

## 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 (Expert Group for Electrical Engineering)

川北史朗、島崎一紀、今泉充、桑島三郎

Shirou Kawakita, Kazunori Shimazaki, Mitsuru Imaizumi, Saburo Kuwajima

## Abstract

To analyze spectral response of solar cells before and after radiation test, the information of defects in the solar cells can be introduced. We have studied radiation effect of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells using by spectral response measurement. Damage constant of minority carrier diffusion length ( $K_L$ ) of the solar cells irradiated with 1MeV protons was  $4.7 \times 10^{-5}$ . The defect introduction rate of proton irradiated CIGS solar cells using the same method was obtained.

## 1. はじめに

近年、宇宙機全体に対して小型・軽量化が要求され、薄膜太陽電池の宇宙への適用が考えられる。我々は宇宙機に適した薄膜太陽電池として、Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池(以下、CIGS 太陽電池)が有力な候補であると考えている。この太陽電池の特長は、報告されている変換効率が AM1.5 で 18.8%と他の薄膜太陽電池と比べて一番高いこと[1]、高い耐放射線性を有すること[2]、ポリイミドやステンレス基板を用いた軽量太陽電池が開発されていること[3,4,5]などが挙げられる。

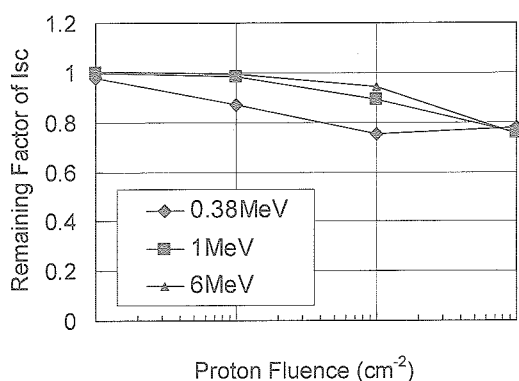
本研究は、この薄膜太陽電池の宇宙機への適用を目的として、放射線特性を中心とした宇宙環境の耐性を明らかにすることである。この研究は平成13年度より開始しており、これまでに1) CIGS 薄膜太陽電池の放射線損傷が温度によって回復する現象の定量的評価、2) MDS-1によるCIGS太陽電池の軌道上評価などの多数の成果を得てきた。今年度は実応用に向けた薄膜太陽電池パネルのシステムの検討を開始した。また、CIGS 太陽電池の放射線損傷およびその回復のメカニズムの解明のための研究を、日本原子力研究所高崎研究所との共同研究を中心に、昭和シェル石油、松下電器産業、産業総合研究所、豊橋技術科学大学、龍谷大学、大阪電気通信大学、宮崎大学および同機構の宇宙科学研究本部と共同で研究を行っている。本年度は、CIGS 薄膜の欠陥形成の解析、磁気(PEM)効果測定を用いた単結晶 CuInSe<sub>2</sub> 薄膜の電子線および陽子線照射によるキャリア拡散長の変化について検討、MBE法で作製した多結晶 CIGS 薄膜の放射線照射前後での PL による評価、低温での陽子線照射による電気性能の突然劣化現象の解析、ソーラシミュレータを用いた CIGS 太陽電池の陽子線照射欠陥の評価、逆バイアス印可時の過渡放電電流解析による陽子線照射欠陥の評価を行った。

ここでは、CIGS 太陽電池の陽子線照射前後での分光感度特性の変化をデバイスシミュレータによるモデル解析と測定結果とを比較解析について報告する。

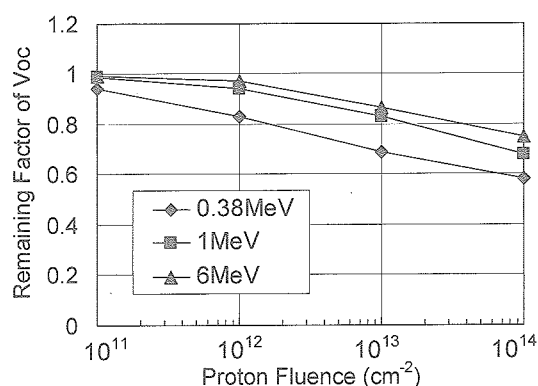
## 2. 実験と結果

本研究で用いた CIGS 太陽電池は、30cm×30cm のモジュールから約 1cm 角に切り出したもので、AM0 光下での電気性能は、短絡電流( $I_{sc}$ )が 24mA、開放電圧( $V_{oc}$ )が 600mV で、変換効率は約 12%である。

