

宇宙用3接合太陽電池のトップセルとしての AlInGaP 単一接合太陽電池の構造最適化検討

Study on Optimum Structure of AlInGaP Top Cell

for Triple-Junction Space Solar Cell

電源技術グループ

Space Power Engineering Group

森岡千晴, 今泉充, 岐部公一

Chiharu Morioka, Mitsuru Imaizumi, Koichi Kibe

Abstract

The purpose of this study is to improve the performance of triple-junction space solar cells. The AlInGaP single-junction (SJ) cell was studied because greater radiation resistance has shown compared to a conventional InGaP top cell. AlInGaP SJ cells with varied layer thickness and carrier concentration of the base layer were prepared, and structural dependence on radiation resistance was investigated in order to determine an optimum structure for the AlInGaP top cell. The results confirmed that the preferred cell for the 10-year mission on geostationary Earth orbit would have a base layer thickness of 1250 nm and a base layer carrier concentration of $3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ or lower. This paper also compared radiation resistance of the AlInGaP SJ cell with that of the InGaP SJ cell. Even though InGaP is known to have excellent radiation resistance, the AlInGaP SJ cell exhibited better radiation resistance than the InGaP SJ cell. Superior radiation-resistant of AlInGaP material was demonstrated for an advanced top cell in a space triple-junction cell.

1. はじめに

本研究は、3 接合太陽電池(3Jセル)の出力特性、放射線耐性の性能向上を目標として実施している。3Jセルは高い変換効率と優れた放射線耐性を併せ持つことから宇宙用太陽電池として注目され、MUSES-C、WINDS、GOSAT、SOHLA-1 など多くの人工衛星の太陽電池に採用されるまでに至っている。格子整合系の InGaP/(In)GaAs/Ge 3Jセルの変換効率は約29%^[1](1-Sun, AM0)であり、これは現在商品化されている太陽電池の中で最も高い変換効率である。しかし変換効率は理論上AM1.5 において約32%であり、AM0の場合でも理論効率と現状の変換効率には未だ数%もの差がある。理論効率を目指した更なる研究が必要である。電源技術グループでは、3Jセルの宇宙における劣化現象の把握や、耐放射線強化を目的として、各種放射線による劣化特性の取得や、劣化現象の解明にむけた研究をこれまで行ってきた^[2, 3]。これらに加え、平成17年度より日本原子力研究開発機構との共同研究で、3Jセルの更なる性能向上を目的とした新材料 3Jセルの開発を実施している。開発は3段階で進め、3Jセルを構成する3種の単一接合太陽電池(SJセル)のうち、まずトップセル、次にミドルセルの各SJセルの検討・最適化を行い、最後に 3Jセル全体としての検討を行う計画である。本報告では昨年度実施したトップセルの検討結果について述べる。

2. 研究の概要

従来のInGaPに変え、材料としてAlInGaPを用いたトップセルの検討を行う。AlInGaPはInGaPと比較してバンドギャップが大きい。このため、AlInGaPを用いることで、3Jセルの開放電圧(Voc)は従来に比べ高くなり、また耐放射性もより優れることが期待される^[1, 4]。一方で、吸収することのできるフォトン数が減るため、同じ膜厚で比べるとAlInGaPを用いることで、InGaPに比べ短絡電流(Isc)が小さくなる。この点は膜厚などの構造条件を最適化することで解決することができると考えられる。本研究ではAlInGaP単一接合セルを作製し、電氣的出力特性、耐放射線性のベース層膜厚およびベース層キャリア濃度依存性について検討した。

3. 実験内容

有機金属気相成長法によりGaAs基板上に $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 単一接合セルを作製した。構造模式図を図1に示す。ベース層(p型AlInGaP層)の膜厚およびキャリア濃度を変化させたAlInGaP単一接合セルを作製した。構造

条件を表1に示す。エミッタ層 (n型AlInGaP層) の膜厚は 30 nm, キャリア濃度は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に統一している。セル受光部のサイズは $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ である。これらのセルに対し, 3 MeV陽子線をフルエンス(照射量) $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 照射した。 10^{12} cm^{-2} オーダーが静止軌道 10 年間で受ける放射線に対する等価フルエンスである。放射線照射試験は日本原子力研究開発機構との共同研究のもと, 高崎研究所にて実施した。照射前後に, 25°C , AMO, 1-Sun で I-V 測定を行った。

