

薄膜シリコン太陽電池用高度光閉じ込め構造の開発

齋 均

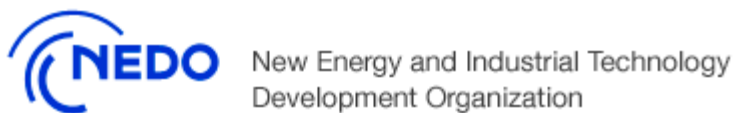
先端産業プロセス・低コスト化チーム



謝辞

近藤道雄、吉田郵司、松井卓矢、鯉田崇、Adrien Bideville、穂積康雄、
菱川善博、佐々木あゆみ、守屋美夏、増田賢一(AIST)
吉田功、齊藤公彦、前島圭剛、保月なな、宮城雄一、村田圭吾 (PVTEC)

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて太陽光発電技術研究組合(PVTEC)と共同で実施した。また実験の一部では産総研ナノプロセッシングパートナーシッププラットフォーム(AIST-NPPP)の支援を受けた。



発表内容

- 薄膜シリコン太陽電池における光閉じ込め
- ハニカムテクスチャの開発
- 微結晶シリコン($\mu\text{c-Si:H}$)太陽電池への適用
 - ・ アスペクト比
 - ・ 周期
 - ・ 膜厚
 - ・ 最適化
- まとめ

薄膜シリコン太陽電池における光閉じ込め

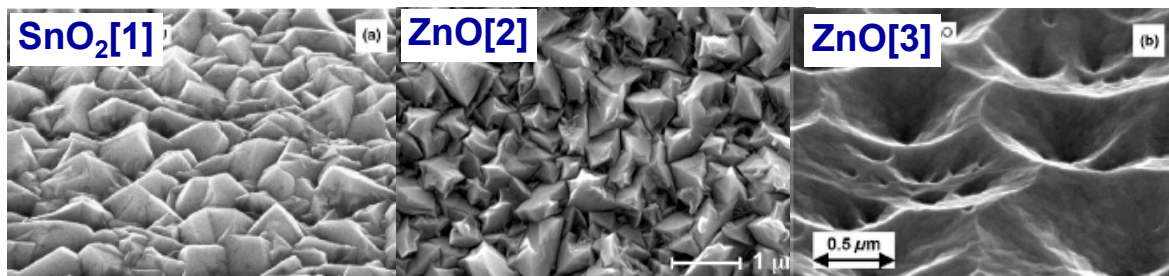
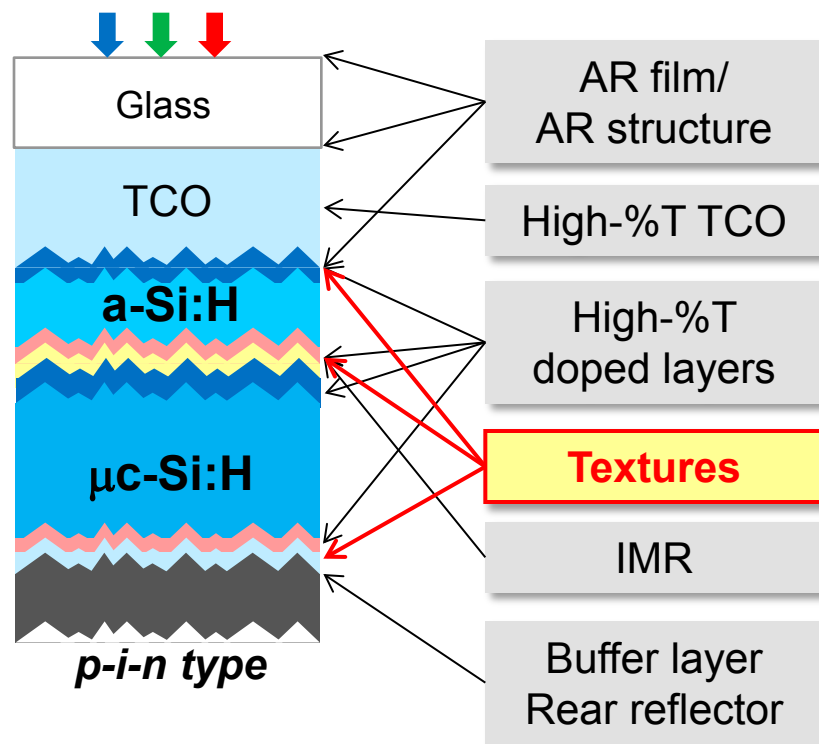
- 反射損失低減 (light in-coupling)
- 光閉じ込め (light trapping)
- 吸収損失低減 (parasitic absorption)

