

Trial Production and Evaluation of IMM3J Solar Cells Optimized for Solar Spectrum in Mars Atmosphere

Hiroyuki Toyota¹, Takanobu Shimada¹, Yu Takahashi¹, Akira Oyama¹, Hidetoshi Washio²

¹ Institute of Space and Astronautical Science / JAXA,
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5210, Japan

² Sharp Coporation,
492 Misono-cho, Yamato-Koriyama-shi, Nara, Japan

Abstract:

We describe the production and evaluation of a prototype of an inverted metamorphic triple-junction (IMM3J) solar cell optimized for the solar spectrum on the surface of Mars. High-efficiency, flexible, lightweight solar panels containing IMM3J solar cells are promising power sources for Mars surface explorers such as rovers, landers, and airplanes. The intensity of sunlight at the Martian surface substantially decreases at wavelengths shorter than 700 nm because of absorption and scattering by the atmosphere. This decreases the output current of the InGaP top cells in state-of-the-art IMM3J solar cells, and thus decreases the overall output current. Therefore, solar cells for Mars surface explorers need to be optimized for the solar spectrum at the Martian surface. We modified IMM3J solar cells in two ways to increase the output power. We increased the thickness of the InGaP top cell to increase the light absorption, which increased the output current of the entire cell. We also increased the band gap energy of the InGaAs bottom cell by trimming the surplus current, in order to increase the output voltage. In the simulated Martian solar spectrum, the performance of the prototype solar cells was higher than that of IMM3J solar cells designed for the AM0 spectrum.

火星大気中の太陽光スペクトルに合わせた IMM3J太陽電池セルの試作と評価

豊田裕之, 嶋田貴信, 高橋優, 大山聖 (JAXA 宇宙科学研究所)
鷺尾英俊 (シャープ株式会社)

1. はじめに

JAXA宇宙科学研究所で開発を進めている火星探査航空機や火星ローバは、太陽電池とバッテリーから電力を得る計画である。

通常の宇宙用太陽電池は、Air Mass 0 (AM0) スペクトルに対して高い変換効率を得られるよう設計されている。火星大気を通過した太陽光のスペクトルはAM0スペクトルから外れるため、通常の宇宙用太陽電池では、必ずしも高い効率を得られない。

そこで我々は、火星の地表付近の太陽光スペクトルの下で、より高い変換効率を得られる太陽電池セルを試作し、その特性を評価したので、報告する。

2. 火星用太陽電池セルの設計と試作

2.1. 宇宙用太陽電池の種類と特徴

従来の宇宙用太陽電池の種類と特徴を表1に示す。電気特性の各値は、25°C、AM0光の下でのものである。

数年前まで、宇宙用太陽電池の主流は長らく単結晶Siであった。しかし単一の材料で変換効率を高めることには限界がある。より高い変換効率を求

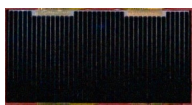
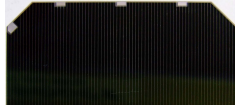
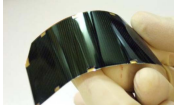
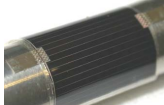
めて、現在の主流は化合物系3接合太陽電池に移行している。これにより、30%近い変換効率が達成された。

化合物系3接合太陽電池の基板であるGe層を除去して薄膜化したものが、薄膜2接合太陽電池である。その薄さゆえフレキシブルで、曲面パネルや低剛性パネルにも搭載可能であり、太陽電池パネルの大幅な軽量化を実現する。

IMM3接合太陽電池は、現在開発中の最先端の太陽電池である。構造の簡略図を図1に示す。IMM3接合を含む多接合太陽電池は、複数の太陽電池(サブセル)を直列接続して構成される。したがって最も発生電流の小さなサブセルが、多接合太陽電池全体の発生電流を制限する。表1に示した多接合セルでは、いずれもInGaP層が電流制限セルになる。

従来の3接合太陽電池は、Ge層の発生電流が他の2層に比べて非常に大きく、バランスが悪い。そこでIMM3接合太陽電池は、Ge層に替えてバンドギャップの大きな材料を用いることで、各層の発生電流を一致させ、変換効率の向上を図っている。従来型3接合とIMM3接合太陽電池の分光感度特性を図2に示す。最も長波長の光を吸収する層の吸収

