

70 keV 電子線照射による InGaP および GaAs 太陽電池の性能劣化

PERFORMANCE DEGRADATION OF InGaP AND GaAs CELL BY RADIATION OF ELECTRON BEAMS AT 70 keV

奥野泰希^{#, A)}, 奥田修一^{B)}, 小嶋崇夫^{B)}, 岡喬^{B)}, 川北史郎^{C)}, 今泉充^{C)}, 舩分宏昌^{C)}

Yasuki Okuno^{#, A)}, Shuichi Okuda^{B)}, Takeo Kojima^{B)}, Takashi Oka^{B)},

Shirou Kawakita^{C)}, Mitsuru Imaizumi^{C)}, Hiroaki Kusawake^{C)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

^{B)} Osaka Prefecture University

^{C)} Japan Aerospace Exploration Agency

Abstract

Space solar cells are utilized as an electric power source such as a satellite, studied about degradation with radiation. 3-junction solar cells (3J) using a III-V compound semiconductor current is used, InGaP solar cells which is the top cell has a highest radiation resistance in 3J. To clarify the cause of this high radiation resistance, the mechanism of the radiation degradation in InGaP cells is investigated. In the previous study, InGaP cells was found to be degraded by irradiation with the electron beam at relatively low energies which are not able to induce the recoil of atoms in the cells. In order to understand the mechanism of the degradation, the samples of InGaP cells were irradiated with electron beams in vacuum under cooling with ice by using a Cockcroft-Walton type accelerator at Osaka Prefecture University. The energies and the fluences of the electron beams for irradiation were 70 keV and from 1×10^{14} to 3×10^{16} cm⁻², respectively. For comparison, it was also irradiated to GaAs solar cells. The measurements of light-current-voltage (LIV), electroluminescence (EL) and capacitance-voltage were carried out for the samples. After the irradiation the open-circuit voltage, the intensity of EL in InGaP cells were decreased. On the other hand, the carrier concentration is increased. The LIV characteristics of GaAs cells was degraded less than InGaP cells.

1. 緒言

宇宙太陽電池は人工衛星の電力源として利用されており、放射線による出力の低下の影響を少なくするために高い放射線耐性が求められている。現在III-V族化合物半導体を用いた3接合型太陽電池が主に宇宙太陽電池として利用されており、そのトップセルであるInGaPセルは、非常に高い放射線耐性を持っている[1,2]。InGaPセルの放射線劣化のメカニズムを明らかにし、宇宙太陽電池における高放射線耐性の向上への基礎的知見を得る研究が行われてきた[3]。

太陽電池の劣化は、イオン化による損傷ではなく、はじき出しといった非イオン化による損傷によって生じると考えられている。先行研究において、Non-Ionizing Energy Loss (NIEL) による計算でInGaP構成原子をはじき出さないと予測されたエネルギーの電子線をInGaPセルへ照射した場合、セルの解放電圧(V_{oc})が劣化することが明らかになった[4]。現在NIELは宇宙太陽電池の劣化予測にも使われるので、この予測外の劣化を明らかにすることは重要である。

V_{oc} を決めるファクターとしてとして考えられることは、太陽電池のシャント抵抗(R_{sh})、キャリア濃度および、ビルトインポテンシャル(V_{bi})がある。本

研究では、InGaPの電子線ははじき出しエネルギー閾値以下(100 keV以下)の電子線を、InGaPセルへ照射し、エレクトロルミネッセンス分光測定およびC-V測定を用いて、 V_{oc} の劣化要因を明らかにする。またGaAsセルのはじき出しエネルギー閾値の計算を行い、構成元素の原子のはじき出されない電子線の照射によってGaAsセルの劣化を比較として検証する。

2. 大阪府立大学コッククロフトウォルトン型電子線加速器システム

大阪府立大学放射線研究センターにあるコッククロフトウォルトン型(CW)電子線加速器システムは、試料への照射へ用いられた。実験時における本加速器システムの概要図をFig.1に示す。コッククロフトウォルトン加速器によって作られた電子線は、偏向電磁石によって90度に曲げられた後、試料室へ運ばれる。コイルは、電流電圧発生装置または、高周波電圧発生装置に接続されている。前者は、縦方向への調節および電子線の集束レンズの役割を持っており、後者は、電子線の走査の役割を持っている。この調整された電子線を試料照射部の試料台と同じ面積の蛍光版に照射し、蛍光版の発光を観察したものをFig.2に示す。蛍光塗料は、全面から均一に光を発光しており、これは電子線が非常に均一に試料へ照射されていることを示している。また試料の電

