

小型軽量パワーシステム

## 高効率3接合太陽電池に関する研究 Study on High Efficiency Triple-Junction Solar Cells

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

今泉 充, 住田泰史, 桑島三郎

Mitsuru Imaizumi, Taishi Sumita and Saburo Kuwajima

### Abstract

The radiation responses of InGaP, (In)GaAs and Ge single-junction sub-cells in a triple-junction space solar cell are studied in order to develop a device simulator which predicts the EOL performance of space solar cells. InGaP top-cells exhibit no significant difference in radiation degradation trends between AM0 light and dark conditions during irradiation. The radiation tolerance of (In)GaAs middle-cells degrades with increasing indium content. However, the absolute value of  $I_{sc}$  for a higher In content cell still exceeds that of a GaAs (In=0%) cell after irradiation. Ge bottom-cells exhibit good radiation tolerance as expected. This study is the first to reveal precise radiation response of the sub-cells.

### 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。しかし、その複雑な構造ゆえ、その放射線特性はあまり良く理解されていない。特に、3Jセルでは電氣的に3種の太陽電池が直列に接続されているため、その短絡電流の劣化曲線は、これまでの単一接合太陽電池(1Jセル)の劣化を表す経験式と異なる振舞いを示す[1]。それゆえ、これまでの手法では寿命末期(EOL)出力の予測が困難である。加えて、3Jセルの性能は新材料・新構造などの応用により日進月歩で向上している[2]。従って、それらの放射線劣化特性を把握することがEOL出力を予測する上で必要となっている。

我々は、3Jセルのような複雑な放射線劣化挙動を示す宇宙用太陽電池セルのEOL出力予測を可能とするため、市販の富士総研製太陽電池デバイスシミュレータ:WebVENUS[3]を応用した宇宙用太陽電池セルの出力劣化シミュレータの開発を行っている。このシミュレータに入力する劣化パラメータを取得するため、3Jセルを構成する3種類の1Jサブセルの放射線劣化を検討した。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. 研究の概要

(Al)InGaPトップサブセル, (In)GaAsミドルサブセル(In混晶比:0~9%), およびGeボトムセルの1Jセルを試料とした。トップサブセルおよびミドルサブセルの太陽電池セル部分のIII-V族化合物半導体エピタキシャル多層薄膜はMOCVD(有機金属気相成長)法により形成した。ミドルサブセルの模式的エピ構造を図1に示す。ボトムサブセルについては、Ge基板をMOCVD反応炉中で加熱し、V族原料ガスを流入させることでV族元素を熱拡散させて形成した。また、表面反射率の差に起因する太陽電池特性のバラツキをなくすため、各サブセルには反射防止膜を形成しな

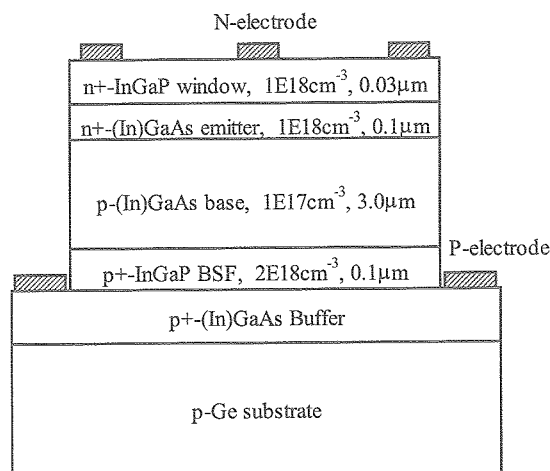


Fig. 1 Schematic structure of (In)GaAs solar cells (middle cells) used in this study. No AR coating was formed on the surface.