a-Si/ μ c-Siタンデムセル

$\eta > 15\%$ の実現には

$J_{SC} \text{ (tandem)} > 15 \text{ mA/cm}^2$

$J_{SC} \text{ (}\mu\text{c-Si:H)} > 30 \text{ mA/cm}^2$

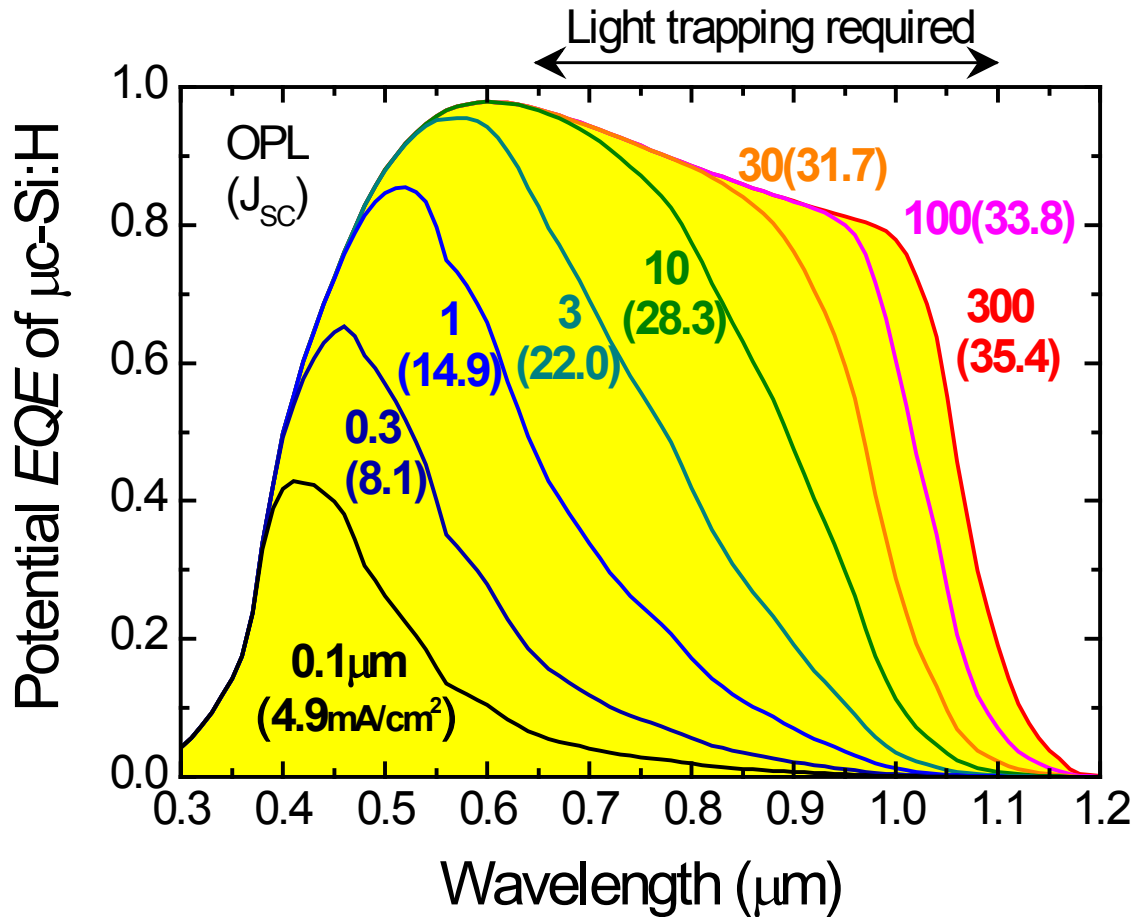


[1] K. Sato, Rep. Res. Lab. AGC., Ltd. 42 (1992) 129.

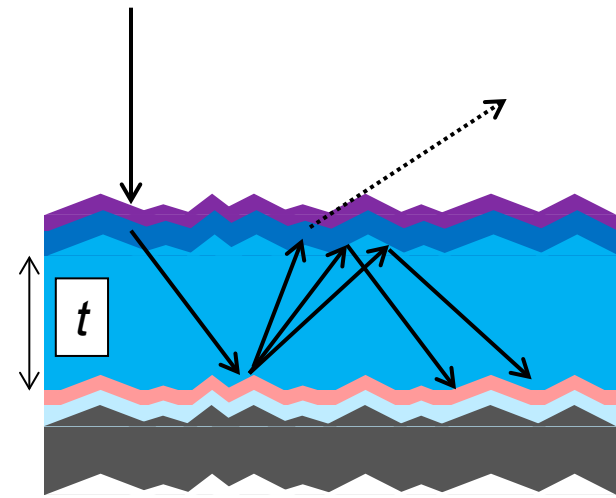
[2] S. Faÿ, SOLMAT 86 (2005) 385.

[3] M. Berginski, JAP 101 (2007) 074903.

微結晶シリコン($\mu\text{c-Si:H}$)太陽電池の光閉じ込め



光路長(OPL) >> 膜厚(t)



光閉じ込め用テクスチャの開発

サブストレート($n-i-p$)構造 + 周期構造テクスチャ

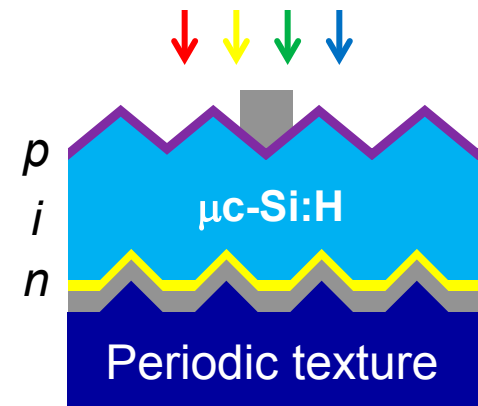
サブストレート構造を使えば...

- 材料(TCO)開発とテクスチャ開発を切り分け
(参考) ナノモールドで形状転写したZnO基板

Battaglia et al., Nature photonics 5 (2011) 535.

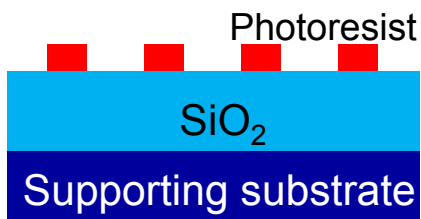
周期構造を使えば...

- テクスチャ構造のパラメータと電池特性の相関を
単純化・明確化
- ランダム構造を上回る光閉じ込め性能が期待
Z. Yu, A. Raman, S. Fan, PNAS 107 (2010)17491.
- 光学シミュレーションとの親和性(周期境界条件)

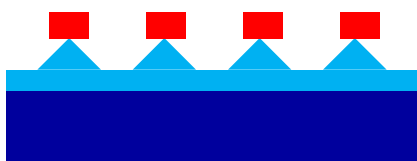


ハニカムテクスチャ開発

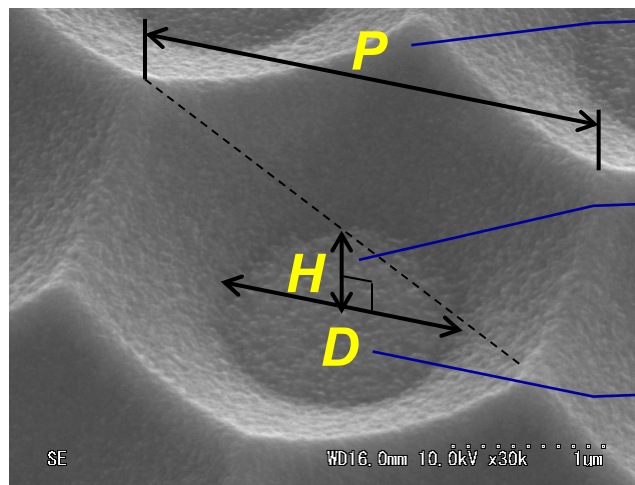
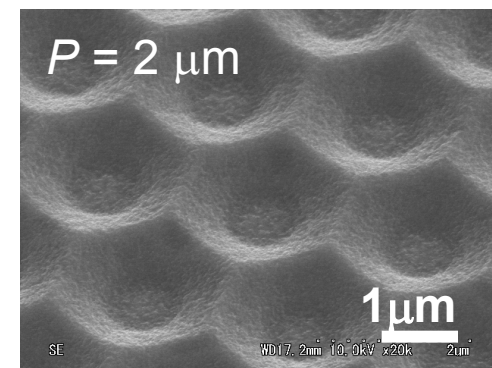
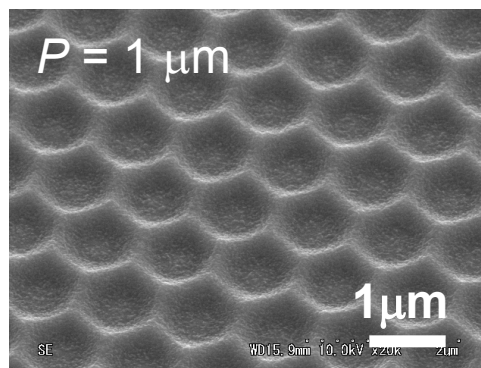
A. Patterning by photolithography



