

高効率薄膜微結晶シリコン太陽電池の開発

High-efficiency thin-film microcrystalline silicon solar cells

先端産業プロセス・低コスト化チーム

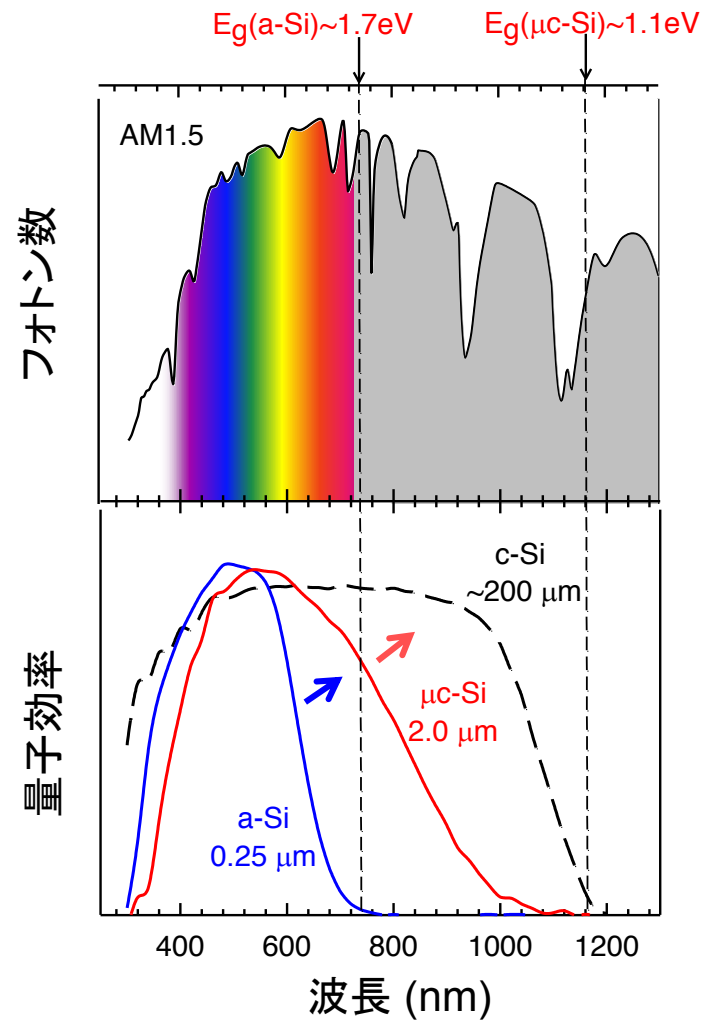
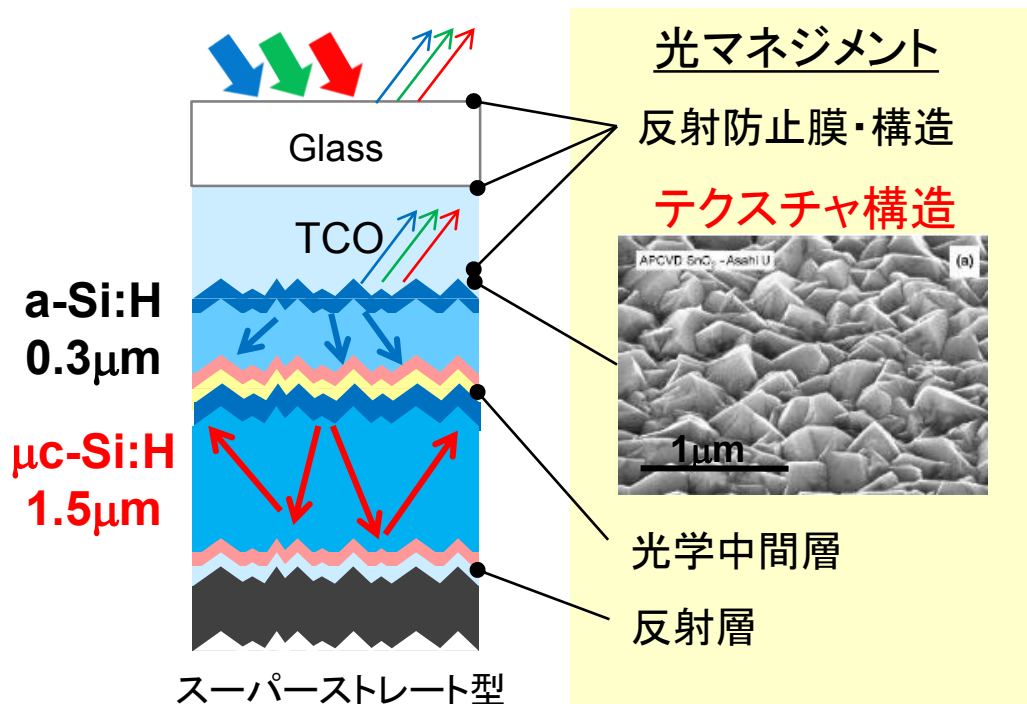
齋 均