表1 各種宇宙用太陽電池

	単結晶Si	化合物系3接合	薄膜2接合	IMM3接合
材料 (バンドギャップ)	Si (1.1 eV)	InGaP (1.86 eV) / InGaAs (1.40 eV) / Ge (0.67 eV)	InGaP (1.86 eV)/ InGaAs (1.40 eV)	InGaP (1.9 eV)/ GaAs (1.42 eV)/ InGaAs (1.0 eV)
厚み	50~100 μm	150 μm	~10 μm	~20 μm
開放電圧	0.605 V	2.665 V	2.382 V	2.988 V
短絡電流	40 mA/cm ²	17.05 mA/cm ²	16.75 mA/cm ²	16.85 mA/cm ²
変換効率	17%	28.3%	24.8%	30.4%
外観				

端が、短波長寄りに変化していることがわかる。また、ここでは詳述しないが、IMM3接合太陽電池は、受光面から成長させる製造法により、結晶欠陥を低減させる工夫が凝らされている。

2.2 火星用太陽電池セルの設計概要

火星用太陽電池の設計にあたり、まず火星表面付近の太陽光スペクトルを求める。

火星は太陽から約1.5 AUの距離にあるため、図3に示すとおり、太陽光強度は1 AUの約0.44倍に低下する。これによって太陽光スペクトルは図4中「AM0」から「火星大気の上端」に変化する。この時、スペクトル形状の変化はない。

火星大気の透過率は波長に対して不均一で、図4中「火星大気の透過率」のようになる（Optical Depth = 1の場合）。したがって火星大気通過後の太陽光スペクトルは、図4中「火星大気の下端」に示すようになる。

ここで図2に示した分光感度特性を振り返ると、火星大気の透過率が大きく落ち込む600 nm以下の

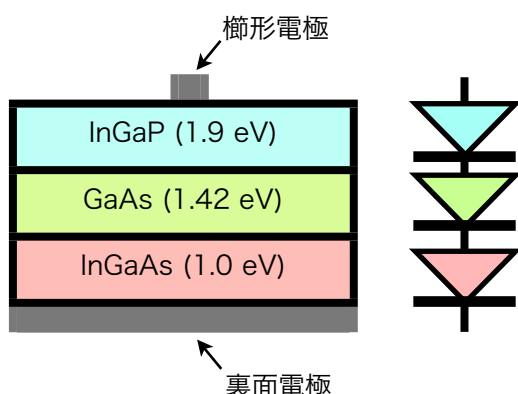


図1 IMM3接合太陽電池の構造

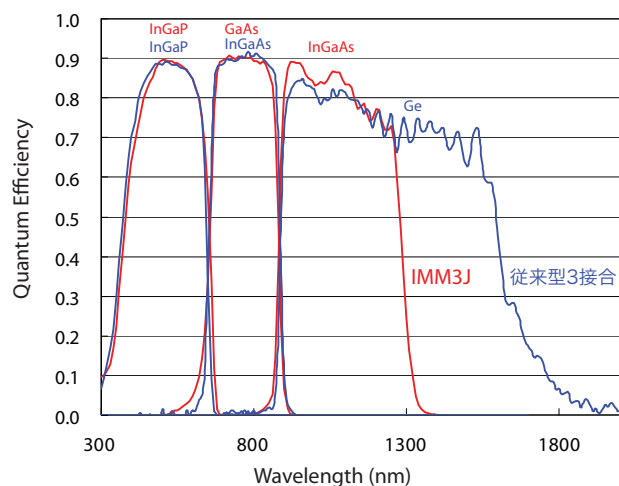


図2 従来型3接合とIMM3接合太陽電池の分光感度特性

波長領域は、電流制限セルとなるInGaP層の感度領域に一致する。すなわち、従来型3接合やIMM3接合太陽電池を使用すると、発生電流の低下は、光量低下割合よりも大きく現れることになる。

そこで、次の方針に基づいて、火星用太陽電池の試作を行うこととした。

- 現状試作可能な太陽電池のうち、最も変換効率の高いIMM3接合型をベースとする。
- 600 nm以下の波長領域における光量低下を補うため、InGaP層を厚くする。
- 電流発生が過剰になるInGaAs層の吸収端を短波長側にシフトし、発生電流を絞ると同時に発生電圧を高める。