放射線は、日本原子力研究所高崎研究所の 400keV 静電加速器とタンデム加速器を用いた、0.38, 1, 3, 6MeV の陽子線である。各陽子線照射試験による太陽電池の電気性能の変化を図1に示す。これより太陽電池の性能劣化が陽子線のエネルギーに依存していることが分かる。ここで、CIGS 太陽電池の各原子の陽子線に対する衝突断面積の計算した。この結果を図2に示す。これより、結合エネルギーが大きい Se のはじき出し確率が一番小さく、それ以外の原子はほぼ同程度であることが分かる。また、陽子線のエネルギーが小さいほど欠陥発生率が高いため、図1に示したようにエネルギーが小さいほど電気性能の劣化量が大きくなる。



(a) Short-Circuit current



(b) Open-Circuit Voltage

図1 0.38, 1, 6MeV 陽子線照射による CIGS 太陽電池の  $I_{sc}$  と  $V_{oc}$  の保存率の変化

これらの陽子線を照射した太陽電池の分光感度特性の変化から、少数キャリアの拡散長や欠陥導入率を求めることができる。その方法は、デバイスシミュレータの解析結果と測定結果の比較による。ここで用いたデバイスシミュレータはニューサウスウェールズ大学が開発した PCID である[7]。ここで想定する太陽電池は単純な CIGS 太陽電池のホモ接合とした。照射試験前の太陽電池の分光感度特性をもとに、少数キャリアの拡散長をパラメータとしたフィッティングを行い、初期の拡散長が  $2.5 \mu\text{m}$  であることが分かった。この値は、同タイプの太陽電池で報告されている値と同等である[8]。

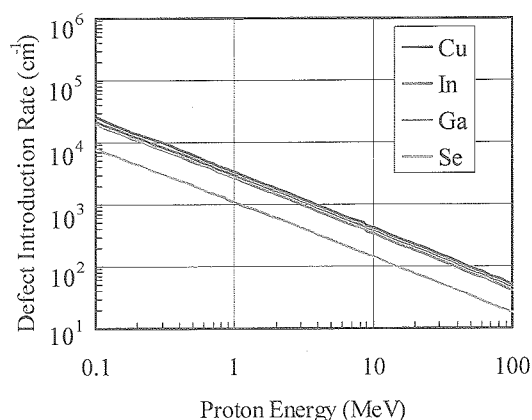


図2 CIGS 結晶の陽子線による欠陥発生率と照射エネルギーの関係

1MeV の陽子線照射試験による CIGS 太陽電池の分光感度特性の測定結果および解析結果を図3

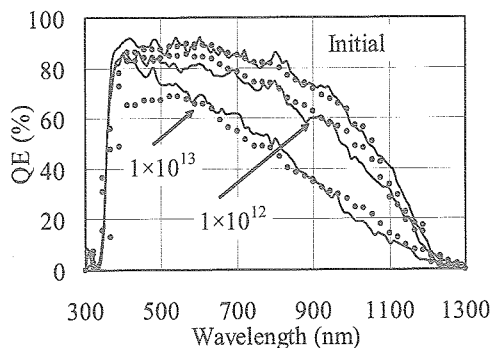


図3 1MeV 陽子線照射前後での分光感度特性。実線が測定結果、点線がシミュレーション結果。

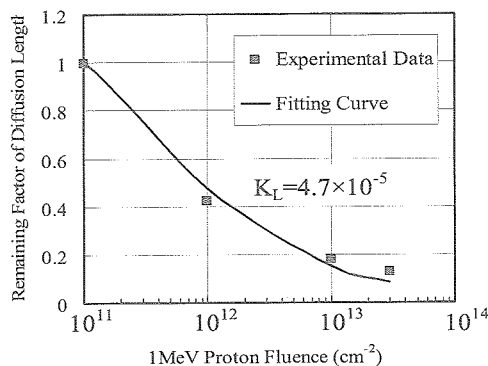


図4 1MeV の陽子線量と少数キャリアの拡散長の保存率との関係

に示す。ここでの解析は少数キャリアの拡散長のみをパラメータとしている。これより、測定結果と解析結果とがよく一致しているのが分かる。次に、拡散長の保存率と陽子線量との関係を求めた。拡散長の逆数の2乗が照射線量に比例することから、その比例係数である拡散長の損傷係数を求めた(図4)。この結果、CIGS 太陽電池の1MeV 陽子線による拡散長の損傷係数は  $4.7 \times 10^{-5}$  であることを明らかにした。

CIGS 太陽電池の陽子線による欠陥導入率を考える。この欠陥導入率は少数キャリアの拡散長が欠陥のライフタイムの平方根に比例していることから求めることができる。ただし、本解析において欠陥の絶対量を求めることができないため、1MeV の陽子線の導入率を1と規格化して、0.38, 3.6MeV の導入率の相対値を求めた。この結果を図4に示す。ここで