SAI Hitoshi

薄膜Si太陽電池の課題 – 高効率化

- アモルファスSi (a-Si:H) 電池の高光安定化
- 微結晶Si ($\mu\text{c-Si:H}$) 電池の高電流化

光マネジメント(テクスチャetc.)技術による高 J_{SC} ・高効率化



テクスチャ開発における課題

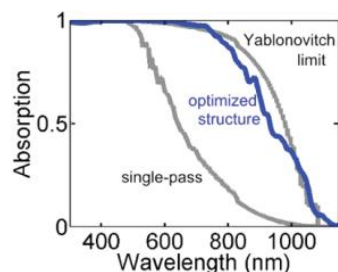
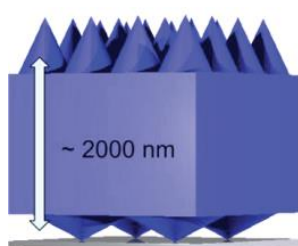
光学的最適解 ≠ デバイス最適解

光吸収 × 電荷輸送(膜質)

$$Eff. = J_{SC} \times V_{OC} \times FF$$

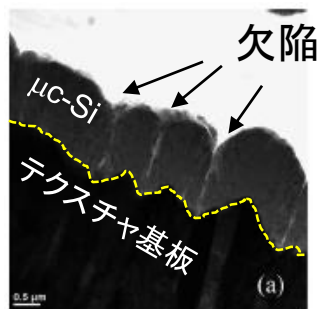
膜質 × 内蔵電界

膜質 × 抵抗



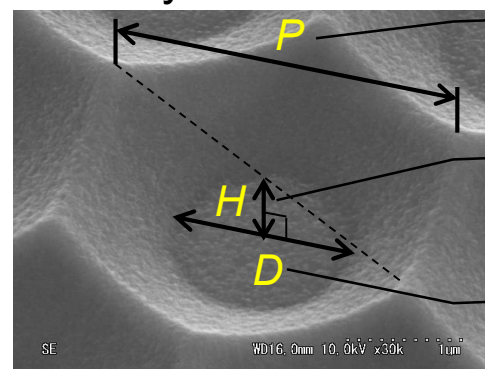
光学的最適化の例(Wang, Nano Lett. 2012)

Trade-off



ハニカムテクスチャによる系統的検討

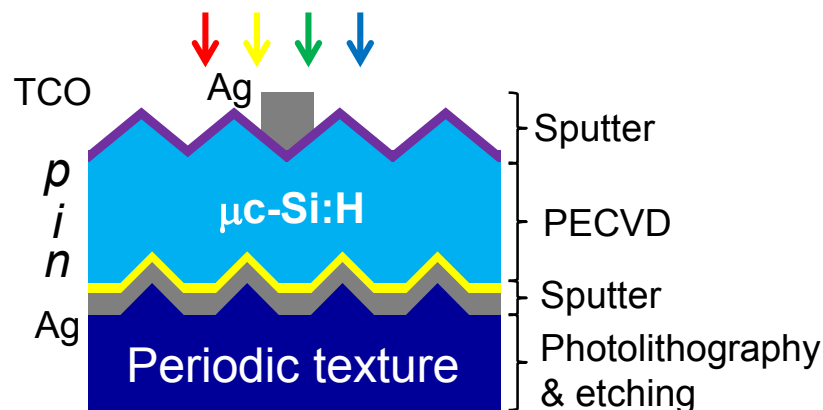
“Honeycomb texture”



