

## 酸化物太陽電池のプロトン照射挙動

Proton irradiation studies on an oxide solar cell

藤田 敏之<sup>1)</sup> 鹿野 文寿<sup>1)</sup> 塩川 美雪<sup>1)</sup> 大西 春樹<sup>1)</sup> 山下 勝也<sup>1)</sup>  
保西 祐弥<sup>2)</sup> 芝崎 聡一郎<sup>2)</sup> 山本 和重<sup>2)</sup>

Toshiyuki FUJITA Fumihisa KANO Miyuki SHIOKAWA Haruki OHNISHI Katsuya YAMASHITA  
Yuya HONISHI Soichiro SHIBASAKI Kazushige YAMAMOTO

<sup>1)</sup>東芝エネルギーシステムズ株式会社 <sup>2)</sup>株式会社東芝

### (概要)

透過型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池の外部環境に対する基礎的な性質を把握するため、プロトン照射試験を行い電流電圧特性の変化を評価した。加速エネルギー200keV のプロトンに対しては照射量  $3 \times 10^{10}$  個/cm<sup>2</sup> 以下で、加速エネルギー3MeV では最大照射量の  $3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> まで明瞭な効率低下(劣化)は認められなかった。これらの劣化挙動は、III-V 族系太陽電池と比較しても優れており、プロトン照射環境における Cu<sub>2</sub>O 太陽電池の優れた耐性を示唆するものと考えられる。

**キーワード** : Cu<sub>2</sub>O、太陽電池、プロトン

### 1. 目的

太陽光発電システムは広く普及し始めているが、そのキーコンポーネントである太陽電池の変換効率向上と低コスト化は重要な技術課題になっている。現在、シリコン(Si)系を中心とした太陽電池が販売されているが、効率やコスト改善には限界が近づいていると思われる。我々は、地球上に豊富に存在する銅の酸化物を材料とする透過型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池を結晶 Si 太陽電池の上に積層することで、幅広い波長の光を活用できる高効率・低コストタンDEM太陽電池の実現を目指している[1]。これまで独自の薄膜形成技術による透過型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池の作製に成功し、高効率化に向けた検討を進めている。一方で、使用環境における経年劣化などの特性把握も重要である。結晶 Si 太陽電池については多くの知見が蓄積されているが、Cu<sub>2</sub>O 太陽電池の特性は不明なところが多い。本研究では、透過型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池の基礎的な特性把握のため、宇宙環境などで重要な劣化因子となるプロトン(陽子線)照射への耐性と劣化挙動把握を目的とした。

### 2. 実施方法

プロトン照射試験には、株式会社東芝 研究開発センターで試作した小型の透過型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池セルを用いた。小型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池セルは、ガラス基板上に裏面透明電極、p 型 Cu<sub>2</sub>O 層、n 型酸化物層、表面透明電極、金属集電極、反射防止膜を積層した構造を有している。陽子線照射前後に AM1.5 の疑似太陽光照射による電流電圧測定を行い、短絡電流密度 J<sub>sc</sub>、開放電圧 V<sub>oc</sub>、形状因子 FF、効率 Eff. を評価した。

プロトン照射は、QST 高崎量子応用研究所 TIARA 施設を利用した。SRIM コードによる投影深さ分布評価により、ほぼすべてのプロトンが Cu<sub>2</sub>O 層で停止する、または貫通する条件として、それぞれ加速エネルギー200keV と 3MeV を選定した。200keV プロトン照射にはイオン注入装置、3MeV にはタンDEM加速器を利用した。イオン注入装置においてはターゲット電流値 1 μA、スキャン幅 35mm 角に、タンDEM加速器においてはターゲット電流値 0.3 μA、スキャン幅 20mm 角に調整し、小型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池セル表面へプロトンを照射した。照射量は、フラックス(電流密度)一定のもとイオンカウンターを用い制御した。最大照射量は  $3 \times 10^{13}$  個/cm<sup>2</sup> とした。

### 3. 結果及び考察、今後の展開等

小型 Cu<sub>2</sub>O 太陽電池セル 14 個に対して、加速エネルギー2 水準、照射量 7 水準のプロトンを照射した。照射後の試料において外観上や分光透過率(波長 200~1400nm)に変化は認められなかった。

図 1 はプロトン照射量と J<sub>sc</sub>、V<sub>oc</sub>、FF、Eff. の変化率の関係を示している。J<sub>sc</sub> は、200keV プロト

ン照射に対して照射量  $3 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> 以上で緩やかに低下する傾向を示しているが、3MeV プロトンでは明瞭な低下は認められない。 $V_{oc}$  は照射量  $3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> で照射前よりも低下するが低下率 5%未満と小さく、プロトンの加速エネルギーの違いによる顕著な差異も認められない。FF は  $1 \times 10^{11}$  p/cm<sup>2</sup> まではほぼ一定であるが、200keV プロトンでは照射量  $3 \times 10^{11}$  p/cm<sup>2</sup> 以上で低下傾向を示す。 $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF の積に相当する Eff. は、照射量  $3 \times 10^{10}$  p/cm<sup>2</sup> 以下ではほぼ一定である。さらに高照射量では、200keV プロトンでは Eff. は変化しはじめ  $3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> では約 40%低下するが、3MeV プロトンでは  $3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> までほぼ一定であり変化は示さない。

