

A Study of Photovoltaic for 1 μ m Laser Light in L-SSPS Receiver Sites

Kazuhisa Fujita¹,

Hiroaki Suzuki, Hiroyuki Yoshida, Katsumi Makino, Tetsuya Nakamura, and Mitsuru Imaizumi

¹The Graduate school for the Creation of New Photonics Industries
1955-1 Kurematsu, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202, Japan
kfujita@gpi.ac.jp Tel: +81-53-484-2609 Fax: +81-53-487-3012

JAXA

Key Words: Laser Based Space Solar Power System (L-SSPS), Photovoltaic for 1 μ m Laser Light.

Abstract

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has studied the photovoltaic device which convert 1 μ m laser light into electricity used for L-SSPS ground facilities. In this research, we analyzed photoluminescence property of the CPV-Si cell (high sensitive Si for near infrared) and InGaAs cells, and evaluated photovoltaic properties of those cells which irradiated 1.07 μ m laser light. Band gap of CPV-Si, InGaAs#1, InGaAs#2 and InGaAs#3 was 1.088, 1.155, 1.075 and 1.037eV, respectively. When laser irradiance was less than 50mW/cm², photovoltaic conversion efficiency of the InGaAs #2 was the highest in all cells, and this efficiency was 25.0% (51mW/cm²). However, CPV-Si showed 32.8% conversion efficiency at high laser irradiance (660mW/cm²).

レーザー宇宙太陽光発電システム用の 1 ミクロン帯レーザー光電変換

○藤田和久（光産業創成大学院大学），鈴木拓明，吉田裕之，牧野克省，木皿且人，
中村徹哉，今泉充（宇宙航空研究開発機構）

1. はじめに

近年，化石燃料の枯渇，温室効果ガス増加などのエネルギー・環境問題が深刻化しており，太陽光発電，燃料電池などに代表される二酸化炭素などの温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーを利用した発電システムの大型プラント実証，実用化が進められている．宇宙航空研究開発機構（JAXA）では，エネルギー・環境問題を解決する手段の一つとして，宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space SolarPower Systems）の研究開発を進めている¹⁻⁵⁾．SSPSとは，宇宙空間で得られる太陽光エネルギーをレーザーやマイクロ波に変換後，地上に無線電力伝送し，地上で電力に変換して利用する電力供給システムである．レーザー方式 SSPS（L-SSPS）の基本原理解は，宇宙プラントから波長 $1\mu\text{m}$ 帯のレーザーを地上プラントに伝送し，光電変換素子により電力に変換するものである．

レーザー用光電変換素子の研究については，飛翔体や惑星探査用ローバー等へのレーザーによる無線エネルギー伝送を目的として研究が行われているが，既存のレーザー発振器と太陽電池を組み合わせ，光電変換効率が最大になる組み合わせを選定する研究がほとんどであり⁶⁻⁹⁾，光電変換素子の変換効率を特定のレーザー波長に最適化する研究は，ほとんど行われていない．L-SSPS の場合は，宇宙から地上にレーザーをエネルギー伝送するため，レーザーの大気透過率及び高出力レーザー発振器の技術的成熟度を考慮すると，波長 $1\mu\text{m}$ 帯を選定する必要がある．しかし，波長 $1\mu\text{m}$ 帯のレーザーを高効率に電力変換する光電変換素子の研究開発は，あまり行われていないため，我々は波長 $1\mu\text{m}$ 帯を中心としたレーザー用光電変換素子の研究開発を進めている．これまでの検討により，波長 $1.06\sim 1.08\mu\text{m}$ のレーザーに高感度な材料（高効率な電力変換が期待できる材料）として，近赤外増感 Si，InGaAs(P)，Cl(G)S を候補材料に選定している¹⁰⁾．本研究では，波長 $1\mu\text{m}$ 帯レーザー用光電変換素子の光電変換特性の把握を目的として，近赤外増感 Si（集光型 Si 単結晶太陽電池），