[#] gakkai@kasokuki.com

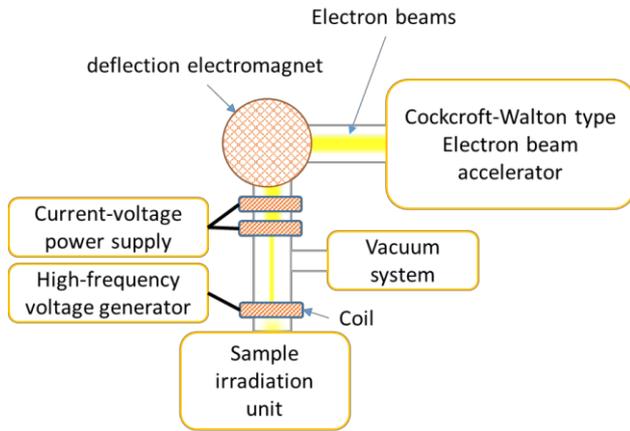


Figure 1: Schematic view of the CW accelerator system in OPU.

電子線フルエンスは、試料の傍に銅板をエレクトロメータに接続することにより測定される。蛍光塗料による観測の結果、電子線が試料台へ均一に照射されているので、試料と電子線フルエンス測定用の銅板がほとんど同じ線量率で照射されていると考えられる。

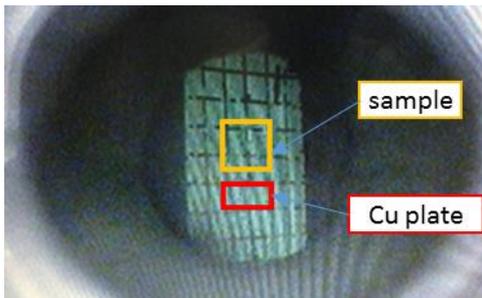


Figure 2: Schematic view of the CW accelerator system in OPU.

結晶中に電子線を照射した場合、はじき出しによる一次欠陥が生成される。その後、熱などによる欠陥の移動によって二次欠陥などが生成される。この二次欠陥による影響は、温度および照射から計測までの時間が大きく関わっている。そのため試料照射部は、宇宙太陽電池の電子線照射試験用に最適化されており、その概略図を Fig.3 に示す。試料照射部は真空システムとつながっており、加速器の運転時には $\sim 10^{-5}$ Pa になる。試料に照射される電子線のエネルギーは、60 - 600 keV の範囲で調整可能である。側面には窓が2か所設置されており、試料への光学的な測定が可能である。試料横には、銅板(10×5 mm)が設置されており、エレクトロメータに接続されている。このエレクトロメータの数値を解析することにより試料へ照射されたおよその電子線フルエンスは、換算されている。温度制御に関しては、冷

却液やヒーターを用いることによって $-196 - 300$ °C の範囲で調整することが可能である。これらのシステムの構築により、照射直後に試料をシステム内に設置したまま光学および電氣的測定を行うことが可能であるため、二次欠陥の影響をほとんど受けずに、デバイスの評価を行うことが可能である。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。

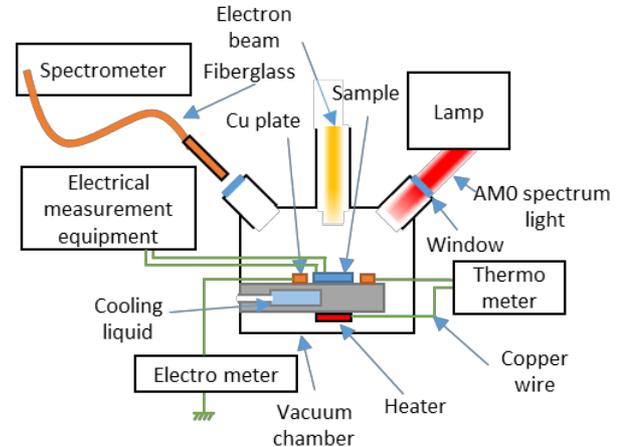


Figure 3: Schematic view of sample irradiation unit.