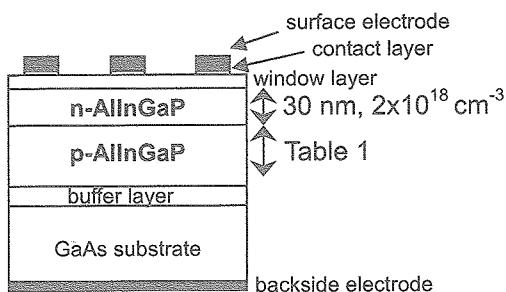


Fig. 1. Schematic structure of the AlInGaP solar cell on a GaAs substrate.

Table 1. Parameters of base layer of the AlInGaP SJ cells.

(a) Thickness		(b) Carrier Concentration	
Thickness [nm]	Carrier Concentration [cm^{-3}]	Thickness [nm]	Carrier Concentration [cm^{-3}]
1000	3.0×10^{16}	500	3.0×10^{16}
	6.0×10^{16}	750	
	9.0×10^{16}	1000	
	3.0×10^{17}	1250	
		1500	

4. 成果の概要

(1) ベース層膜厚依存性

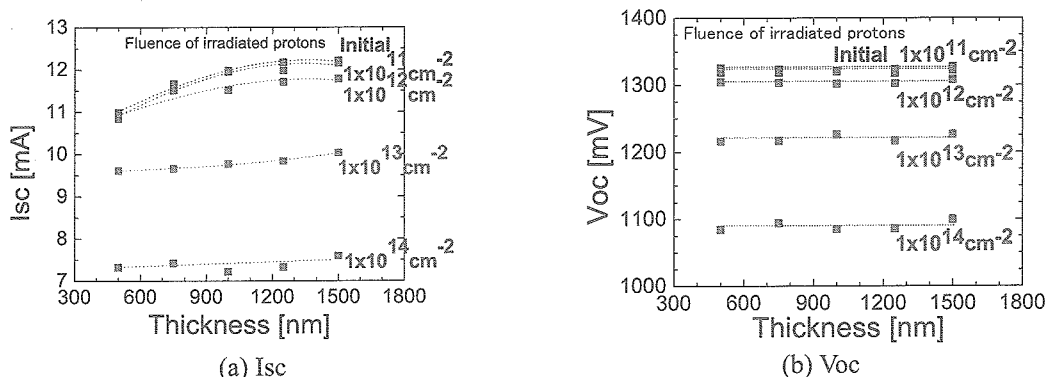


Fig. 2. (a) Isc and (b) Voc of the AlInGaP SJ cells as a function of base layer thickness. The indicated numbers are fluence of irradiated 3 MeV protons.

図2はベース層膜厚の異なる AlInGaP 単一接合セルの出力特性である。

まず初期特性 (放射線未照射) について述べる。図2中の Initial と示したデータは (a) Isc, (b) Voc の初期特性である。(a)において, Isc の膜厚 500 nm ~ 1250 nm では膜厚の増加と共に Isc は増加する。一方, 膜厚 1250 nm 以上では Isc は飽和する。これは膜厚が AlInGaP の少数キャリア拡散長よりも大きくなり, ベース層の深い領域で発生した少数キャリアが出力特性に寄与することが出来なくなったため, もしくは AlInGaP の光吸収が飽和したためと考えられる。(b)において, Voc はベース層膜厚に依存せず, どの膜厚でも一定である。

次に放射線照射による劣化特性について述べる。Isc, Vocの劣化特性を図2(a), (b)にそれぞれ示す。フルエンス $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ までは初期特性と同じ傾向であるが, フルエンス $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \sim 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の照射後では, Iscはどの膜厚でもほぼ同じ値となり, 膜厚が小さいほど保存率が高いことがわかる。図2(b)は Vocの劣化特性である。Vocの劣化特性は膜厚に依存しないことがわかる。

