

# InGaP 太陽電池における 100 keV 以下の電子線照射による欠陥の生成

## GENERATION OF DEFECTS BY IRRADIATION WITH LESS THAN 100 KEV ELECTRON IN INGAP SOLAR CELLS

奥野泰希<sup>#,A)</sup>, 奥田修一<sup>A)</sup>, 秋吉優史<sup>A)</sup>, 岡喬<sup>A)</sup>, 川北史郎<sup>B)</sup>, 今泉充<sup>B)</sup>, 艸分宏昌<sup>B)</sup>, リーカンファ<sup>C)</sup>, 山口真史<sup>C)</sup>  
Yasuki Okuno<sup>#,A)</sup>, Shuichi Okuda<sup>A)</sup>, Masafumi Akiyoshi<sup>A)</sup>, Takashi Oka<sup>A)</sup>, Shirou Kawakita<sup>B)</sup>, Mitsuru Imaizumi<sup>B)</sup>,  
Hiroaki Kusawake<sup>B)</sup>, Kan-Hua Lee<sup>C)</sup>, and Masafumi Yamaguchi<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Osaka Prefecture University (OPU)

<sup>B)</sup> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

<sup>C)</sup> Toyota Technological Institute (TTI)

### Abstract

The performance degradation of InGaP solar cells with high radiation resistivity has been considered not to be caused by irradiation with less than 100 keV electron in the predication of the non-ionizing energy loss (NIEL). However, the unexpected degradation of InGaP solar cells was observed by the irradiation with 60 keV electron-beams. This degradation is not able to be explained by the conventional degradation methods. It is known that the value of the displacement threshold energy ( $E_d$ ) is has been used as the fundamental value of the degradation prediction models, as also the function of the NIEL value, of the space solar cells. However, the value of the  $E_d$  for InGaP semiconductor is not directly derived by an experimental. In this study, the degradation mechanism of InGaP solar cells caused by irradiation with less than 100 keV electrons is reveal. When we evaluate the value of  $E_d$  for phosphorus in InGaP, the irradiation-induced defects related to phosphorus is expected to be generated in InGaP solar cells irradiated with less than 100 keV electron. We use the deep-level transient spectroscopy (DLTS) to investigate kind of defects in the InGaP solar cells irradiated with less than 100 keV electron-beams. The result of the DLTS indicates that the NIEL which is currently considered may not explain the degradation caused by low-energy electron beams well. Additionally, we were able to explain about the unexpected degradation of the InGaP solar cells and the risk of the  $E_d$ , which has been considered so far.

### 1. 緒言

宇宙環境では、太陽や銀河から放射線が放出されている。そのため宇宙環境で利用されている人工衛星は放射線の影響を考える必要がある。人工衛星に用いられている太陽電池に放射線が照射されると、はじき出し損傷によって太陽電池の結晶中に欠陥が生成されると考えられている[1, 2]。一般的に太陽電池に欠陥が生成されると、キャリア寿命の低下、シリーズ抵抗の増加、および、シャント抵抗の低下が引き起こされ、太陽電池の性能が低下する。そのため放射線による劣化を考慮した太陽パネルの設計を行う必要があり、太陽電池の地上試験による劣化予測の研究が行われてきた[3-5]。

現在宇宙太陽電池の劣化予測モデルとして Displace Damage Dose が注目されている[6-9]。通常1つの太陽電池の予測モデルを構築する場合、非常に多くの照射試験が必要であるが、このモデルは、あらかじめ太陽電池の放射線材料の種類によって与えられる質量とはじき出し閾値エネルギー( $E_d$ )に応じて各エネルギーの電子線および陽子線が与える損傷の度合いを示す値である Non-Ionizing Energy Loss(NIEL)値を求めておくことによって、最低2回の照射試験で太陽電池の劣化予測を行うことが可能である。

InGaP 太陽電池は、非常に高い放射線耐性を持っており、バンドギャップが約 1.9 eV であることから、宇宙用3接合型太陽電池のトップセルとして利用されてきた[10-13]。先行研究において 100 keV 以下の電子線照射では

InGaP 太陽電池の性能は、ほとんど劣化しないと考えられてきた[14]。しかし、InGaP 太陽電池へ 60 keV の電子線照射することによって、劣化予測を遥かに上回る劣化が発見された[15]。この劣化はこれまでの劣化モデルでは、説明できない現象である。そのため、この劣化の物理的なメカニズムを解明することは、非常に重要である。

太陽電池の物理的な放射線損傷メカニズムを調査するためには、500 keV 以下の大電流の電子線を照射する加速器が求められている。また照射損傷を調査する上で、照射中の試料温度の制御、および試料のその場測定が求められる。しかし、現在、高エネルギーな電子線が求められており、物質の放射線損傷を物理的に調査するための加速器はほとんどない。そのため大阪府立大学放射線センターでは、コッククロフトウォルトン型加速器をベースとして、材料損傷の物理的なメカニズムを解明するための加速器システムの構築を行ってきた。本研究では、構築した加速器システムを用いて、100 keV 以下の電子線を照射された InGaP 太陽電池に生成された欠陥について観察を行うことによって、この劣化の要因について言及する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 InGaP 太陽電池