3. GaAs のはじき出しエネルギーの算出

電子線がある物質に照射されるとエネルギーのほとんどは、その物質を構成する原子の電子を励起することに費やされるが、一部は原子核と弾性的に衝突してエネルギーをターゲットである原子核に渡し、その原子をはじき出すことに費やされる[5]。電子線の質量を M_e および光速を c とすると、静止エネルギー $M_e c^2$ は 0.511 MeV であるから、原子をはじき出すエネルギーを持つ電子線は相対論的に扱う必要がある。そのため電子線の運動エネルギー p および運動エネルギー E は、

$$p = \frac{M_e v}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1)$$

$$E = \frac{M_e c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (2)$$

と表される。ここで v は電子線の速度を表している。質量 M_T のターゲット原子へ電子線が Fig.4 のように弾性衝突した場合、角度 θ の散乱に対してターゲット原子に渡されるエネルギー E_p は、

$$E_p = \frac{\Delta p}{2M_T} \quad (3)$$

$M_e \ll M_T$ より、

$$E_p = \frac{2p^2}{M_T} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

(1)および(2)式を用いて、

$$E_p = \frac{2M_e}{M_T} \cdot \frac{1}{M_e c^2} (E + 2M_e c^2) E \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

となる。従って $\theta = \pi$ の時、1次はじき出し原子の付与されるエネルギーは、最大となりそのエネルギーは、

$$E_{p,max} = \frac{2E(E+2M_e c^2)}{M_T c^2} \quad (6)$$

となる。

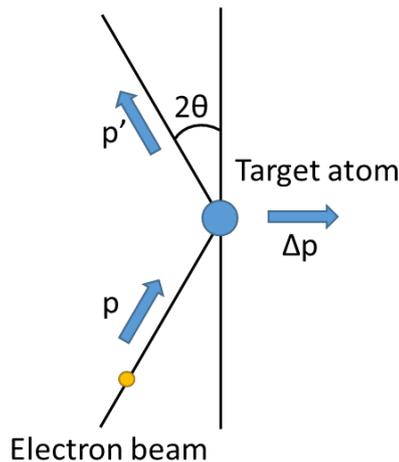


Figure 4: Elastic collision of the target atom and the electron.

$E_{p,max}$ がはじき出し閾値エネルギー E_d より大きい場合、原子がもっていた位置からはじき出されると考えられている。 $E_{p,max}=E_d$ の時、(6)式の解より、電子線が原子をはじき出す最小のエネルギー E_{min} は、

$$E_{min} = \frac{\sqrt{4(M_e c^2)^2 + 2M_T c^2 E_d} - 2M_e c^2}{2} \quad (7)$$

と表される。

GaAs の場合、電子線に対する E_d は10 eV程度であることが知られている[6]。(7)式より Ga および As 原子を電子線がはじき出す最小エネルギーは、それぞれ約 255 keV および 271 keV である。そのため、ほとんどはじき出し損傷が起きないと考えられる 70 keV の電子線を照射した場合における GaAs セルの劣化について調査を行う。

4. 実験方法

➤ InGaP セルおよび GaAs セル

InGaP セルに関しては Ref.3 に使われている試料と同様のものが用いられた。GaAs セルの性能を Tab.1 に示す。短絡電流(I_{sc})、解放電圧(V_{oc})、最大電力(P_M)、Pm 電流(I_{PM})、Pm 電圧(V_{PM})、フィルファクタ(FF)、セル面積はそれぞれ、122 mA、0.95 V、83.57

mW、112.70 mA、0.7418 V、72.09、4 cm²であった。

Table 1: Performances of GaAs solar cell

I_{sc} [mA]	122.60
V_{oc} [V]	0.95
P_M [mW]	83.57
I_{PM} [mA]	112.70
V_{PM} [V]	0.7418
FF [%]	72.09
A [cm ²]	4

➤ 電子線照射試験

CW 加速器を用いて、70 keV の電子線を試料へ照射した。電子線フルエンスは、 1×10^{14} - 3×10^{16} cm⁻²であった。試料は、氷によって冷却された。試料の照射中、LIV 測定、EL 分光分析および C-V 測定が試料の評価として行われた。

➤ 光電流電圧(LIV)測定

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)が測定器として、用いられた。光源は、キセノンランプ(KXL-150F, ワコム電創)および AM0 フィルター(F049, ワコム電創)を用いて作製され、Fig.3 のように取り付けられた。

➤ エレクトロルミネッセンス(EL)分光分析

分光器(MAYA2000PRO, Ocean Optics 社製)を用いて測定した。ファイバー(P400-2-VIS-NIR, Ocean Optics 社製)は、Fig.3 のように設置された。電源は、LIV 測定で用いたものを使用した。