以上の結果から, 例えば静止軌道 10 年間のミッションを想定した場合, 3 MeV陽子線のフルエンス

として 10^{12} cm^{-2} オーダーが静止軌道 10 年間で受ける等価フルエンスであることから、ベース層膜厚として約 1250 nm が適当であるということがわかる。

(2) ベース層キャリア濃度依存性

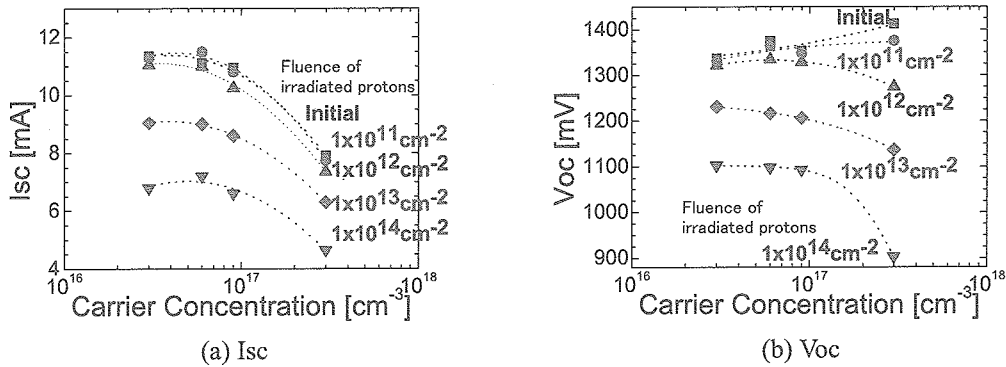


Fig. 3. (a) I_{sc} and (b) V_{oc} of the AlInGaP SJ cells as a function of base layer carrier concentration. The indicated numbers are fluence of irradiated 3 MeV protons.

図3はベース層キャリア濃度の異なる AlInGaP 単一接合セルの出力特性である。

まず照射前の初期特性について述べる。図3中の Initial と示したデータは(a) I_{sc} , (b) V_{oc} の初期特性である。(a)において、キャリア濃度の増加と共に I_{sc} が減少している。これはキャリア濃度が高くなるに従い発生した少数キャリアの再結合が増加し、少数キャリア拡散長の低下を引き起こした結果と考えられる。(b)において、 V_{oc} はキャリア濃度が高くなるに従い増加している。これは p 型の AlInGaP ベース層のフェルミレベルはキャリア濃度が高いほど荷電子帯に近づき、n型エミッタ層とp型ベース層間の拡散電位が大きくなったためと考えられる。

次に放射線照射による劣化特性に注目する。図3(a)において、照射後の I_{sc} はキャリア濃度が低い程、高い I_{sc} を維持している。図3(b)において、 V_{oc} は保存率として比較するとキャリア濃度が低いほど高いことが判る。

以上の結果から、例えば静止軌道 10 年間のミッションを想定した場合、(1) 項同様 10^{12} cm^{-2} オーダーと比較すると、ベース層キャリア濃度として約 $3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ が適当であるということがわかる。

(3) InGaP 単一接合セルとの耐放射線性の比較

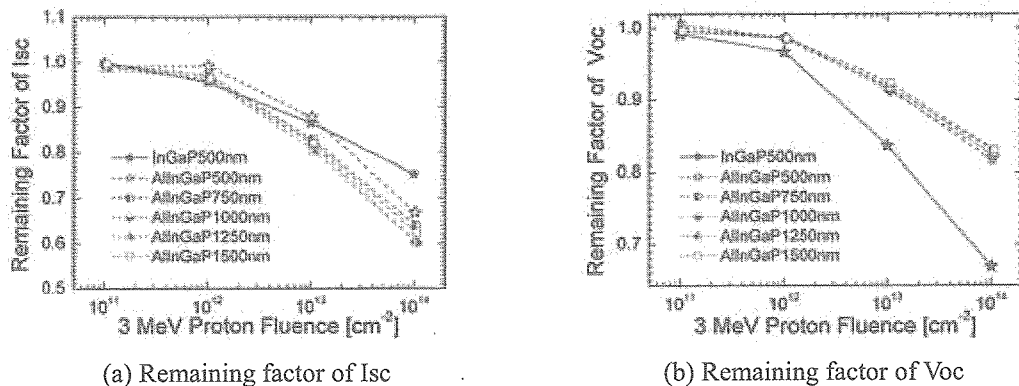


Fig. 4. Degradation of (a) I_{sc} and (b) V_{oc} of the AlInGaP SJ cells due to 3 MeV proton irradiation as a function of base layer thickness. For reference, result of an InGaP SJ cell (base layer thickness: 500 nm) is indicated.

