

## 薄膜太陽電池の宇宙応用に関する研究

### Study of Thin-Film Solar Cells for Space Application

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

島崎一紀, 今泉充, 岐部公一

Kazunori Shimazaki, Mitsuru Imaizumi, Koichi Kibe

#### Abstract

Thin film solar cells have attracted a lot of attention for space applications because of their superior radiation tolerance, lightweight, and high specific power density. They have potential as space solar cells with high end-of life performance. In this study we investigated the radiation response of thin film solar cell based on hydrogenated amorphous silicon (a-Si) alloy. We report the radiation tolerance of a-Si solar cells superior to crystalline silicon solar cells and remarkable recovery from radiation-induced degradation by thermal annealing at low temperatures.

#### 1. はじめに

薄膜太陽電池は、軽量・フレキシブルかつ安価な太陽電池パネルへの適用が期待できることから宇宙応用への関心が高まっている。米国においても薄膜太陽電池の宇宙応用に関心が寄せられており、既にCu(In, Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池ならびにアモルファスシリコン太陽電池（以下、a-Si太陽電池）の宇宙実証の計画が進められている[1]。Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池は、耐放射線性に優れ[2, 3]、かつ高い変換効率が得られることとフレキシブルな基板への製作が可能なことから宇宙応用を目指した薄膜太陽電池として最も有力である。一方、a-Si太陽電池は製造プロセスの向上とともに大面積のフレキシブル基板への製作が行われている。a-Si太陽電池の放射線耐性に関する研究は僅かに行われているものの[4-11]、単結晶シリコン（以下、c-Si太陽電池）やIII-V族化合物太陽電池ほど精力的に行われていない。その原因としては、結晶系の太陽電池に比べて効率がかなり低いため、宇宙応用した場合のメリットが少なかったことが挙げられる。その反面、フレキシブル太陽電池は、宇宙への輸送と展開といった点で大きな利点を有し、安価で単位重量あたりの発電量が大きい太陽電池パネルが期待できるため注目が集められるようになった。例えば、ソーラーセイルのような大面積かつ大きな展開機構を有する薄膜セイル部に搭載する太陽電池として有望である。しかしながら、a-Si太陽電池は宇宙応用の可能性を十分持っているものの、劣化機構や回復機構を含めた放射線照射効果について十分研究が行われているとは言えない。

そこで本研究は、a-Si太陽電池の宇宙応用を目指して、その放射線照射効果を明らかにすることを目的としている。今年度は、地上用に開発されたフレキシブルa-Si太陽電池の放射線照射効果について検討した。同時に、放射線劣化からの熱アニールによる回復についても検討を行った。ここでは、a-Si太陽電池の放射線照射前後での電気特性の変化、ならびに熱アニールによる電気特性の回復現象の測定結果について報告する。なお、本研究は原子力研究所高崎研究所との共同研究として実施した。

## 2. 研究概要

### 2.1 フレキシブル a-Si 太陽電池

研究対象となる太陽電池には、国内外の2社で製作されたフレキシブル a-Si 太陽電池を選定した。放射線照射用サンプルは、いずれも Roll-to-Roll 方式により大面積のポリイミド基板上に成膜された太陽電池モジュールから切り出した。A 社、B 社のサンプルの受光面積は、それぞれ約 3.3~3.8 および 1.4cm<sup>2</sup> である。セル構造の概略図を図 1,2 に示す。なお、今回の試料は樹脂やガラスなどによる封入はなされていない。図 3,4 に今回用いた a-Si 太陽電池の典型的な出力特性を示す。変換効率は、サンプルによるばらつきがあるものの A 社が約 4.2~5.4%, B 社では約 6.1~7.9%であった。このばらつきは、透明導電膜及び光吸収層の膜厚分布による出力の違いや、モジュールから切り出したために生じた並列抵抗成分の減少、出力測定端子との接触抵抗による直列抵抗成分の増加などの影響であると考えられる。

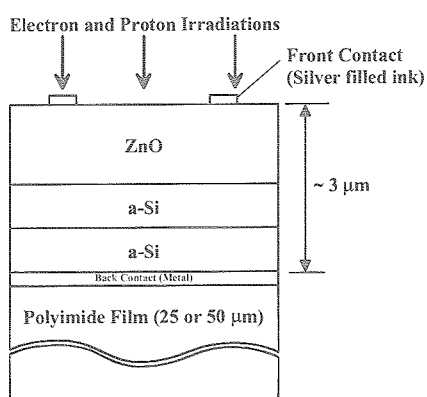


Fig.1 Schematic of structure of a-Si solar cell.  
(Company A).

