

# 低エネルギー電子線照射が InGaP 太陽電池の電気特性へ及ぼす影響 EFFECTS OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF INGAP SOLAR CELL ON LOW ENERGY ELECTRON BEAM IRRADIATION

奥野泰希 \*<sup>A)</sup>、奥田修一 <sup>A)</sup>、小嶋崇夫 <sup>A)</sup>、岡喬 <sup>A)</sup>、  
川北史朗 <sup>B)</sup>、今泉充 <sup>B)</sup>、舩分宏昌 <sup>B)</sup>、  
Yasuki Okuno\*<sup>A)</sup>, Shuichi Okuda<sup>A)</sup>, Takeo. Kojima<sup>A)</sup>, Takashi Oka<sup>A)</sup>,  
Shirou Kawakita<sup>B)</sup>, Takashi Imaizumi<sup>B)</sup>, Hiroaki Kusawake<sup>B)</sup>  
, <sup>A)</sup>Osaka Prefecture Univ  
<sup>B)</sup>Japan Aerospace eXploration Agency

## Abstract

The solar cell used for a satellite has commonly triple-junction, whose top-subcell is made of InGaP. The electrons can recoil the atoms in the crystal lattice of the cells at energies above the threshold energies. Theoretically obtained threshold energies for recoil atoms of the InGaP cell by an electron are about 120 - 320 keV. The research using low energy electron beams is important to investigate the mechanism of the degradation of the cell by the defects. The InGaP solar cell was irradiated with electron beams by the Cockcroft Walton electron accelerator in a vacuum and at an ambient temperature. The energies and the fluences of the electron beams are from 60 to 500 keV and from  $3 \times 10^{14}$  to  $3 \times 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>. Degradation of the open-circuit voltage of solar cell energy at less than 100 keV was observed. This degradation was not predicted on the theory. This result suggests that defects were caused by not only the recoil but also the absorbed dose by electron. At an electron energy of more than 400 keV the RF of the short-circuit current (Isc) has been found to increase at a fluence below about  $3 \times 10^{14}$ . For the higher fluence the RF of Isc has gradually decreased. This phenomenon can be attributed to the increase of carrier concentration due to the irradiation.

## 1. 緒言

宇宙環境における人工衛星などは、宇宙太陽電池をエネルギー源として利用している。電子線や陽子線などの宇宙放射線より生成される照射欠陥は、人工衛星太陽電池の性能を劣化させる<sup>[1]</sup>。そのため宇宙太陽電池は、放射性耐性の比較的高いものが使用される。III-V 族化合物半導体をもちいた太陽電池は、従来の Si 太陽電池よりも放射性耐性が高い。そのため III-V 族化合物半導体を用いた 3 接合型太陽電池が現在宇宙太陽電池として広く利用されている。そのなかでも InGaP 太陽電池は、最も放射性耐性が高く、太陽光の短波長領域 (700nm 以下) を吸収することから 3 接合型太陽電池のトップサブセルとして用いられている<sup>[2]</sup>。

宇宙太陽電池は、宇宙での運用のために照射試験が行われてきた<sup>[1][2]</sup>。この試験では 1 MeV 以上の高エネルギー電子線や陽子線を用いたものが一般的に利用されてきた。InGaP 太陽電池も同様に放射線劣化特性について評価されてきた。これまでに陽子線や電子線による劣化現象は観測されたが、高エネルギー電子線の照射によって低フルエンスにおける InGaP 太陽電池の短絡電流 ( $I_{sc}$ ) の増加などの減少も確認されている<sup>[3]</sup>。

しかし性能の劣化や  $I_{sc}$  の増加についての詳しいメカニズムは今まで考えられていなかった。このメカニズムの解明は、化合物半導体の放射線耐性の向上について考える上で重要である。

高エネルギー電子線や陽子線は、全ての元素をはじき出す。陽子線ではカスケード損傷が生成されるので照射欠陥は、電子線より結晶中に保存されやすい。そのた

め各元素の照射欠陥が及ぼす影響は明らかにされてこなかった。

非イオン化エネルギー損失の式を用いると InGaP 半導体の各元素のはじき出し電子線エネルギー閾値を計算することができる<sup>[2]</sup>。計算の結果、In、Ga、および P はそれぞれ約 320、300、および 120 keV ではじき出されることが明らかになった。この結果は、約 100-300 keV の低エネルギー電子線電子線を用いると照射欠陥を制御し、各元素の照射欠陥が及ぼす影響を調査できることを示している。

大阪府立大学のコッククロフトウォルトン (CW) 型電子線加速器は、60 - 600 keV のエネルギーの電子線を照射することが可能である。さらにこの加速器は、太陽電池の照射試験のために試料照射部が最適化されている。試料照射部の模式図を Fig.1 に示す。

この照射部では、真空中での試料への電子線照射および、光電気物性の評価が可能である。試料温度は、ヒータによる加熱と液体窒素による冷却により約 100 - 323 K の範囲で調整可能である。試料横に設置したアルメロクロメルにより試料の温度は測定された。電子線を均一に試料に照射するためにコイルを設置し、高周波交流電流を流した。試料ホルダーに蛍光板を設置し、電子線の形を観測した結果を Fig.2 に示す。

