

InGaP 太陽電池の低エネルギー電子線照射効果

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

^{A)} 大阪府立大学

^{B)} JAXA

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いる。宇宙環境は、宇宙放射線、真空、無重力および激しい温度変化など過酷な環境である。その中でも宇宙放射線は、太陽電池の性能を劣化させる主な要因である。太陽電池が劣化すると人工衛星に供給される電力が少なくなる。そのため太陽電池の劣化を予測し、人工衛星の運用時間を決定するために様々な太陽電池の照射試験がこれまでに行われてきた[1]。

3 接合型太陽電池は、現在宇宙太陽電池として用いられている。この太陽電池は、InGaP トップサブセル、GaAs ミッドサブセル、Ge ボトムサブセルの3つのセルで構成されており、高効率、軽量および高放射線耐性といった特徴を持っている[2]。これらのセルは、III-V 族化合物半導体であり、一般的に動作領域が浅いこと、直接遷移型であるため少数キャリア拡散長が短いことが高放射線耐性である理由として考えられている。また InGaP セルは、これらのセルの中でも最も放射線耐性が高いとされている。そのため現在の3接合型太陽電池の高放射線耐性を超える新しい太陽電池を提案するために、InGaP 太陽電池の放射線劣化機構と回復現象等の解明が行われてきた[3]。

InGaP 太陽電池は、多元素化合物であり、放射線照射による劣化機構は非常に複雑なものである。従来放射線耐性の照射試験として用いられる線源は、1 MeV 程度の電子線や 30 keV 程度の陽子線である。しかしながら、これらの線源を照射した場合、結果的にセル内部で複数種の欠陥が同時に生じるため欠陥評価は容易ではない。

InGaP 構成元素の電子線 NIEL を計算したところ、各元素のはじき出しエネルギー閾値がことなっていることが明らかになった[3]。P、Ga および In のエネルギー閾値はそれぞれ、100、300 および 320 keV 程度である。この結果よると 320 keV 程度以上の電子線を InGaP 太陽電池に照射した場合、In、Ga および P が同時にはじき出される。一方 100-300 keV 程度の電子線を照射した場合、P のみのはじき出される。そのため低エネルギー（600 keV 以下）電子線を用いることによって軽い元素からはじき出すことができる。本研究では、各元素のはじき出しエネルギー閾値を超えた電子線を照射したときに、太陽電池の性能に変化があることを調査することによって、InGaP 太陽電池の劣化機構を調査する。

2、実験

図1に照射試験システムを示す。加速器はコッククロフトウォルトン型電子線加速器である。この加速器で加速された電子は、エネルギーの均一性のため、および電子線以外の粒子線を取り除くために偏向コイルによって直角に曲げられる。曲げられた電子線は、試料への均一な電子線照射のために収束用コイルで絞られた後、スキャンコイルで上下左右

にスキャンされ試料へと到達する。試料台には、温度計、フルーエンスモニターが設置されており各種特性をモニターすることができる。フルーエンスモニターは $5 \times 10 \text{ mm}$ の銅板であり、試料横に設置されている。また試料台裏に冷却ラインおよび加熱ヒーターが設置されており、試料の温度を $-196 - +300 \text{ }^\circ\text{C}$ の範囲で変化させることが可能である。試料にはプローブを設置可能であり、照射した状態で電氣的測定を行うことができる。また試料横の窓から光学的測定も行うことが可能である。

本研究では、InGaP 太陽電池 ($10 \times 10 \text{ mm}$) へ、60、150 および 400 keV の電子線を照射した。フルーエンスは、 $3 \times 10^{14} - 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ であった。温度および気圧は、それぞれ室温および $1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 以下であった。AM0 ソーラーシミュレーターを用いて光電流電圧 (LIV) 特性の測定を行い、InGaP 太陽電池は評価された。この測定は、照射後すぐに試料台に設置したまま行われた。また電子線照射の他に大阪府立大学大規模 γ 線照射施設を用いた InGaP 太陽電池への γ 線照射も行った。試料温度、線量率はそれぞれ室温および 3.7 kGy/h であった。