かった。

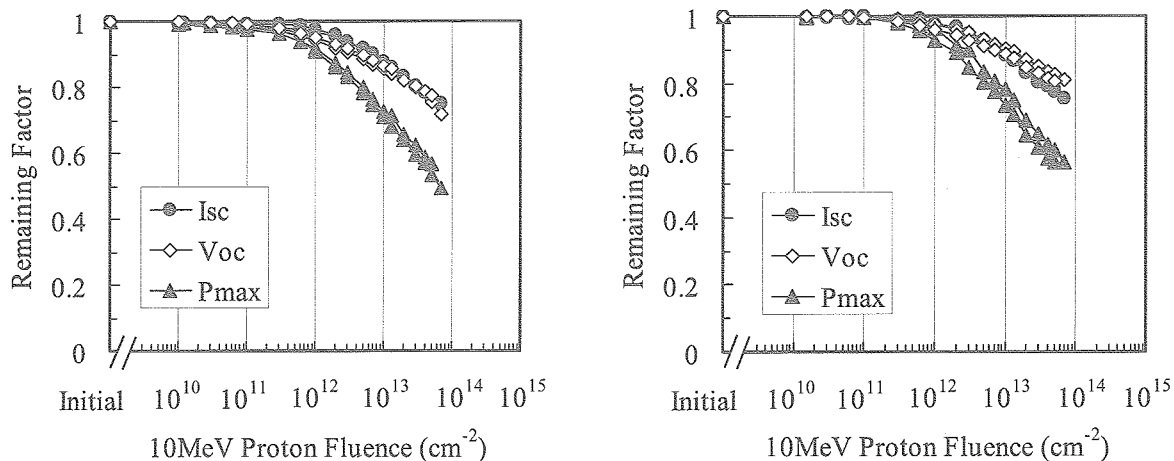
各サブセルに対し、1 MeV 電子線および3, 10 MeV 陽子線を照射した。照射は原子力研究所高崎研究所にて実施した。このうち1 MeV 電子線と10 MeV 陽子線の照射試験では、放射線の照射を行う真空チャンバ内にAM0擬似太陽光を照射し、太陽電池セルの電流－電圧特性をその場測定した。つまり、放射線の照射量が所望の値となったときに放射線照射を中断して電流－電圧特性を取得する、という操作を繰り返した[4]。この方法では、1枚の太陽電池セルから劣化曲線が即時に取得でき、時間と試料の大幅な節約が可能である。

### 3. 成果の概要

#### 3.1 トップセル

図2は、異なる条件下で10MeV 陽子線を照射したときの、InGaPトップサブセルの短絡電流(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。横軸は照射量、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。照射条件は陽子線照射中に、(a)AM0擬似光を照射しセルを短絡した(セル内部を光電流が流れる)場合、および(b)暗状態に保ちセルを開放状態とした場合、の2通りである。In(Ga)P太陽電池では、放射線劣化に対して電流注入による回復効果が生じることが報告されている[5-9]。従って、条件(a)はより高い保存率が期待される。しかし、図2では、両条件で劣化傾向における有意な差は見られない。この結果は、通常の太陽電池動作条件(1sun 程度の光強度)での電流の大きさでは回復効果が表れないことを示唆している。一方、先の電流注入による回復効果が表れたのは、比較的大電流をセルに注入した場合である[6]。しかし、本実験での照射速度は $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、宇宙環境における実際の被曝速度と比較すると5桁程度高い。つまり、回復速度が劣化速度に対して極めて小さいために、見かけ上回復効果が表れていないことも考えられる。

InGaPセルにAlを添加することにより、エネルギーギャップが拡大してより高い電圧出力を得ることができる[2]。そこで、膜厚など構造は同一としたAlInGaPトップサブセルを試作して、InGaPセルとの耐放射線性を比較した。その結果、AlInGaPセルの方が保存率が高いことが示された。よって、トップセル材料をAlInGaP化することにより、より高い電圧出力と耐放射線性が同時に実現できる可能性がある。



(a) Short-circuited and AM0-1sun light illuminated

(b) Open-circuited and kept in dark

Fig. 2 Degradation trend of Isc and Voc of InGaP single-junction cells under different condition.

#### 3.2 ミドルセル

図3に、異なるIn混晶比を有するInGaAsミドルサブセルの、10MeV 陽子線によるIsc および Voc の劣化傾向を示す。In混晶比はIII族元素の割合(50%)中で、0, 3.7, 5.4, 7.0, 8.8%と変化させている。0%とはすなわち

GaAsセルである。Voc では明らかにIn混晶比の増大に伴って劣化が大きくなっているのに対し、Isc ではその依存性は比較的小さい。同様な傾向が 1MeV 電子線照射の結果からも確認されている。そこで、3MeV 陽子線照射試験にて異なるフルエンスを照射したセルに対し、暗状態で電流－電圧測定を行った。その結果、フルエンスを  $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$  まで照射しても、異なるIn混晶比のInGaAsセル間で逆方向飽和電流の値に系統的な差は観察されなかった。従って、この Voc の劣化と In 混晶比の関係の原因はまだ明らかでない。