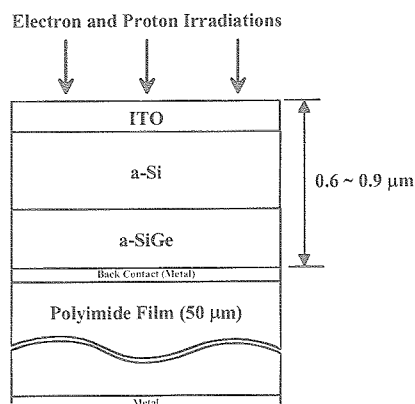


Fig.2 Schematic of structure of a-Si solar cell.  
(Company B).

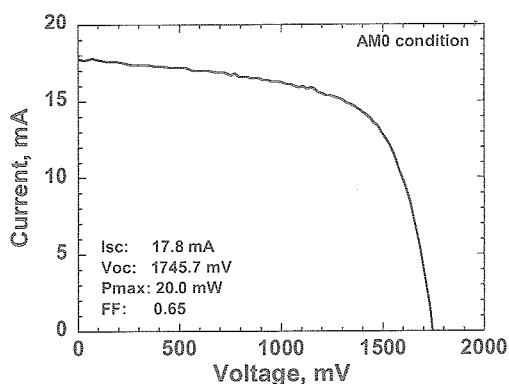


Fig.3 Typical electrical performance of a-Si solar cell.  
(Company A).

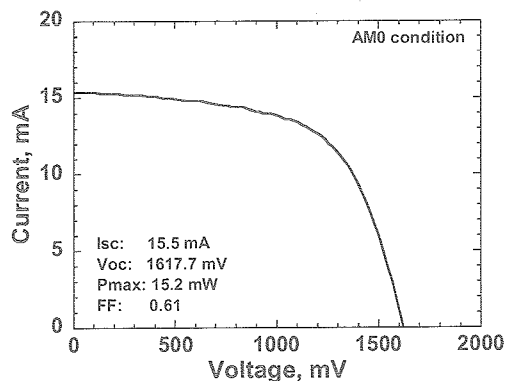


Fig.4 Typical electrical performance of a-Si solar cell.  
(Company B).

### 2.2 実験条件

太陽電池への電子線ならびに陽子線照射試験は、日本原子力研究所高崎研究所にて実施した。本実験では、様々なエネルギーでの放射線照射試験を行い、劣化特性のエネルギーおよびフルエンス依存性を調べた。照射時の太陽電池は暗状態に置かれ開放状態であった。照射条件を表 1 に示す。

原研高崎にて照射試験終了後に、筑波宇宙センターにて特性を測定した。サンプルは、照射前後にお

いて AMO 光に調整された 2 光源ソーラーシミュレータを用いて電流-電圧特性の測定を行った。ここでは、2 個の太陽電池のデータの平均値を用いた。

Table 1 Experimental conditions of electron and proton irradiations.

	Electron	Proton
Energy, MeV	0.5, 1, 2	0.38, 1, 3, 10
Fluence, cm <sup>-2</sup>	1E13, 1E14, 3E14, 1E15, 3E15, 1E16	1E11, 1E12, 1E13, 3E13, 1E14, 5E14
Ambient atmosphere	N <sub>2</sub> gas	Vacuum
Temperature	Room temperature	Room temperature

### 3. 成果概要

#### 3.1 照射結果

図 5~8 に A 社の太陽電池に対する照射試験の結果を、図 9~12 に B 社の太陽電池に対する照射試験の結果を示す。比較のため、宇宙用単結晶シリコン (c-Si) 太陽電池の放射線照射試験の結果も同時に示す。縦軸は、照射前後での各電気特性の比 (保存率)、横軸は照射量 (フルエンス) である。陽子線照射の結果は実線で、電子線照射の結果は点線で示している。