3. 試作した火星用太陽電池セルの特性評価

試作した太陽電池セルの外観写真を図5に示す。基本構造はIMM3接合と同じくInGaP/GaAs/InGaAsで、セル寸法は20 mm角である。

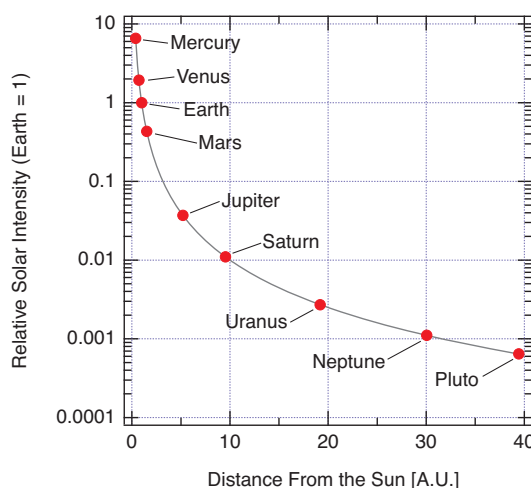


図3 太陽系の惑星の太陽距離と太陽光強度

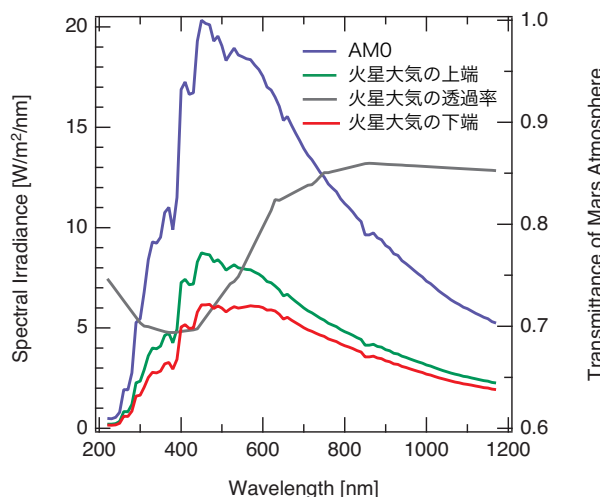


図4 各条件での太陽光スペクトル

電気特性の評価を行うにあたり、火星大気の吸収を模擬する光学フィルタを製作した。その特性を図6に示す。光学フィルタでは250 nm以下で急激に落ち込んでいるが、図2に示すとおり太陽電池の感度がないため問題ない。

電気特性の測定は、

- AM0光
- AM0光を0.44 Sunsに減光した光（火星大気の上端に相当）
- 火星表面における太陽光

の3種類の光の下で行った。測定対象は、502（従来型3接合）、AM0用IMM3接合、火星用IMM3接合の3種類の太陽電池セルである。各条件でのIV特性はその結果を図7～9に示す。また、各環境における最大発生電力（ P_{max} ）を図10に示す。

AM0光およびそれを0.44 Sunsに減光した光の下では、AM0用IMM3接合の発生電力が最も高い。火星用IMM3接合は、AM0用IMM3接合のIV特性を電流減少方向にシフトしたような特性を示し、発生電力は最も低くなった。

逆に、火星表面における太陽光の下では、火星用IMM3接合はAM0用IMM3接合のIV特性を電流増加方向にシフトしたような特性を示し、狙い通りに最も高い発生電力を得ることに成功した。