200keV プロトンによる Eff. の変化挙動は、 $V_{oc}$  よりも  $J_{sc}$  の低下影響に支配的である。プロトン照射による Eff. 低下は、少数キャリア密度の減少起因であることが示唆される。一方、3MeV プロトンに対しては明瞭な低下は認められていない。照射したプロトンの加速電圧による劣化挙動の違いは、欠陥の生成量や形態がプロトンエネルギーに依存しているものによると思われる。すなわち、200keV プロトンは Cu<sub>2</sub>O 層で停止するため、損傷ピークも Cu<sub>2</sub>O 層に位置し、弾性散乱による多数の欠陥が導入される。これに対して、3MeV プロトンによる損傷は、弾性散乱の散乱断面積が小さいため、Cu<sub>2</sub>O 層に導入される欠陥数は 200keV プロトンと比べて少ないと考えられる。

本研究で得られた結果を他の太陽電池の報告例と比較する。III-V 族化合物系太陽電池は耐放射線特性に優れており、人工衛星など強い放射線環境で使用される宇宙用太陽電池として知られている。Cu<sub>2</sub>O 太陽電池での Eff. の変化率は、InGaP や GaAs の報告例よりも小さく [2]、放射線環境における優れた耐性を示唆する結果と思われる。

今後、フォトルミネッセンス測定などで欠陥評価を行いプロトンによる劣化損傷挙動の詳細評価を進めるとともに、より高加速エネルギーのプロトンに対する挙動調査や、電子線やガンマ線など他の放射線種に対する劣化挙動の評価を行い、放射線環境下での特性把握を進めたいと考えている。

#### 4. 引用(参照)文献等

- [1] 山本和重、芝崎聡一郎、中川直之、東芝レビュー Vol.74 No.1, 30 (2019).
- [2] M. Imaizumi et al., Prog. PHOTOVOLTAICS: Res. Appl. 25, 161(2017).

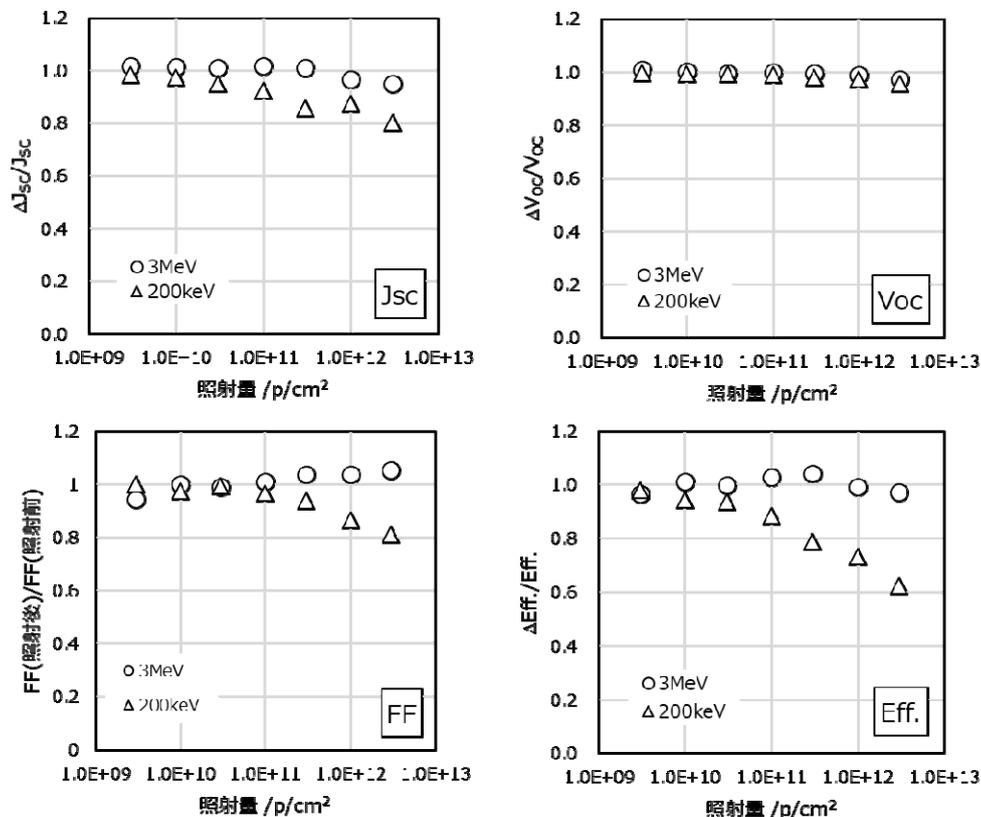


図1 プロトン照射による電流電圧特性の変化