##### (a) 陽子線照射結果

短絡電流 (Isc)、開放電圧 (Voc)、最大電力 (Pmax)、曲線因子 (FF) の全てにおいて照射した陽子線のエネルギーが小さくなるに従い劣化が大きくなることが分かった。また、c-Si 太陽電池と比べて a-Si 太陽電池は全てのエネルギーに対して保存率の減少が小さく、耐放射線性が優れていた。これは、厚さ 100 $\mu$ m の c-Si に比べて a-Si の膜厚が数 $\mu$ m と非常に小さく、放射線でダメージを受ける領域が少ないためと考えられる。また a-Si は、もともと構造欠陥が多いため放射線により生成された欠陥に対して鈍感であるとも考えられる。それゆえ、c-Si 太陽電池は、10E10cm<sup>-2</sup> の照射量から徐々に劣化し始めているのに対して a-Si 太陽電池は、10E12cm<sup>-2</sup> もしくはエネルギーによっては 10E13cm<sup>-2</sup> 程度までほとんど劣化しなかった。なお、A 社と B 社の結果を比べると B 社の太陽電池の方が僅かながら放射線耐性が高かったが、主な原因としては光吸収層の厚さの違いによるものと考えられる。

##### (b) 電子線照射結果

Voc に関してはそれほど劣化せず c-Si よりも高い放射線耐性を示した。しかしながら Isc, Pmax, FF は、10E15cm<sup>-2</sup> 以上の照射量で大きく劣化しており、特に FF については、c-Si 太陽電池のそれよりも全体的に劣化が大きい結果となった。さらに、A 社の太陽電池に対する照射結果から、1, 2MeV 電子線よりも 0.5MeV 電子線照射による劣化の方が僅かながら大きいことが分かった。通常、結晶系の太陽電池では高エネルギーの電子線に対して劣化が大きくなるが、a-Si 太陽電池の場合、低エネルギーの電子線により劣化しやすいことが確認された。また、陽子線照射と同様に、A 社の a-Si 太陽電池よりも僅かながら B 社の太陽電池の耐放射線性が高いことが確認された。なお、a-Si 太陽電池は電子線、陽子線照射のどちらに対しても Isc, Voc の高い保存率に比べ FF の劣化が大きいといった、c-Si 太陽電池とは異なる特徴的な劣化特性を示すことが分かった。

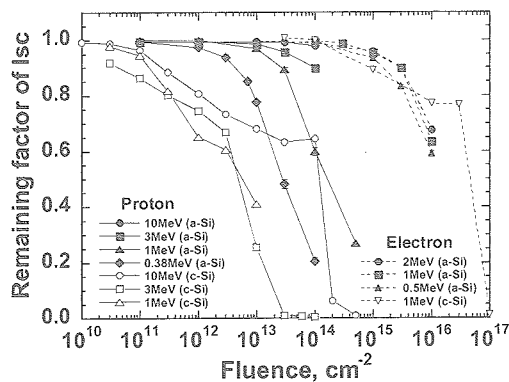


Fig.5 Changes in short circuit current  $I_{sc}$  as a function of particle fluence. (Company A)

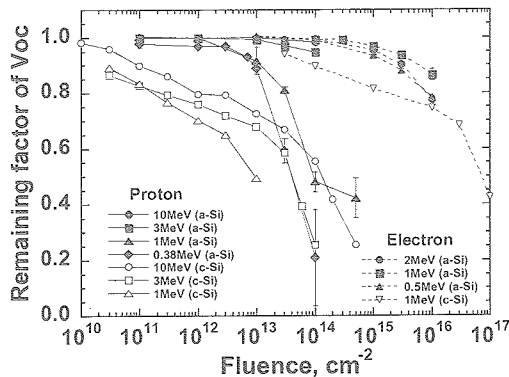


Fig.6 Changes in open circuit voltage  $V_{oc}$  as a function of particle fluence. (Company A)

