約20 cm離れた位置にレーザー光源を固定し、レーザー光をチップに垂直に照射し、半導体パラメータアナライザにてpn接合のI-V特性をオンチッププローブを用いて測定した。使用したレーザー光源は、前節と同じ波長685 nm, 出力4.5 mW, スポット径5 mm

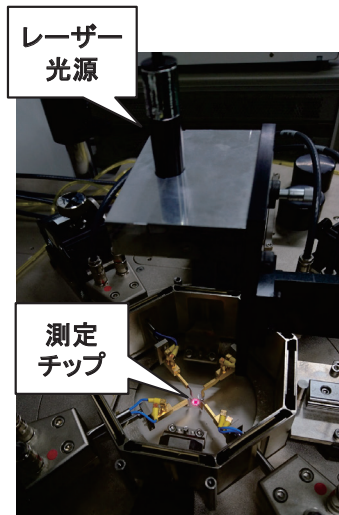


図5 レーザー光照射時の I-V 特性評価系

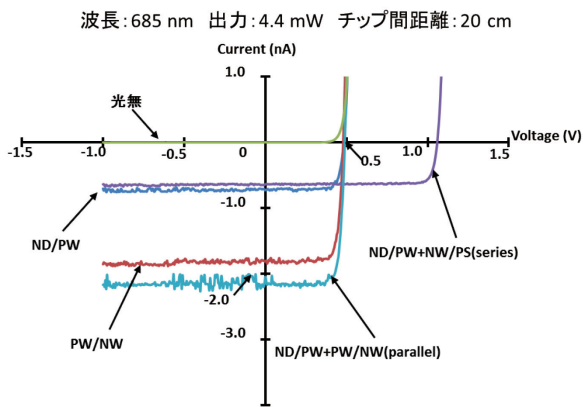


図6 レーザー光照射時の各 pn 接合の I-V 特性

の半導体レーザーである。測定評価のセットアップの状況を図5に示す。

具体的に評価した接合は、ND/PW 接合、PW/NW 接合、ND/PW 接合と NW/PS 接合の直列接続 (series)、ND/PW 接合と PW/NW 接合の並列接続 (parallel) の4種類である。図6に、レーザー光を照射した際の各 pn 接合の I-V 特性の測定結果を示す。グラフより、ND/PW 接合よりも PW/NW 接合で発生する光電流の方が大きいことがわかる。これは深い位置に接合が形成される PW/NW 接合の方が Si 基板に侵入したレーザー光による光キャリアをより効率よく収集できるからである。また、ND/PW 接合と NW/PS 接合を直列に組み合わせた場合 (PW-NW 間は外部配線にて短絡) は、発生する光電流は ND/PW 接合の場合とほぼ同じだが、開放電圧が約2倍になっている。

これは、直列に接続したことによって2つの接合の開放電圧が足し合わされたものが得られるからである。一方光電流は、ND/PW 接合と NW/PS 接合の小さい方の電流で制限される。並列に組み合わせた場合は開放電圧の値は ND/PW や PW/NW 単独の場合とほぼ同じだが、発生する電流は大きくなっていることがわかる。これは、並列に接続することによって2つの接合に発生した電流を足し合わせたものが出力電流となっているからである。以上の様に、集積回路上に形成可能な様々な pn 接合を様々な組み合わせで用いる事により、様々な電圧、電流レベルを生成出来る事が実証された。

なお、測定された I-V 特性においてノイズが重畳しているように電流値が変動しているのは、レーザー光特有のスペックルによるものと思われる。コヒーレント性の高いレーザー光では、わずかな凹凸による干渉によりスペックルと呼ばれる微小な明暗パターンが観測されるが、その大きさ (数 10  $\mu\text{m}$ ) と受光素子として用いた pn 接合の平面サイズが同程度なため、測定時のわずかな振動によりスペックルのパターンが移動し、それによる光強度の変動が生じたためと思われる。実際の応用場面では、mm 単位のはるかに寸法の大きな pn 接合を用いるため、スペックルの影響は無視できると思われる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究ではレーザー光を用いたワイヤレス微小電力伝送技術の確立に向けた研究を行った。まずレーザー光の伝送効率を評価し、距離 0 cm から 200 cm までの範囲では距離によらず同じ電力が伝送できることが確認された。これは、レーザー光の持つ極めて強い指向性 (コリメート性) によるものであり、極めて高い効率で電力伝送が可能であることが実証された。次に、集積回路技術によって作製した pn 接合太陽電池の構造や接合の組み合わせを変えた時の I-V 特性の評価を行った。その結果、集積回路上の pn 接合を用いた太陽電池は、その構造や接合の組み合わせを変えることにより、様々な電圧、電流レベルを生成出来る事がわかった。

今後は、レーザー光のスポットサイズと同程度の



大きさの大面積オンチップ太陽電池を用いて伝送効率などを評価するとともに、強度変調レーザー光の活用やシステムレベルでのレーザースポット追尾機構などの検討を進める予定である。

### 謝辞

本研究は、平成 29 年度 秋田県立大学新任教員スタートアップ支援研究「レーザー光を用いたユビキタスセンサーチップ向けエネルギー伝送技術の研究」によるものである。また、研究の一部は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス（株）、ローム（株）および凸版印刷（株）の協力で行われたものである。

### 文献

- M. P. Kazmierkowski, and A. J. Moradewicz (2012). Unplugged But Connected: Review of Contactless Energy Transfer Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(4), 47-55.
- 菊地杜斗, 小宮山崇夫, 長南安紀, 山口博之, 小谷光司 (2018) . 「レーザー光を用いたワイヤレス電力伝送向けオンチップ太陽電池の特性評価」『電子情報通信学会 2018 年総合大会講演論文集』エレクトロニクス講演論文集 2, C-12-12, 47.
- G. A. Rincón-Mora (Ed.). (2011). Special Section on Energy-Harvesting/Scavenging Circuits and Systems. *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, 58(12), 785-836.
- L. Xie, Yi Shi, Y. T. Hou, and A. Lou (2013). Wireless power transfer and applications to sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 20(4), 140-145.

〔平成 30 年 6 月 30 日受付〕  
〔平成 30 年 7 月 10 日受理〕

## Wireless micropower transfer technology using laser light for IoT devices Evaluation of wireless power transfer efficiency and on-chip photovoltaic cell characteristics

---

Koji Kotani<sup>1</sup>, Morito Kikuchi<sup>2</sup>, and Takao Komiyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Intelligent Mechatronics, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

<sup>2</sup> *Department of Electronics and Information Systems, Graduate School of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

Wireless power transfer technologies for IoT devices that cannot be powered through wires or by batteries have been widely investigated. In this study, the authors introduce laser light as a viable energy transfer medium for several 10s and 100s  $\mu\text{W}$  of micro power required for sensor operation and/or for the signal processing of remote nodes several meters in distance. High efficiency wireless power transfer technology can be established by combining an on-chip integrated photovoltaic cell known as the most practical environmental power generation device along with the laser light source that possesses the ultimate directivity of energy radiation. Through basic experiments using an on-chip photovoltaic cell and a red laser light source with 685 nm of wavelength and 4.5 mW of power, the authors have demonstrated that about 500  $\mu\text{W}$  of power can be delivered without distance-dependent energy loss across several meters of distance. In addition, it has been established that various output voltages and currents can be provided by combining multi-layered on-chip PN junctions fabricated with the integrated circuit technology in series or in parallel.

**Keywords:** wireless power transfer, laser light, photovoltaic, integrated circuit, IoT device, sensor network