

小型軽量パワーシステム

III-V 族化合物太陽電池の耐放射線性に関する研究 Study on Radiation Hardness of III-V Compound Solar Cells

エレクトロニクス技術グループ (Spacecraft Electrical Engineering Group)

今泉 充, 住田泰史, 岐部公一

Mitsuru Imaizumi, Chiharu Morioka and Koichi Kibe

Abstract

Triple-junction (3J) space solar cells were irradiated with 10MeV protons at 175 K. The electrical performance of the 3J solar cells was measured *in situ* under AM0-light illuminated condition at low temperature. The electrical performance of the solar cells decreases with increasing proton fluence, and at a proton fluence of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, short-circuit current (Isc) and open-circuit voltage (Voc) become approximately 87 and 80 % of the initial values, respectively, indicating higher radiation resistance compared to Si solar cells. No significant difference in the degradation behavior of the electrical performance is observed between low temperature and RT. The influences of light-illumination and current-injection on the electrical properties were studied at low temperature to minimize the thermal annealing effect. For AM0 light illumination, the change in the electrical properties of the 3J solar cells under AM0 illumination was investigated at 175 K. The electrical performance does not change by the illumination for 370 min. On the other hand, by current injection at 155 K, a significant recovery of the electrical performance of proton-irradiated 3J solar cells is observed. At current injection times of 4500 sec, a 10 % recovery of Isc and Voc to the values after irradiation for the fluence of $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ is observed.

1. はじめに

近年, InGaP/GaAs/Ge構造3接合太陽電池(3Jセル)が宇宙用太陽電池の主流となりつつある。3Jセルは高効率と高耐放射線性を併せ持った高性能な太陽電池である[1, 2]。しかし, その複雑な構造と動作原理ゆえ, その放射線劣化特性はあまり良く理解されていない。3Jセルの模式的断面構造を図1に示す。一方, 3Jセルは非常に高価であるため, 太陽電池パドルなどの設計ではマージンを可能な限り少なくしたいという要求がある。そのためには, より正確で詳細な3Jセルの寿命末期(EOL)出力の予測法確立が求められる。この予測法確立には, 3Jセルの放射線に対する劣化挙動を把握しそのメカニズムを解明する必要がある。

3Jセルが高い耐放射線性を有するのは, その3種類の構成サブセル, すなわち InGaP トップセル, GaAs ミドルセル, Ge ボトムセルのうちで最も耐放射線性に優れる InGaP トップセルが, 全体の耐放射線性を律速するように構造設計されているからである。InGaP 太陽電池が耐放射線性に優れる理由のひとつに, 放射線劣化に対する比較的大きな自己アニール効果があることが挙げられている。また, この効果は太陽電池に電流を流すことによって促進されることが報告されている[3, 4]。さらに, この効果は太陽電池の温度に依存すると予測される。

我々は, 3Jセルの放射線劣化挙動の解明を目的に, 3Jセルの放射線損傷・劣化からの回復効果について,

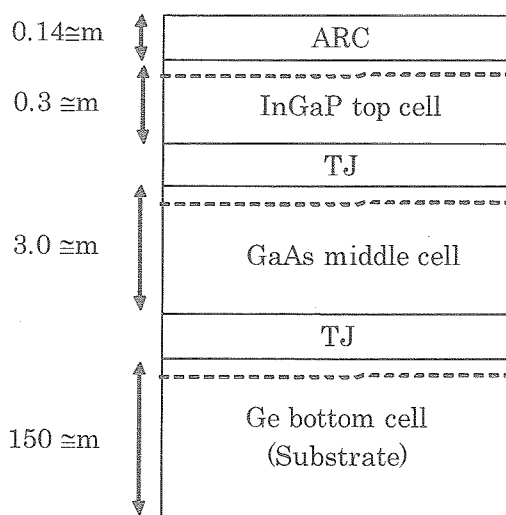


Fig. 1 Schematic cross-section of a 3J solar cell. "TJ" and "ARC" stand for "tunnel junction" and "anti-reflection coating", respectively.