交流電源を流した場合電子線が均一になったことが観測された。また試料ホルダー横に銅プレートを設置し、電子線フルエンスを測定することが可能である。このようなシステムを持った加速器は世界でもほとんどない。本研究では CW 加速器を用いて、各元素の照射欠陥が太陽電池の性能へ及ぼす影響を明らかにする。

\* mx106003@riast.osakafu-u.ac.jp

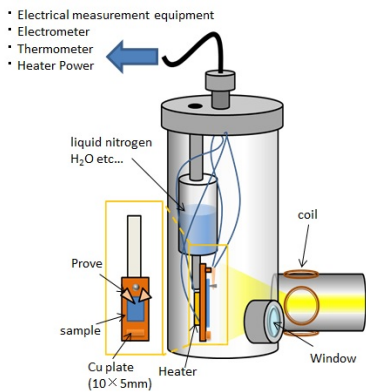


Figure 1: Schematic diagrams of the illuminated portion in CW accelerator system.

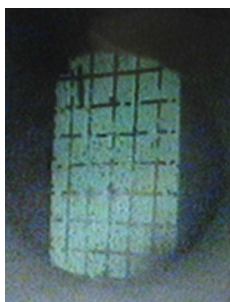


Figure 2: Photos of fluorescent screen when measuring the shape of the electron beam.

## 2. 実験方法

### ● 電子線照射

大阪府立大学の CW 加速器システムを用いた。加速器エネルギーは、60、150、300、400 keV であった。試料へ照射された電子のフルーエンスは、 $3 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$  であった。試料は、真空中および室温で照射された。試料は、各照射実験ごとに、新しいものに取り替えた。太陽電池の測定は、照射後すぐに照射部の試料ホルダー内で行われた。

### ● 太陽電池評価方法

逆バイアス用電源 (6146, ADC 社製) およびデジタルマルチメーター (7352E, ADC 社製) を用いて光電流電圧 (LIV) 測定を行った。キセノンランプキ、セノンランプ用電源およびエアマス (AM)0 フィルターを用いた光源を利用した。

### ● InGaP 太陽電池

InGaP 太陽電池は JAXA から提供された。試料は  $1 \times 1 \text{ cm}$  の面積であった。AM0 光源による InGaP 太陽電池の基準セルの LIV 曲線を Fig.3 示す。実験に使用した太陽電池の開放電圧 ( $V_{oc}$ )、 $I_{sc}$ 、最大電力および発電効率の平均値および標準偏差を Tab. 1 に示す。

照射前の全ての試料の変換効率、最大電力、 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$  は、それぞれ  $11.20586792 \pm 0.346$ 、 $0.0151 \pm 0.000466$ 、 $0.0139 \pm 0.000115$  および  $1.367 \pm 0.00294$  であった。±

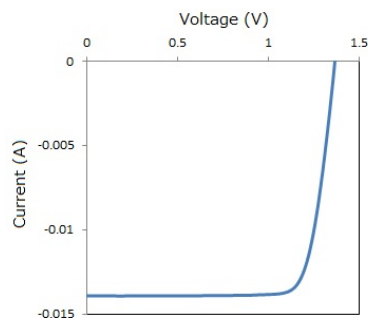


Figure 3: LIV curve of the reference cell as experimented InGaP solar cells.

Table 1: Performance of InGaP Solar Cell

|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| Conversion efficiency | $11.20586792 \pm 0.346$ |
| Power (max)           | $0.0151 \pm 0.000466$   |
| $I_{sc}$              | $0.0139 \pm 0.000115$   |
| $V_{oc}$              | $1.367 \pm 0.00294$     |

以下の数字は、標準偏差である。この結果より、各エネルギーで試料の取替えを行う照射試験であるが、同様の試料を用いたとする。

## 3. 結果と考察

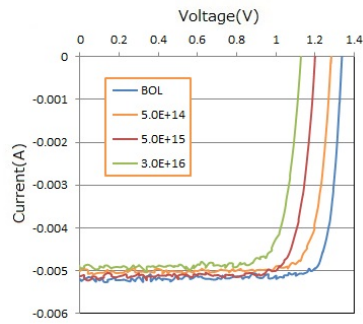
Fig.4 の (a)、(b)、(c) および (d) に 60、150、300 および 400 keV の電子線照射による InGaP 太陽電池の LIV 特性の変化を示す。

全てのエネルギーにおいて、太陽電池の劣化が確認された。また  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  のフルーエンスにおいてエネルギーが大きいくほど、劣化が大きくなるようになった。300 keV 以上では、リーク電流が大きくなっている。300 keV 以上では、Ga のはじき出しが生成される。そのため Ga の照射欠陥が、リーク電流を引き起こしている可能性がある。400 keV では  $5 \times 10^{14}$  の時に、 $I_{sc}$  がほとんど減少していない。