ここで、この実験結果は、GaAs太陽電池にInを添加すると耐放射線性は向上せず、むしろ低下していることを示している。一方、InP系材料の太陽電池は高い耐放射線性を有していることが知られている[5]。その理由のひとつとして、放射線照射により発生するIn空孔欠陥のアニール(回復)の活性化エネルギーが低いことが考えられていたが、本実験結果はそれを否定するものである。従って、InP系太陽電池の高耐放射線性の理由は、同じく放射線照射で発生するPの空孔の何らかの性質、ないしはInとP(に關与した欠陥同士)との相互作用であると思われる。

図3において、フルエンスが大きくなるにつれ、Isc の保存率ではIn混晶比の差による差が小さくなっているが、Voc の保存率ではそのような傾向はなく全フルエンス領域でIn混晶比依存性が見られる。この傾向は 1MeV 電子線の照射結果でも確認された。これは、主に光発生電流を低下させる放射線欠陥は主に拡散電位を低下させる放射線欠陥とは異なる、つまり少数キャリア再結合中心を形成する結晶欠陥と多数キャリア捕獲中心を形成する結晶欠陥は、その起源・種類が異なることを示唆している。

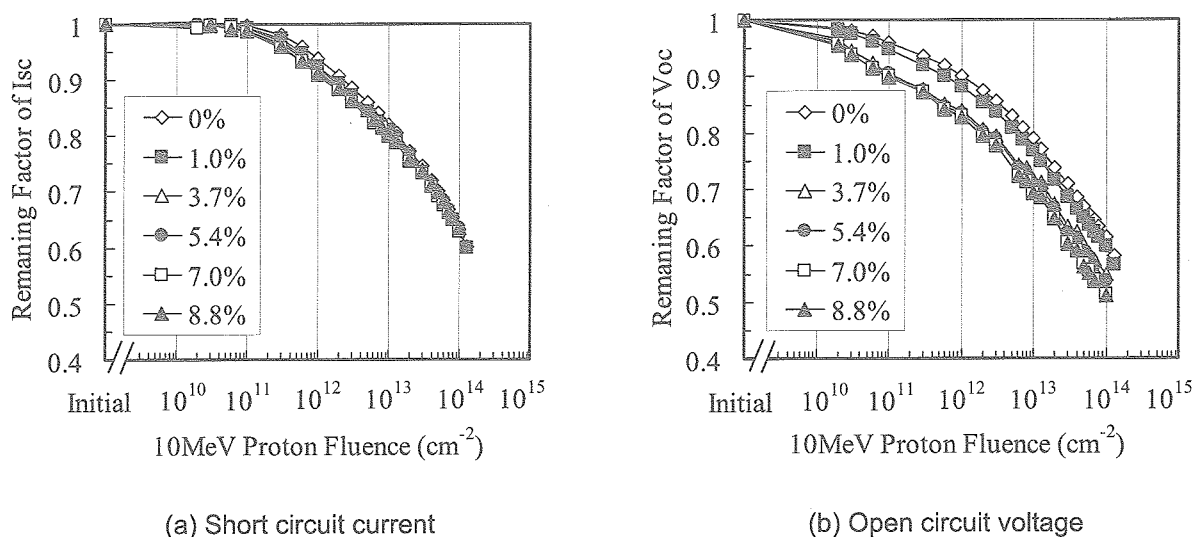


Fig. 3 Degradation trend of InGaAs single-junction cells with different indium content.

