

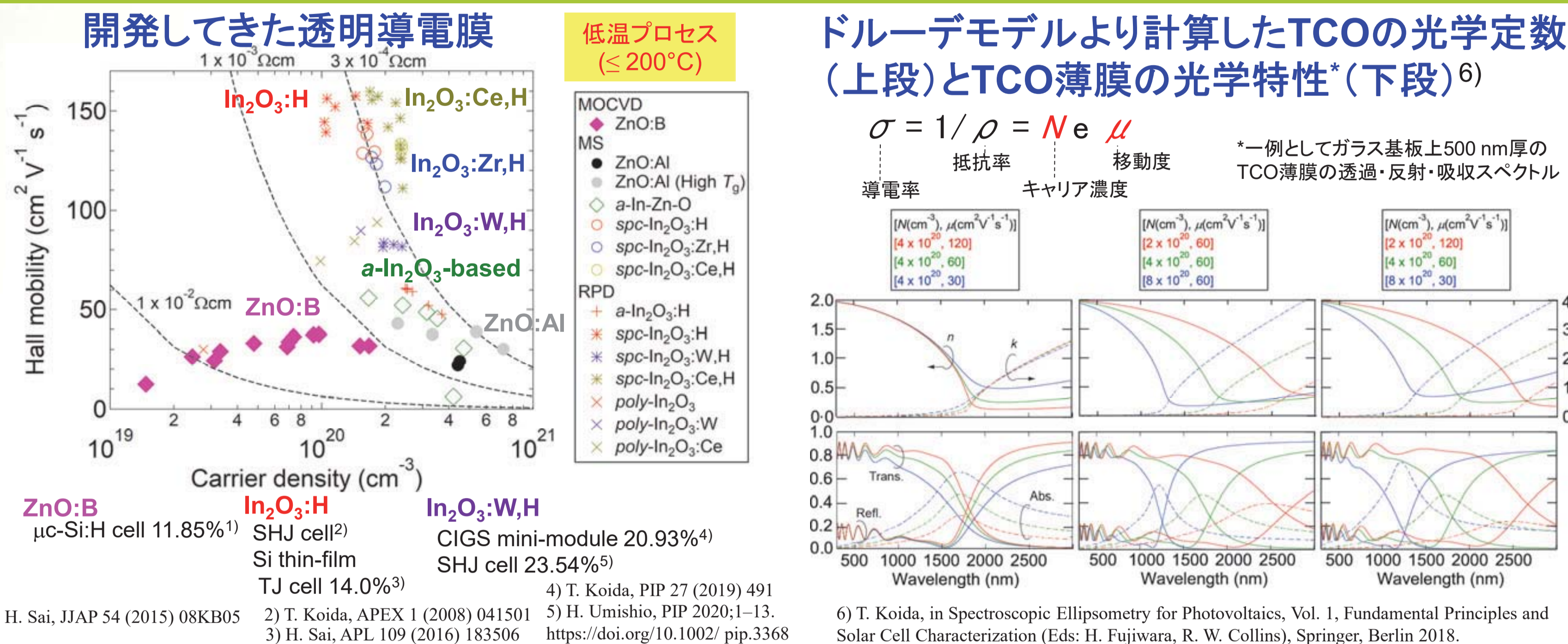
広帯域透明電極の太陽電池応用 — 他機関との連携 —

鯉田 崇

産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門

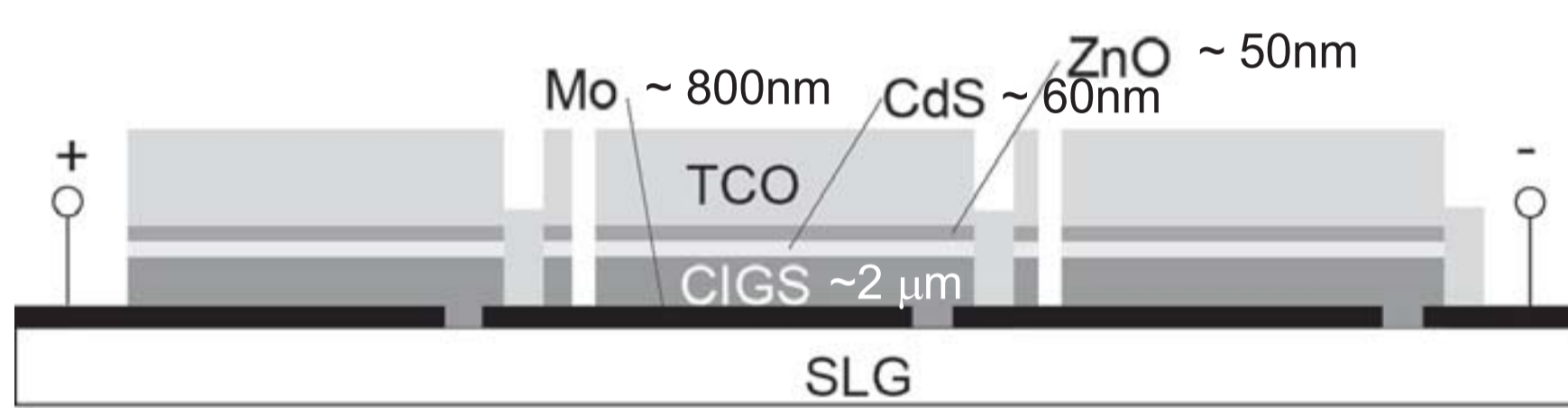
はじめに

高い電子移動度を持つ透明導電性酸化物(TCO)薄膜は、導電率を向上させると同時に自由キャリア吸収を減らすことが出来る。多接合型太陽電池や近赤外イメージセンサーなどの窓電極に適用することで、近赤外域(800-1700 nm)にも感度を持つデバイスの実現を可能にする。これまで、TCO薄膜の研究を行い、ITOやIZOより高移動度な $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me}$ (Me: Zr, W, Ce)薄膜や200°C以下のプロセス温度で更に高移動度な固相結晶化 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ と $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Me},\text{H}$ 薄膜などを見出してきた。そして、産総研研究者が開発しているSiヘテロ接合型太陽電池、Si系薄膜太陽電池、CIGSミニモジュールの窓電極に適用し、高移動度TCO薄膜の有用性を電池性能で示してきた。今回は、他機関(ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンターとフ라운ホーファー研究機構太陽エネルギーシステム研究所)のCIGS太陽電池とSiヘテロ接合型太陽電池の窓電極に適用した結果を紹介する。製造工程等の異なるセルプリカーサー上に形成することで、TCO薄膜の新たな課題も明らかとなり、窓電極材料および製造手法を改良しているところである。



$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 系透明電極(RPD法)のCIGS薄膜太陽電池応用(AIST / PVcomB HZB)

一般的なCIGS太陽電池の構造



TCO deposition

Inline Pulsed DC Magnetron Sputtering (@HZB)

Area: 30 x 60 cm²

Target: In_2O_3

Reactive Plasma Deposition (@AIST)