InGaAs の光学物性評価，波長 $1.07\mu\text{m}$ レーザー照射による光電変換特性評価を実施した．

2. 光電変換素子の光学物性評価及びレーザー照射による光電変換特性評価

2.1 測定素子

光学物性評価及びレーザー照射による光電変換特性評価試験を行った測定素子は，集光型 Si 単結晶太陽電池（以下，CPV-Si）が 1 種類，InGaAs は In/Ga 組成比が異なるものが 3 種類である．図 1 に測定素子の外観写真を示す．なお，電極構造は CPV-Si は集光用であるが，InGaAs は非集光用である．また，素子サイズは CPV-Si 及び InGaAs#1, #3 は $\square 1\text{cm}$ であるが，InGaAs#2 は $\square 2\text{cm}$ である．

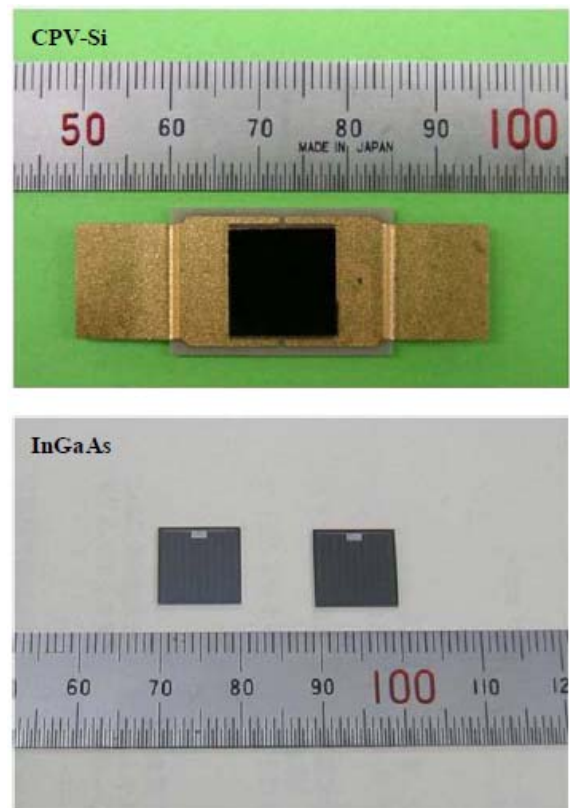


図 1 CPV-Si, InGaAs の外観写真

2.2 光学物性評価

波長 1 μm 帯レーザー用光電変換素子の変換効率向上のためには、波長 1 μm レーザーのバンドギャップ (E_g) より僅かに狭いバンドギャップの光電変換材料を選定する必要がある。現時点での L-SSPS の候補となるレーザー波長は 1.07 μm であるため、 $E_g=1.159\text{eV}$ より、僅かに狭いバンドギャップの材料を選定することになる。そこで光学物性評価として、今回準備した測定素子 (CPV-Si : 1 種類, InGaAs : 3 種類) のフォトルミネッセンス (PL) 測定を実施した。測定は太陽電池材料光学特性評価装置を用い、Ar レーザーを照射し、光電子増倍管により測定した。測定温度は室温である。表 1 に CPV-Si 及び InGaAs のバンドギャップ波長 (PL スペクトルが最大となる波長)、バンドギャップ及び In 濃度 ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) の測定・計算結果を示す。なお、In 濃度は式(1)¹¹⁾を用いて算出した。

$$E_g(x, T) = 0.42 + 0.625x - [5.8 / (T + 300) - 4.19 / (T + 271)] \cdot 10^{-4} T^2 x - 4.19 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 271) + 0.475x^2$$

(1)

表 1 CPV-Si, InGaAs の光学物性評価結果

Sample	Band gap wavelength (nm)	Band gap (eV)	In concentration
CPV-Si	1140	1.088	-
InGaAs#1	1073	1.155	0.19
InGaAs#2	1153	1.075	0.25
InGaAs#3	1196	1.037	0.28

表 1 より今回準備した InGaAs は、3 種類全て $E_g=1.159\text{eV}$ (L-SSPS のレーザー波長 1.07 μm) より狭いバンドギャップであることが確認できた。

2.3 レーザー照射による光電変換特性評価

L-SSPS の候補となるレーザー波長は 1.07 μm であるため、波長 1.07 μm のファイバーレーザー発振器を用いて、レーザー照射による光電変換特性評価を実施した。レーザー発振器の発振モードはシングルモード、ビーム品質は $M^2 < 1.05$ (TEM00) である。