直線のモデルは、陽子線によって発生した欠陥が点欠陥であると仮定し、kpモデルによる求めた計算結果である。これより、解析により求めた値とモデルとが一致していることから、これらのエネルギーの陽子線がCIGS太陽電池で形成する欠陥は単純な点欠陥であると推察される。

ただ、TRIMM 計算によって、0.4MeV の陽子線は CIGS 太陽電池の光吸収層である CIGS 層で止まると予想され、このエネルギーの陽子線は CIGS 太陽電池にクラスタータイプのかなりの量の欠陥を発生すると予測される。しかし、図5より単純な点欠陥モデルによる計算結果と良い一致を示すことから、従来の放射線照射試験においては、照射直後は発生したであろうクラスタータイプの欠陥が室温付近の温度であってもアニールされるために、観測できないと考えられる。今後は低温試験などによって、同エネルギーの陽子線による損傷量と室温でのそれとの比較を行い、上記のモデルの検証を行う。

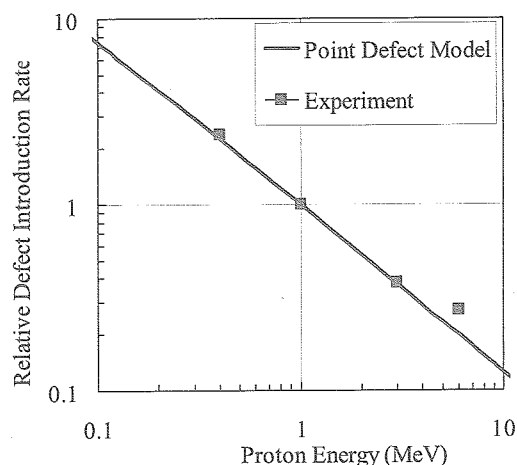


図5 CIGS 太陽電池の陽子線のエネルギーと欠陥導入率との関係。点線が実験結果で、実線が点欠陥モデルによる解析結果。

### 3. まとめ

CIGS 太陽電池の宇宙応用に関して、その放射線による劣化特性について研究を行った。これにより、同太陽電池の少数キャリアの拡散長の放射線損傷係数を明らかにすることができ、それが他のタイプの太陽電池と比べて小さいことが分かった。また、少数キャリア拡散長からライフタイムを求め、これと放射線欠陥量との関係から、陽子線の照射エネルギーと欠陥導入率との関係を明らかにした。ここで、同太陽電池に発生した欠陥がフレンケル・ペアとなる点欠陥モデルとした計算結果と同じ傾向が示された。このことから、同太陽電池に陽子線によって発生する欠陥は単純な点欠陥であると考えられる。

最近、CIGS 太陽電池の特長を生かした太陽電池パドルの検討や[9]、宇宙プラズマと CIGS 太陽電池を搭載したパドルとの相互干渉に関する研究が行われている[10]。技術実証衛星「つばさ」による CIGS 太陽電池の宇宙実証によってその性能が確認された今、この太陽電池を宇宙機の太陽電池パドルへどのように応用するかが問題である。現在、薄膜太陽電池の特長を生かした薄膜太陽電池パネルの検討を始めており、次年度はこの検討を中心に研究を行う。

#### [参考文献]

- [1] M.A. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Swartzlander, F. Hasoon, R. Noufi: Prog. Photovolt. 7 (1999) 311.
- [2] T. Aburaya, T. Hisamatsu and S. Matsuda, 2<sup>nd</sup> WCPEC, 1998, pp.3568-3571.
- [3] S. Wideman, M. E. Beck, R. Butcher, I. Repins, N. Gomez, B. Joshi, R. G. Wendt and J. S. Britt, 29<sup>th</sup> IEEE PVSC, 2002, pp.575-578
- [4] J. R. Tuttle, A. Szalaj and J. Keane, Twenty-eighth IEEE PVSC, 2000, pp. 1042-1045.
- [5] A. Bohen, D. Bräunig, J. Klaser, F. H. Kang, B. Hösselbarth and G. La Roche, 29<sup>th</sup> IEEE PVSC, 2000, pp.1038-1041.
- [6] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Yamaguchi, K. Kushiya, T. Ohshima, H. Ito, and S. Matsuda, Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002), p. L797
- [7] <http://www.pv.unsw.edu.au/pc1d/>
- [8] C. H. Champness, 29<sup>th</sup> IEEE PVSC, 2002, pp.732-735
- [9] D.M. Murphy, M.I. Eskenazi, S.F. White and B.R. Spence, 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., p.782, America, (2002)
- [10] [http://space-power.grc.nasa.gov/ppo/sctm/docs/A\\_1045\\_M\\_PIZSCZOR\\_2002\\_SSP\\_TIM\\_HV\\_Presentation.pdf](http://space-power.grc.nasa.gov/ppo/sctm/docs/A_1045_M_PIZSCZOR_2002_SSP_TIM_HV_Presentation.pdf)