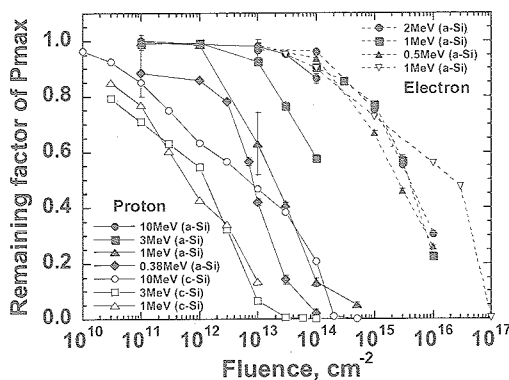


Fig.7 Changes in maximum power  $P_{max}$  as a function of particle fluence. (Company A)

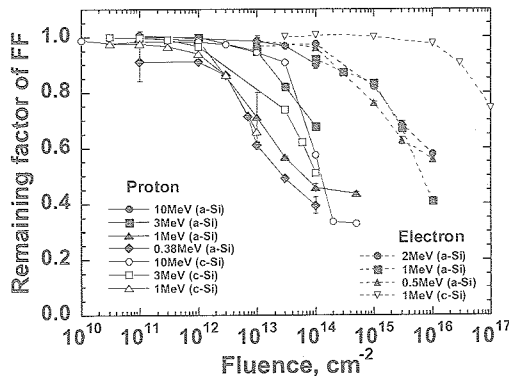


Fig.8 Changes in fill factor  $FF$  as a function of particle fluence. (Company A)

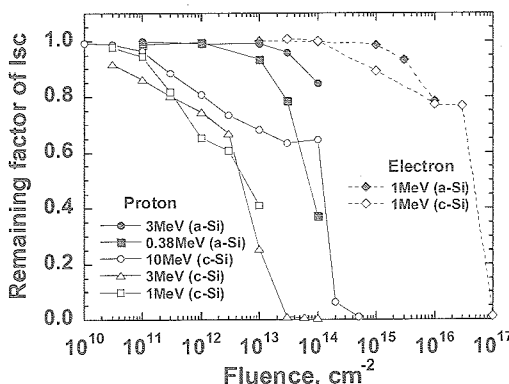


Fig.9 Changes in short circuit current  $I_{sc}$  as a function of particle fluence. (Company B)

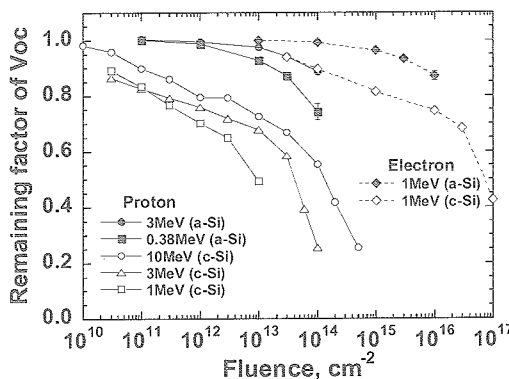


Fig.10 Changes in open circuit voltage  $V_{oc}$  as a function of particle fluence. (Company B)

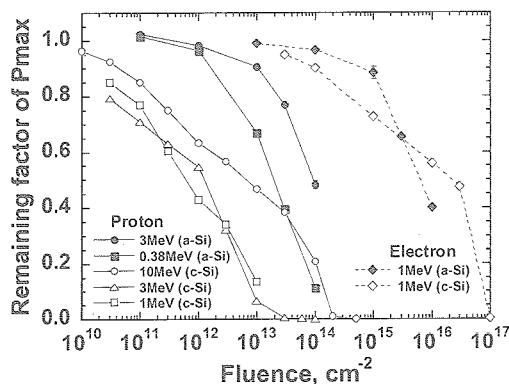


Fig.11 Changes in maximum power  $P_{max}$  as a function of particle fluence. (Company B)

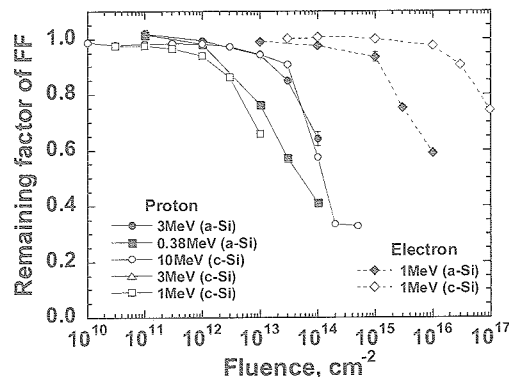


Fig.12 Changes in fill factor  $FF$  as a function of particle fluence. (Company B)