Period
 $P = 1 \sim 4 \mu\text{m}$

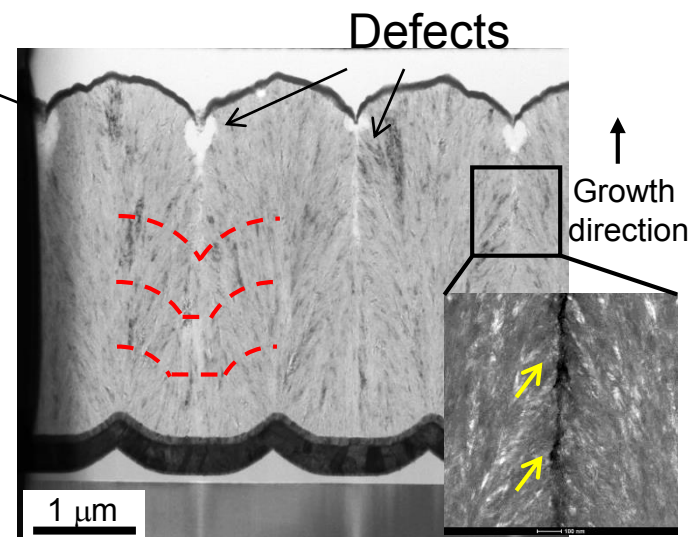
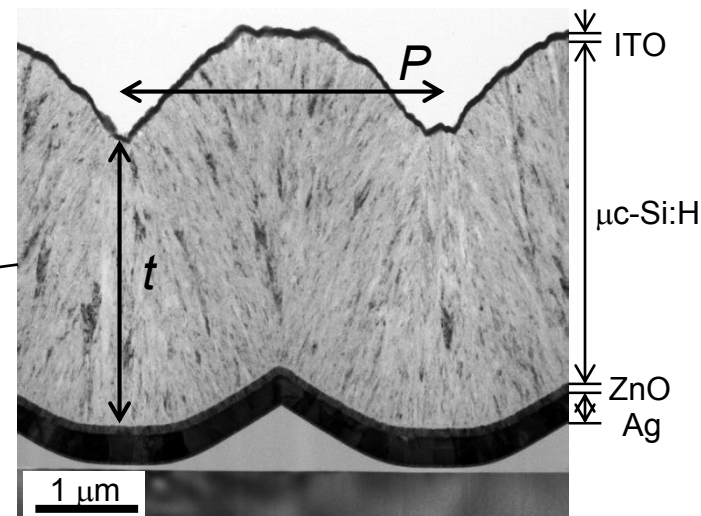
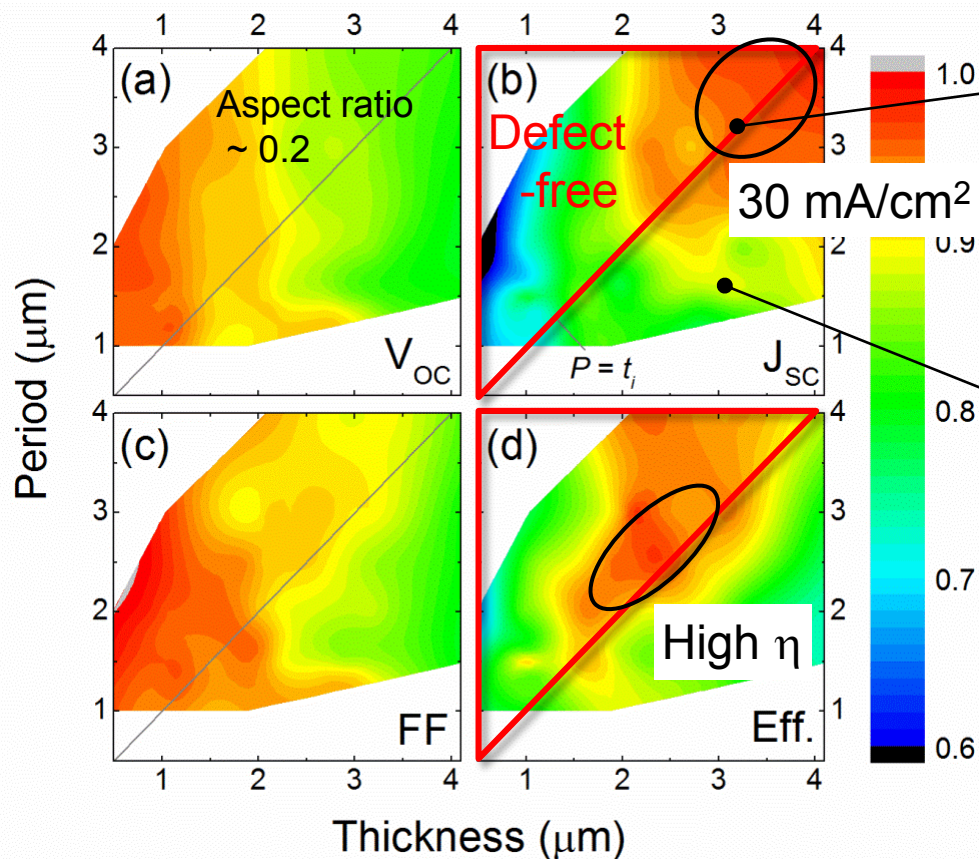
Aspect ratio
 $H/P = 0 \sim 0.3$

$D/P = 0.3 \sim 0.5$



ハニカムテクスチャによる系統的検討

高品質 $\mu\text{c-Si:H}$ 成長の条件: $P > t$ ($H/P \sim 0.2$)



→ 発電効率 **10.5%** (世界最高 10.7%)

Sai et al., *APL* **102** (2013) 053509.
Sai et al., *APEX* **6** (2013) 104101.

更なる高効率化に向けて

aa: active area
da: designated area

	Area cm ²	t μm	V _{oc} V	J _{sc} mA/cm ²	FF	Eff. %	Remarks
EPFL	da 1.04	1.8	0.549	26.55	0.733	10.69	Superstrate [1]
	aa 1.0	2	0.51	24	0.72	~9	Commercial substrate
	da 1.05	1.8	0.521	28.17	0.716	10.5	HC(P=2.5μm), IOH [2]
	da 1.05	1.8	0.523	28.22	0.732	10.81	HC(P=2.5μm), ITO, AR, (i)μc-Si[3]
	Δ		+0.4%	+0.2%	+2.2%		
	da 1.05	1.7	0.542	27.44	0.738	10.97	HC(P=2μm), i-p buff., thin (i)μc-Si
	Δ		+3.6%	-2.8%	+0.8%		

