

## シリコン新材料チームの概要

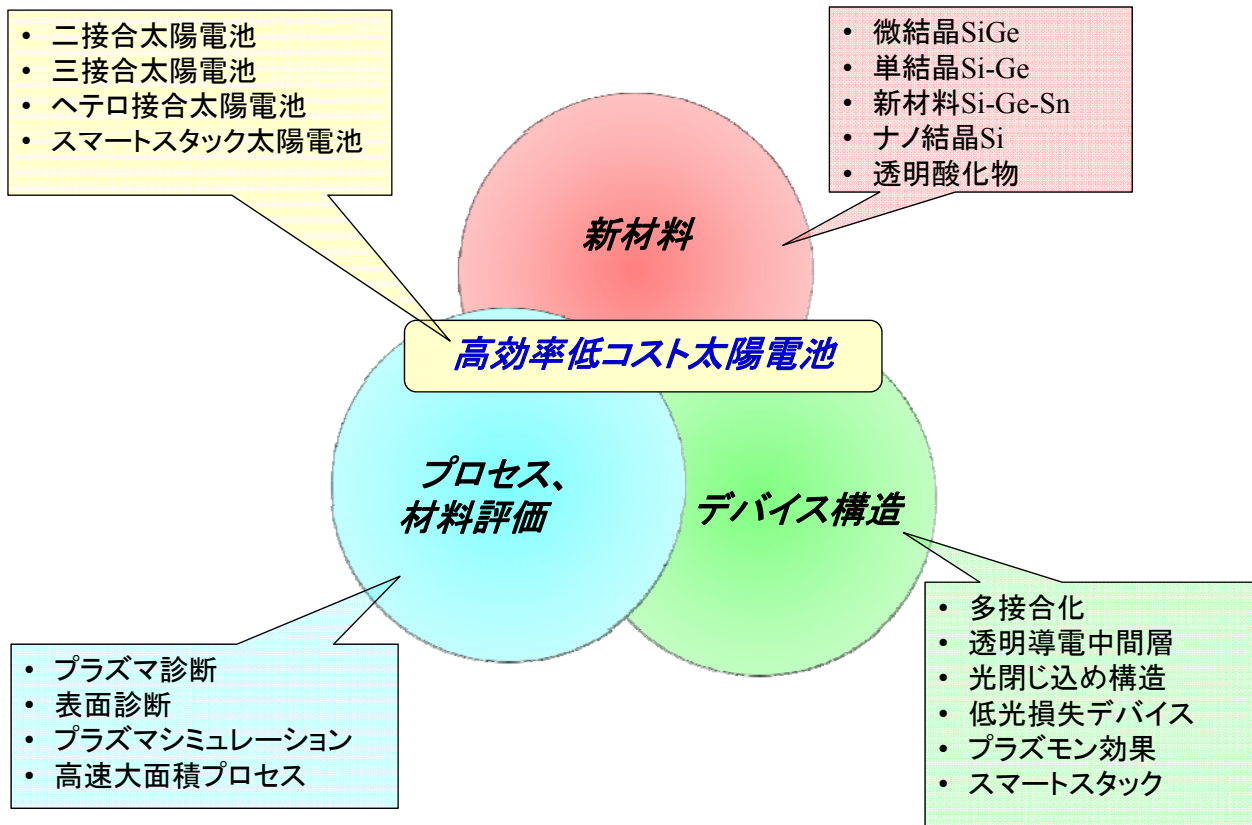
Recent Activities of Novel Silicon Material Team  
– R&D of Thin Film Silicon Solar Cells and  
Related Materials –

