

# 分光感度シミュレーションによる $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 太陽電池の 光学・再結合損失の評価

## Characterization of optical and recombination losses in $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cells by quantum efficiency simulation

岐阜大学 未来型太陽光発電システム研究センター<sup>1</sup>,  
産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター<sup>2</sup>

○中根 章裕<sup>1</sup>, 反保 衆志<sup>2</sup>, 藤本 祥平<sup>1</sup>, 金 江玖<sup>2</sup>, 柴田 肇<sup>2</sup>, 仁木 栄<sup>2</sup>, 藤原 裕之<sup>1</sup>  
Gifu University, CIPS<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>

○A. Nakane<sup>1</sup>, H. Tampo<sup>2</sup>, S. Fujimoto<sup>1</sup>, Kangmin Kim<sup>2</sup>, H. Shibata<sup>2</sup>, S. Niki<sup>2</sup>, and H. Fujiwara<sup>1</sup>  
E-mail: fujiwara@gifu-u.ac.jp

【はじめに】 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (CZTSe)は、希少元素を含まない薄膜太陽電池材料として近年注目されているが、 $\text{CuInGaSe}_2$ (CIGSe)太陽電池と比較すると変換効率が 10%程度と低い欠点がある。そこで本研究では、我々がこれまでに報告した CZTSe の光学定数<sup>1</sup>を適用して分光感度シミュレーションを行い、さらにキャリア収集長  $L_{\text{col}}$  を解析変数として考慮した新たな解析手法により、CZTSe 太陽電池の光学および再結合損失を評価した。

【実験および計算方法】 CZTSe 太陽電池の構造は、 $\text{ZnO:Al}(350 \text{ nm})/\text{ZnO}(50 \text{ nm})/\text{CdS}(60 \text{ nm})/\text{CZTSe}(1200 \text{ nm})/\text{Mo}$  とし、CZTSe 光吸収層は多元同時蒸着法により作製した ( $\text{Cu}:\text{Zn}:\text{Sn}:\text{Se}=1.80:1.31:0.89:4.00$ )。この太陽電池の変換効率は、 $8.46\%$  ( $J_{\text{sc}} = 33.4 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{\text{oc}} = 418 \text{ mV}$ ,  $\text{FF} = 0.606$ ) である。分光感度の計算には、我々が提案したラフネスによる光散乱の影響を考慮したモデルを利用し、太陽電池各層の光学定数に関しても、以前の報告結果を適用した<sup>2</sup>。但し、CZTSe の光学定数に関しては、組成によるバンドギャップ ( $E_g$ ) 変化を考慮し、特に  $E_g$  のシフト値 ( $\Delta E_g$ ) を解析変数とし、総和則を満たすように CZTSe 誘電関数の振幅を変化させた。再結合損失は、実験から得られる外部量子効率 (EQE) を  $\text{EQE}(\lambda) = A(\lambda)\{1 - \exp[-\alpha(\lambda)L_{\text{col}}]\}$  を用いてフィッティングする事から算出した<sup>3</sup>。ここで、 $A(\lambda)$  および  $\alpha(\lambda)$  は、光の波長に対する CZTSe の吸収率および吸収係数である。上記の EQE 解析では、最終的に  $\Delta E_g$  および  $L_{\text{col}}$  を変数として使用した。

【結果】図1は、CZTSe 太陽電池の EQE スペクトル (白丸) および光学シミュレーションから算出した太陽電池各層の吸収率スペクトル (黒線) を示している。図の黄色の領域は、 $L_{\text{col}} = \infty$  ( $\Delta E_g = 0.16 \text{ eV}$ ) の場合のスペクトルを示し、実験値との一致は良くない。しかし、 $L_{\text{col}} = 0.57 \mu\text{m}$  を仮定して得られる EQE スペクトルは、実験値と極めて良く一致する。この結果は、CZTSe のキャリア収集長 ( $L_{\text{col}} \sim 0.6 \mu\text{m}$ ) が膜厚 ( $1.2 \mu\text{m}$ ) と比較して小さく、長波長領域で再結合損失が大きくなっていることを示している。図2の (a) および (b) は、シミュレーションから求めた CdS 界面からの深さおよび波長に対する規格化した CZTSe の吸収率および EQE を示している。図から分かる様に、 $\lambda < 750 \text{ nm}$  の領域では、値に大きな差はないが、長波長領域 ( $\lambda > 1200 \text{ nm}$ ) および Mo 裏面電極付近で生成されたキャリアの収集効率は低いことが示された。結果として、新しいシミュレーション手法により、CZTSe 太陽電池の光学・再結合損失を精度良く評価できることを初めて明らかにした。

1) Hirate et al., *J. Appl. Phys.* **117**, 015702 (2015). 2) Hara et al., *Phys. Rev. Applied* **2**, 034012 (2014).

3) Klenk et al., *12th Euro. Conf. Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 1588 (1994).

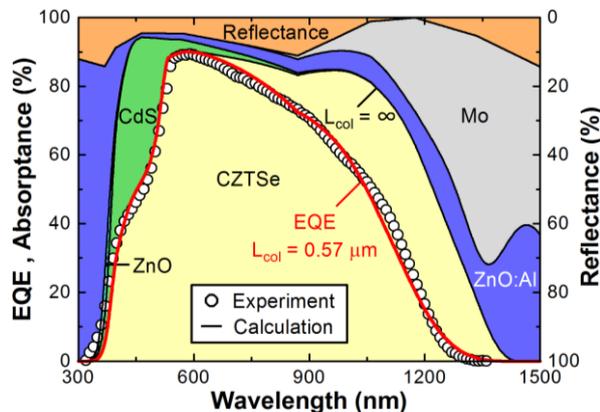


Figure 1. EQE spectrum of the CZTSe solar cell and the absorbance spectra of the component layers and reflectance spectrum.

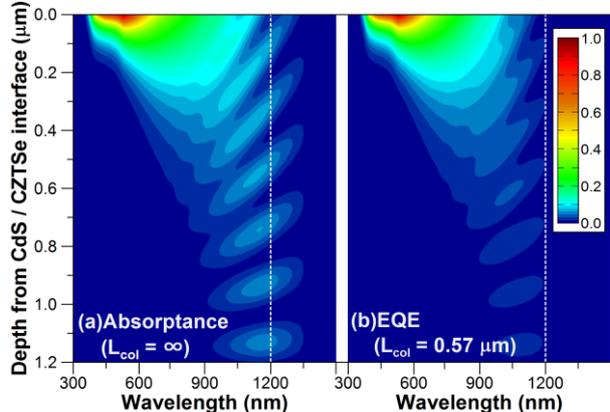


Figure 2. Normalized partial absorbance (a) and EQE (b) of the CZTSe for the different depth and wavelength.