<V_{oc}, FF>

- (i)μc-Si:Hの結晶化率調整
- i-p buffer層
- 薄型化

<J_{sc}>

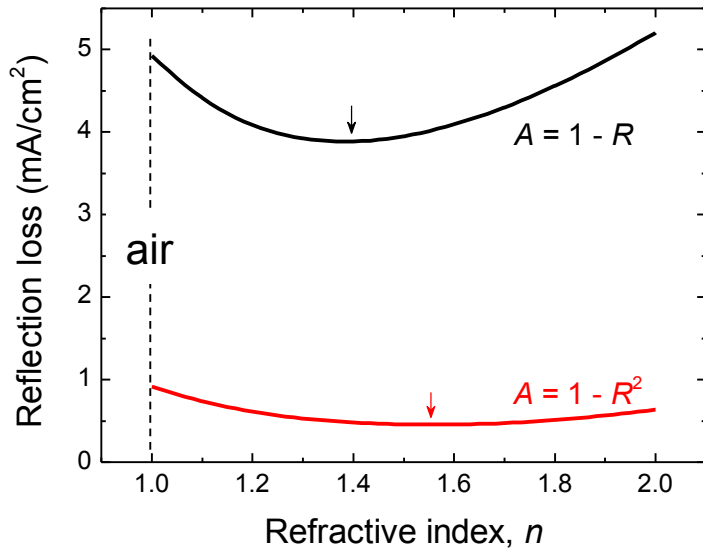
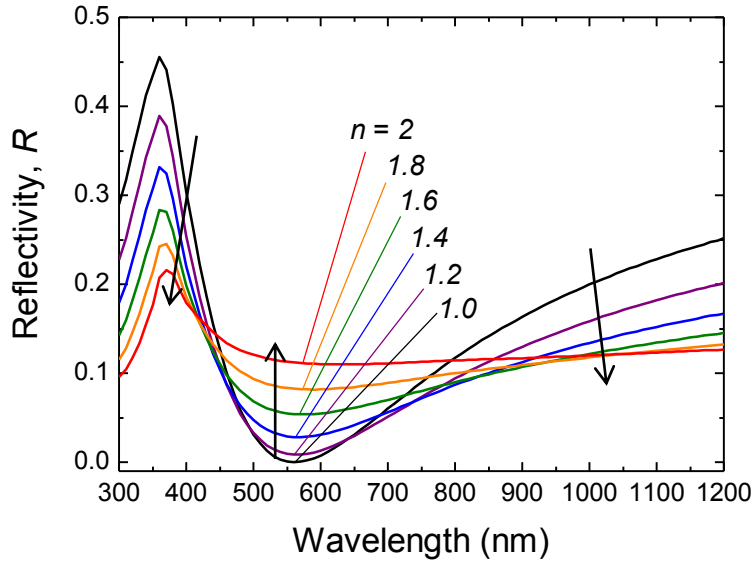
- 反射防止フィルム

[1] Hänni et al., *PIP* **21** (2013) 821.

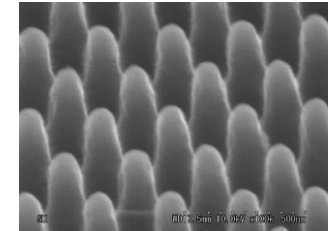
[2] Sai et al., *APEX* **6** (2013) 104101.

[3] *PIP* **22** (2014) 1. efficiency tables (ver.43)