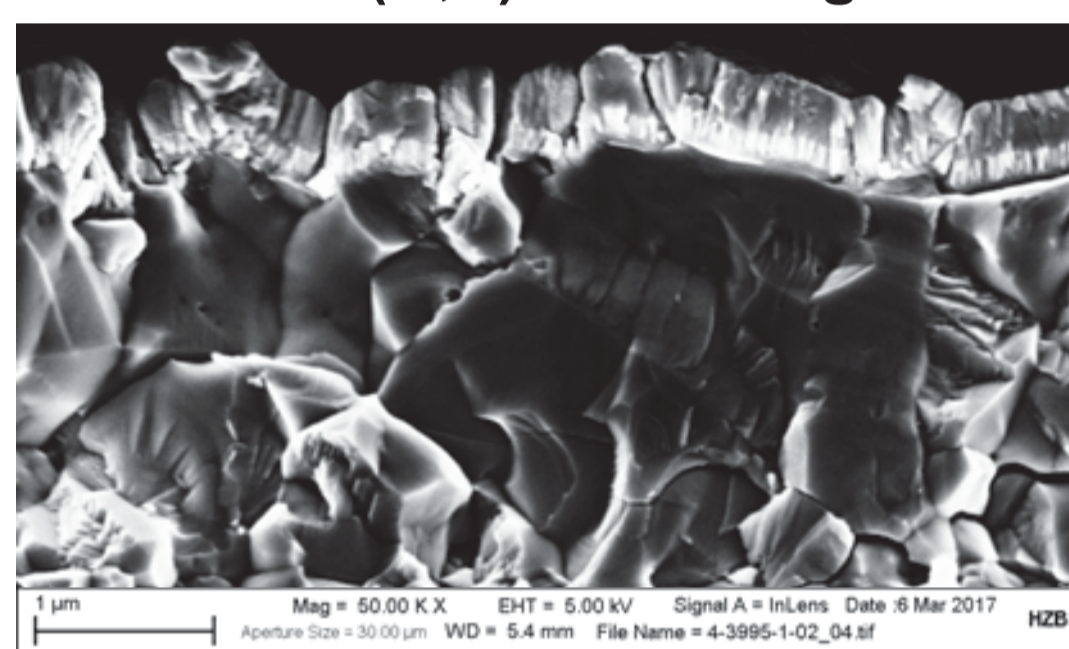
Area: 20 x 20 cm²

Tablet: $\text{In}_2\text{O}_3, \text{In}_2\text{O}_3:\text{W}$

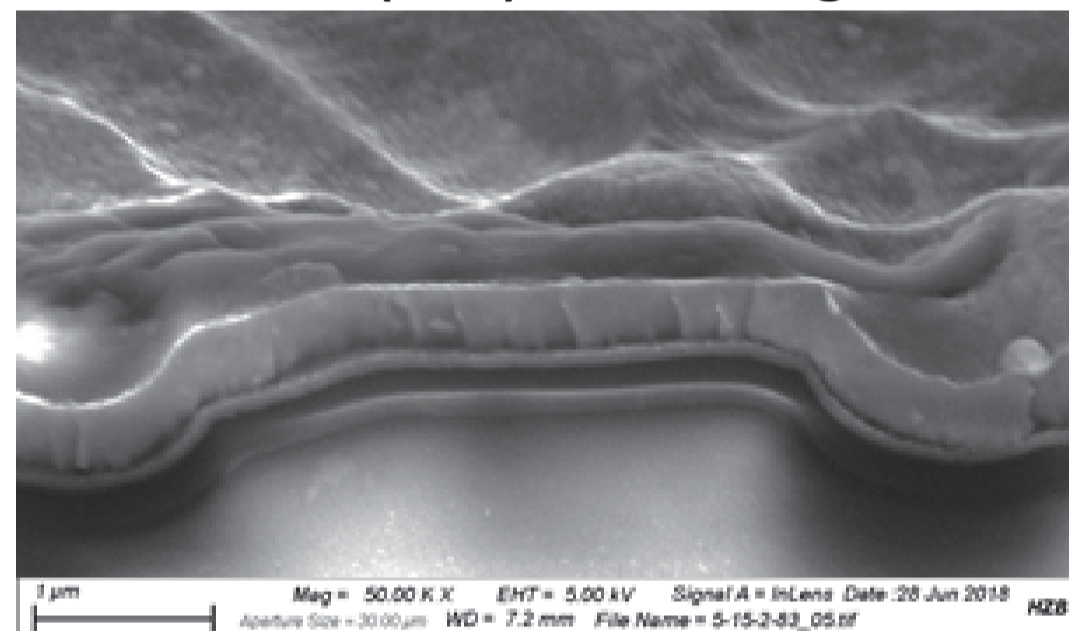
本研究は、ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンター博士課程学生Darja Erfurtさんと一緒に産総研で実施(2017/11/6-2018/2/23)した内容です。詳細は論文[1]を参照してください。