B. Wet etching with HF+NH₄F aq.



C. Ag/ZnO coating



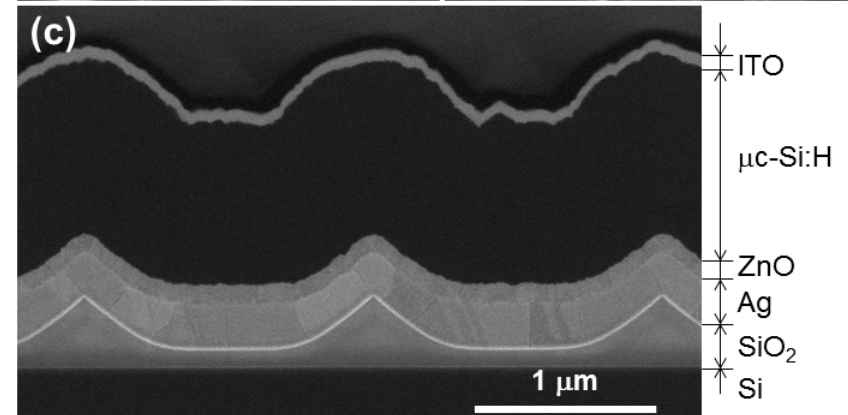
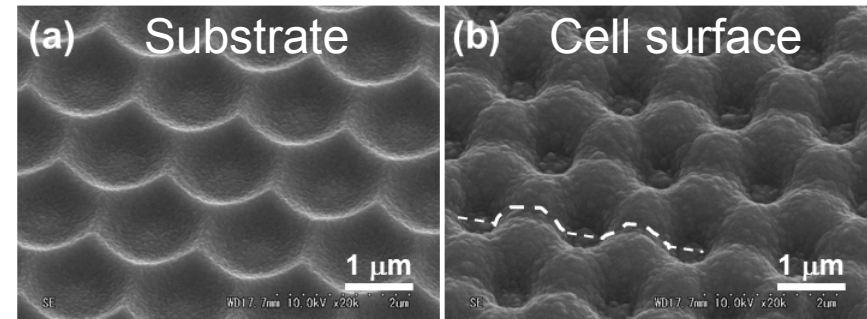
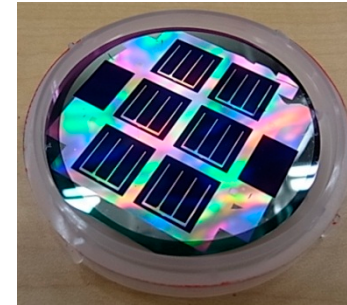
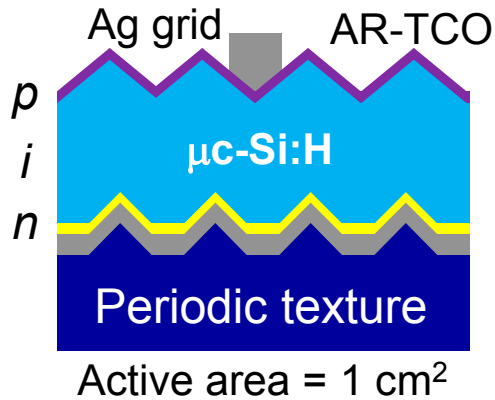
Period
 $P = 1 \sim 4 \mu\text{m}$

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

Flat base
 $D/P = 0.3 \sim 0.5$

μc-Si:H太陽電池の作製

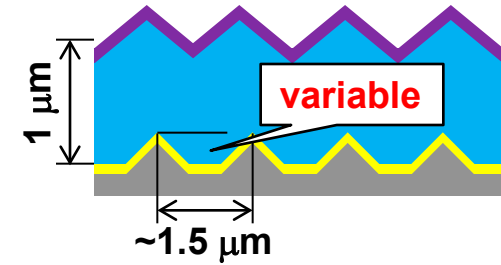
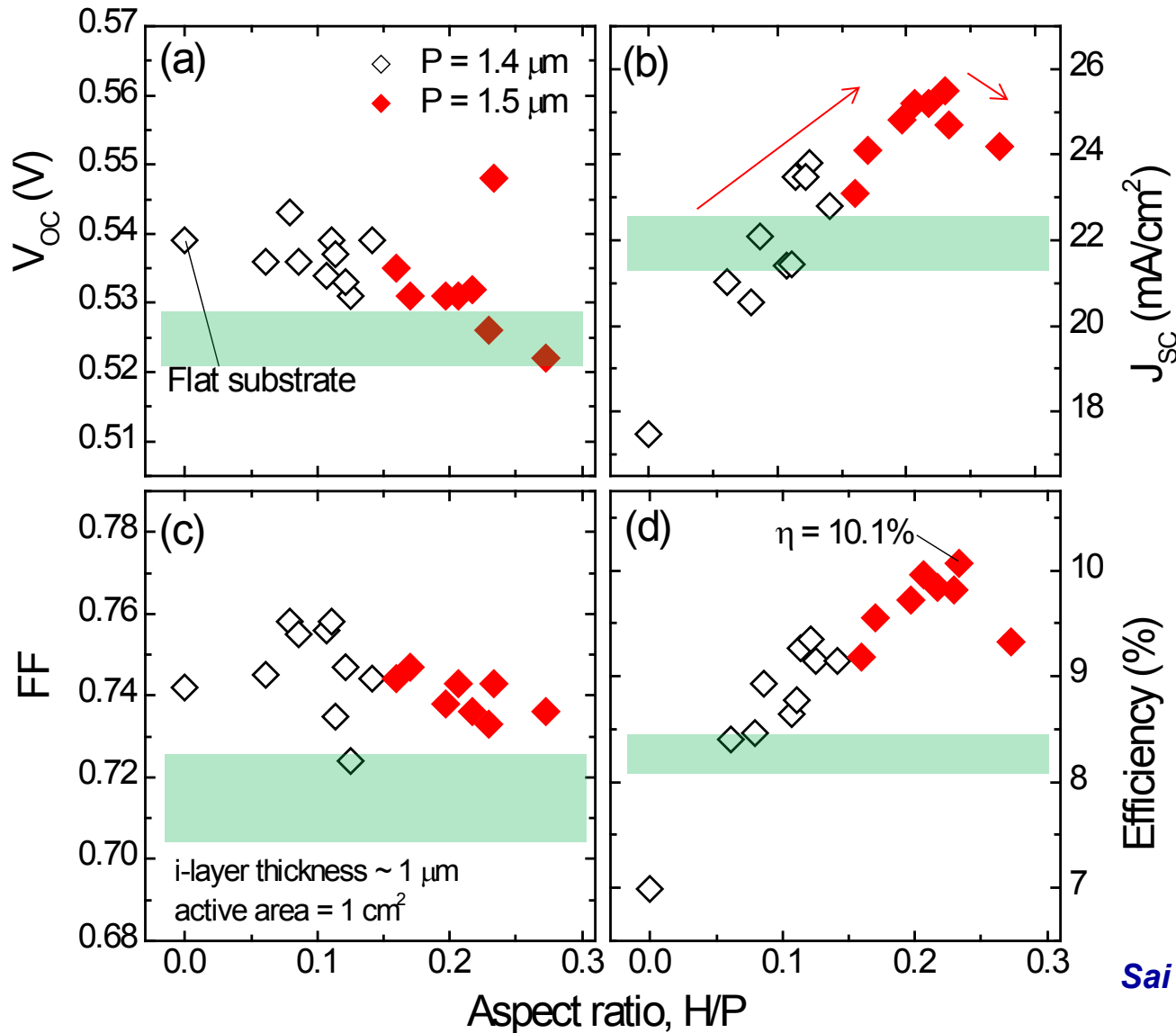
D. Cell fabrication (PECVD & sputtering)