①-1 反射防止フィルムによる屈折率変調

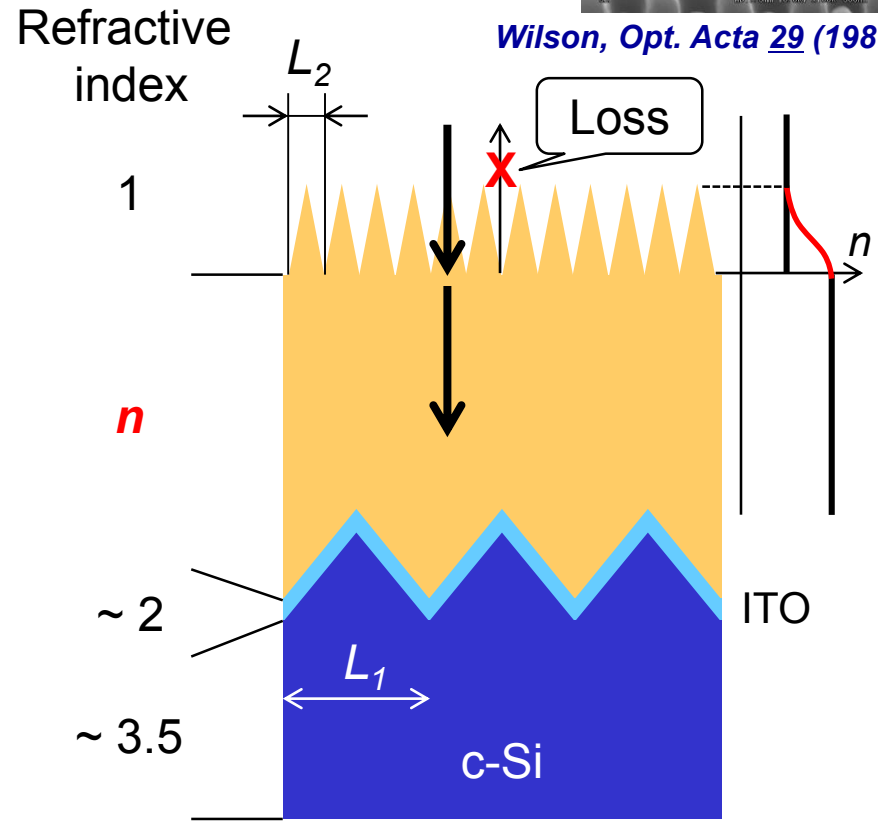


Moth-eye film



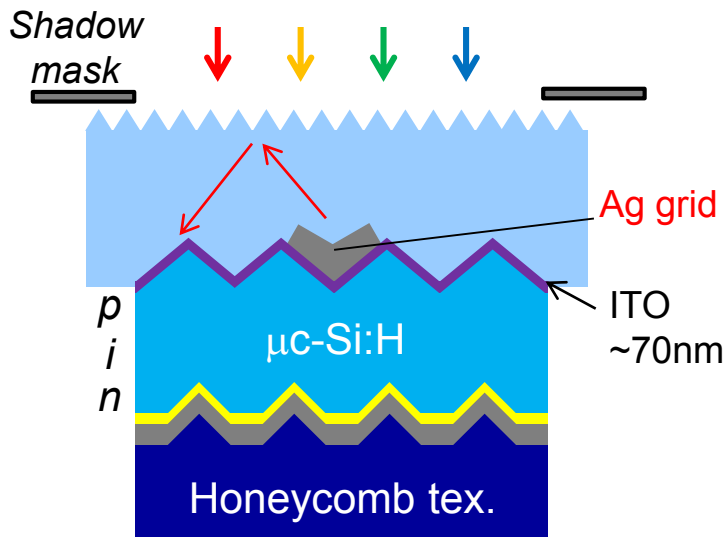
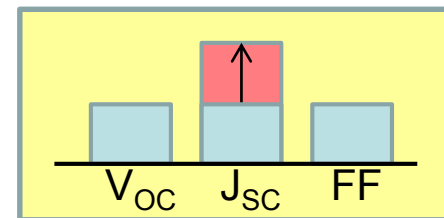
$\lambda \gg L_2$ 500 nm

Wilson, *Opt. Acta* 29 (1982) 993

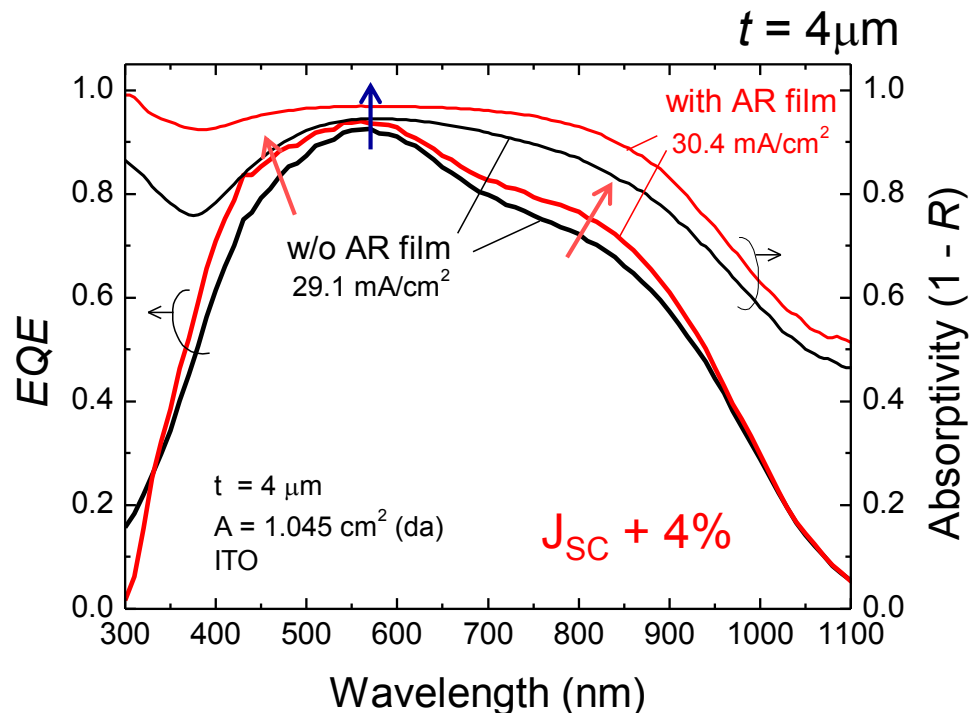


新たな反射ロス無しで入射媒質の屈折率を変調

①-2 反射防止フィルムの適用



AR	V_{OC} V	J_{SC} mA/cm ²	FF	Eff. %
w/o	0.480	29.1(da)	0.682	9.5
with	0.481	30.4 (da)	0.678	9.9