異なる基材上の $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜の断面SEM像

On ZnO/Zn(O,S)/CIGS/Mo/glass

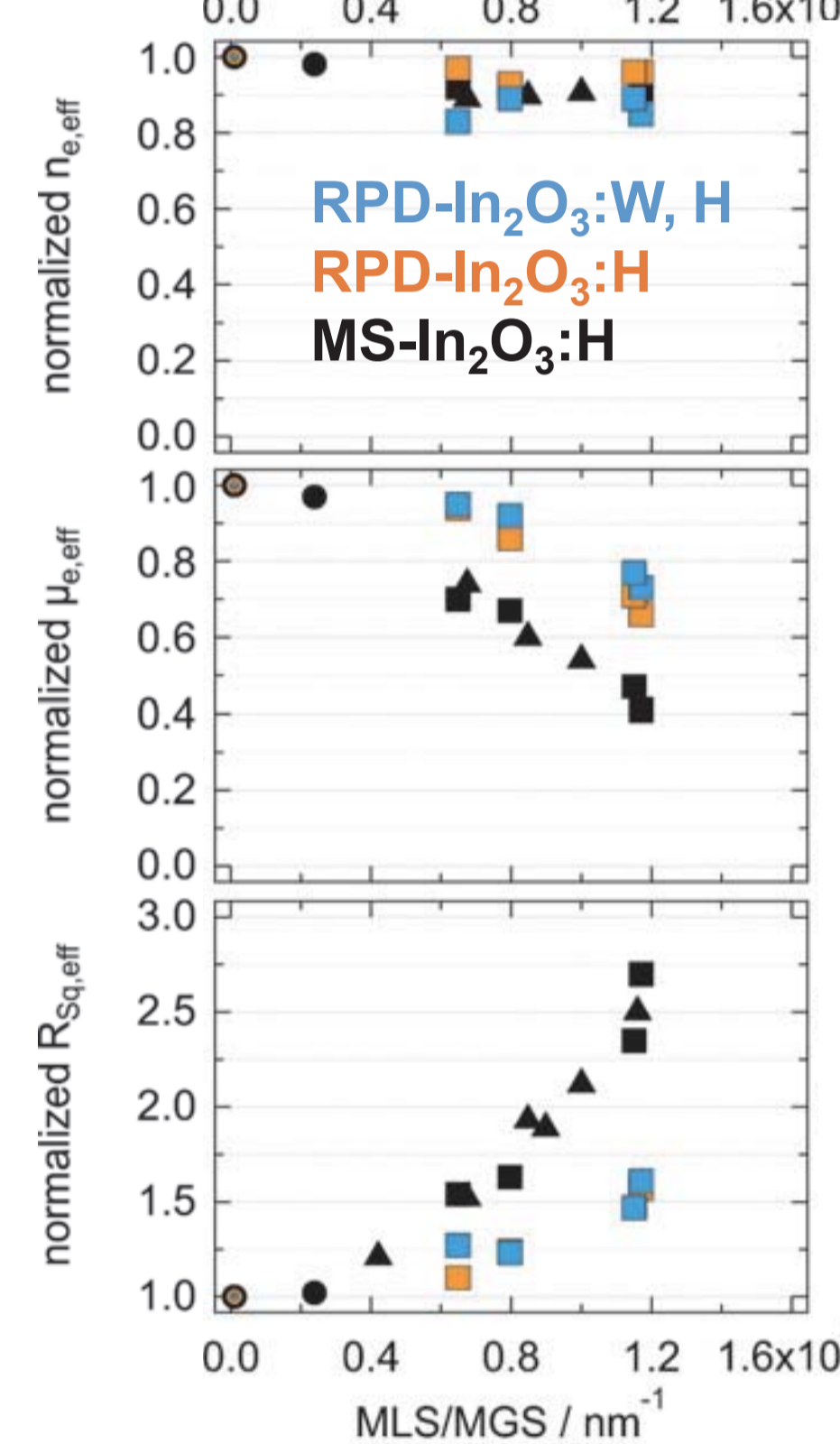


On ZnO/Zn(O,S)/textured glass