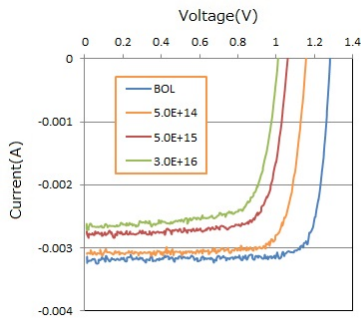
Fig.5 に、60、150、および 400 keV の  $I_{sc}$  と  $V_{oc}$  の保存率 (RF) を示す。

60 keV では、 $I_{sc}$  の劣化は、ほとんど見られなかった。しかしながら、60 keV の電子線は、太陽電池の  $V_{oc}$  の低下を引き起こしている。120 keV 以下では、電子線による InGaP 半導体における元素のはじき出しは生じない。そのため 120 keV 以下の電子線照射において、はじき出しではなくイオン化による欠陥の生成メカニズムが存在すると考えられる。

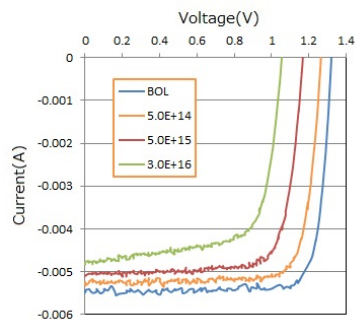
60 および 150 keV を比較すると、150 keV では、 $I_{sc}$  が低下している。150 keV では P のみが電子によってはじき出される。そのため、この低下は P の照射欠陥による影響であると考えられる。400 keV では、低線量の時 InGaP 太陽電池の  $I_{sc}$  が増加している。400 keV では、300 keV 以下と比べて新たに In の照射欠陥が生成される。In の欠陥は InGaP 半導体内で、p 型のドーパントとして機能する。そのため吸収層である p-InGaP 半導体層のキャリア濃度が増加し、低線量領域で  $I_{sc}$  が増



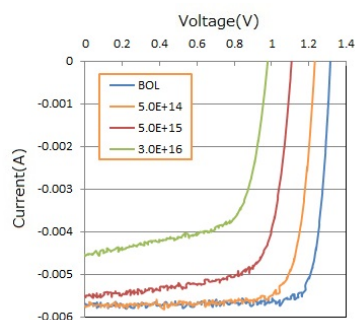
(a) 60 keV



(b) 150 keV

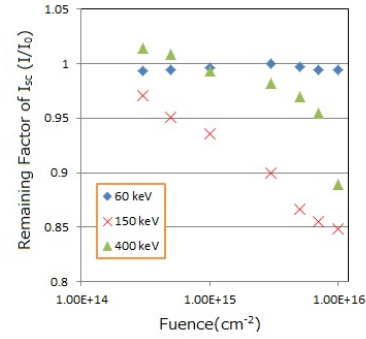


(c) 300 keV

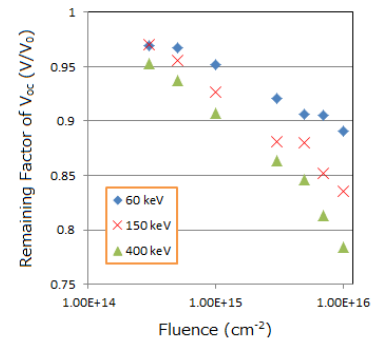


(d) 400 keV

Figure 4: Changes in the LIV curve of a solar cell by electron beam irradiation.(a), (b), (c) and (d) are 60 keV, 150 keV, 300keV and 400 keV, respectively.



(a) Isc



(b) Voc

Figure 5: Remaining factor of Voc and Isc by electron beam irradiation at each energy.

加したと考えられる [3]。V<sub>oc</sub> に関しては、電子線エネルギーが高くなると、保存率の低下がより大きくなることが明らかになった。

#### 4. まとめと今後の課題

電子線エネルギーを変化させることにより照射欠陥を制御し、InGaP 太陽電池の照射欠陥と電気的特性の変化の関係性を観測した。60 keV では新たな V<sub>oc</sub> の劣化メカニズムが確認された。今後、X線を利用してイオン化による欠陥の生成を行い V<sub>oc</sub> の劣化を調査する。400 keV では、In の照射欠陥が I<sub>sc</sub> を向上させることが明らかになった。大阪府立大学では、高エネルギー電子線をパルスで照射できる電子線ライナックがある。今後、このライナックを用いて、低線量における I<sub>sc</sub> の照射効果を調査する。

本研究の一部は平成 24-26 年度 KEK の大学等連携支援事業によって行った。

#### 参考文献

- [1] C. Morioka, K. Shimazaki, S. Kawakita, M. Imaizumi, Prog. Photovolt: Res. Appl. 19 (2011) 825.
- [2] M. Imaizumi, C. Morioka, T. Sumita, T. Ohshima and S.Okuda, IEEE(PVSC) 37 (2011) 1579.
- [3] D. Elfiky, M. Yamaguchi, T. Sasaki, and more, Japanese Journal of Applied Physics 49 (2010) 121201.