

[20015]

フレキシブル基板上に作製した化合物太陽電池の放射線特性解明

Impacts of electron and proton irradiation properties for solar cells using flexible substrate

杉山 睦^{#A)}, 加藤 匠秀^{A)}, 屋代 貴彦^{A)}, Lin Tzu-Ying^{A)}, Ishwor Khatri^{A)}
Mutsumi Sugiyama^{#A)}, Naruhide Kato^{A)}, Takahiko Yashiro^{A)}, Lin Tzu-Ying^{A)}, Ishwor Khatri^{A)}
^{A)} Tokyo University of Science

Abstract

The feasibility of in-space applications of a CIGS solar cells and NiO/TiO₂ visible-light-transparent solar cell was investigated. The degradation of photovoltaic properties of CIGS and NiO/TiO₂ solar cells after irradiation was evaluated to determine the possibility of long-term operation in space. No significant difference was observed between normal and "flexible" CIGS solar cells. These solar cells showed the potential of a higher radiation tolerance, as compared to Si or GaAs-based solar cells.

Keyword: CIGS, NiO, solar cells, degradation

1. はじめに

カルコパイライト系 Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)太陽電池は高変換効率[1]と高放射線耐性[2]を有するため、次世代の宇宙用太陽電池として期待されている。太陽電池を宇宙空間に輸送するためには重量を抑える必要があるため、CIGS 太陽電池において一般的に用いられるソーダライムガラス(SLG)基板よりも軽量で割れにくい、使い勝手の良い基板が必須である。Ti 基板はその耐熱性、耐久性、軽量性から宇宙用途での利用が期待できる。しかし、Ti 基板上の CIGS 太陽電池の物性については未解明な点が多く残っている。特に宇宙利用を検討する際は放射線照射やヒートサイクルによる影響を検討する必要があるが、Ti 基板上 CIGS 太陽電池での報告例は少ない。本研究では厚さ 50 μm のフレキシブル Ti 基板上に CIGS 太陽電池を作製し、放射線照射試験やヒートサイクル試験を行うことで、宇宙空間での実用性について検討を行った。

一方、酸化ニッケル(NiO)は禁制帯幅 4.0 eV のワイドバンドギャップ半導体[3]で、p 型の導電性を示す酸化物半導体であるため、透明デバイスへの応用が期待される。これまで我々は NiO と n 型の酸化亜鉛(ZnO)を組み合わせる事によって、NiO 系可視光透過型太陽電池の作製をスパッタ法により行ってきた[4]。この可視光透過型太陽電池は、紫外光を吸収し可視光を透過するため、設置場所の自由度が高い。また、ワイドバンドギャップ半導体であるため、優れた環境耐性が期待できる。これらの特徴を活かすことで、IoT 社会や宇宙空間での実用についても期待できる。一方で、現在の ZnO を用いた NiO 系可視光透過型太陽電池は発電効率や信頼性が未だ乏しく、新たな n 型層の材料検討も必要である。そこで注目したのが酸化チタン(TiO₂)である。TiO₂は光触媒塗料や色素増感太陽電池として商品化された実績があり、湿熱耐性を持つ n 型半導体である。本研究では NiO 系可視光透過型太陽電池の実用化の第一歩として、TiO₂を光吸収層に用いた NiO/TiO₂ 太陽電池の試作を行い、TiO₂のキャリア密度制御による変換効率の向上を検

討した。また宇宙用途への検討として、陽子線照射に対する耐性について評価した。

2. 実験方法

CIGS 太陽電池について、Ti 及び SLG 基板上に、Al/Ni/ZnO:Al/ZnO/CdS/CIGS/Mo 構造をそれぞれ作製した。放射線照射試験では、作製した太陽電池に対して加速エネルギー 2 MeV、照射量 $1 \times 10^{13} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射を行い、その前後で J-V 測定を行った。ヒートサイクル試験では、作製した太陽電池に対して、-30℃～80℃の温度設定において、1 サイクルの時間を 2 分として、6000 サイクルのヒートサイクル試験を行い、1500 サイクルごとの試料に対して試験前後で電流密度-電圧(J-V)測定を行った。