その温度と電流注入の影響を明らかにすべく低温での放射線照射と劣化回復の評価を実施した。なお、本研究は原子力研究所高崎研究所(担当:極限材料研究室 伊藤久義室長, 大島 武研究員)との共同研究として実施した。

2. 研究の概要

照射試験に供した3Jセルは、シャープ製の宇宙用信頼性保証認定太陽電池セル:JAXA-QTS-2130-501 で、サイズは2cm×2cmである。放射線照射前の初期(BOL:Beginnig of Life)典型出力値は、開放電圧(Voc) 2.6V, 短絡電流(Isc)65mA, 変換効率(η)27%である。

この3Jセルに対し、BOL出力特性を測定後、原研高崎イオン照射施設TIARA内のサイクロトロン照射設備のひとつである太陽電池照射チャンバにて陽子線(H⁺)を照射した。3Jセルはチャンバ内の冷却ステージ上にマウントした。このステージはヘリウム冷却機に接続されており、その冷却到達温度は約 100K である。このチャンバには石英窓が装着されており AM0 擬似太陽光が外部から被試験太陽電池に照射可能である。従って、陽子線の照射中に電気出力のその場測定ができる。さらに、ステージ温度およびセル温度も測定可能となっている。なお、このセル温度については、冷却ステージ上熱電対を接着し、その指示温度とした。陽子線は3Jセルに対して垂直方向から入射され、擬似太陽光は太陽電池面の鉛直方向から 60° の方向より照射される。この照射・測定チャンバの模式図を図2に示す。

放射線照射試験における陽子のエネルギーは 10MeV とした。このエネルギーの陽子は3Jセル(厚さ 150 μ m)を通過するため、太陽電池表面から裏面に亘り深さ方向に均一密度の放射線欠陥を発生させる。また、太陽電池面への陽子の均一照射のため、まず陽子ビームを焦点化し、これを縦横両方向に走査して(走査領域:縦 6cm×横 10cm)、この領域内に太陽電池を設置した。さらに、陽子線照射中は擬似太陽光を照射しなかった。これは、光照射によって太陽電池内に電流が発生し、これが先の電流注入効果となって放射線損傷に対する回復を起こすことを避けるためと、光による温度上昇(これも回復の要因となりうる)を避けるためである。照射中の試料温度は 175K である。

陽子線照射終了後の3Jセルに対し、光による放射線損傷の回復効果を観察するためにソーラーシミュレータの擬似太陽光を照射した。このときセルは短絡し、発生した電流がセル内を流れるようにした。これとは別に、少数キャリア注入による回復効果を観察するため、同じく陽子線照射した3Jセルに対して電流注入を実施した。注入した電流密度は約 0.5A/cm²である。またこのとき、発生したジュール熱による回復効果を避けるため、試料温度は 155K を超えないように保った。

3. 成果の概要

(1) 低温における劣化特性

図3は、低温(175K)で 10MeV 陽子線を照射したときの、3Jセルの短絡電流(Isc)、開放電圧(Voc)および最大電力(Pmax)の劣化傾向を示している(黒記号)。横軸は照射量(フルエンス)、縦軸は初期の値を 1 として規格化した保存率で表している。また、比較のため、図中に室温(RT)にて照射を行った場合の劣化傾向を示

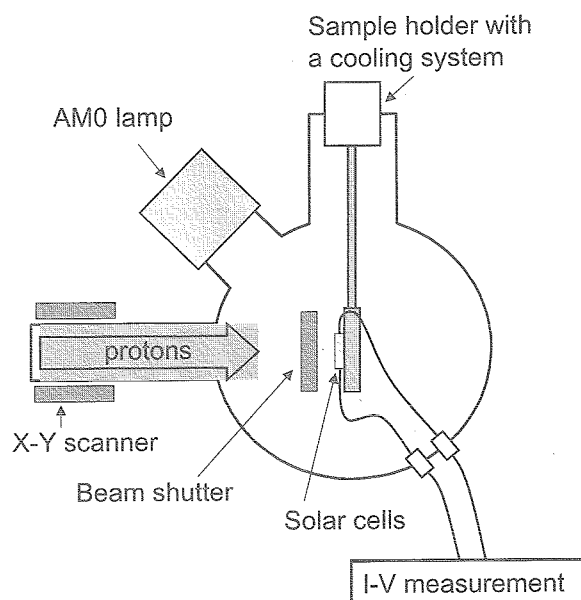


Fig. 2 Schematic configuration of the vacuum chamber for low-temperature proton irradiation

す(白記号). この結果から, 3 J セルの陽子線劣化では, 175K と RT では有意な差は認められない.

