

[21040]

フレキシブル基板上に作製した化合物太陽電池の耐放射線特性解明

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

杉山 睦一^{#,A)}, 浦田 奈波^{A)}, 金井 綾香^{A)},
Mutsumi Sugiyama^{#,A)}, Nanami Urata^{A)}, Ayaka Kanai^{A)}
^{A)} Tokyo University of Science

Abstract

The radiation effects on Cu_2SnS_3 (CTS) solar cells were investigated by proton irradiation. The CTS solar cells had a high radiation tolerance comparable to other Cu compound solar cells such as CIGS. In order to understand the reason for the high radiation resistance of CTS solar cells, proton irradiation of CTS thin films was carried out to investigate the effect of proton irradiation on their electrical properties. The results show that there is no change in the electrical properties of the CTS solar cells by 10^{13} cm^{-2} irradiation.

Keyword: CTS solar cells, degradation properties, proton irradiation

1. はじめに

宇宙空間は、宇宙放射線や熱サイクルをはじめとする半導体デバイスの劣化要因が多い環境であり、宇宙機を構成するデバイスには高い各種耐性が求められる。中でも宇宙用太陽電池は常に暴露空間にあり、かつ宇宙機の電力源であるため、とりわけ高い耐性と信頼性が求められる。

CTS(Cu_2SnS_3)は、構成元素が地殻中に豊富に存在し、光吸収材料に適したバンドギャップや光吸収係数を持つことから、次世代フレキシブル太陽電池材料として期待されている[1]。また近年、銅(Cu)を材料に含む Cu 化合物太陽電池が高い放射線耐性を持つことが確認されており[2]、CTS を光吸収材料とする CTS 太陽電池も高い放射線耐性を持つことが期待されるが、CTS 太陽電池の放射線耐性に関する報告は無いのが現状である。本研究では、CTS 太陽電池の宇宙利用を目指し、手始めにその放射線耐性について検討した。CTS 太陽電池に陽子線を照射し、その影響を調査した。また、CTS 太陽電池の放射線耐性の原因解明の一助として、CTS 単体の薄膜にも陽子線を照射し、その電気特性への影響を調査した。

2. 実験方法

CTS 太陽電池について、ソーダライムガラス(SLG)基板上に、 $\text{Al}/\text{Ni}/\text{ZnO}:\text{Al}/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CTS}/\text{Mo}$ 構造を作製した[1]。また、電気特性を評価するために、SLG 基板上に直接 CTS 薄膜を堆積した[3]。陽子線の照射エネルギーに対する太陽電池内での軌跡を、二体衝突シミュレーションソフト(SRIM)を用いてシミュレーションした。Figure 1 に CTS 太陽電池構造と、それに対応する陽子線の侵入深さを示す。陽子線の照射エネルギーを 30 keV、100 keV、200 keV、380 keV と制御したとき、陽子はそれぞれ透明導電膜内、バッファ層、CTS 薄膜内、裏面電極内まで到達した。通常、宇宙用デバイスの対放射線試験では数~数十 MeV 程度の照射エネルギーを用いるが、CTS 太陽電池は薄膜構造のため、同程度の照射エネルギーを用いると基板まで貫通することがシミュレーション結果より確認された。本研究では、陽子線による CTS 太陽電池への影響を調査するため、照射粒子が薄膜内に捕獲される程度の照射エネルギーを目標とし、シミュレーション結果より照射エネルギーを 380 keV に設定し、照射量を $1 \times 10^{12} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ と変化させた。陽子線照射前後で、CTS 太陽電池の発電(J-V)測定および CTS 薄膜のホール測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 陽子線照射による CTS 太陽電池への影響

CTS 太陽電池に対して、照射エネルギー 380 keV の陽子線を照射量 $10^{12} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の間で変化させて照射した。各照射量に対する照射前後の最大発電量および変換効率の変化割合を Figure 2 に示す。各照射量に対してサンプルは 9 枚ずつ用意し、データは箱ひげ図で示している。照射量が $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ よりも小さい時、最大発電量と変換効率の低下は確認されなかったが、照射量が $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 以上になると徐々に低下しはじめた。これは、放射線耐性が高いと報告

