

p型ナノ結晶シリコン薄膜を窓層に用いたヘテロ接合太陽電池の開発

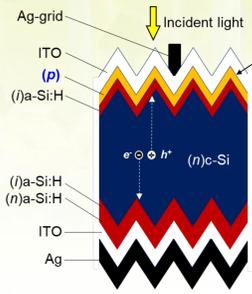
松井 卓矢¹、海汐 寛史²、鯉田 崇³、齋 均¹
産業技術総合研究所

¹ ゼロエミッション国際共同研究センター、² 前太陽光発電研究センター、³ 省エネルギー研究部門

研究の目的・実験

a-Si:H/c-Si シリコンヘテロ接合(SHJ) 太陽電池

- ◎ 高い変換効率・低い温度係数
- ◎ 両面受光により発電量upが可能
- ◎ 窓層(特にドーブ層)の光吸収損失が課題
- ◎ 低温環境では特性(FF)が低下する[1]



受光面のp型a-Si:Hをp型nc-Si:Hに置き換える

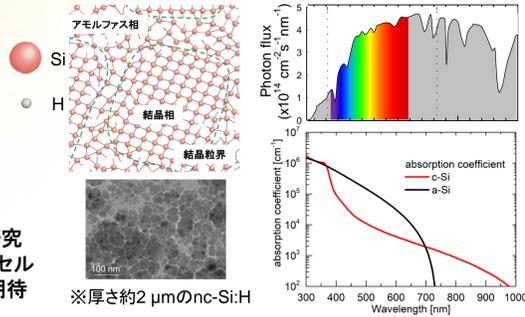
研究の課題

- ・ (p)a-Si:Hを(p)nc-Si:Hに置き換える研究は多数報告されているが[1-6]、高効率セル(eff.>23%)でどの程度の性能改善が期待できるのか不明

研究のねらい

- ・ nc-Si:H薄膜の物性とセル特性の関係を明らかにする。
- ・ 高効率なSHJでnc-Si:Hの効用を検証する。

nc-Si:H薄膜の特徴



※厚さ約2 μmのnc-Si:H

- ・ ナノメートルオーダーの結晶相とアモルファス相が混在した複合材料
- ・ a-Si:Hに比べて可視光領域の光吸収係数が小さい。

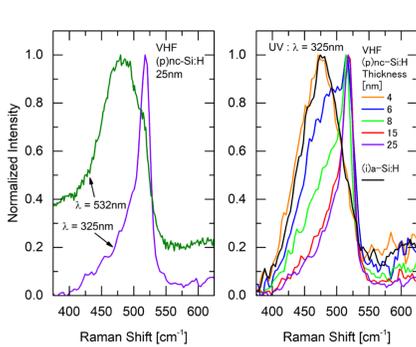
p層製膜条件と評価手法

Material	(p)nc-Si:H	(p)nc-Si:H	(p)a-Si:H	
Frequency (MHz)	65.0 (VHF)	13.56 (RF)	13.56 (RF)	
Gas	SiH ₄ (sccm)	3.0	3.5	5.0
flow	H ₂ (sccm)	500	700	20
rate	B ₂ H ₆ (sccm)	0.015	0.005	0.075
Pressure (Pa)	200	200	66.5	
Power density (mW/cm ²)	347	148	30	
T _s (°C)	180	150	150	