	Standard	Advanced
n	$\mu\text{c-Si:H}$	nc-SiOx:H
i	$\mu\text{c-Si:H}$ Thickness $t_i = 0.5 - 3 \mu\text{m}$	
p	$\mu\text{c-Si:H}$	nc-SiOx:H
TCO	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO)	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ (IOH)*

*Koida et al., JJAP 46 (2007) L685.

アスペクト比依存性



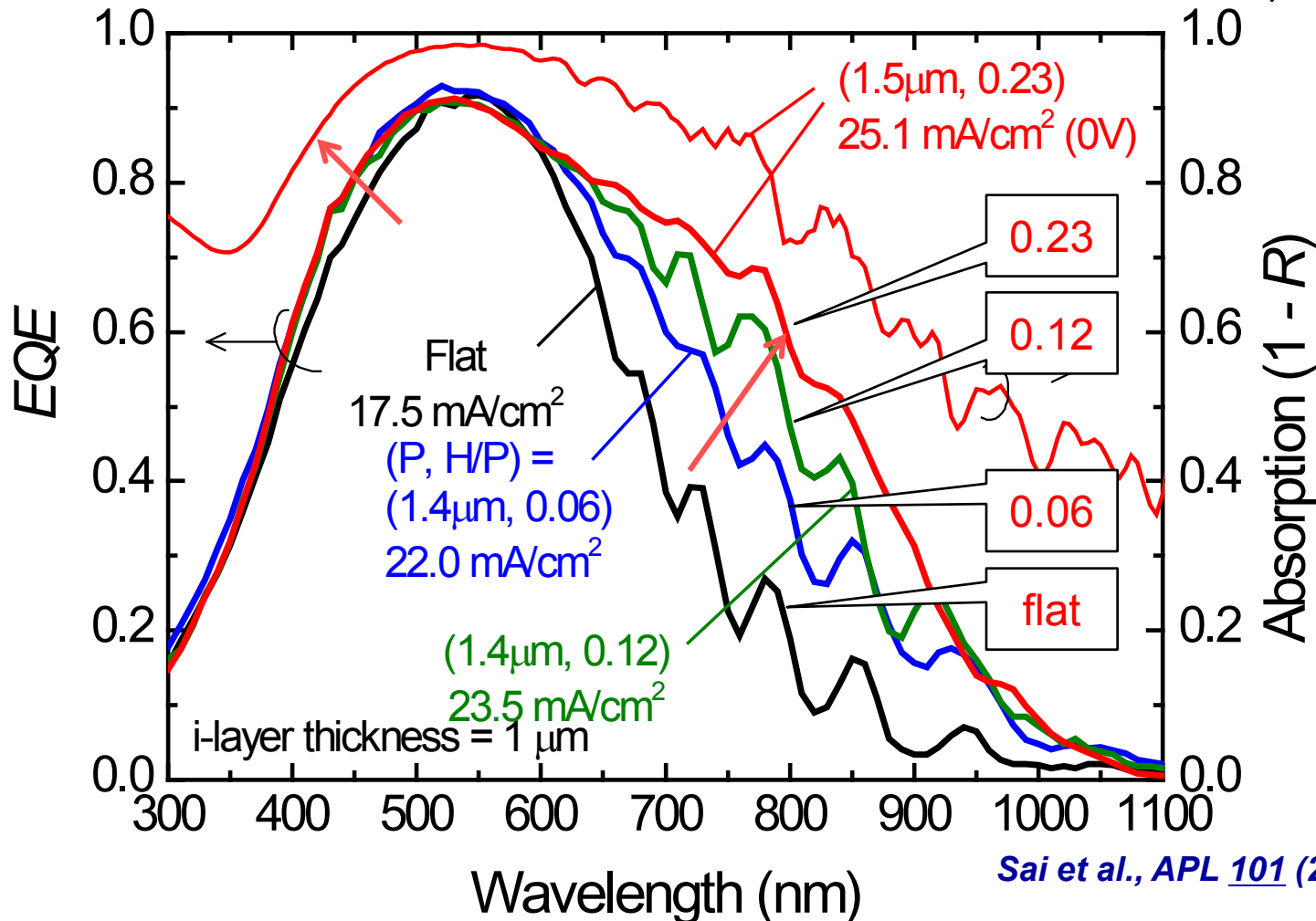
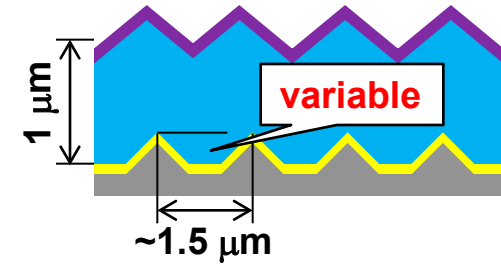
- V_{oc} , FF maintained
- J_{sc} improved
- Optimal H/P
- $\eta > 10\%$

CVD- $\text{SnO}_2/\text{Ag}/\text{GZO}$

Sai et al., *APL* **101** (2012) 173901.