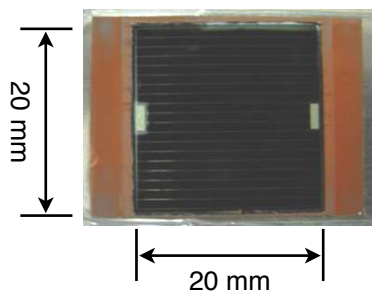


図5 試作した火星用太陽電池セルの外観

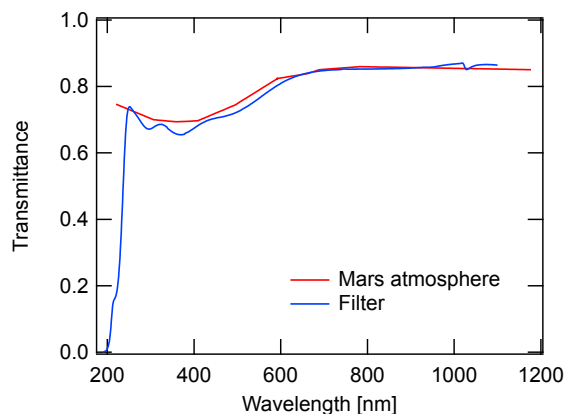


図6 火星大気を模擬する光学フィルタの特性

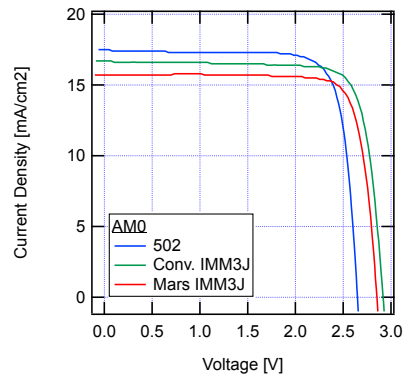


図7 AM0光の下でのIV特性

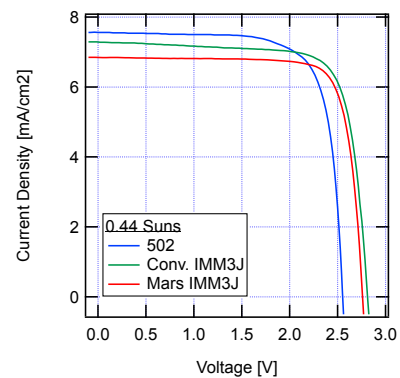


図8 AM0光を0.44 Sunsに減光した光の下でのIV特性

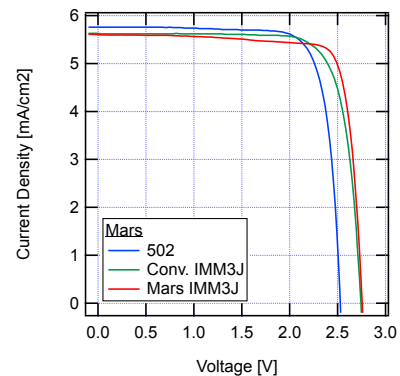


図9 火星表面における太陽光の下でのIV特性

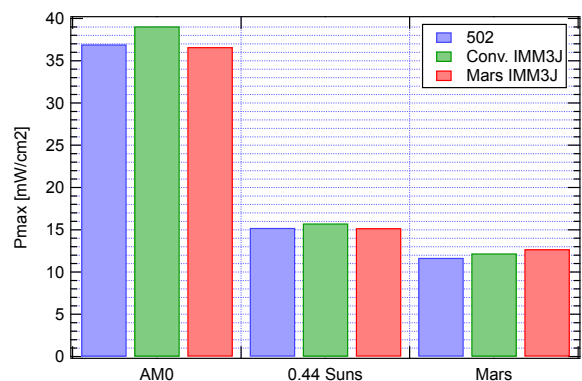


図10 各環境における最大発生電力の比較

今後はさらなる構造の最適化を行うとともに、放射線等の宇宙環境耐性の評価を進めてゆく予定である。

4. おわりに

本稿では、火星表面における太陽光スペクトルに最適化した太陽電池の設計の概要と、試作品の電気特性を報告した。火星大気による減衰の大きな波長が、多接合太陽電池の電流を制限するサブセルの感度領域に相当する。そこで、これを補うべく当該のサブセルの厚みを増し、発生電流バランスを変化させた。その結果、火星表面における太陽光の下での発生電力を高めることに成功した。

参考文献

- (1) Tatsuya Takamoto et. al: “World’s Highest Efficiency Triple-junction Solar Cells Fabricated by Inverted Layers Transfer Process”, Proc. of 35th Photovoltaic Specialists Conference (2010)
- (2) Kenneth M. Edmondson et al.: “Simulation of the Mars Surface Solar Spectra for Optimized Performance of Triple-junction Solar Cells”, Proc. of 19th Space Photovoltaic Research and Technology Conference” (2005)

謝辞

本稿で報告した太陽電池セルの電気特性評価にあたり、株式会社 エイ・イー・エスの原田次郎氏、JAXA の今泉充氏に、多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。