□ 反射防止(AR)効果の広帯域化

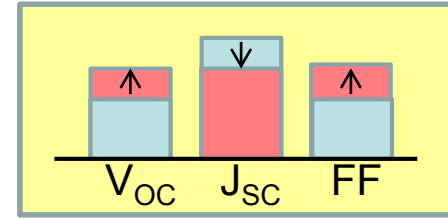
□ EQE/光吸収のピークも向上

Ag電極のシャドウロス低減効果

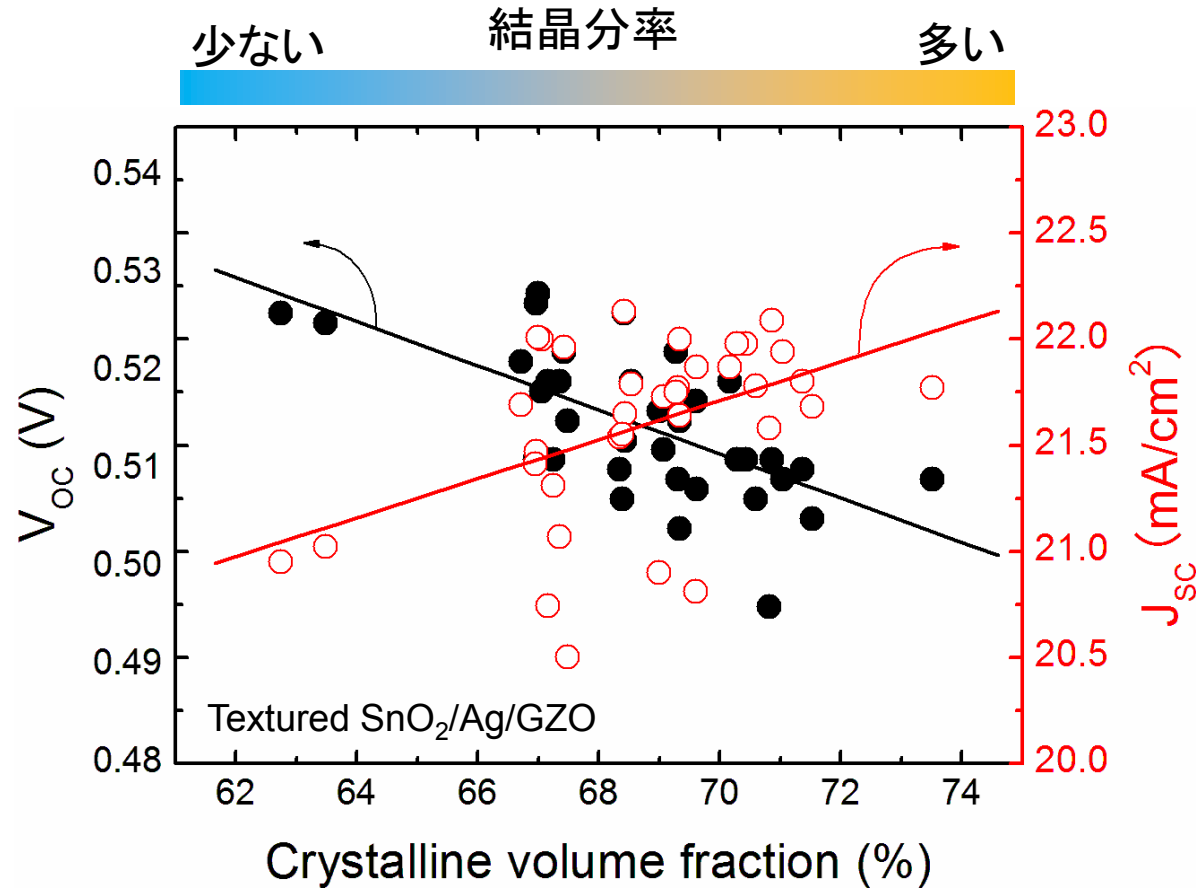
⇒全波長で吸収向上

ハニカムテクスチャとの相乗効果

② (i) $\mu\text{c-Si:H}$ 結晶化率

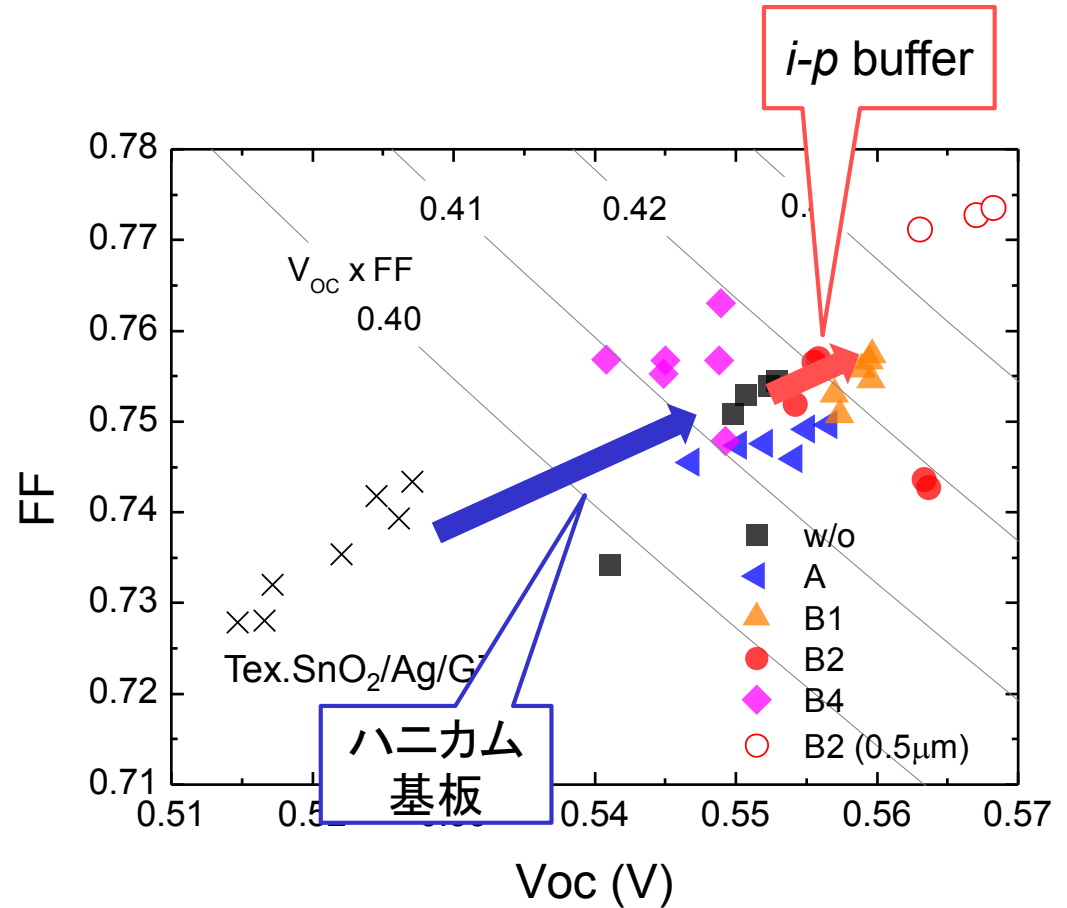