凹凸のある基材上のTCO膜の電気特性

MLS/MGS / nm⁻¹

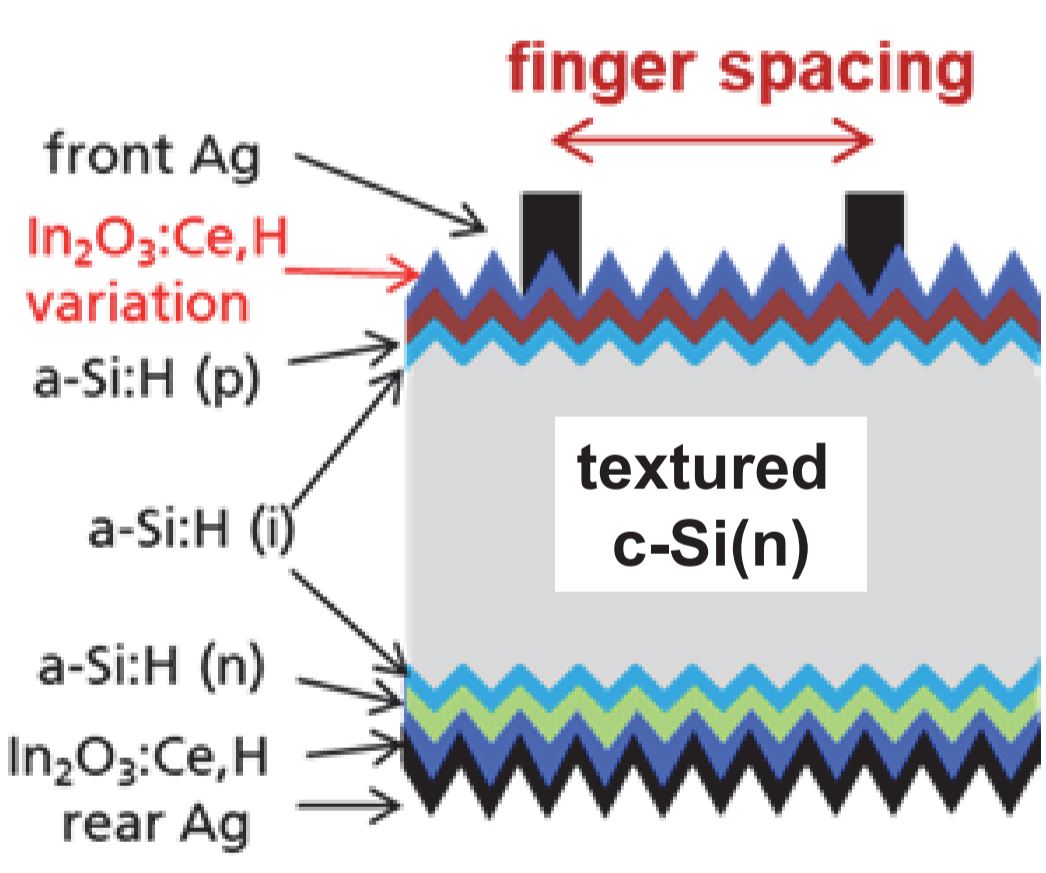


$$\frac{\text{MLS}}{\text{MGS}} = \frac{\text{Median Local Slope}}{\text{Median Grain Size}}$$