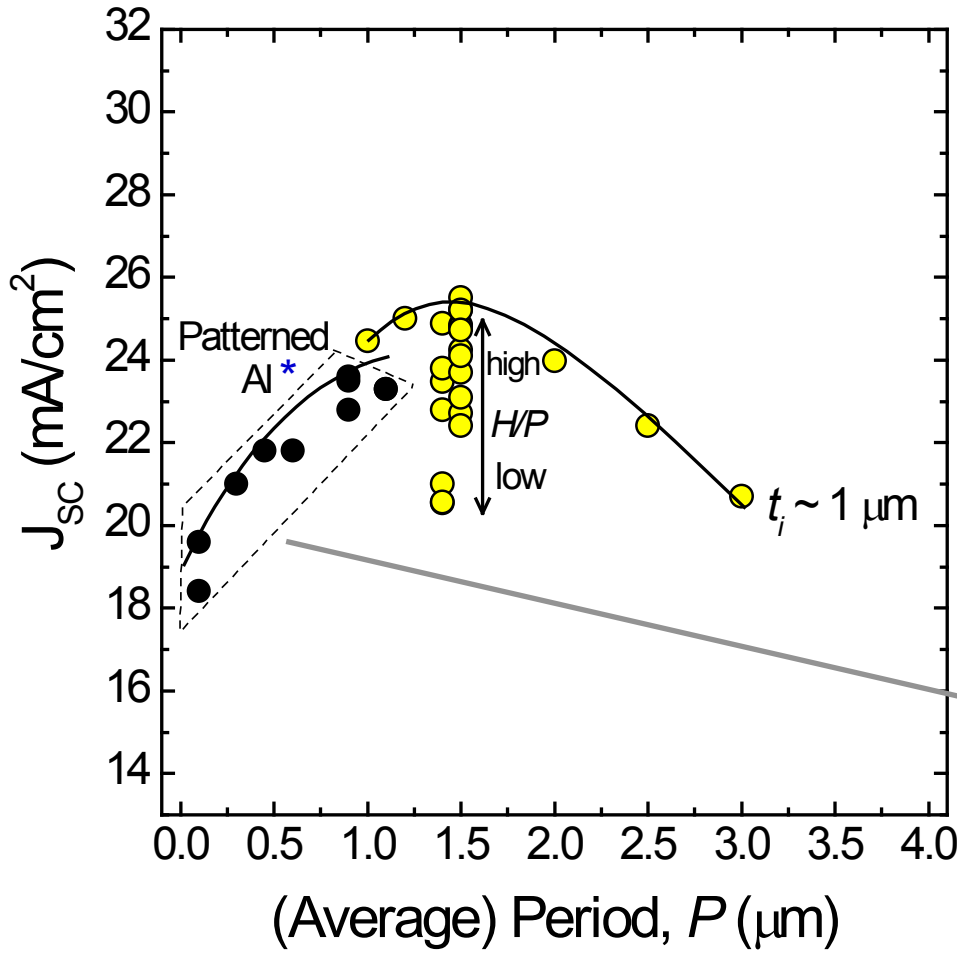
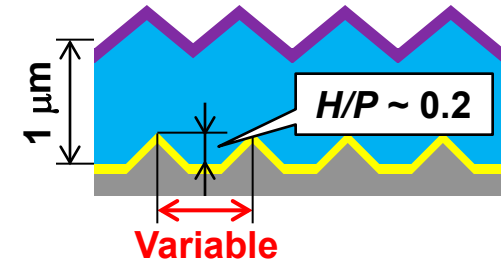
アスペクト比依存性

■ J_{SC} improved by +43% compared to a flat cell



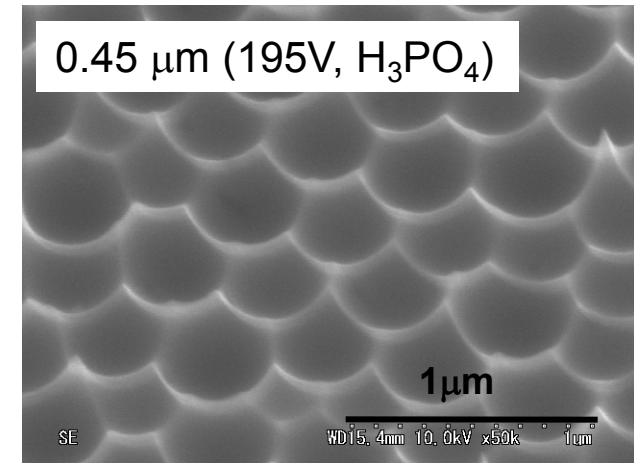
Sai et al., *APL* **101** (2012) 173901.

周期依存性



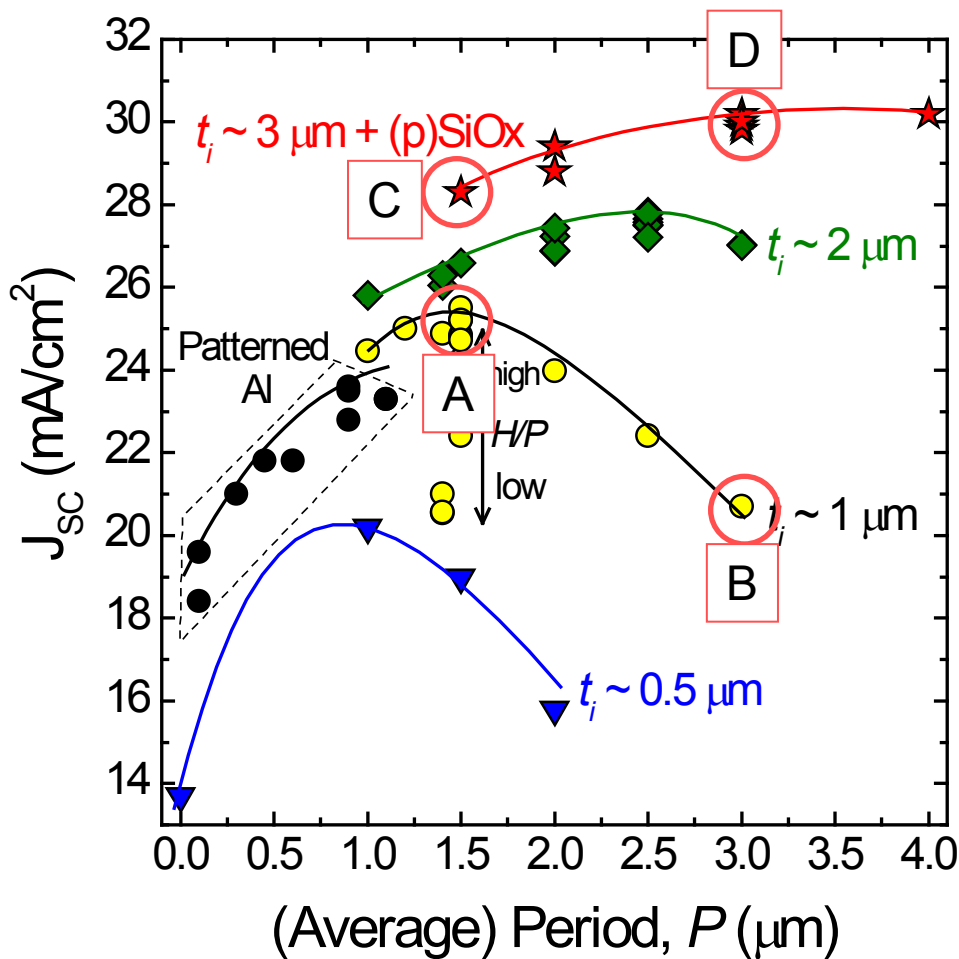
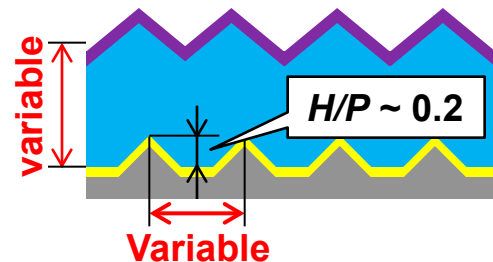
t_i μm	Optimal P μm	J_{sc} mA/cm ²
1	1.5	25.5

Anodically oxidized Al



*Sai & Kondo, *JAP* 105 (2009) 094511.