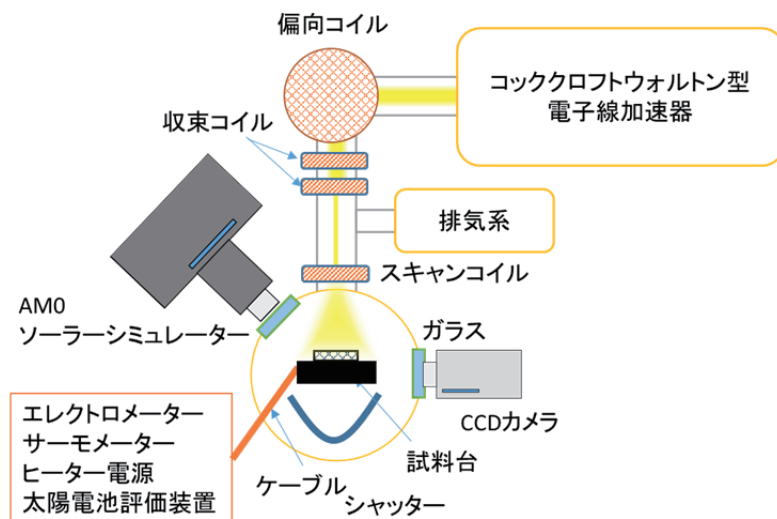


図 1. 大阪府立大学低エネルギー電子線照射システム

3、結果および考察

図 2 に 150 keV の電子線照射における InGaP 太陽電池の LIV 特性を示す。この結果は、150keV の電子線を照射が、InGaP 太陽電池の開放電圧 (I_{sc})、短絡電流 (V_{oc}) および最大電力 (P_{MAX}) の低下を引き起こしていることを示している。60、150 および 400 keV における LIV 特性の I_{sc} および V_{oc} の保存率 (Remaining Factor) をそれぞれ図 3 の (a) および (b) に示す。VOC の保存率は、電子線エネルギーが増加すると低下することが明らかになった。また 60 keV の電子線照射においても劣化することが明らかになった。はじき出しエネルギーの計算では、100 keV 以下の電子線で InGaP 太陽電池においてははじき出しが発生しないと

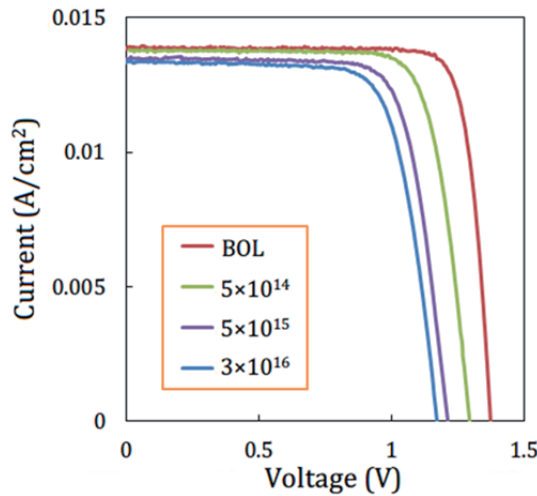


図2. 150 keV の電子線照射における InGaP 太陽電池の LIV 特性

縦軸および横軸は、それぞれ電流(A/cm²)と電圧(V)である。光源は AM0 ソーラーシミュレーターを使用した。Beginning of Life(BOL)は照射前の InGaP の LIV 特性である。またそれぞれの LIV 特性はフルエンス 5×10¹⁴、5×10¹⁵ および 3×10¹⁶ cm⁻² における LIV 特性を示している。

考えられているため、照射欠陥が生成されず劣化が起きないと予測されていた。そのためこの結果は予想に反したものである。Iscの保存率は、各エネルギーによって低下に違いが見られた。60 keV の場合、Iscは、各フルエンスでほとんど劣化していない。150 keV の場合は、60 keV と比較すると劣化していることが明らかである。150 keV では 60 keV と