➤ キャパシタンス-電圧(C-V)測定

LCR メーター(4284A, Agilent 社製)によって C-V 測定を行った。測定条件については、測定周波数、交流電源電圧、バイアス電圧およびバイアス電圧ステップが、それぞれ 100 kHz、50 mV、-1000-1500 mV および 50 mV であった。

5. 結果および考察

70 keV 電子線を InGaP セルへ照射した際の、InGaP セルおよび GaAs セル LIV 測定の結果をそれぞれ Fig.5 および Fig.6 へ示す。縦軸および横軸は、電流および電圧である。InGaP セルの LIV 曲線の電子線フルエンスは、Begin of life (BOL)、 3×10^{14} 、 3×10^{15} および 3×10^{16} cm⁻²である。GaAs は BOL および、 5×10^{16} cm⁻²である。InGaP セルへの 70 keV の電子線照射では、 I_{sc} の劣化がなく、 V_{oc} および P_M の劣化が起きることが明らかになった。この劣化の特徴は、60 keV の電子線を InGaP セルへ照射した場合と同様の劣化である。 V_{oc} の劣化の要因の一つである R_{SH} は、IV 曲線における I_{sc} 付近の傾きの逆数で表される。各フルエンスにおける R_{SH} の変化を Fig.7 へ示す。縦軸および横軸は、それぞれ R_{SH} および電子線

フルエンスである。 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ より小さいフルエンスでは、ほとんど R_{SH} の減少がなかった。 V_{oc} は、フルエンスの増加につれて劣化しており、 R_{SH} の減少していない $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 以下でも劣化していた。しかし $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 以上のフルエンスでは、 R_{SH} の低下が起きており、 V_{oc} の劣化を引き起こした要因の一つであると考えられる。

GaAs の LIV 曲線については、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射において、ほとんど変化していないことが明らかになった。これは、InGaP に対して GaAs のはじき出し閾値エネルギーが、100 keV 程度大きいことが、70 keV 電子線照射におけるセルの劣化に関係していることが考えられる。また 1 MeV 電子線照射の場合、InGaP セルは GaAs セルに比べて劣化しないことが知られているが[7]、70 keV の電子線照射に対しては、GaAs セルの方が、放射線耐性が高いことが明らかになった。

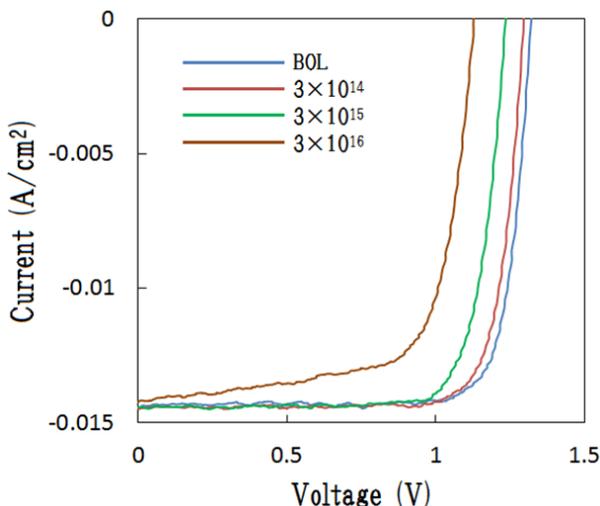


Figure 5: LIV characteristics of InGaP cell under the AM0 condition before and after electron beam irradiation at 70 keV.

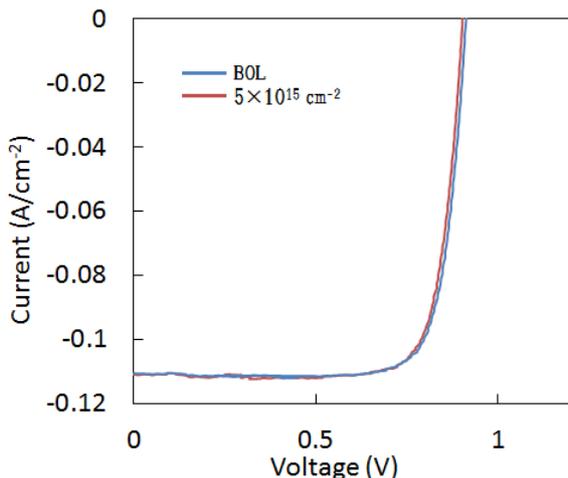


Figure 6: LIV characteristics of GaAs cell under the AM0 condition before and after electron beams irradiation at 70 keV.