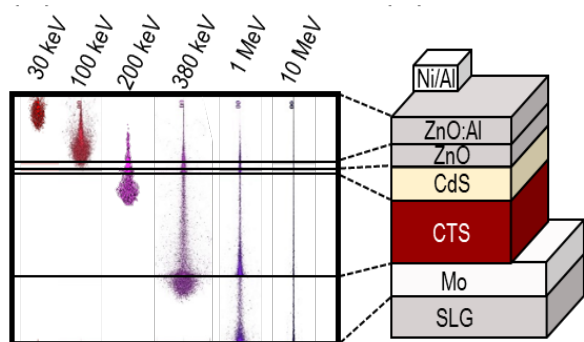


Figure 1 照射エネルギーによる陽子線の侵入深さの変化

[21040]

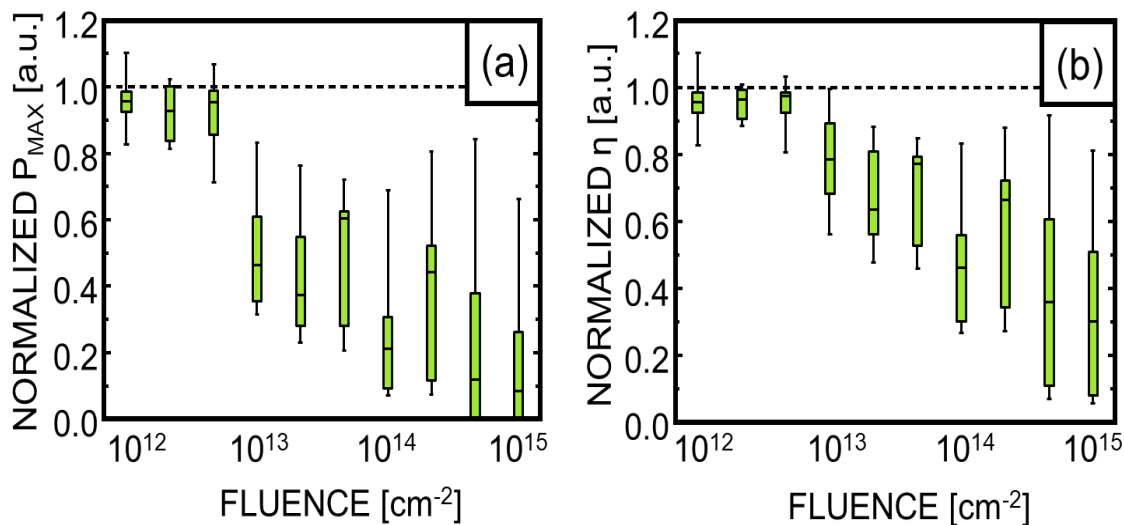


Figure 2 陽子線照射による CTS 太陽電池の、(a)最大発電量および(b)変換効率の変化割合

されている CIGS 太陽電池と同等の結果であり [2][4][5]、CTS 太陽電池も他の Cu 化合物系と同様に放射線耐性が高いと示唆される。また、劣化が始まる照射量 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ は、ISS などの軌道である低軌道に換算すると約 100 年分の照射量に相当し [6]、CTS 太陽電池は宇宙環境で長期的な運用が期待される。

CTS 太陽電池の劣化要因について考察を深めるために、各陽子線照射量に対する照射試験前後の短絡電流密度(J_{sc})および開放電圧(V_{oc})の変化割合を調査したところ、 J_{sc} 、 V_{oc} ともに約 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 以上の照射で低下する傾向が確認された。これは最大発電量の低下の様子とも一致する。過去の報告より、透明導電膜やバッファ層における陽子線照射の影響は無いと確認されており [4]、本実験でも同条件の透明導電膜やバッファ層を用いていることから、この結果

は CTS 層への影響によるものと判断した。一般に V_{oc} は pn 接合界面の、 J_{sc} は光吸収層の影響を強く受けることが知られている。本実験では J_{sc} と V_{oc} が同程度の低下を示したことから、CdS/CTS 界面付近から CTS 薄膜内にかけて一様に欠陥が形成され、それが劣化の一因となり発電量が低下したと考えられる。