図 2 に試験装置全体及び素子ホルダの外観を示す。試験装置は、レーザー発振器から発振したレーザービームをビームエキスパンダによりビーム径を 2-3 倍に拡大し、ND フィルタにより照射強度を調整し、測定素子に照射する構成となっている。計測機器はパワーメータにより入力レーザーパワー、太陽電池評価装置 I-V カーブトレーサーにより光電変換特性

(開放電圧, 短絡電流, 最大電気出力, 曲線因子等), サーモグラフィにより素子表面温度を測定し

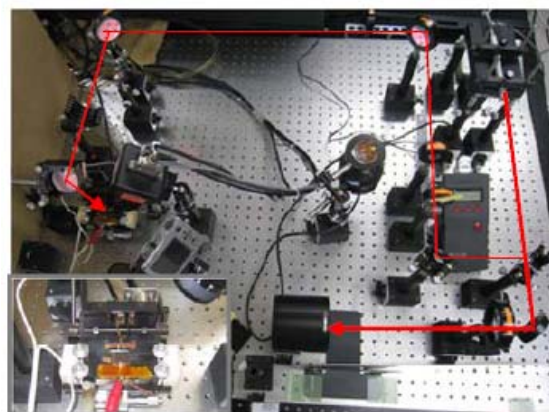


図 2 試験装置の外観

た。なお、今回準備した測定素子は、CPV-Si は反射防止膜が付いているが、InGaAs は反射防止膜が付いていないため、本研究の光電変換特性の各数値は、予め測定素子の表面反射率を測定し、表面反射分を差し引いて計算している。垂直入射時の表面反射率は、CPV-Si が 14.3%, InGaAs が 22.2% である。また、レーザービームが測定素子の受光面からずれて照射されると、正確な光電変換特性が測定できないため、ビームプロファイラを用いて、測定素子の受光面とレーザービームの位置合わせを行った。レーザー照射強度 (素子面積に対する平均強度) は、0~10,000 mW/cm^2 とした。なお素子表面温度は、全ての測定素子において、レーザー照射強度の影響がほとんど無く、室温程度であった。

図 3 に開放電圧 (V_{oc}) のレーザー照射強度依存性を示す。InGaAs の開放電圧は、#2 と #3 はほぼ同等であるが、#1 は #2 及び #3 と比較して増加する結果となった。増加の要因はバンドギャップの増加によるものであるが、#2 と #3 で開放電圧に差が見られなかった理由については、現在調査中である。CPV-Si については、InGaAs#1 と #2 の間にあり、バンドギャップ相当の開放電圧を示した。レーザー照射強度依存性は、CPV-Si は 1,000 mW/cm^2 付近までレーザー照射強度の対数に比例して増加しているのに対して、InGaAs は 100 mW/cm^2 付近で傾きが小さくなる傾向が見られた。これは素子の電極構造に起因し、CPV-Si は集光用の電極構造であるのに対して、InGaAs は非集光用のためである。また、開放電圧がレーザー照射強度の対数に比例して、増加する理由は、レーザー照射強度の増加に伴い、光電流/暗電流の比率が増加するためである¹²⁾。