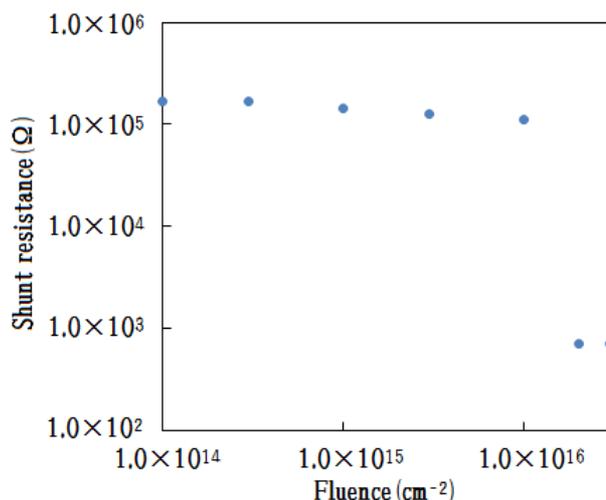


Figure 7: R_{SH} of InGaP cell before and after electron beam irradiation at 70 keV.

V_{oc} の劣化は、キャリア濃度またはビルトインポテンシャルの低下が考えられる。C-V 測定において、 $1/C^2$ -V プロットは、Mott-Schottky プロットと呼ばれ、以下の式より接合からの距離に対するキャリア濃度 (N_c) およびビルトインポテンシャル (V_{bi}) を計算することが可能である。

$$N_c(W) = \frac{2}{qK_S\epsilon_0A^2} \left[\frac{d(1/C^2)}{dV} \right] \quad (8)$$

$$\text{ここで } W = \frac{K_S\epsilon_0A}{c}$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{qN_cK_S\epsilon_0A^2} (V_{bi} - V) \quad (9)$$

ここで q 、 K_S 、 ϵ_0 および A は、それぞれ電荷量、半導体の比誘電率、真空の誘電率および太陽電池セルの表面積を意味している。

(8)式より InGaP セルのキャリア濃度を算出した結果を Fig.8 に示す。縦軸および横軸は、キャリア濃度および接合からの距離である。フルエンスは、BOL から $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ である。この結果より $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ までの電子線照射では、InGaP セルのキャリア濃度が、増加していることが明らかになった。電子線照射によりキャリア濃度の増加することは、InGaP セル内部の多数キャリアを増加させる欠陥が生成されたことになる。多数キャリアの濃度の低下により、キャリアが枯渇した場合、 V_{oc} の低下の要因になるが、70 keV 電子線照射では、低下の要因が、キャリア濃度の低下によるものではないことが明らかになった。

V_{bi} は、 $1/C^2$ -V プロットにおける $1/C^2=0$ の時の V の値で表される。C-V 測定より計算された各フルエンスにおける InGaP セルのビルトインポテンシャルを Fig.9 へ示す。この結果より、70 keV 電子線照射によってビルトインポテンシャルはほとんど変化していないことが明らかになった。そのため V_{oc} の劣化に対してビルトインポテンシャルは、ほとん

ど影響していないと考えられる。

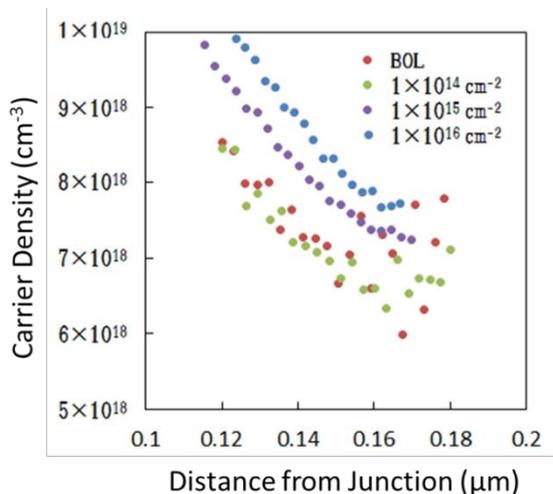


Figure 8: Carrier profile of the InGaP solar cell after an electron beam irradiation at 70 keV.