発表者: 近藤 道雄

Michio Kondo

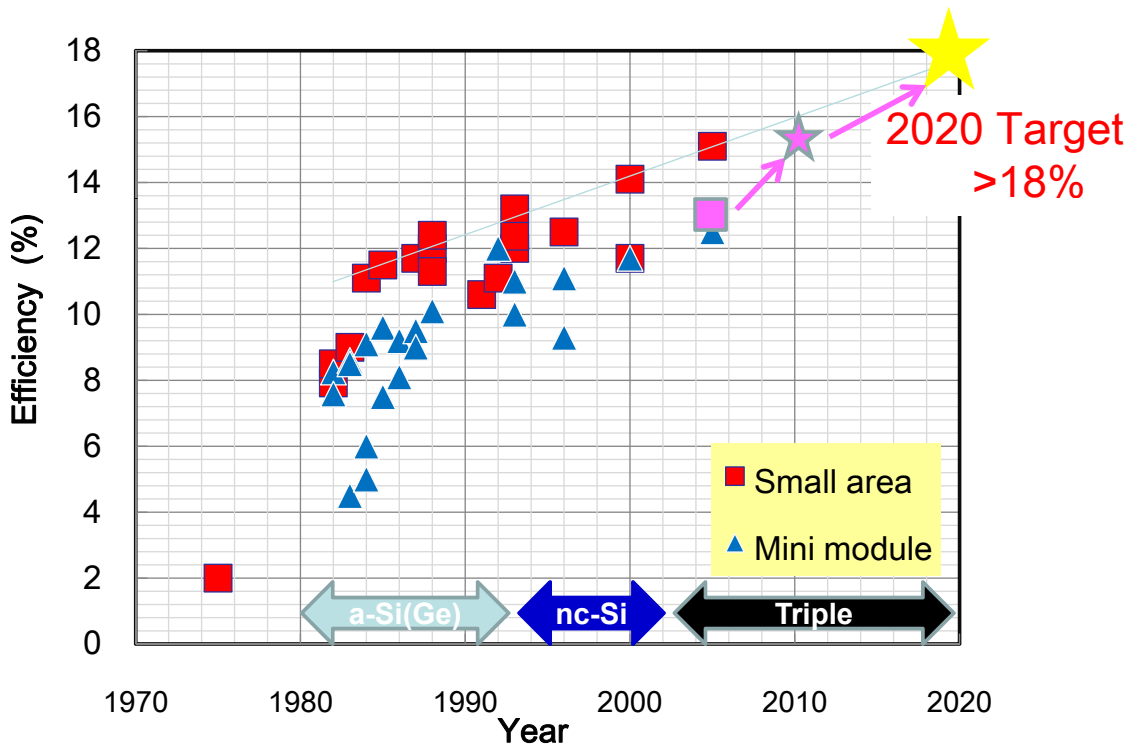
独立行政法人 産業技術総合研究所

## シリコン新材料チームの研究テーマ

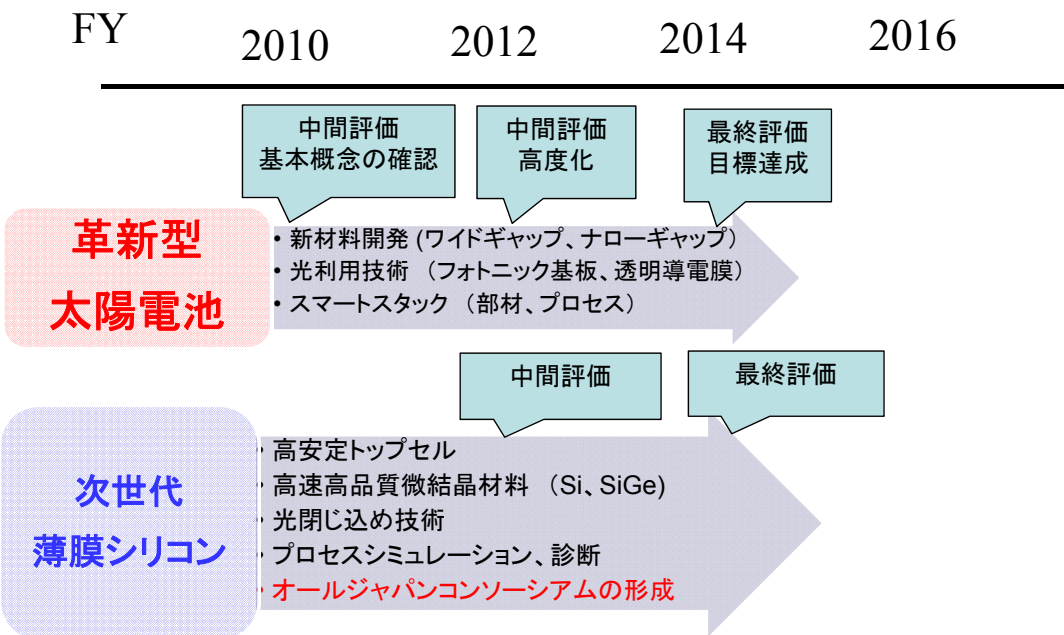


独立行政法人 産業技術総合研究所

# 薄膜シリコン太陽電池の高効率化



独立行政法人 産業技術総合研究所



**所内連携**

- ワイドギャップ材料 : 化合物薄膜チーム、有機チーム
- ナローギャップ材料 : ナノテク部門、光技術部門、結晶シリコンチーム
- 光閉じ込め : フォトリソ技術 (共通的)
- モジュール化 : 産業化戦略チーム、評価システムチーム

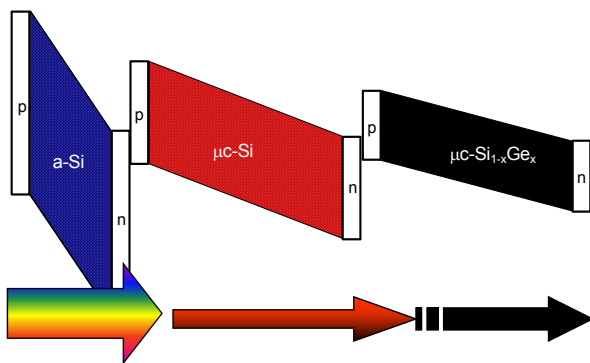
独立行政法人 産業技術総合研究所

# nc-SiGe alloys ; Materials and devices for higher efficiency solar cells

独立行政法人 産業技術総合研究所

## トリプルタンデム型新構造太陽電池 (triple tandem solar cell)

a-Si:H       $\mu\text{c-Si:H}$        $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$



a-Si/  $\mu\text{c-Si}$  tandem solar cell

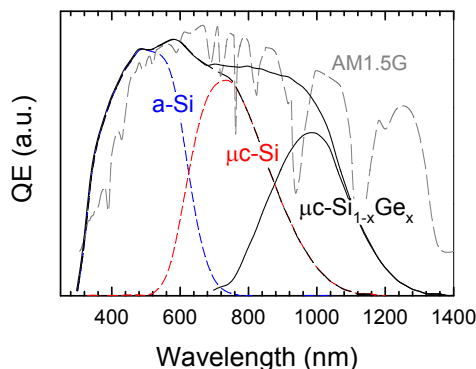
Low absorption coeff. ( $\mu\text{c-Si}$ )