JAXA によって提供された n<sup>+</sup>-p InGaP<sub>2</sub> 太陽電池のエアマス 0(AM0)下における性能を Table 1 に示す。この太陽電池は、先行研究で使われたものと同様のものである

[14, 15]. 変換効率( $\eta$ )、最大電力( $P_m$ )、短絡電流( $I_{sc}$ )、および開放電圧( $V_{oc}$ )はそれぞれ、11.2 %、15.1 mW、13.9 mA、1.37 V である。またセル面積は、 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ であり、光吸収層の厚みは、 $0.5 \mu\text{m}$  である。

Table 1: Averaged Values and the Deviations of Performance of  $n^+p$  InGaP<sub>2</sub> Cells Performance Used in the Experiments under AM0

	Average	Deviation
$\eta$ [%]	11.2	$\pm 0.34$
$P_m$ [mW]	15.1	$\pm 0.46$
$I_{sc}$ (mA)	13.9	$\pm 0.11$
$V_{oc}$ (V)	1.37	$\pm 0.029$

## 2.2 電子線照射

大阪府立大学放射線センターの Cockcroft-Walton 型電子線加速器システム(本システム)を用いて、試料へ電子線照射を行った。電子線の加速電圧は、70 keV であった。照射中、試料は、氷水によって冷却された。試料へ照射された電子線フルエンスは、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  であった。

## 2.3 電流電圧(IV)特性の評価

本システムの試料台には、プローブが設置されており、試料の電気特性を照射中または照射直後に測定することが可能である。そのため照射直後の試料を、デジタルマルチメータ(7352E, ADC)およびバイポーラ直流電源(6146, ADC)に接続し、IV 特性を評価した。

## 2.4 DLTS による欠陥評価

TTI 半導体研究室の DLTS 測定システムを用いて試料の、CV 測定及び DLTS 測定を行った。システムのキャパシタンス制限のため、サンプルの面積を照射後ダイアモンドブレード (R07-SDC220-BB300-100, disco co.) を用いて  $0.2 \times 0.2 \text{ cm}^2$  へ調整した。そして試料表面にプラズマスパッタリングによって Ag を堆積し、オーミック接合を形成した。DLTS 測定の周波数は、1 MHz であった。試料温度は、200 K から 340 K であった。試料台へ試料を設置する際に、導通接着(Dotite, Fujikurakasei)を使用した。逆バイアスおよびパルスバイアスはそれぞれ、 $-0.7 \text{ V}$  および  $0.3 \text{ V}$  であった。パルスバイアスのパルス時間はトラップ中へのキャリア捕捉時間より十分に長い、1s であった。

## 3. 結果と考察

70 keV 電子線照射された InGaP 太陽電池の IV 特性を Figure 1 に示す。青線および赤線は、それぞれ照射前(BOL)および 70 keV 電子線  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  (1E+17) 照射後の IV 曲線である。照射後では、再結合電流成分の増加によって低電圧側の電流が増加している。また抵抗性電流領域においてそれぞれの直列抵抗は、ほとんど違いが見られなかった。そのため、照射によって欠陥が生成され、キャリアの再結合が増加したと考えられる。

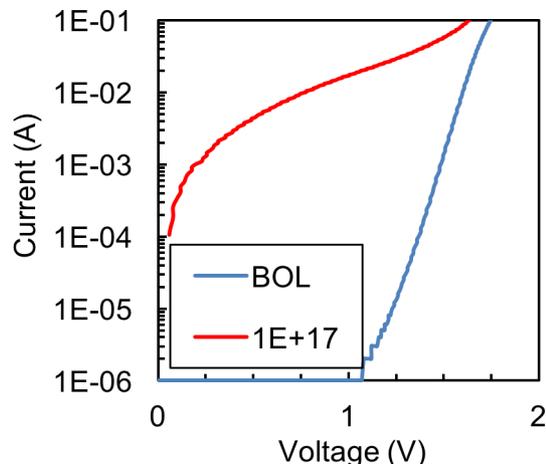


Figure 1: Current-voltage characteristics of InGaP solar cells before and after the irradiation with 70 keV electron-beams.