NiO 太陽電池について、RF マグネトロンスパッタ法を用いて、Ag paste/NiO:Li/TiO₂/ITO/Glass 構造を作製した。成膜時の酸素とアルゴンの流量比を変化させることで TiO₂のキャリア密度を制御し、各キャリア密度における太陽電池の J-V 測定を行った。また、作製した太陽電池に対して 380 keV の陽子線照射試験を行い、その前後で J-V 測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 Ti 及び SLG 基板上 CIGS 太陽電池の放射線およびヒートサイクル耐性

Figure 1 に Ti 及び SLG 基板上 CIGS 太陽電池の電子線照射量に対する照射前後における変換効率の変化割合を示す。Ti 基板上 CIGS 太陽電池の変換効率は照射量 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ まで低下せず、SLG 基板上 CIGS 太陽電池と同程度の電子線耐性を有していることが確認された。また、照射量 $1 \times 10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ で変換効率の向上が確認された。この要因として、これまで我々はガラス基板上の CIGS 太陽電池に対し、電子線照射による原子のはじき出しの影響によりアクセプタ源である銅空孔: V_{Cu}が増加し、キャリア濃度が増加することによって開放電圧 V_{oc}が増加したためであることを明らかにしてきた[5]が、Ti 基板を用いた CIGS 太陽電池でも同様の結果となるこ

[20015]

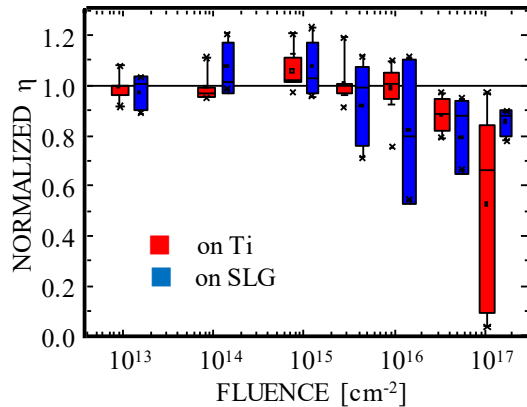


Figure 1. Normalized efficiency of CIGS solar cells on SLG or flexible Ti substrate as a function of electron irradiation fluence.

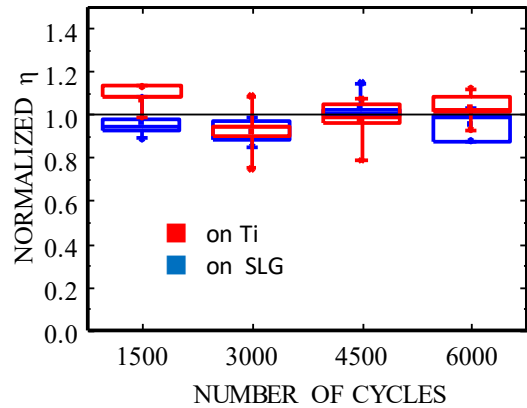


Figure 2. Normalized efficiency of CIGS solar cells on SLG or flexible Ti substrate as a function of heat-cycle.

とを明らかにしたとともに、Ti 基板やフレキシブル化に伴う曲げた事に固有の欠陥は発生しなかった。

Figure 2 に Ti 及び SLG 基板上 CIGS 太陽電池特性のヒートサイクル数依存性を示す。変換効率は 6000 サイクルまで減少しなかった。この要因として、基板として用いた Ti の熱膨張係数は 8.6 ppm、SLG は 8.5 ~ 9.0 ppm であるのに対して、光吸収層である CIGS の熱膨張係数は 9~11 ppm であり、基板に近い値を有している[6]ことや、CIGS が多結晶半導体であることから、熱膨張と収縮を繰り返すことで面欠陥等が形成されにくく、キャリア拡散長の低下がおこりにくいためと推測した。以上より、CIGS 太陽電池の軽量化・フレキシブル化に向け、Ti 基板は非常に相性が良いことを明らかにすることができた。