周期依存性



t_i μm	Optimal P μm	J_{SC} mA/cm^2
0.5	~1	~21
1	1.5	25.5
2	2.5	27.8
3	3 ~ 4	30.2

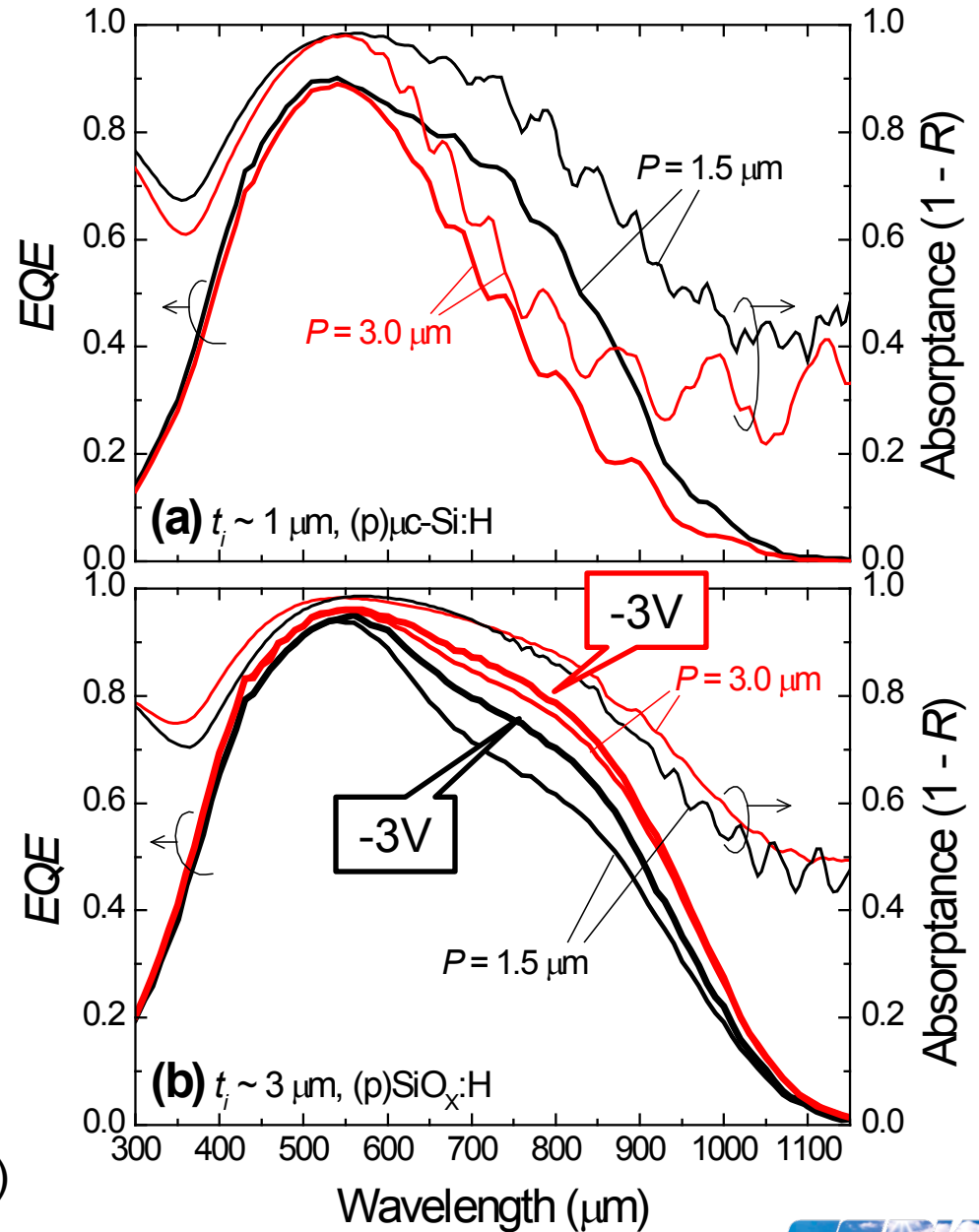
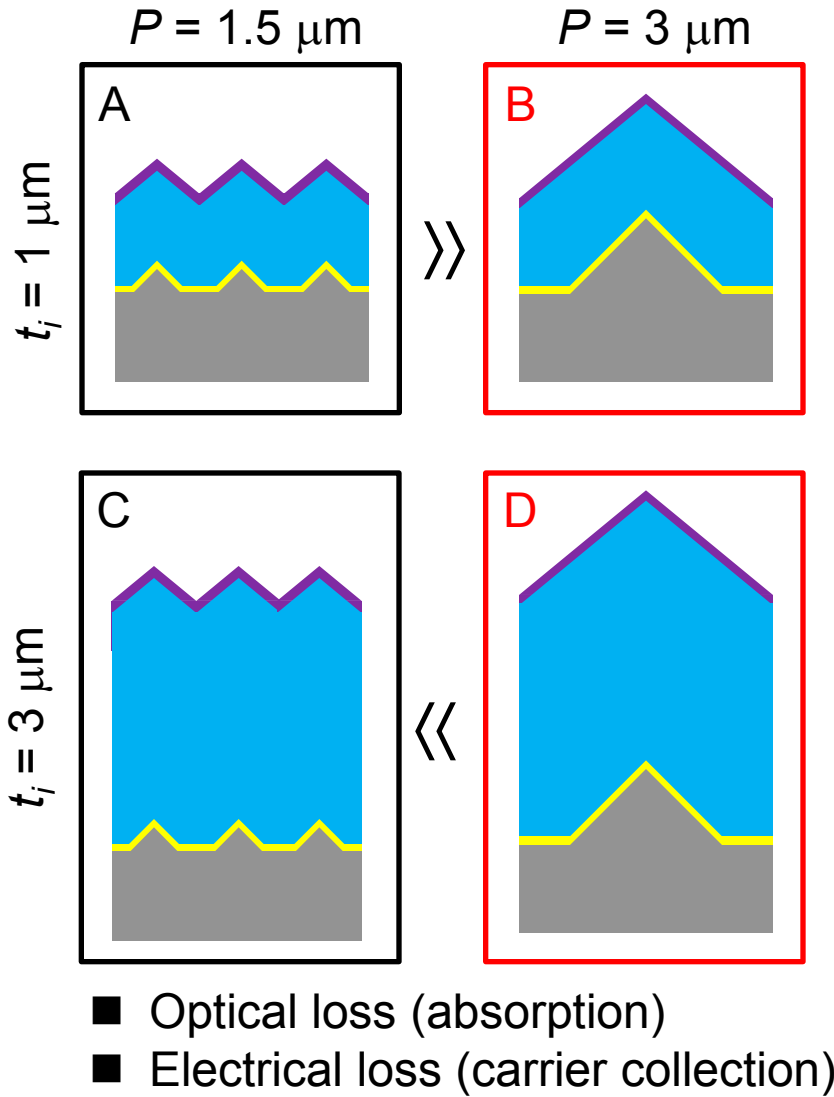
■ Optimal $P \leftrightarrow$ Cell thickness t_i