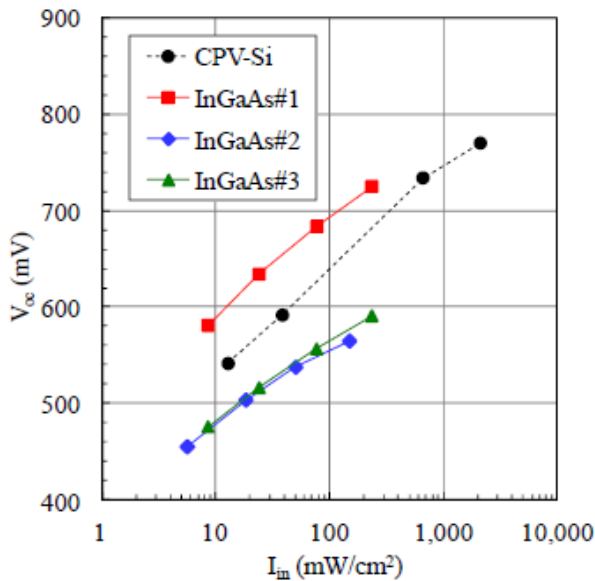


図3 開放電圧のレーザー照射強度依存性

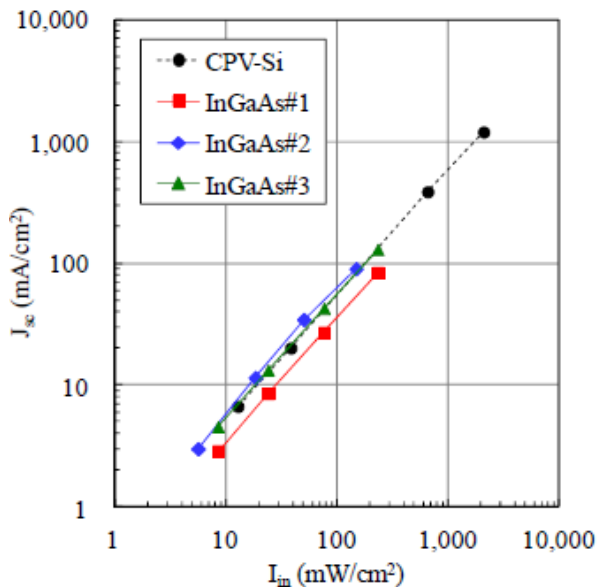


図4 短絡電流密度のレーザー照射強度依存性

図4に短絡電流密度 (J_{sc}) のレーザー照射強度依存性を示す。短絡電流密度は、全ての測定試料において、レーザー照射強度に比例して増加する傾向が見られた。これは言うまでもなく、レーザー照射強度の増加によるものである。測定試料別の比較については、InGaAsの場合、#1は#2及び#3と比較して減少し、また#2は#3より僅かに大きい値を示した。#1の短絡電流密度が減少した理由は、短絡電流密度は量子効率及びレーザー照射強度と比例関係にあり、#1は#2及び#3と比較して照射レーザーの波長に対する量子効率が小さいためである。#3より#2の方がバンドギャップが小さいにもかかわらず、#2

の短絡電流密度が#3より僅かに大きい理由は、現在調査中である。また、CPV-Siについては、電極構造が集光用であるため、 $2,000\text{mW}/\text{cm}^2$ 付近まで線形的に増加する結果となった。

図5に曲線因子 (F.F.) のレーザー照射強度依存性を示す。CPV-Siはレーザー照射強度 $1,000\text{mW}/\text{cm}^2$ 付近まで高い曲線因子を維持できているが、InGaAsは $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 付近から低下する傾向が見られた。InGaAsにおいて、曲線因子の低下が発生した要因は、レーザー照射強度の増加により、電流密度が増加しているが、InGaAsの電極構造が非集光用となっているためである。