図4はAlInGaPおよびInGaP単一接合セルの3 MeV陽子線照射による劣化特性を比較した結果である。ここで用いたInGaPセルは3 Jセルのトップセルとして最適化されたもので、ベース層膜厚は 500 nm である。図4(a)は I_{sc} の劣化特性である。同じ膜厚 (500 nm) で比較すると、フルエンス $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の範囲において AlInGaP セルは InGaP セルに比べ耐放射線性に優れている。しかし、AlInGaP セルの膜厚が 500 nm よりも大きい場合は InGaP セルの方が耐放射線性に優れている。今後はこの

点を改善するためにベース層キャリア濃度の傾斜構造を新たに検討する予定である。Vocの劣化特性を図4(b)に示す。どの膜厚のAlInGaPセルもInGaPセルに比べて放射線耐性が優れている。InGaPは非常に優れた耐放射線性を有する材料であるが、AlInGaPは実用領域でそれに勝る優れた耐放射線性を持つ材料であることが示された。

5. まとめ

3 接合太陽電池の性能向上を目指し、AlInGaP トップセルについて検討した。耐放射線性、電気的出力特性の構造依存性を検討するため、様々なベース層膜厚およびベース層キャリア濃度の AlInGaP 単一接合セルを作製した。照射前の初期出力特性および陽子線照射後の出力特性を測定し、出力特性および耐放射線性のベース層膜厚依存性、ベース層キャリア濃度依存性を把握することが出来た。以下に構造依存性をまとめる。

◇ 膜 厚

- a. Isc は膜厚 500 nm～1250 nm では膜厚増加に従い増加する。
1250 nm 以上では増加せず飽和する。
- b. Voc は膜厚に依存しない。

◇ キャリア濃度

- a. Isc はキャリア濃度が高いほど低い。
- b. 放射線未照射時の Voc はキャリア濃度が高いほど高い。照射後の Voc はキャリア濃度が高いほど低い。
- c. キャリア濃度が低いほど Voc の保存率が高い。

以上の結果から、例えば、静止軌道 10 年間のミッションを想定した場合、ベース層膜厚 1250 nm、ベース層キャリア濃度 $3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ が適当であるということがわかった。また AlInGaP の耐放射線性について検討した結果、AlInGaP は InGaP と比較してより優れた耐性を示した。

6. 参考文献

- [1] T. Takamoto, T. Agui, K. Kamimura and M. Kaneiwa, "Multijunction Solar Cell Technologies - High Efficiency, Radiation Resistance, and Concentrator Applications", *Proc. 3rd WCPEC*, 2003, 3PL-C2-01.
- [2] M. Imaizumi, T. Tatsuya, T. Sumita, T. Ohshima, M. Yamaguchi, S. Matsuda, A. Ohi and T. Kamiya, "Study of Radiation Resistance on Single-Junction Component Sub-cells in Triple-Junction Solar Cells", *Proc. 3rd WCPEC*, 2003, 3O-D6-02.
- [3] T. Sumita, M. Imaizumi, T. Ohshima, A. Ohi, T. Kamiya and S. Matsuda, "Analysis of End-of-Life Performance for Proton-Irradiated Triple-Junction Space Solar Cell", *Proc. 3rd WCPEC*, 2003, 3P-B5-10.
- [4] T. Agui, T. Takamoto and M. Kaneiwa, "Investigation on AlInGaP Solar Cells for Current Matched Multijunction Cells", *Proc. 3rd WCPEC*, 2003, 3P-B5-05.

7. 謝辞

本研究を実施するにあたりご協力頂いた日本原子力研究開発機構 大島武氏、伊藤久義氏に対し深謝いたします。