### 3.3 ボトムセル

Ge太陽電池セルに対して 10MeV 陽子線を照射したときの劣化曲線を図4に示す。良好な耐放射線性が確認される。Ge太陽電池は以前から耐放射線性に優れると言われていたが、その根拠は 10 年以上前の中性子照射試験結果とされ、かつ具体的な実験結果の公式な報告は見られない。よって、この結果は非常に貴重なものである。しかし、この良好な耐放射線性の理由として、初期出力特性が優れないためである可能性がある。

通常3接合太陽電池セル中のGeボトムセルは、前述したようにミドルセルなどを形成するIII－V族化合物半導体薄膜を結晶成長させる際に、p型Ge基板にV族元素がオートドープされて表面領域にn型領域(エミッタ層)が自然形成されることを利用して作製されている。従って、エミッタ層の厚さやキャリア濃度の制御が困難である。その結果として、良好なダイオード特性は得られていない。しかし最近、Ge基板上初期層を従来のGaAsからInGaPに変更することにより、拡散するV族元素をAsからPとすることでダイオード特性に改善が見られている。

Geボトムセルは、3Jセル全体での出力寄与が小さいこともあり、この結果から耐放射線性の観点からは現状

問題がないことが確認されたが、今後のダイオード特性の改善に併せ、改めて耐放射線性を検討する必要があると思われる。

#### 4. まとめ

本研究により、宇宙用高効率3接合太陽電池セルを構成する(Al)InGaPトップセル、(In)GaAsミドルセル、およびGeボトムセルの3種類のサブセルの耐放射線性における、材料パラメータ(含有元素)および放射線照射条件(光/暗状態、短絡/開放)の影響・効果を初めて明らかにした。この結果は、まだよく理解されていない3接合太陽電池セルの放射線劣化のメカニズム解明に有益であるばかりでなく、宇宙機に使用する上での劣化予測・電源設計および初期・末期出力の更なる改善にも有効であると考えられる。しかし、この結果ではまだ不十分であり、更なる検討が今後必要である。

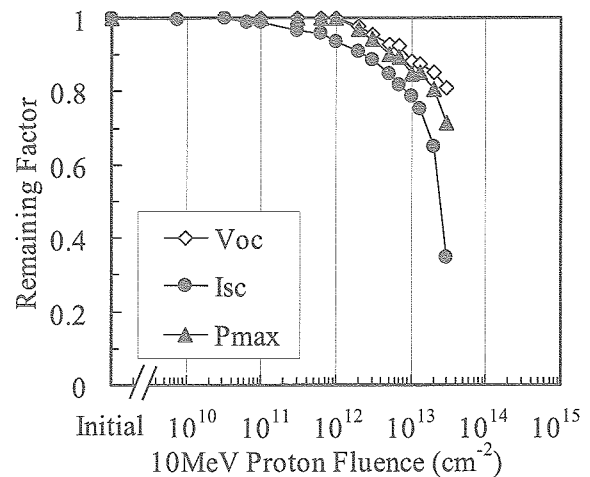


Fig. 4 Radiation response of Ge cells by 10 MeV proton irradiation.

#### 参考文献

- [1] T. Sumita, M. Imaizumi, S. Matsuda, T. Ohshima, A. Ohi, and T. Kamiya, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (3P-B5-10)
- [2] T. Takamoto, T. Agui, K. kamimura, M. Kaneiwa, M. Imaizumi, S. matsuda, and M. Yamaguchi, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* (3PL-C2-01).
- [3] Web-based device simulator developed by Fuji Research Institute Corporation, cf. URL: <http://www.fuji-ric.co.jp/>
- [4] S. Kawakita, M. Imaizumi, S. Matsuda and T. Ohshima, *Proceedings of the 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference.*, (IEEE, New York, 2002), p. 978.
- [5] M. Yamaguchi, C. Uemura, and A. Yamamoto, *J. Appl. Phys.*, **55**, 1429 (1984).
- [6] M. Yamaguchi, K. Ando, A. Yamamoto and C. Uemura, *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 432 (1984).
- [7] N. Dharmarasu, M. Yamaguchi, A. Khan, T. Yamada, T. Tanabe, S. Takagishi, T. Takamoto, T. Ohshima, H. Itoh, M. Imaizumi, and S. Matsuda, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2399 (2001).
- [8] N. Dharmarasu, M. Yamaguchi, T. Takamoto, Y. Takashi, T. Tanabe, S. Takagishi, T. Ohshima, H. Itoh, M. Imaizumi, and S. Matsuda, *Proceedings of 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (WIP, Munich, 2001), p. 2159.
- [9] M. Yamaguchi, A. Khan and N. Dharmarasu, *Proceedings of the 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference.*, (IEEE, New York, 2002), p. 792.