In thick cells, J_{SC} is

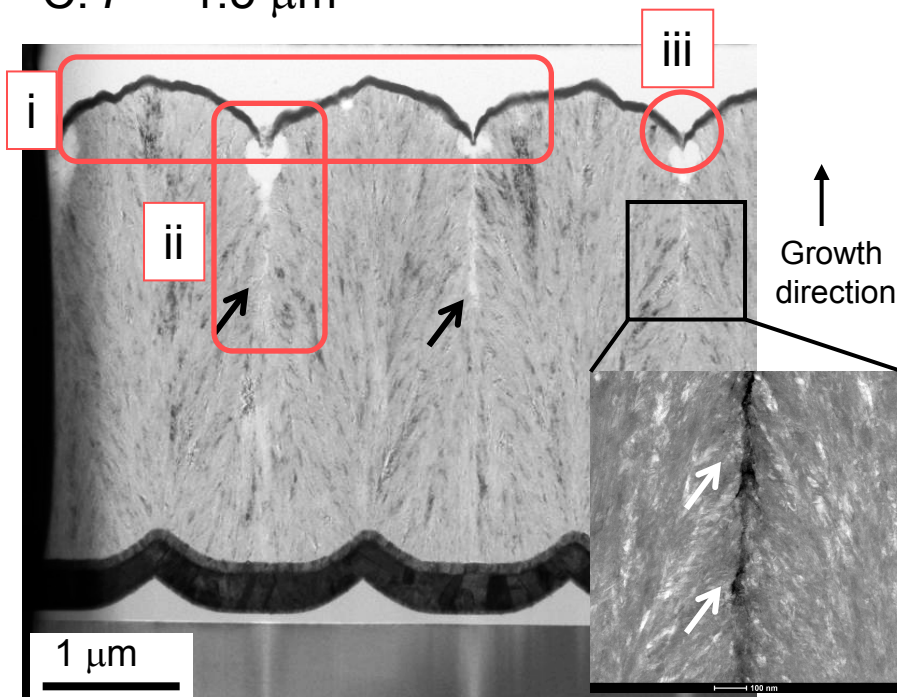
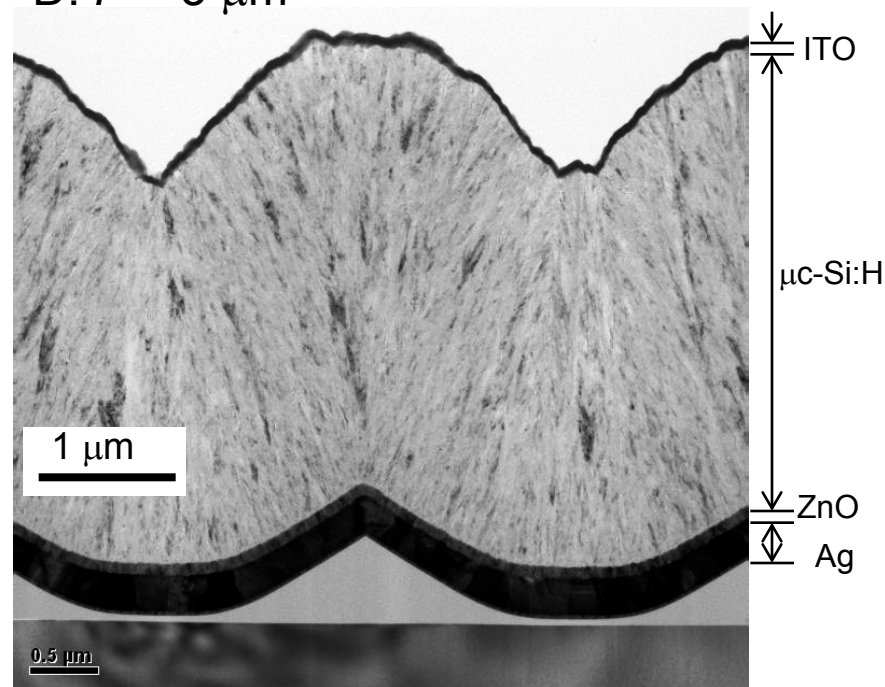
(i) higher at longer P

(ii) less sensitive to P

Sai et al., APL 102 (2013) 053509.



X-TEM ($t_i = 3 \mu\text{m}$)