DLTS 測定の結果を Figure 2 および Figure 3 へ示す。Fig.2 は、各温度における DLTS シグナルを表している。赤三角および黒四角は、それぞれ照射前および 70 keV 電子線  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  (1E+17) 照射後の試料の測定結果である。照射前では、200 K から 350 K の間でピークが観測されなかったが、照射後では、270 K 付近にピークが観測された。DLTS においてピークは、欠陥が生成されたことを意味しており、このピークの欠陥にトラップされているキャリアの活性化エネルギーを求める事によって欠陥の種類を特定することが可能である。Fig.3 は、270 keV 付近にピークをもつ欠陥にトラップされたキャリアの活性化エネルギーを表している。Fig.3 の結果において、この欠陥の準位が  $0.54 \text{ eV}$  であることが明らかになった。先行研究において、InGaP 半導体内で  $0.54 \text{ eV}$  の準位の欠陥

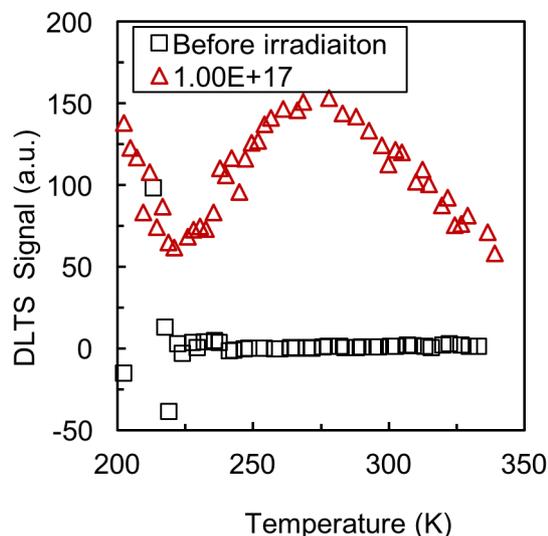


Figure 2: DLTS majority-carrier spectra of  $n^+p$  InGaP solar cells before and after irradiation with 70 keV electron-beams to a fluence of  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ .

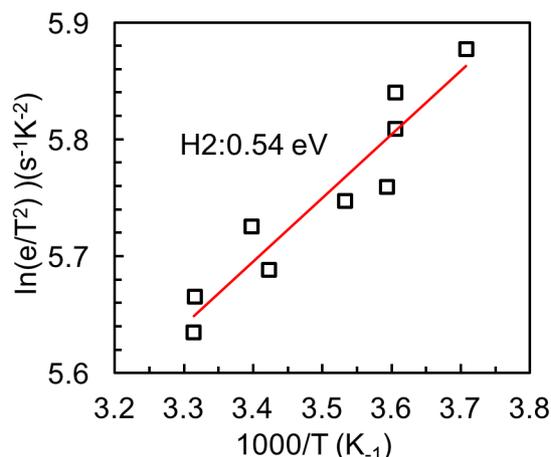


Figure 3: Arrhenius plot of the emission rates vs temperature for the H2 trap detected, whose slope provide, the corresponding ionization energies of the H2 trap.

は、リンの空孔であると考えられている。そのため、70 keV の電子線を InGaP 太陽電池へ照射した場合、リンの空孔が形成されることが明らかになった。しかし 70 keV 電子線照射によってリンの欠陥が生成するメカニズムについては、これまでのものでは説明することが出来ない。そのためこの劣化現象は、太陽電池の劣化にこれまで用いられてきた欠陥生成モデルに非常に重要な物理的問題があること提起している。

これまでの欠陥生成メカニズムでは、電子線と原子核が衝突し、運動エネルギーが原子核へ付与されたとき、そのエネルギーが安定な欠陥が生成されるのに必要なエネルギーであるはじき出し閾値エネルギー ( $E_d$ ) を超えた場合に、欠陥が生成されると考えられている。これまで考えられてきたリンのはじき出し閾値エネルギーは 9 eV である。しかし、70 keV 以下でははじき出しによってリンの欠陥が生成される場合、はじき出し閾値エネルギーは、4 eV 以下である必要がある。

各はじき出し閾値エネルギーにおける NIEL の電子線エネルギー依存性を計算した結果を Figure 4 に示す。この結果より、500 keV 以下の電子線エネルギーの場合、

はじき出し閾値エネルギー依存性が高いことがわかる。InGaP のはじき出し閾値エネルギーは、これまでの照射試験から推測されたものが用いられているが、殆どの場合 1 MeV 以上の電子線が用いられている。そのため、はじき出し閾値がこれまで考えられてきたものより低いことは否定出来ない。

#### 4. 結言

材料の放射線損傷を物理的に調査することに特化した、大阪府立大学放射線センターコックロフトウォルトン型電子加速器システムによって InGaP 太陽電池の電子線照射を行った。70 keV の電子線を照射した InGaP 太陽電池の欠陥を DLTS によって測定したところ、リンの空孔が形成されていることが明らかになった。リンは、100 keV 以下でははじき出されないと考えられてきたので、この欠陥生成メカニズムはこれまでのモデルでは説明することが出来ない。しかし、これまでの劣化予測で用いられているはじき出し閾値エネルギー閾値を実験的に算出することによって、この欠陥生成メカニズムを説明できる可能性がある。