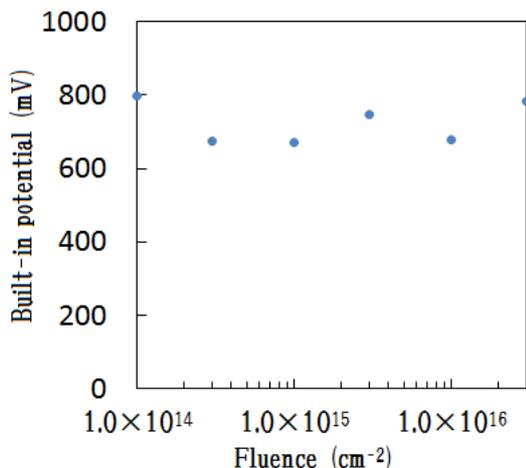


Figure 9: V_{bi} of InGaP cell after an electron beam irradiation at 70 keV.

InGaP セルの EL の分光分析の結果を Fig.10 に示す。縦軸および横軸は、それぞれ光子のカウント数および波長である。またフルエンスは、 3×10^{14} – $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ であった。InGaP の EL バンド端発光をすることが知られており [8]、EL のピークは約 660 nm であることから、InGaP のバンドギャップ(約 1.9 eV)とほぼ一致している。この結果より EL の発光強度は、電子線照射によって低下し、 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ で、分光器検出できないことが明らかになった。EL の発光強度の低下は、欠陥によってバンドに非発光再結合順位が生成されたことを意味しており、NIEL によるはじき出しエネルギー以下の電子線照射によって深い準位の結果が導入されたと考えられる。また発光ピークが長波長側へシフトしているが、これは、試料温度が電子線照射によって高くなり EL の温度依存性によって起きたものと考えられる。

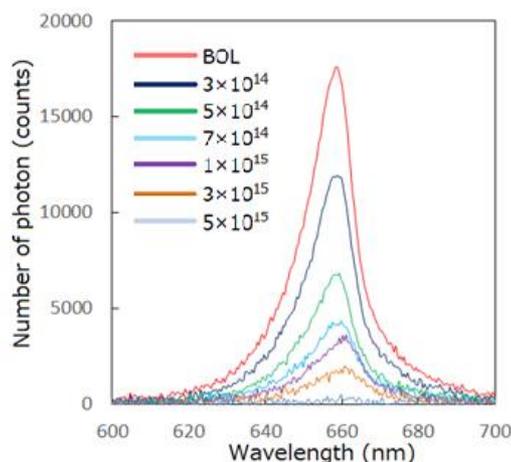


Figure 10: EL of InGaP cell before and after an electron beam irradiation at 70 keV.

6. まとめ

InGaP セルおよび GaAs セルに 70 keV 電子線照射を行った。GaAs セルの LIV 特性は、ほとんど劣化しなかった。InGaP セルは、 V_{oc} の劣化が確認された。この V_{oc} 劣化の要因と考えられるシャント抵抗、キャリア濃度、ビルトインポテンシャルを計測した。その結果、 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 以上の場合、シャント抵抗の低下が要因の一つであることが明らかになった。また 70 keV 電子線照射によってキャリア濃度が増加することが明らかになった。EL の分光分析では、InGaP セルの発光強度が低下したことから、深い準位の欠陥が生成され、キャリアの非発光再結合過程が増加したと考えられる。今後、電子ライナックのビームの照射も計画している。

本研究の一部は、H27 年度加速器科学総合支援事業「大学等連携支援事業」によって行われた。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi and S. Wakamatsu, Proceedings of the 25th IEEE Photo-voltaic Specialists Conference (IEEE, New York), 9 (1996).
- [2] M. Yamaguchi, T. Okuda, and S. J. Taylor, Appl. Phys. Lett. **70**, 16 (1997).
- [3] M. Imaizumi, C. Morioka, T. Sumita, T. Ohshima and S. Okuda, IEEE (PVSC) **37**, 1579 (2011).
- [4] Yasuki Okuno, Shuichi Okuda, Takeo Kojima, Takashi Oka, Shirou Kawakita, Mitsuru Imaizumi and Hiroaki Kusawake, Phys. Status Solidi C **12**, 773 (2015).
- [5] Ishino Shiori, 東京大学出版会, 照射損傷 (原子力工学シリーズ 8) (1979).
- [6] I. Jun, W. Kim and R. Evans, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **56**, 3229 (2009).
- [7] M. Yamaguchi, T. Okuda, Stephen J. Taylor, and T. Takamoto, E. Ikeda and H. Kurita, Applied Physics Letters **70**, 1566 (1997).
- [8] M. Zazoui and J. C. Bourgoin, Applied Physics Letters **80**, 4455 (2002).