

CIS系太陽電池における界面とバルクの物理と化学、これからの研究開発課題

石塚尚吾¹、西永慈郎¹、別府孝介²、前田毅²、青柳風香²、和田隆博²、山田明³、Jakapan Chantana⁴、西村昂人⁴、峯元高志⁴、Muhammad Monirul Islam⁵、櫻井岳暁⁵、寺田教男⁶

¹産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門、²龍谷大学、³東京工業大学、
⁴立命館大学、⁵筑波大学、⁶鹿児島大学

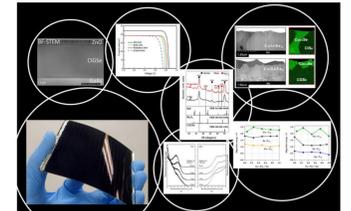
はじめに

CIS系太陽電池の研究開発課題

CIS系太陽電池とは、Cu、In、Seを主成分とし、これにGaやSなどを含有するI-III-VI₂系化合物を光吸収層とした太陽電池の総称である。多元系化合物として多くの派生材料が存在し、太陽電池の他にも様々なエネルギー変換デバイスへの応用が期待される材料群でもある。CIS系太陽電池はすでに実用化もされているが、アルカリ金属効果やその制御など、未解明でさらなる研究が必要とされる課題も多い。細分化が進む多元系カルコゲナイド材料の研究において、CIS系太陽電池の発展と応用を見据え基礎に立ち返り、研究開発課題を整理することは重要である。特に、多結晶材料からなるCIS系太陽電池ではバルク同様に界面や粒界におけるキャリア再結合の抑制は重要であり、開放電圧や曲線因子などの太陽電池パラメータ改善に繋がる技術開発は恒久的な課題である。最近我々は、英国王立化学会が刊行するPhysical Chemistry Chemical Physics誌に、CIS系太陽電池の今後の展望について最新の研究成果を交えながらPerspective論文としてまとめた^[1]。ここではその内容をダイジェストで紹介する。

PCCP

Physical Chemistry Chemical Physics
ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY



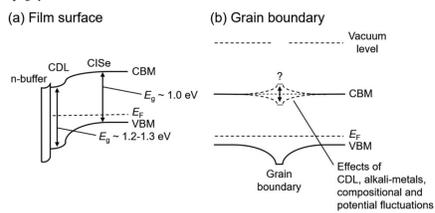
Physical and chemical aspects at the interface and in the bulk of CuInSe₂-based thin-film photovoltaics

S. Ishizuka, J. Nishinaga, K. Beppu, T. Maeda, F. Aoyagi, T. Wada, A. Yamada, J. Chantana, T. Nishimura, T. Minemoto, M. M. Islam, T. Sakurai, and N. Terada

Phys. Chem. Chem. Phys. 24, 1262 (2022).
<https://doi.org/10.1039/D1CP04495H>

最近の研究紹介^[1]

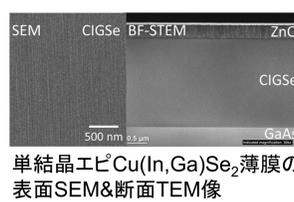
銅欠乏相の役割とアルカリ金属添加効果 (産総研)



多結晶Cu(In,Ga)Se₂表面・界面に存在する銅欠乏相が太陽電池デバイスに及ぼす影響の検証

単結晶Cu(In,Ga)Se₂薄膜太陽電池 (産総研)

Ag Grid
Anti-reflection coating
Al doped ZnO (AZO) 300 nm
CdS 40 nm
CIGSe 2.2 μm
GaAs (001) p-type substrate 350 μm
Indium electrode

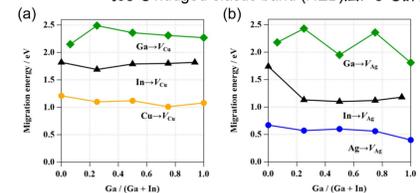


単結晶エピCu(In,Ga)Se₂薄膜の表面SEM&断面TEM像

単結晶エピCu(In,Ga)Se₂薄膜太陽電池と従来の多結晶薄膜太陽電池の比較検証

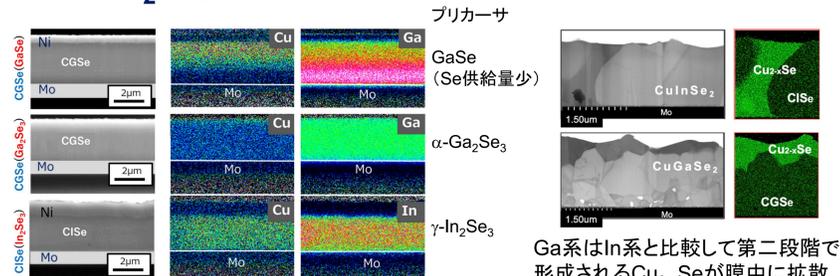
Ag(In,Ga)Se₂とCu(In,Ga)Se₂比較 (龍谷大)