3Jセルは, 電気的にはトップ, ミドル, ボトム の3つのサブセルが直列に接続されている. 従って, 3Jセルの電圧出力はその3つのサブセルの電圧出力の和で表され, また電流出力は3つのサブセルの電流出力のうち一番低い値に制限される. 放射線損傷による出力劣化を考えた場合, 電流出力については, どれかひとつのサブセルが大きな劣化(低下)を起こすと全体の電流出力はそれに律速され大きな低下を示す. 一方, 電圧出力についてはそれぞれの劣化(低下)は和となって表れる. 3つのサブセルのうち最も耐放射線性に優れるのは InGaP トップセルである[5]. このため3 J セルではトップセルが電流制限するように設計されている. よって, 図3に表れている I_{sc} の劣化は, InGaP トップセルの I_{sc} の劣化を示していると判断される. 低温と室温で I_{sc} の劣化に差が無いことから, この温度差では, 陽子線照射試験中の温度による InGaP セルの電流出力における回復効果は無視できる程度といえる.

(2) 光照射による回復効果

3 J セルに対し, 175K にて 10MeV 陽子線をフルエンス $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 照射した後, 続いて光照射試験を行った. 試験開始時の I_{sc} , V_{oc} の保存率はいずれも陽子線照射前の値に対して約80%である. ソーラーシミュレータからの AM0 擬似太陽光(強度 1sun)を3Jセルに対して照射した. またこのとき温度はそのまま 175K に保った. 図4は, 光照射を370分間続けたときの, I_{sc} および V_{oc} の照射直後の値に対する相対値である. 全く変化(回復)は見られない. 光回復に関しては, その強度および波長スペクトルにも依存すると考えられるが, この結果は, 少なくとも通常の太陽電池の動作環境においては, 陽子線劣化に対する光照射による有意な回復はないことを示している.

(3) 電流注入による回復効果

先の光照射回復試験に続き, 電流注入による回復試験を行った. 3Jセルに外部からバイアスを印加して電流密度約 0.5A/cm^2 で電流を注入し, I_{sc} および V_{oc} を測定しその変化をみた. 結果を図5に示す. 縦軸は陽子線照射直後の値に対する相対値で表している. I_{sc} , V_{oc} 共に電流注入によって回復を示し, 注入時間 4500 秒にて相対値は約 1.10 となっている. これは初期値(陽子線照射前の値)の約 90%に相当する.

先述したように, InGaP 太陽電池は電流注入によって放射線劣化が回復することが知られている. これより, ここで見られる3 J セルの回復は, InGaP トップセルの回復によるものである可能性が大きい. これを確認するため

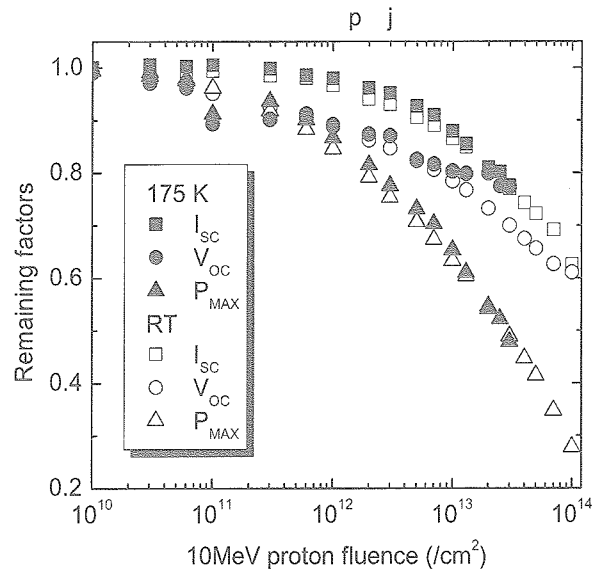


Fig. 3 10 MeV proton fluence dependence of I_{sc} , V_{oc} and P_{max} . The irradiation of protons and I-V measurement were performed at 175 K (closed symbols). For comparison, the results for solar cells irradiated at RT are also plotted (open symbols).