#### 参考文献

- [1] M. Yamaguchi, A. Khan, S. J. Taylor, K. Ando, T. Yamaguchi, S. Matsuda, and T. Aburaya, *J. Appl. Phys.*, **86**, 217 (1999).
- [2] R. J. Walters, H. L. Cotal, S. R. Messenger, E. A. Burke, S. J. Wojtczuk, H. B. Serreze, P. R. Sharps, M. L. Timmons, P. Iles, and Y. C. M. Yeh, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **50**, 305 (1998).
- [3] M. Yamaguchi, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **68**, 31 (2001).
- [4] M. Imaizumi, Y. Yuri, P. R. Bolton, S. Sato, and T. Ohshima, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2012 38th IEEE*, **38**, 002831 (2012).
- [5] N. de Angelis, J.C. Bourgoin, T. Takamoto, A. Khan, M. Yamaguchi, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **66**, 495 (2001).
- [6] M. Lu, R. Wang, Y. Liu, Z. Feng, Z. Han, and C. Hou, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B*, **307**, 362 (2013).
- [7] N. Dharmarasu and M. Yamaguchi, in *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 2003. Proceedings of 2003*, **1**, 730 (2003).

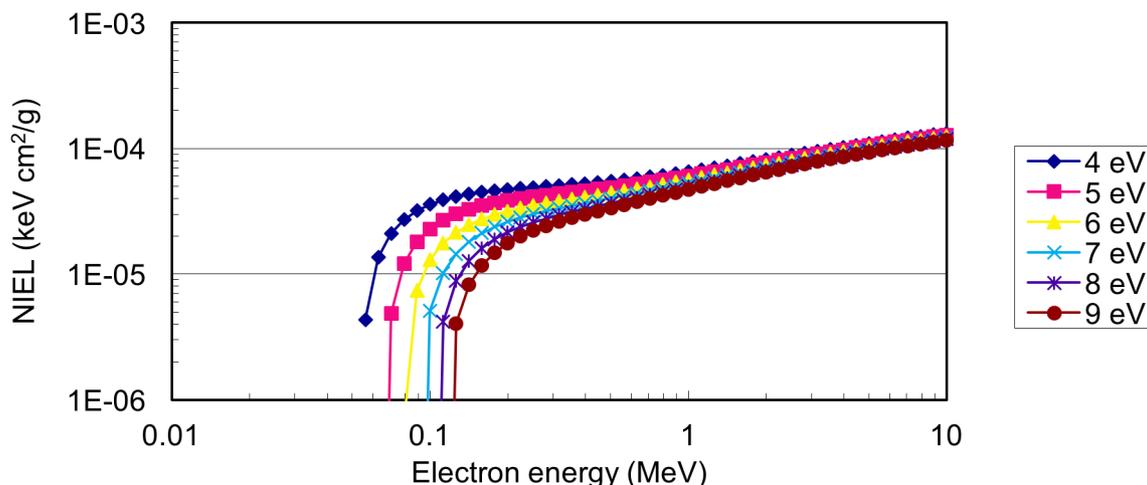


Figure 4: Dependence of the NIEL value of phosphorus in each  $E_d$  on electron energy.

**PASJ2016 MOP128**

- [8] S. R. Messenger, G. P. Summers, E. A. Burke, R. J. Walters, and M. A. Xapsos, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, **9**, 103 (2001).
- [9] R. J. Walters, H. . Cotal, S. R. Messenger, E. a. Burke, S. J. Wojtczuk, H. B. Serreze, P. R. Sharps, M. L. Timmons, P. Iles, and Y. C. M. Yeh, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **50**, 305 (1998).
- [10] D. Elfiky, M. Yamaguchi, T. Sasaki, T. Takamoto, C. Morioka, M. Imaizumi, T. Ohshima, S. I. Sato, M. Elnawawy, T. Eldesoky, and A. Ghitas, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49**, 121201 (2010).
- [11] S. I. Sato, T. Ohshima, and M. Imaizumi, *J. Appl. Phys.*, **105**, 044504 (2009).
- [12] S. R. Messenger, E. A. Burke, R. J. Walters, J. H. Warner, G. P. Summers, and T. L. Morton, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **53**, 3771 (2006).
- [13] R. Szweda, *III-Vs Review*, **13**, 25 (2004).
- [14] M. Imaizumi, C. Morioka, T. Sumita, T. Ohshima and S. Okuda, *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (IEEE, New York, 2011) *IEEE (PVSC)*, **37**, 1579 (2011).
- [15] Y. Okuno, S. Okuda, T. Kojima, T. Oka, S. Kawakita, M. Imaizumi and H. Kusawake, *Phys. Status Solidi C*, **12**, 773 (2015).