Linear and quadratic synchronous transit (LST/QST)法およびnugded elastic band (NEB)法による計算結果

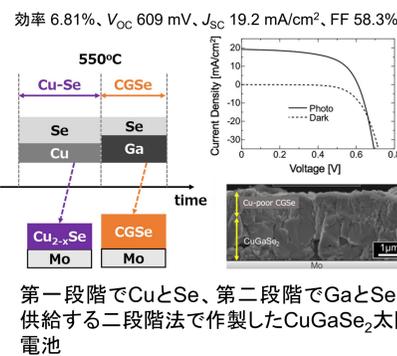


AgはCuよりも拡散しやすい
⇒Ag添加による粒径増大効果を説明

CuGaSe₂の製膜 (東工大)

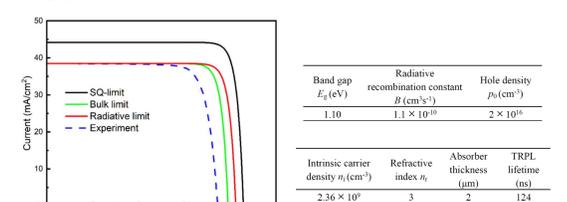


三段階法の第一段階で用いるプリカーサの違いによって最終的に得られる薄膜の元素分布の違い



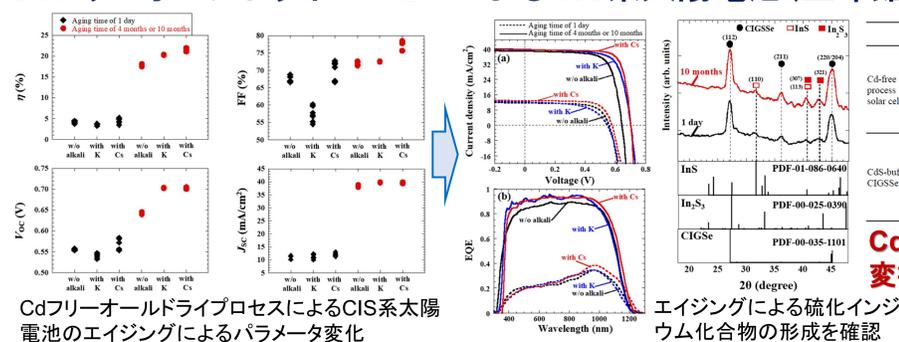
第一段階でCuとSe、第二段階でGaとSeを供給する二段階法で作製したCuGaSe₂太陽電池

開放起電圧損失の解析 (筑波大)



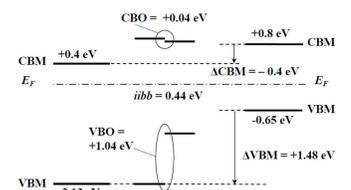
バルク再結合によるV_{OC}損失は、界面や空乏層再結合と比較しても大きな割合を占めており、今後も重要な課題

CdフリーオールドライブプロセスによるCIS系太陽電池 (立命館大)



Cdフリー、オールドライブプロセスで変換効率22%

深さ方向の界面電子構造解析 (鹿児島大)



正・逆光電子分光法により導出されたCdS/Cu(In,Ga)(S,Se)₂界面エネルギーバンド構造

まとめ

(1)アルカリ金属添加制御とCIS系光吸収層表面や粒界の銅欠乏相層との関係、(2)単結晶Cu(In,Ga)Se₂薄膜を用いた物性評価とデバイスの評価、(3)Ag系とCu系の違い、(4)新しいCuGaSe₂製膜方法の提案、(5)オールドライブプロセスによるCdフリー高効率CIS系太陽電池、(6)開放起電圧損失の解析、(7)正・逆光電子分光法による界面エネルギーバンド構造解析について、最新の研究成果を交えて今後の展望と研究開発課題の整理を行った。特に、これからの重要課題の一つとして曲線因子(FF)の改善が挙げられる。各内容の詳細については、右記参考文献をご参照頂きたい。

謝辞

本研究は、NEDOの支援によって実施されました。また一部の研究は、JSPS 科研費(19K05282、20K05354)、三菱財団自然科学研究助成(No.20190001)の支援を受け実施されました。本研究にご協力頂いた多くの方々、樋口博文氏、飯岡正行氏、高橋秀樹氏、田口昇氏、田中真悟氏、上川由紀子氏、増田泰造氏、P. J. Fons氏、C. S. Langham氏、加藤拓也氏、杉本広紀氏、木本祥紀氏、試料を御提供頂いた出光興産株式会社(ソーラーフロンティア)に深く感謝致します。

参考文献

[1] S. Ishizuka, J. Nishinaga, K. Beppu, T. Maeda, F. Aoyagi, T. Wada, A. Yamada, J. Chantana, T. Nishimura, T. Minemoto, M. M. Islam, T. Sakurai, and N. Terada, Phys. Chem. Chem. Phys. 24, 1262 (2022). <https://doi.org/10.1039/D1CP04495H>