### 3.3 回復現象

a-Si 太陽電池の電気特性は、熱アニールにより回復する[5, 6, 8-10]ことが報告されているため、ここでは、A社の太陽電池に対して 100°C等温アニール試験を行った。アニールは空気中で行った。図 13, 14 から 3MeV 陽子線を 1E14cm<sup>2</sup>照射したセルの特性が 10000 分後にほぼ 100%回復していることが分かる。特に Isc は、初期値よりも大きくなっており、熱アニールにより太陽電池の特性が改善されている可能性が考えられる。なお、10MeV 陽子線、1MeV 電子線を照射したサンプルも熱アニールによる回復が確認されたが回復の速度は、照射したエネルギー、照射量に依存して異なった。なお、1MeV 陽子線を 1E14cm<sup>2</sup>照射した太陽電池は、完全には回復しなかった(図 15, 16)。これが劣化機構の違いによるものなのか、ダメージの大きさの違いに起因する回復速度の違いによるものなのかは分からないが、今後、実験を重ねて明らかにしていきたい。

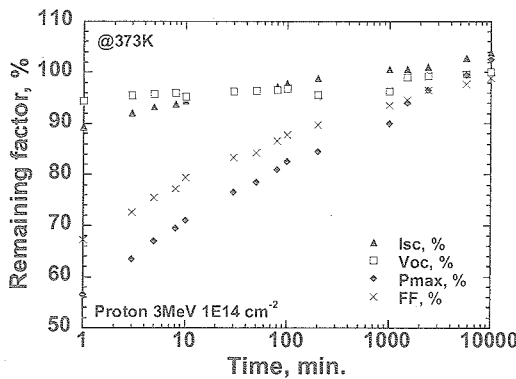


Fig.13 Recovery of electrical performance by thermal annealing at 100°C. Irradiated proton energy was 3MeV.

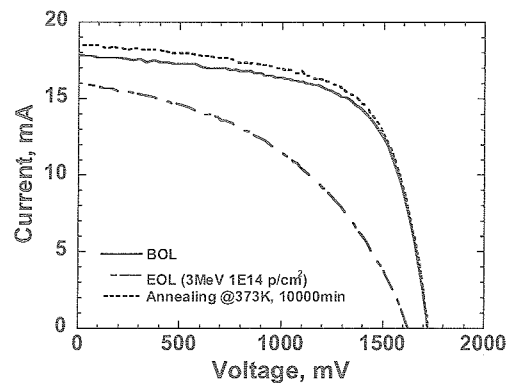


Fig.14 Recovery of I-V curve by thermal annealing at 100°C. Irradiated proton energy was 3MeV.

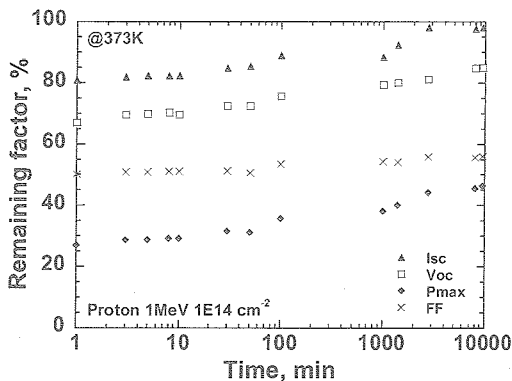


Fig.15 Recovery of electrical performance by thermal annealing at 100°C. Irradiated proton energy was 1MeV.

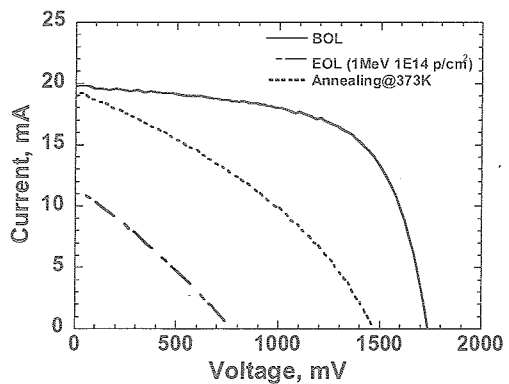


Fig.16 Recovery of I-V curve by thermal annealing at 100°C. Irradiated proton energy was 1MeV.