3.2 陽子線照射による CTS 薄膜への影響

前節より、CTS 太陽電池への陽子線照射は、太陽電池を構成する各層の中でも特に CTS 層に影響を及ぼすことが示唆された。そこで、具体的な劣化要因を特定するため、CTS 薄膜に陽子線を照射し、手始めにその電気特性への影響を調査した。Figure 3 に、陽子線照射前後における CTS 薄膜のキャリア濃度の変化割合を示す。太陽電池特性が劣化をし始めた照

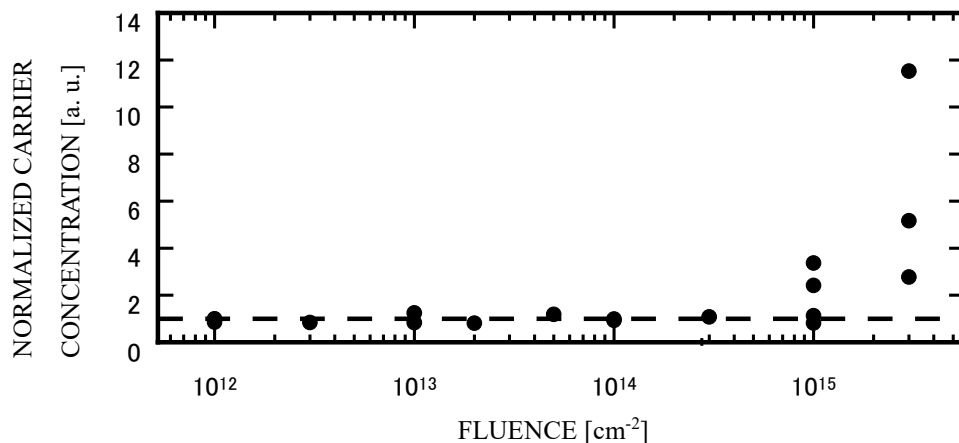


Figure 3 陽子線照射による CTS 薄膜のキャリア濃度の変化

[21040]

射量である $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を超えても、キャリア濃度は変化しなかった。この結果より、太陽電池特性の劣化は、陽子線照射によるキャリアの生成・欠損によるものではないと示唆される。

放射線照射による半導体の主な劣化要因は、はじき出し損傷効果であることが知られている。今回も陽子線照射によって CTS 薄膜内で何らかの原子がはじき出され欠陥を形成していることが推測される。同じ Cu 化合物である CIGS では、放射線照射によって Cu 原子が最も弾き飛ばされやすく、その飛ばされた Cu 原子が Cu 空孔の位置に入ることにより、見かけ上は何の欠陥も生じないため放射線耐性が高いと報告されている[2][4][5]。本研究では、CTS においても CIGS と同様に Cu 原子および Cu 空孔が高い放射線耐性の一因として関係しているのではないかと推測しており、本結果はこの推測に矛盾しない。しかしながら、原因の特定には更なる調査が必要である。

4. 結論

CTS 薄膜および CTS 太陽電池を作製し、照射エネルギー 380 keV の陽子線を照射した。照射前後の太陽電池に対して J-V 測定を用いて太陽電池特性を測定したところ、CTS 太陽電池が CIGS 太陽電池と同等の高い放射線耐性を持つことが確認できた。また、放射線耐性が高い原因解明の一助として、陽子線照射前後の CTS 薄膜の電気特性を測定した。太陽電池が劣化をはじめる照射量である 10^{13} cm^{-2} 以上の照射を行っても、キャリア濃度の変化が無いことを確認した。一般に半導体における放射線照射の影響ははじき出し損傷効果による欠陥形成だと知られているが、CTS における欠陥形成はキャリア源である Cu 空孔には関与しないと推測した。

参考文献

- [1] A. Kanai, and M. Sugiyama, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 231, 111315 (2021).
- [2] I. Khatri, T.-Y. Lin, T. Nakada, and M. Sugiyama, Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett. 13, 1900519 (2019).
- [3] N. Urata, A. Kanai, and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 60, 115503 (2021).
- [4] Y. Hirose, M. Warasawa, I. Tsunoda, K. Takakura, and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 111802 (2012).
- [5] S. Kawakita, M. Imaizumi, S. Ishizuka, S. Niki, S. Okuda, and H. Kusawake, Thin Solid Films 535, 353 (2013).
- [6] N. Kato, and M. Sugiyama, Jpn. J. Appl. Phys. 60, 048001 (2021).