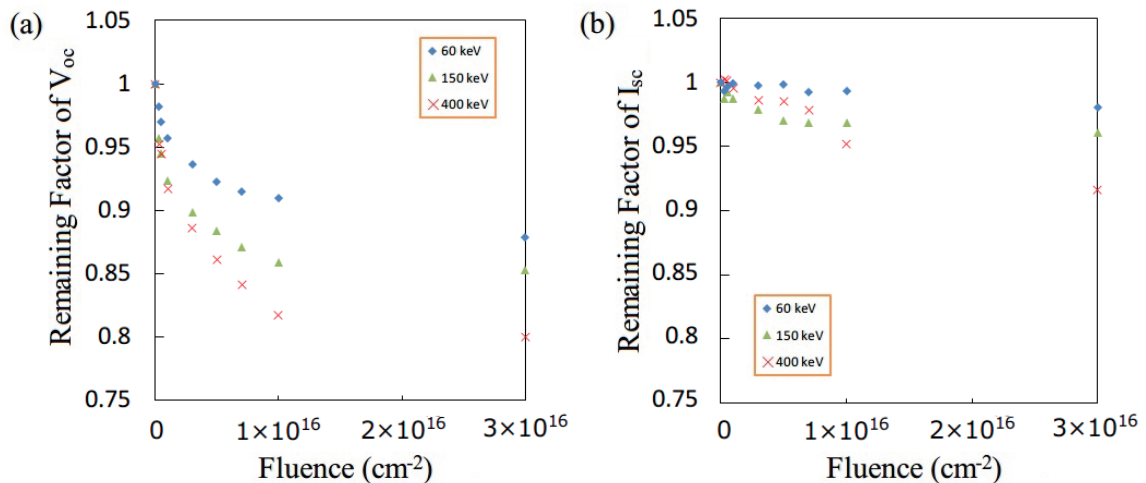


図3. 各電子線エネルギーにおける Voc および Isc の保存率

(a)および(b)はそれぞれ VOC および ISC を示している。電子線エネルギーは、60、150 および 400keV である。縦軸および横軸は、それぞれ保存率およびフルエンスを示している

比較すると、Pのはじき出しが発生すると考えられる。そのためPのはじき出しによって生成された欠陥が I_{sc} を低下させる要因であると考えられる。400 keVの場合、ISCの保存率はフルーエンス $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 以下では150 keVよりも低下していない。400 keVではPの欠陥も生成されているので、この結果は I_{sc} の低下が400 keVの電子線照射によって抑制された可能性があることを示している。400 keVでは150 keVと比較するとPのはじき出しに加えてGaおよびInのはじき出しが発生していると考えられている。またInのはじき出しによる欠陥は、アクセプター順位を生成する。そのためGaまたはInのはじき出しによって生成された欠陥がこの I_{sc} 低下の抑制に関与したと考えられる。

γ 線照射によるInGaP太陽電池のLIV特性の変化を図4に示す。この結果は、 γ 線照射によって V_{oc} および P_{MAX} が劣化したことを示している。 γ 線照射の場合、電子線と比較すると原子との衝突によるのはじき出しは生じない。そのため γ 線による太陽電池の損傷は、イオン化損傷によるものと考えられる。また60 keVの電子線を照射したときにも V_{oc} および P_{MAX} が劣化しているため、InGaP太陽電池は、非イオン化損傷だけでなくイオン化損傷によって性能が劣化する可能性がある。

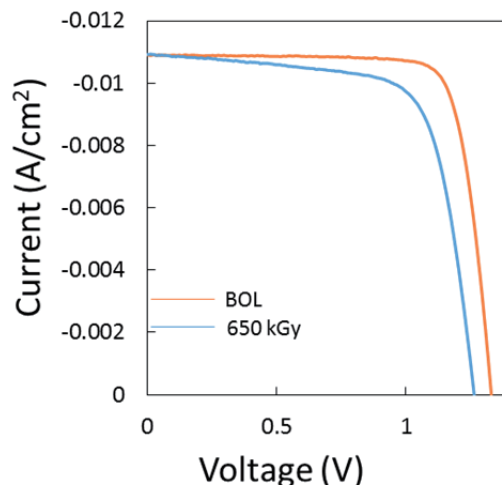


図4. γ 線照射におけるLIV曲線の変化

縦軸および横軸は、電流(A/cm^2)および電圧(V)である。BOLおよび650 kGyの γ 線照射時のLIV特性が示されている。

4、まとめ

InGaP太陽電池の各元素におけるのはじき出しエネルギー閾値に対して電子線を照射した場合、 I_{sc} の保存率の低下に違いが見られた。Pのはじき出しが生じるエネルギーの電子線を照射した場合、 I_{sc} は低下することが明らかになった。Pに加えてInおよびGaのはじき出しが生じるエネルギーの電子線をフルーエンスが $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 以下で照射した場合、Pのみがはじき出されるエネルギーの電子線を照射したときに比べて、 I_{sc} の保存率の低下が

抑制されることが明らかになった。また 60 keV の電子線を照射した場合、はじき出しが生じないと考えられているが、 V_{oc} および P_{MAX} の劣化が確認された。また 60 keV の LIV 特性の変化は γ 線照射時の変化と類似している。そのため、60 keV での劣化は、イオン化損傷によるものと考えられる。

本研究の一部は、平成 25 年度 KEK 大学等連携支援事業の支援により行われた。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi Solar, Energy Materials & Solar Cells **68**, 31 (2001).
- [2] S.Sato, T.Ohshima and M. Imaizumi, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **105**, 044504 (2009).
- [3] M. Imaizumi, C. Morioka¹, T. Sumita¹, T. Ohshima and S. Okuda, IEEE (PVSC) **37**, 1579 (2011).