### 4. まとめ

フレキシブル基板上に成膜された a-Si 太陽電池への電子線 (0.5, 1, 2MeV), 陽子線 (0.38, 1, 3, 10MeV) 照射試験を実施した。その結果、保存率については、a-Si は c-Si 太陽電池よりも高い耐放射線性を示した。そのため、EOL において高い性能維持が期待できる。また、照射後、比較的低温の熱アニールでも

太陽電池の特性が顕著に回復するアニール効果を確認した。1MeV 陽子線を除いて高エネルギーで照射された太陽電池は、100°C、10000 分のアニールでほぼ 100%特性が回復した。しかしながら、回復の速度は、照射したエネルギー、照射量に依存して異なるため、今後、更なる実験が必要と思われる。

放射線照射により、Isc, Voc の劣化よりも FF の劣化が大きこと、そして、100°C程度における熱アニールで特性がほぼ 100%回復することなどから、放射線による劣化の挙動は光劣化のそれと類似性があるものと考えられる。そのため、今後は、非イオン化エネルギー損失 (Non-Ionization Energy Loss: NIEL) やイオン化損傷 (Ionization damage) を考慮した解析や、電子スピン共鳴法などを用いた欠陥評価などから a-Si 太陽電池の放射線劣化のメカニズムについて検討する予定である。

#### 【参考文献】

- [1] P. E. Hausge, J. E. Granata, D. Senft, P. Tlomak, and J. Merrill “AFRL Thin Film Solar Cell Development and Upcoming Flight Experiments,” 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, AIAA 2004-5734 Rhode Island, U.S.A (2004).
- [2] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Yamaguchi, K. Kushiya, T. Ohshima, H. Itoh, and S. Matsuda, Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) L797.
- [3] S. Kawakita, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Kushiya, T. Ohshima, M. Yamaguchi, S. Matsuda, S. Yoda, and T. Kamiya, Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 11-18 May 2003, Osaka, Japan (2003) 8pB511.
- [4] S. S. Abdulaziz and J. R. Woodyard “Investigation of the role of a-Si:H based-alloy solar cell thickness on 1.00 MeV proton irradiation resistance,” Conference Record of the 22nd Photovoltaic Specialists Conference, IEEE No.91CH2953-8, (1991), pp. 1248-1253.
- [5] G. J. Vendura Jr., C. M. C. Toporow, and M. A. Kruer “Irradiation and Annealing of Amorphous Silicon Space Solar Cell,” Proc. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, July (1998) pp. 3745-3748.
- [6] J. R. Srour, G. J. Vendura, Jr., D. H. Lo, C. M. C. Toporow, M. Dooley, R. P. Nakano, and E. E. King “Damage Mechanisms in Radiation-Tolerant Amorphous Silicon Solar Cells,” IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, No. 6, (1998) pp. 2624-2631.
- [7] S. Guha, J. Yang, A. Banerjee, and T. Glatfelter, G. J. Vendura, Jr., A. Garcia, and M. Kruer “Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Applications,” Proc. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, July (1998) pp. 3609-3613.
- [8] 佐々木進, 後川昭雄, 森田洋右 “a-Si太陽電池の耐放射線性の評価” 宇宙科学研究所報告 特集第43号 (2001) pp. 23-29.
- [9] G. Oomen, R. van der Heijden, S. Guha, J. Yang, and A. Banerjee “The Effects of Extremely High Radiation Fluxes on Amorphous Silicon Alloy Cells,” Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK, (2000) pp. 1053-1056.
- [10] R. J. Walters, J. H. Warner, G. P. Summers, S. R. Messenger, and J. R. Lorentzen “Radiation Response and Annealing Characteristics of Thin Film Photovoltaics,” Proceedings of 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, (2004) pp.3606-3609.
- [11] J. E. Granata, T. D. Sahlstrom, P. Hausge, S. R. Messenger, R. J. Walters, and J. R. Lorentzen “Thin-Film Photovoltaic Radiation Testing and Modeling for a MEO Orbit,” Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Florida, U.S.A, 3-7 January, (2005).