- ラフネスのある基材上に形成した $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 系薄膜の電子移動度は減少し、シート抵抗は増大する傾向にある。
- ラフネスの指標としてはRms(二乗平均粗さ)よりもMLS/MGSが適している。
- 低いシート抵抗を実現するには、MLS/MGSの小さい光電変換層、あるいは、ラフネスに依存しない構造をもつ透明電極を用いる必要がある。

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ce},\text{H}$ 透明電極(スパッタ法)のシリコンヘテロ接合型太陽電池応用(AIST / Fraunhofer ISE)

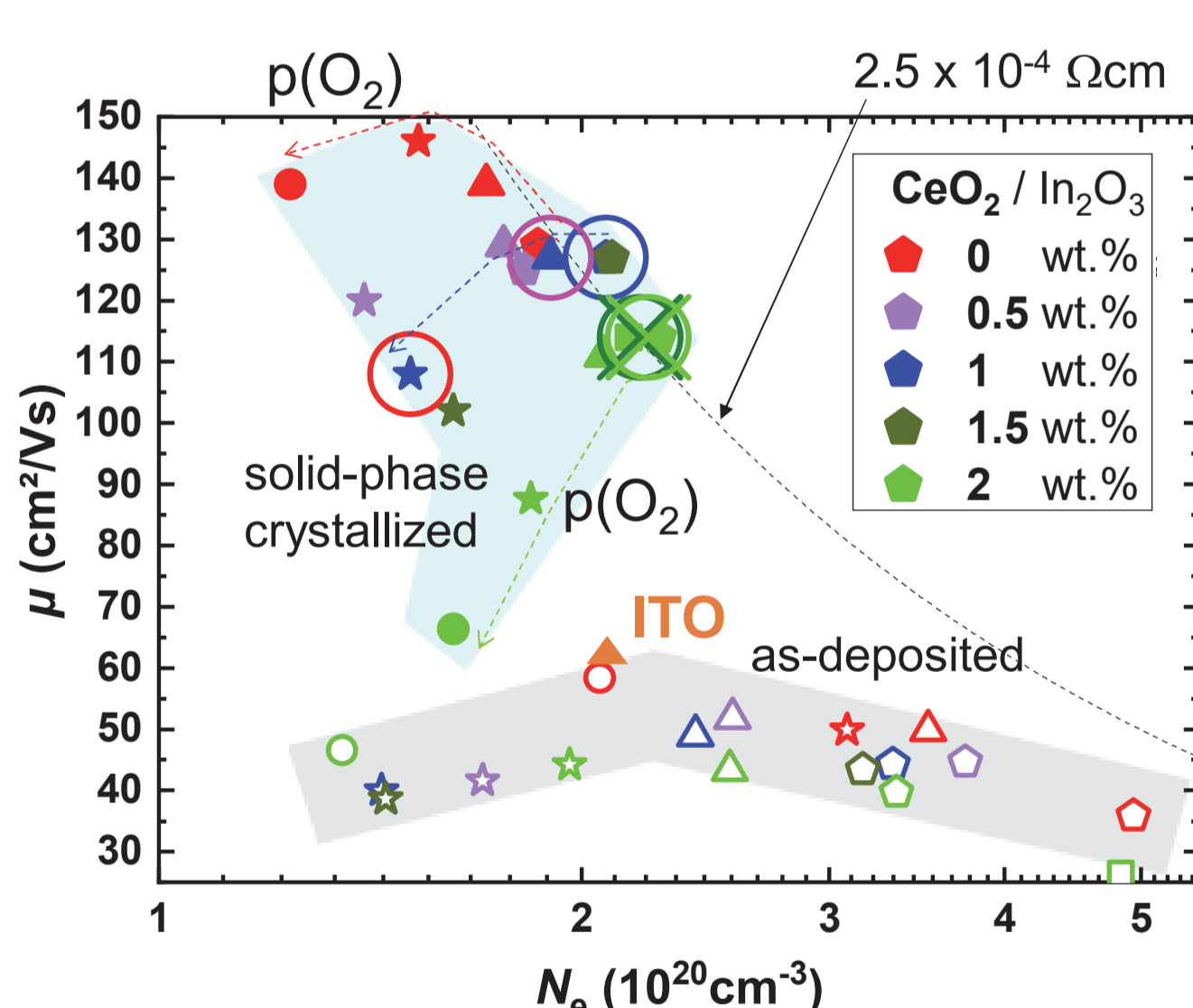
作製した太陽電池*



*セルプリカーサーはFraunhofer ISEにて作製。産総研では表面・裏面側のTCO及び金属電極を形成。

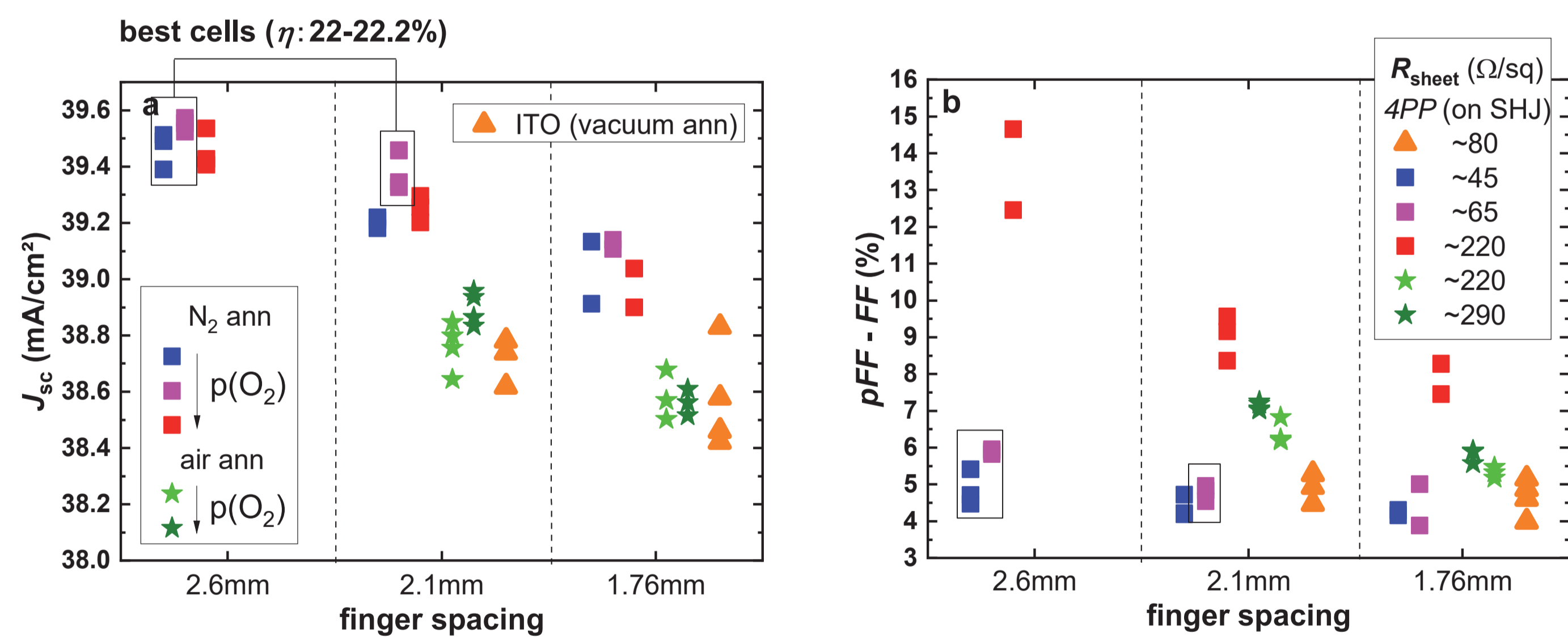
本研究は、フ라운ホーファー研究機構太陽エネルギーシステム研究所 博士課程学生Leonard Tutschさんと一緒に産総研で実施(2019/5/13-2019/9/6)した内容です。詳細は論文[2]を参照してください。