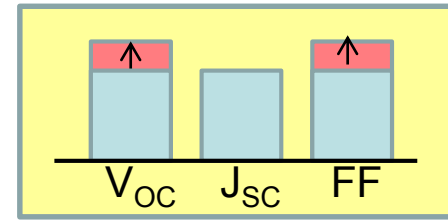
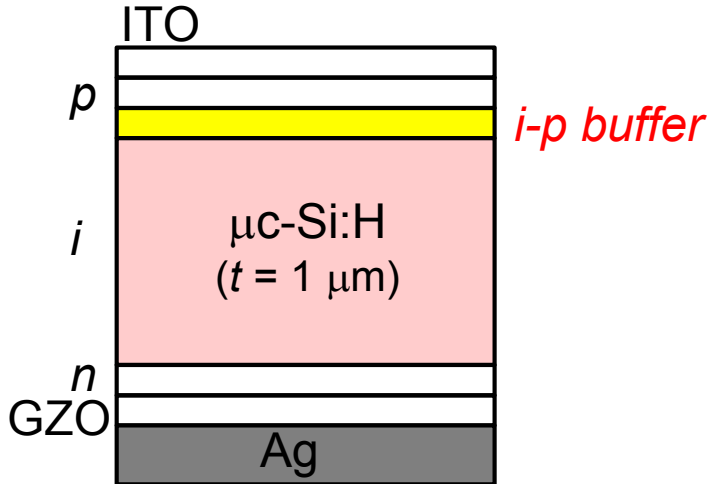


- (i) $\mu\text{c-Si:H}$ の結晶体積分率は製膜条件で制御可
- J_{SC} と V_{OC} (FF) のバランス調整 ($\Delta J_{\text{SC}} \Leftrightarrow \Delta V_{\text{OC}}$)
- 高 V_{OC} 型に調整