図6に最大電気出力密度 (I_{out})、図7に光電変換効率 (η) のレーザー照射強度依存性を示す。

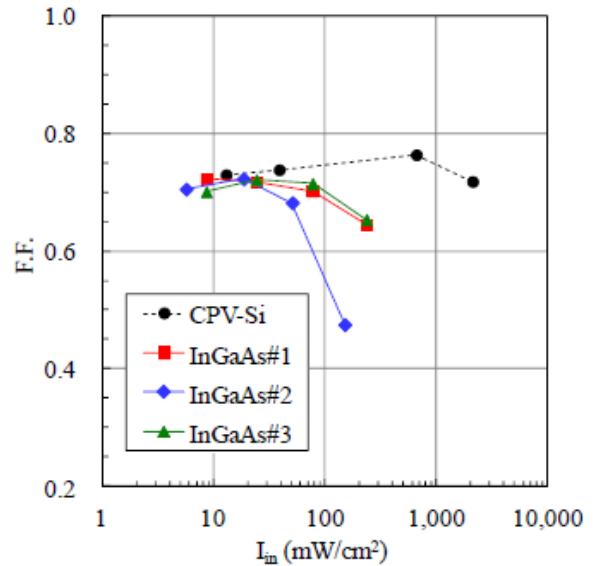


図5 曲線因子のレーザー照射強度依存性

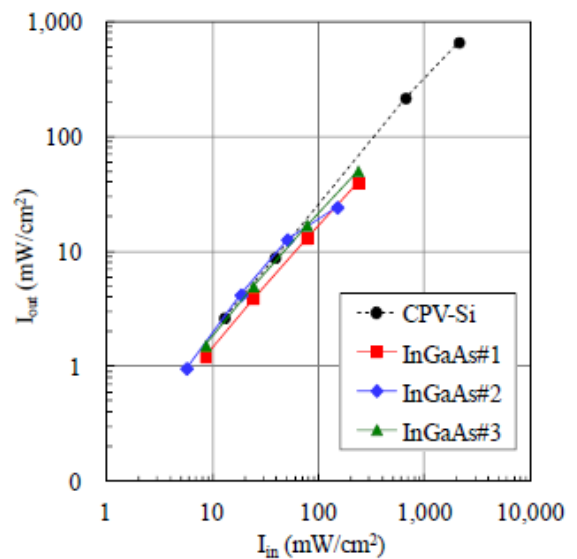


図6 最大電気出力密度のレーザー照射強度依存性

InGaAs#2 の素子サイズが 0.2cm であるため、最大電気出力密度は式(2)、光電変換効率は式(3)を用いて算出し、比較した。

$$I_{\text{out}} = V_{\text{oc}} \times J_{\text{sc}} \times F.F. \quad (2)$$

$$\eta = I_{\text{out}} / I_{\text{in}} \quad (3)$$

InGaAs の最大電気出力密度及び光電変換効率は、#1 が $I_{\text{in}}=77\text{mW/cm}^2$ のとき、 $I_{\text{out}}=13.0\text{mW/cm}^2$ 、 $\eta=16.8\%$ 、#2 が $I_{\text{in}}=51\text{mW/cm}^2$ のとき、 $I_{\text{out}}=12.6\text{mW/cm}^2$ 、 $\eta=25.0\%$ 、#3 が $I_{\text{in}}=77\text{mW/cm}^2$ のとき、 $I_{\text{out}}=16.9\text{mW/cm}^2$ 、 $\eta=22.0\%$ となり、レーザー照射強度が比較的低い領域 (100mW/cm^2 以下) において、InGaAs#2 が最大となった。CPV-Si については、レーザー照射強度が 50mW/cm^2 以下では InGaAs#2 より低い光電変換効率であるが、電極構造が集光用であるため、レーザー照射強度の高い領域である $I_{\text{in}}=660\text{mW/cm}^2$ のとき、 $I_{\text{out}}=216.3\text{mW/cm}^2$ 、 $\eta=32.8\%$ の最大値を示した。

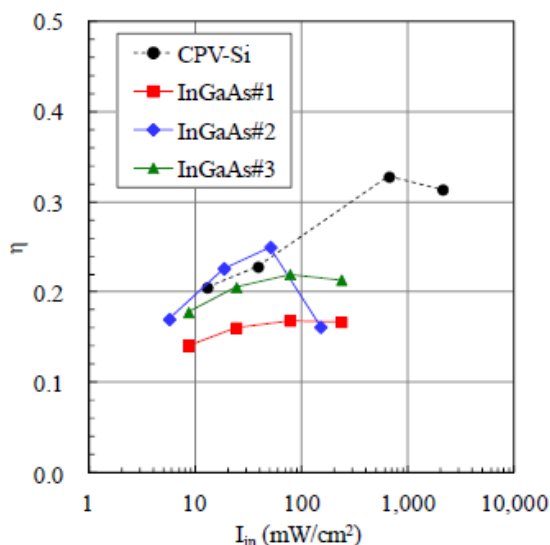


図7 光電変換効率のレーザー照射強度依存性

最大電気出力密度及び光電変換効率は、L-SSPS の候補となるレーザー波長のバンドギャップ ($E_g=1.159\text{eV}$) より僅かに狭い InGaAs#1 ($E_g=1.155\text{eV}$) で最大値を示すと予測していたが、InGaAs#2 ($E_g=1.075\text{eV}$) で最大値を示した。波長 $1.07\mu\text{m}$ のレーザーにおいて、光電変換効率のバンドギャップ依存性を考えた場合、InGaAs は直接遷移型のバンド構造であるため、バンドギャップの増加に伴い、光電変換効率は増加し、波長 $1.07\mu\text{m}$ のバンドギャップ直近から急激に減少すると予測され、InGaAs#3 より僅かにバンドギャップが狭い領域で光電変換効率が最大になると予測される。また、