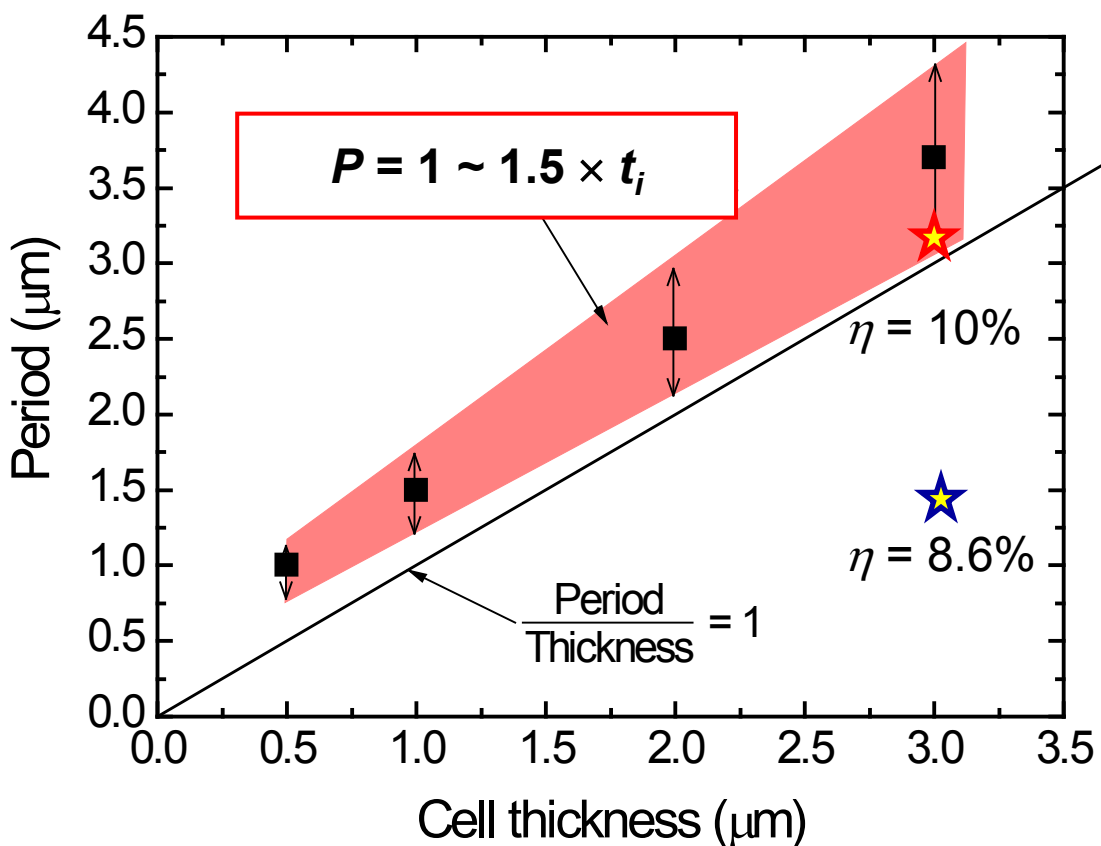
 C: $P = 1.5 \mu\text{m}$

 D: $P = 3 \mu\text{m}$


- i. Surface flattening
- ii. Texture-induced defects
- iii. Non-uniform coverage

ID	P μm	V_{oc} V	J_{sc} mA/cm^2	FF	Eff. %
C	1.5	0.460	28.3	0.658	8.6
D	3	0.480	30.3	0.688	10.0

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

テクスチャ周期と膜厚の相関



In case of: PECVD film growth on textured substrates with moderate aspect ratios

ハニカムテクスチャによる高効率化

Sub	t_i μm	p	n	V_{OC} V	J_{SC} mA/cm^2	FF	Eff. %	Note
P = 1.5 μm	1	$\mu\text{c-Si}$	$\mu\text{c-Si}$	0.519	26.7	0.746	10.3	
P = 2.5 μm	2	SiO_x	SiO_x	0.510	28.7	0.732	10.7	
P = 3 μm	3	SiO_x	$\mu\text{c-Si}$	0.500	30.1	0.693	10.4	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$
KANEKA* random	2**	-	-	0.539	25.8 24.4(ap)**	0.766	10.7 10.1(ap)**	

*Yamamoto, *IEEE Trans. Electron Devices* **46** (1999) 2041.

Active area, 1cm^2

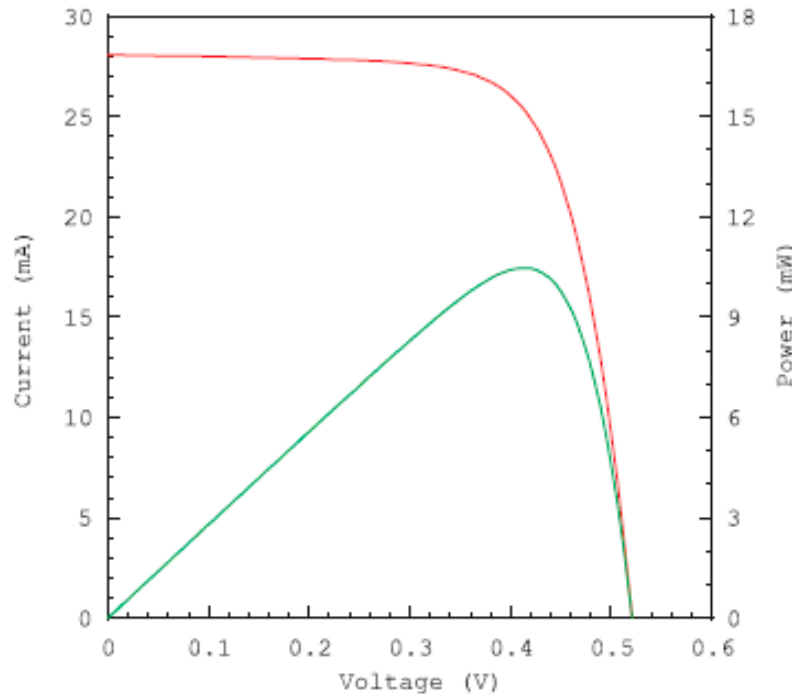
Solar Cell efficiency tables (ver. 41), *PIP* **21 (2012) 1.

- $\eta > 10\%$ in the range of $t_i = 1 - 3 \mu\text{m}$ with optimized P .
- Highest $\eta = 10.7\%$ (active area) with $t_i = 2 \mu\text{m}$ and $P = 2.5 \mu\text{m}$.
- Room for improvement in V_{OC} & FF.

$\eta = 10.5\%$ (da) confirmed

$P = 2.5 \mu\text{m}$
 $t_i = 2 \mu\text{m}$
 w/ $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$

I-V CURVE
 IEC60904-3Ed.2 0.997cm²(designated area) WHSS



Date : 27 Feb 2013
 Data No :
 SC1227-01
 Sample No :
 SC1227
 Repeat Times : 9

I_{sc} 28.09 mA
 V_{oc} 0.521 V
 P_{max} 10.47 mW
 I_{pmax} 25.21 mA
 V_{pmax} 0.416 V
 F.F. 71.6 %
 Eff (da) 10.5 %
 DTemp. 25.0 °C
 MTemp. 25.0 °C
 DIrr. 100.0 mW/cm²
 MIrr. 99.9 mW/cm²

Ref. Device No
 93307
 Cal. Val. of Ref.
 126.05 [mA at 100mW/cm²]
 Scan Mode
 I_{sc} to V_{oc}



	Area	V _{oc} V	J _{sc} mA/cm ²	FF	Eff. %
AIST cal. lab.	designated	0.521	28.17	0.716	10.5
In-house	active	0.524	29.04	0.725	11.0

まとめ

- サイズ・形状が制御可能な周期構造からなるハニカムテクスチャ基板を開発し $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池に適用
 - 最適アスペクト比 : 0.2 – 0.25
 - 最適周期 : $1 < \text{周期/膜厚} < 1.5$
- 適正化したハニカムテクスチャと吸収損失低減により $J_{\text{SC}} > 30 \text{ mA/cm}^2$ を達成
- 産総研評価チームの評価で、10.5% (da) を達成 (世界トップレベル)

今後の展開

- キャリア収集ロス、 V_{OC} 、FFの改善
- スーパーストレート型・タンデム構造
- インプリント法等による大面積化・低コスト化