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ce},\text{H}$ 窓電極(スパッタ膜)



- ITOよりも顕著に高い移動度
- で記した材料を太陽電池の窓電極に適用

太陽電池の光学特性と抵抗損失



- 太陽電池特性(電池性能最適化未実施): V_{oc} : 710 ± 5 mV, pFF = 83 ± 1%
- 窒素アニール: 短絡電流密度向上(+0.6 mA/cm² vs ITO)、フィンガー電極幅の増加可変換効率 22.2%
- 空気アニール: 直列抵抗・光学損失の増加、雰囲気に影響を受けない構造をもつ窓電極が必要

まとめと今後の展開

- 他機関のセルプリカーサー上に、RPD法/マグネトロンスパッタ法を用いて $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 系広帯域透明電極を形成。産総研の太陽電池^{4,5)}では問題とならなかった現象を確認。[1,2]
- 太陽電池をポストアニールしている際、窓電極層をHall測定することで、アニール雰囲気や窓電極の下地層が窓電極の輸送特性に与える影響を評価。
- 超高真空下で太陽電池をポストアニールし、最表面の窓電極層からの脱ガス成分を分析することで、窓電極層およびその下地層からのH拡散の影響を評価。
- これら評価結果と太陽電池特性を比較検討することで、問題の要因を明らかにし、個々のデバイスに応じた製造手法を改良。
- また、上記の評価手段を用いて、スイス連邦工科大学ローザンヌ校PV-LAB博士課程学生Esteban Rucavadoさんと一緒に MoO_x 正孔輸送層を持つSi太陽電池やパッシベーションコンタクトを持つSi太陽電池、Zn-Sn-O系透明導電膜の研究を産総研で実施。[3-6]
- これまで、低温(150~200°C以下)・プラズマ損傷の少ないプロセスで製造可能な広帯域透明電極の材料・製法開発に従事。今後は、窓電極に対して異なるプロセスを要求するデバイスに対しても広帯域透明電極を適用できるよう、引き続き材料・製造プロセス開発に従事。適用したいデバイスがあれば、お気軽にご相談ください。

[1] D. Erfurt, T. Koida, M. D. Heinemann, C. Li, T. Bertram, J. Nishinaga, B. Szyszka, H. Shibata, R. Klenk, R. Schlattmann, Impact of rough substrates on hydrogen-doped indium oxides for the application in CIGS devices, Solar Energy Materials and Solar Cells 206 (2020) 110300
 [2] L. Tutsch, H. Sai, T. Matsui, M. Bivour, M. Hermle, T. Koida, The sputter deposition of broadband transparent and highly conductive cerium and hydrogen co-doped indium oxide and its transfer to silicon heterojunction solar cells, Prog Photovolt Res Appl. 2021;1-11. https://doi.org/10.1002/pip.3388
 [3] G. Nogay et al., Interplay of annealing temperature and doping in hole selective rear contacts based on silicon-rich silicon-carbide thin films, Solar Energy Materials and Solar Cells 173 (2017) 18
 [4] S. Essig et al., Toward Annealing-Stable Molybdenum-Oxide-Based Hole-Selective Contacts For Silicon Photovoltaics, Solar RRL 2 (2018) 1700227
 [5] E. Rucavado et al., New Route for "Cold-Passivation" of Defects in Tin-Based Oxides, The Journal of Physical Chemistry C 122 (2018) 17612
 [6] A. Ingenito et al., A passivating contact for silicon solar cells formed during a single firing thermal annealing, Nature Energy 3 (2018) 800