InGaAs も CPV-Si と同様に、電極構造を集光用になれば、レーザー照射強度に依存して、光電変換効率が增加すると予測される。

3. まとめ

本研究では、CPV-Si 及び In/Ga 組成比が異なる3種類の InGaAs について、光学物性評価、波長 $1.07\mu\text{m}$ レーザー照射による光電変換特性評価を行った。

今回測定した素子のバンドギャップは、CPV-Si : 1.088eV 、InGaAs#1 : 1.155eV 、InGaAs#2 : 1.075eV 、InGaAs#3 : 1.037eV であり、現時点での L-SSPS の候補となるレーザー波長 ($\lambda=1.07\mu\text{m}$) のバンドギャップ ($E_g=1.159\text{eV}$) より狭いことが確認できた。

レーザー照射による光電変換特性評価については、InGaAs ではバンドギャップの減少 (In 濃度の増加) に伴い、開放電圧が減少、短絡電流密度が増加する傾向が見られた。最大電気出力密度及び光電変換効率は、L-SSPS の候補となるレーザー波長のバンドギャップより僅かに狭い InGaAs#1 で最大値を示すと予測していたが、InGaAs#2 で最大値を示した。また、L-SSPS の候補となるレーザー波長で InGaAs の最適なバンドギャップは、InGaAs#1 より僅かに狭いところにあると予測される。また CPV-Si の光電変換効率は、電極構造が集光用であるため、レーザー照射強度が高い領域で最大値を示した。

以上より、InGaAs の光電変換効率向上のための今後の課題は、In/Ga 組成比の最適化及び電極構造の高集光対応である。

参考文献

- 1) H. Suzuki, T. Fujita and M. Mori: "Technology Demonstration and Elemental Technology Development of Space Solar Power Systems (SSPS)", 59th International Astronautical Congress, IAC-08-C3.2.04 (2008).
- 2) H. Suzuki, T. Fujita, K. Kisara and S. Sasaki: "Technology Demonstration and Elemental Technology Development of Laser Based Space Solar Power System", 60th International Astronautical Congress, IAC-09-C3.4.06 (2009).
- 3) 鈴木拓明: 「宇宙太陽光利用システム」, OplusE (Optics+Electronics), Vol. 31, No. 10, pp. 1174-1177, 2009.
- 4) 鈴木拓明, 吉田裕之, 森谷信一, 木皿且人, 佐々木進: 「レーザー方式宇宙太陽光利用システムの研究

現状」, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1S01, 2010.

5) 鈴木拓明: 「レーザー方式宇宙太陽光発電の開発現状と展望」, レーザー研究, 第 39 巻, 第 1 号, pp. 24-29, 2011.

6) Henley, M.W, Fikes, J.C, Howell, J. and Mankins, J.C: "Space Solar Power Technology Demonstration for Lunar Polar Applications", IAC-02-r4.04 (2002).7) Submitted by University of Colorado at Boulder Student Group Members, "Project LaMaR: Laser-powered Mars Rover", LPI Contribution No.1106.

8) 武田和也, 河島信樹: 「無人月氷探査車 (ローバー) モデルへの 1.2km レーザーエネルギー伝送実験」, 日本航空宇宙学会 宇宙技術, Vol. 3(2004).

9) 武田和也, 河島信樹, 矢部恭一: 「レーザーエネルギー伝送の小型無人飛行体への応用」, 日本航空宇宙学会 宇宙技術, Vol. 7, pp27-32 (2008).

10) 石川東一郎, 吉田裕之, 鈴木拓明, 森谷信一, 斉藤由佳, 藤田和久, 木皿且人: 「LSSPS におけるレーザーの光電変換に関する検討」, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1S04, 2010.

11) ヨッフエ物理学研究所ホームページ

<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>

12) 高本達也, 兼岩実: 「集光型化合物太陽電池」, ヤープ技報, 第 93 号, pp. 49-53, 2005. _