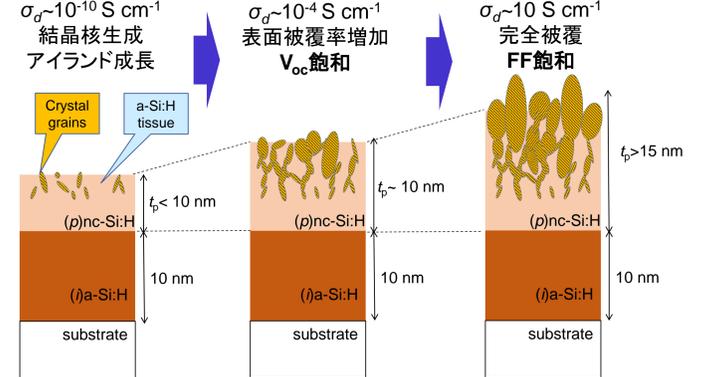
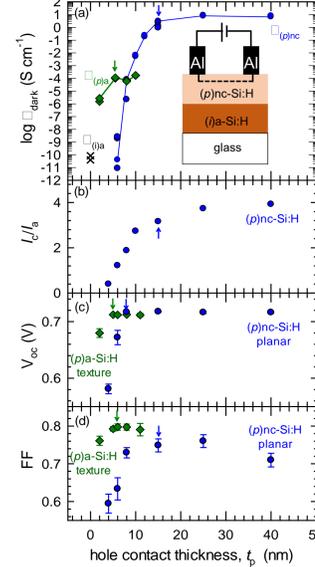
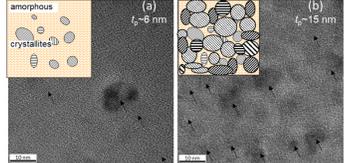
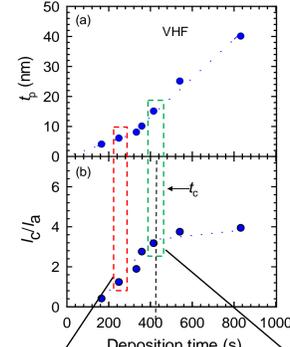
・ 各p層製膜条件はTEXセルの変換効率を指標に最適化した。

- ・ 結晶性: UV-Raman
- ・ 電気特性: Coplanar conductivity
- ・ セル特性(平坦・テクスチャSi): I-V, EQE
- ・ コンタクト抵抗

nc-Si:H薄膜 (t_p-4-40 nm) の成長と構造変化の評価(VHF放電)



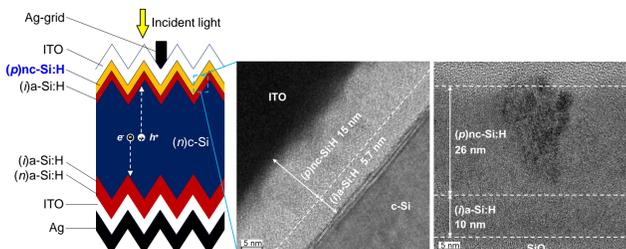
- ・ UV-Ramanで極薄nc-Si:H (<10nm) を評価
- ・ t_p~4-6 nmで結晶核発生を確認
- ・ t_p~15 nmで成長速度が増加するとともに結晶性が飽和(臨界膜厚: t_c)
→ ナノ結晶相の表面被覆が支配的に



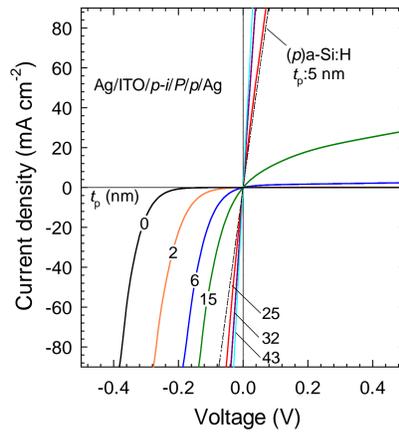
- ・ 膜厚増加 (t_p: 4-15 nm) に従って導電率は12桁増加
→ (p)nc-Si:Hのアモルファス相の導電率は極めて低い(i層と同程度)
- ・ t_p~15 nm(臨界膜厚: t_c) 近傍で導電率、結晶性、FFが飽和
→ 高いFFを得るためにはナノ結晶相による完全被覆が必要
- ・ V_{oc} はp層の導電率により支配

H. Umishio, H. Sai, T. Koida, T. Matsui, Prog. Photovolt. Res. Appl. (2020).

セル特性のp層膜厚依存性(VHF、RF放電)