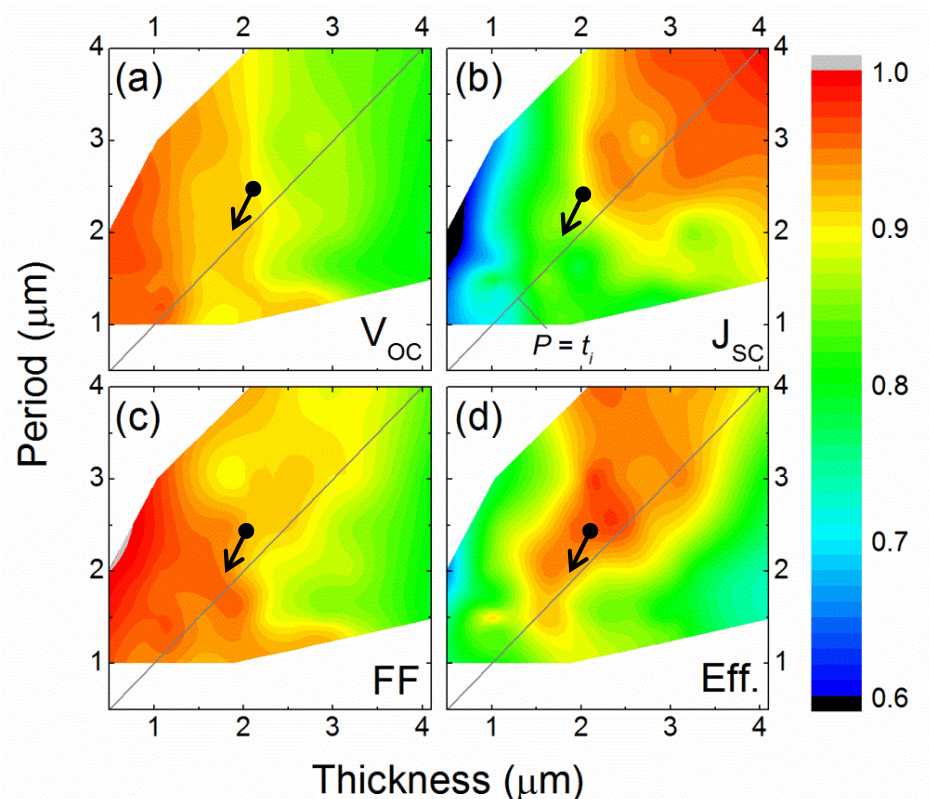
③ i-pバッファ層

- i/p界面での再結合抑制
⇒ a-Si:H-likeなi層の挿入
(低パワー密度、低水素希釈)

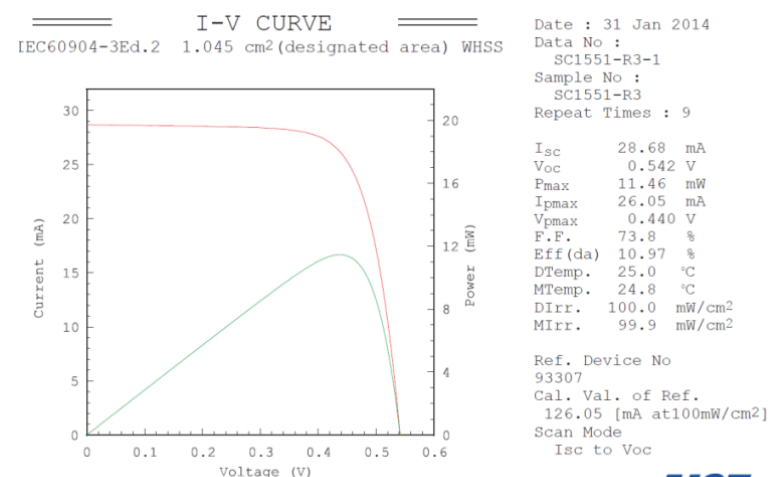


④ i層薄型化

ID	Area cm ²	P μm	H/P	t μm	V _{OC} V	J _{SC} mA/cm ²	FF	Eff. %	
1532	aa 1.1	2.0	0.25	1.9	0.540	28.2	0.739	11.2	
1551	aa 1.1	2.0	0.25	1.7	0.542	27.7	0.737	11.1	
	da 1.1				0.542	27.4	0.738	11.0	w/ AR



世界最高効率11%
μc-Si:H単接合セル



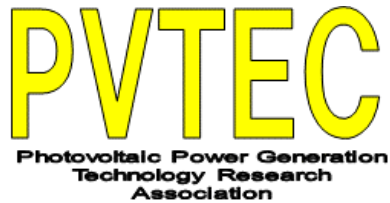
まとめ

サブストレート型(nip) $\mu\text{c-Si:H}$ セル

- i-p界面へのバッファ層挿入 \Rightarrow 高 V_{OC} 化・高FF化
- モスアイフィルムによる反射損失低減可能 $\Rightarrow J_{SC}(da) > 30.4 \text{ mA/cm}^2$
 - (i) $\mu\text{c-Si:H}$ /ITO膜界面の反射防止効果の広帯域化
 - (ii) Ag電極で反射した光の閉じ込め(シャドウロス低減効果)
- $\mu\text{c-Si:H}$ 層結晶化率・膜厚調整
- 世界最高となる発電効率11%を実現

□ タンデム型・スーパーストレート型太陽電池への展開

謝辞



RCPVTの皆様
 (評価・標準チーム 菱川様、
 志村様、佐々木様)
 PVTECの皆様
 AIST-NPPの関係者