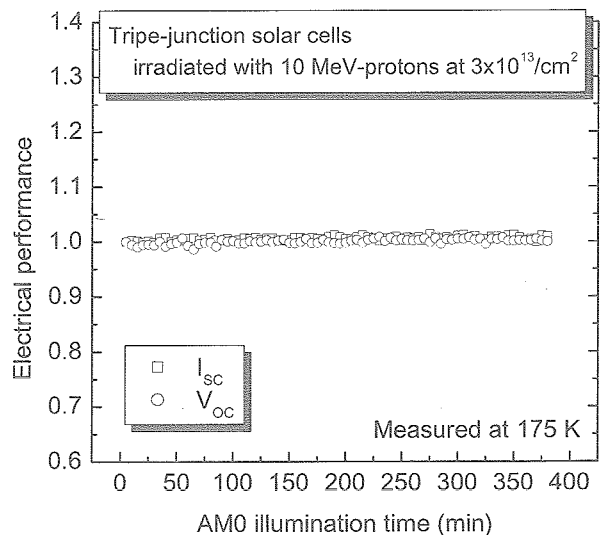


Fig. 4 Change in I_{sc} and V_{oc} of a 3J solar cell irradiated with 10MeV protons as a function of illumination time by an AM0 solar simulator. The illumination of AM0 light and I-V measurement were performed at 175 K.

には、またさらに各サブセルの回復効果を定量的に把握するには、サブセルの単一接合セルを準備して同様の実験を実施する必要がある。

4. まとめ

本研究により、低温における3接合太陽電池の陽子線劣化特性を把握した。また、その光照射、電流注入による回復特性について、独立して評価した。その結果、陽子線照射損傷に対し、光照射では回復効果が認められないこと、電流注入では電流、電圧両出力について回復が見られることを確認した。今後温度による回復効果を検討する必要がある。さらに、これらの回復効果を定量的に把握して3接合太陽電池の寿命末期出力特性の予測に生かすには、InGaP トップセル、GaAs ミドルセル、Ge ボトムセルの単一接合太陽電池を作製して同様な実験を行う必要がある。

参考文献

- [1] R. R. King, C. M. Fezer, K. M. Edmondson, D.C. Law, P.C. Colter, H. L. Cotal, R. A. Sherif, H. Yoon, T. Issiki, D. D. Krut, G. S. Kinsey, J. H. Ermer, S. Kurtz, T. Moriarty, J. Kiehl, K. Emery, W. K. Metzger, R. K. Ahrenkiel, and N. H. karam, Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3587 (Paris, 2004).
- [2] 1) M. A. Stan, D. Aiken, P. Sharps, J. Hills, B. Clevenger, and N. S. Fatemi, Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 662 (Osaka, 2003).
- [3] M. Yamaguchi, C. Uemura, and A. Yamamoto, *J. Appl. Phys.*, **55**, 1429 (1984).
- [4] M. Yamaguchi, K. Ando, A. Yamamoto and C. Uemura, *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 432 (1984).
- [5] 今泉 充, 住田泰史, 桑島三郎, 平成 15 年度宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部宇宙領域研究成果報告書, 2-21 (2004)

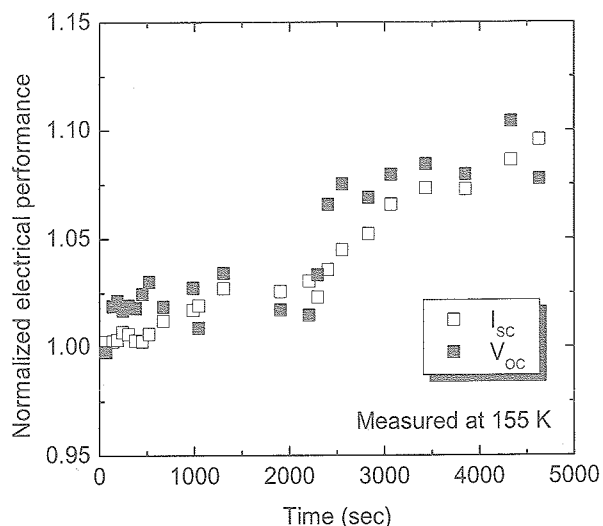


Fig. 5 Change in I_{sc} and V_{oc} of a 10MeV proton irradiated 3J solar cell as a function of current injection time. Current density was about $0.5A/cm^2$. The current injection and I-V measurement were performed at 155 K.