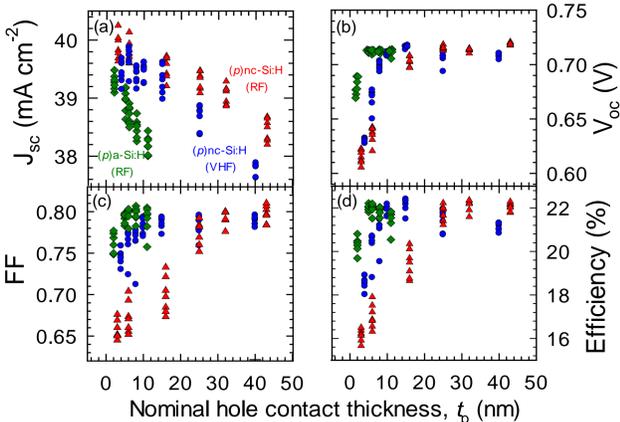
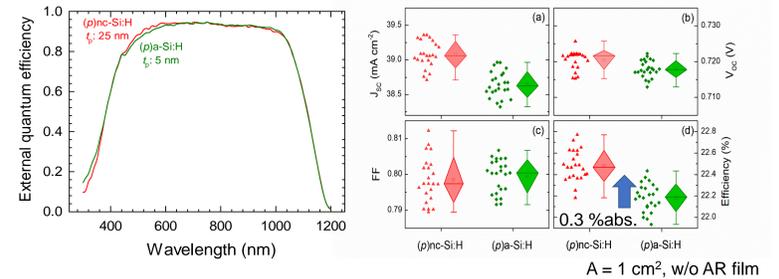
TCO/pコンタクト抵抗の評価



ベストセルの比較

	TCO	t _p (nm)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	Eff. (%)
(p)a-Si:H	ITO	5	38.9	0.722	0.801	22.5
(p)nc-Si:H	ITO	25	39.4	0.729	0.804	23.1
(p)a-Si:H	IWOH	5	39.2	0.728	0.805	23.0
(p)nc-Si:H	IWOH	25	39.48*	0.730*	0.812*	23.3
			39.48*	0.733*	0.814*	23.56*

* Independently measured by Calibration and Standard Measurement Team of AIST.



- ・ セル特性とp層膜厚(平坦基板に製膜した際の厚さに換算)の関係性を評価
- ・ t_{c,eff}: (p)a-Si:H < (p)nc-Si:H(VHF放電) < (p)nc-Si:H(RF放電) → VHF放電による結晶核の高密度化を示唆
- ・ (p)a-Si:H → (p)nc-Si:Hの置換により、短波長応答の改善のみならず、パッシベーション向上やコンタクト抵抗低減の効果も得られ、0.3-0.6%abs.の効率改善を得た。
- ・ 高性能TCO(ITO→IWOH)の適用により、TCO/pコンタクト抵抗のさらなる低減でFFが改善し、変換効率23.54%を得た。

H. Umishio, H. Sai, T. Koida, T. Matsui, Prog. Photovolt. Res. Appl. (2020).

結論

- (j)a-Si:H層上の(p)nc-Si:Hの成長を調査した結果、VHF放電の場合、t_p~5nmで結晶核生成、t_p~15nmで結晶相の表面被覆を観測し、表面被覆に応じて導電率が劇的に変わることを見出した。
- 高いV_{oc}、FFを得るために必要なnc-Si:Hの臨界膜厚は、t_{c,Voc} < t_{c,FF}で、それぞれnc-Si:H層の導電率(>10⁻⁴ S cm⁻¹)とナノ結晶相の表面被覆度に関係していることを明らかにした。
- SHJセルの(p) a-Si:Hを(p) nc-Si:Hに置き換えることでJ_{sc}の改善(+1.4%)を得た。パッシベーション性能やTCO/pコンタクト性能も向上したため、V_{oc}、FFも改善し、従来のSHJセルよりも高い効率(0.3-0.6%abs.)を得た。
- 高性能TCO(ITO→IWOH)の適用により、変換効率23.54%を達成した。
- VHF放電により、(p)nc-Si:Hの臨界膜厚を薄くできることが期待される。

参考文献

1. G. Nogay et al., IEEE J. Photovolt. 6,1654 (2016).
2. J. Sriharathikhun et al., Jpn. J. Appl. Phys. 48,101603 (2009).
3. O. M. Ghahfarokhi, et al., Appl. Phys. Lett. 104, 113901 (2014).
4. L. Mazzarella et al., Appl. Phys. Lett. 106, 023902 (2015).
5. L. Mazzarella et al., Phys. Status Solidi. 214,1532958 (2017).
6. A. Fioretti et al., IEEE J. Photovolt. 9,1158 (2019).

謝辞

本研究はNEDO委託事業のもと、コマツNTC(株)およびパナソニック(株)と連携して実施した。
研究協力: 奥登志喜、佐藤芳樹、田辺まゆみ、上田孝、吉田正裕(産総研)、Pei-Ling Cheng(台湾交通大)