3.2 NiO/TiO₂ 太陽電池の放射線耐性

Figure 3 に TiO₂ の各キャリア密度における NiO/TiO₂ 太陽電池の発電特性の依存性を示す。TiO₂ のキャリア密度が減少するにつれて短絡電流密度

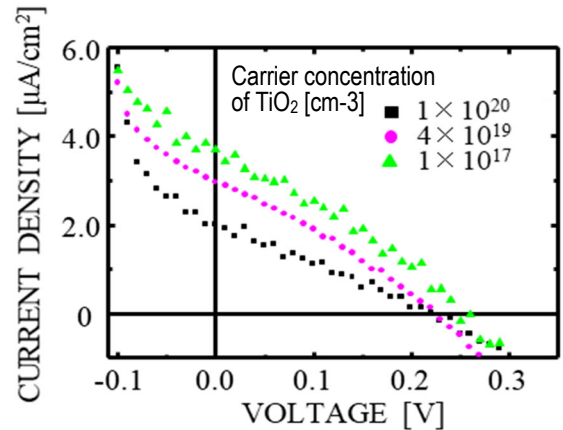


Figure 3. Representative J-V property of NiO/TiO₂ solar cells as a function of carrier concentration of TiO₂ layer.

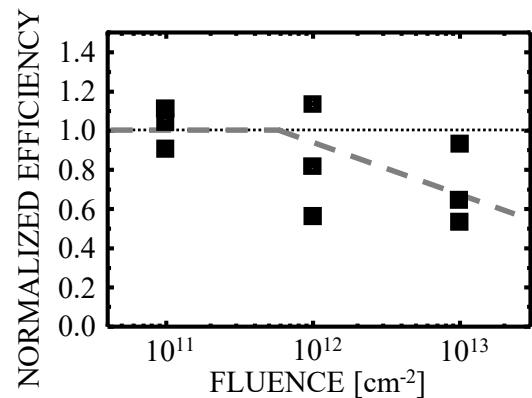


Figure 4. Normalized efficiency of NiO/TiO₂ solar cells as a function of proton irradiation fluence.

(Jsc)が増加し、変換効率(η)が増加した。キャリア密度の減少に伴い空乏層幅が拡大したことによって光の吸収量が増加したことが一因であると考えられる。

Figure 4 に NiO/TiO₂ 太陽電池の陽子線照射前後における発電効率の変化割合を示す。照射試料数が少なく、詳細な劣化メカニズムなどは継続的に実験する必要があるものの、 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ の照射量で発電効率低下が始まる GaAs 系太陽電池 [7]と比較して、NiO/TiO₂ 太陽電池は 100 倍程度高い陽子線耐性を有する可能性があることが示唆された。

4. 結論

電子線照射試験において、Ti 基板上 CIGS 太陽電池は SLG 基板上 CIGS 太陽電池と同程度の電子線耐性を有していることが確認された。また、ヒートサイクル試験において、Ti 及び SLG 基板上 CIGS 太陽電池は 6000 サイクルまでのヒートサイクル耐性を確認した。一方、NiO/TiO₂ 太陽電池は GaAs 系太陽電池の 100 倍程度の陽子線耐性を確認した。以上の

[20015]

実験結果より、宇宙空間でのフレキシブル CIGS 太陽電池の実用性や NiO/TiO₂ 太陽電池の利用可能性が示唆された。

参考文献

- [1] M. Nakamura, et al., IEEE J. Photovolt. 9 (2019) 1863.
- [2] M. Yamaguchi, et al., J. Appl. Phys. 78 (1995) 1476.
- [3] H. Nakai, et al., Appl. Phys. Lett. 110 (2017) 181102.
- [4] M. Warasawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 021102.
- [5] I. Khatri, et al., Phys. Status. Solidi RRL 13 (2019) 1900415.
- [6] F. Kessler, et al., Sol. Energy 77 (2004) 686.
- [7] B. E. Anspaugh, The Conference Record of the 21st IEEE PVSC, (1991) 1593.