$\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

ナローギャップ化により、高い赤外感度を得ることを目指す

Higher IR response



double  $\eta=12-13\% \rightarrow$  triple  $\eta=16\%$

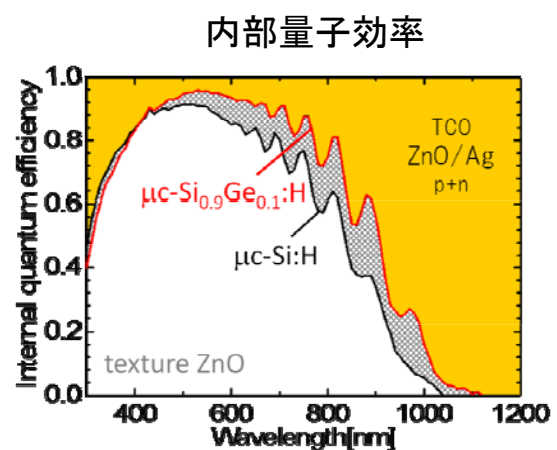
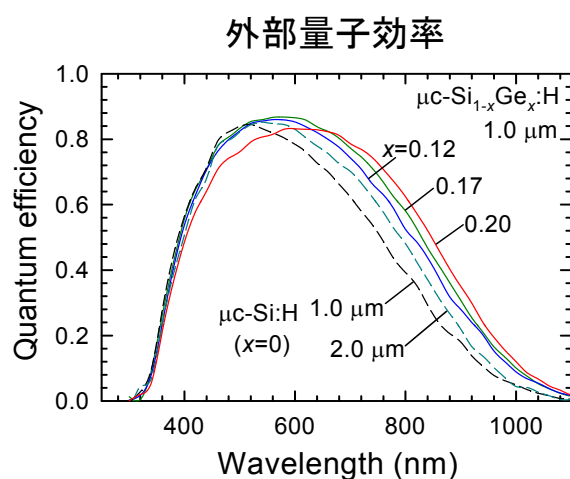
$J_{sc}(\text{SiGe}) \gg 30 \text{ mA/cm}^2$

独立行政法人 産業技術総合研究所

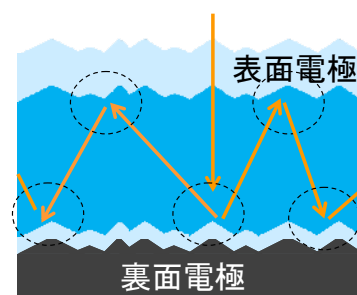
## 薄膜シリコン開発課題 (Issues for Thin Film Si)

- 高品質 $\mu\text{c-Si/Ge}$  (High quality material)  
高効率化のための材料開発がカギ
- 高透過低抵抗透明導電膜 (High quality TCO)
- 高度光閉じ込め技術 (Light management)

## 微結晶 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ シングルセルの特性

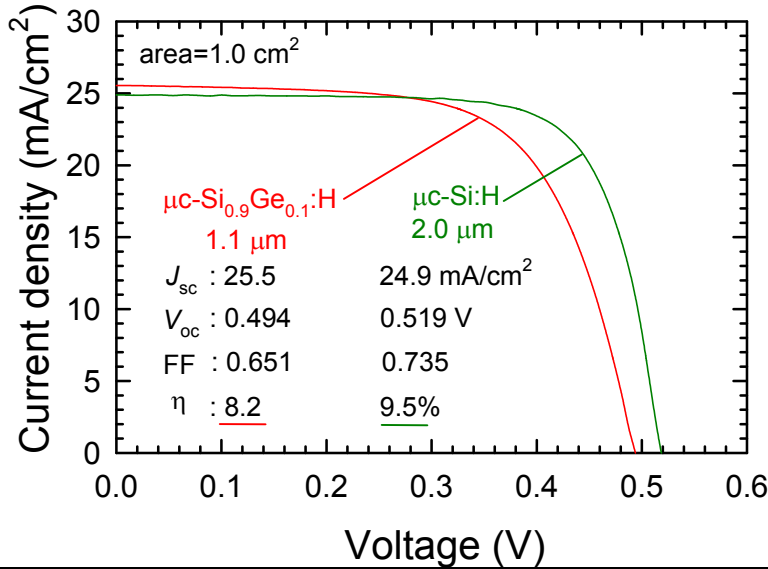
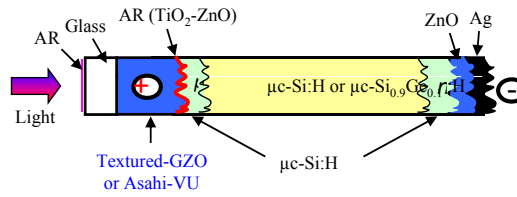


- Ge添加(10~20原子%)により長波長感度を効果的に増加させることができる。
- 微結晶Siセルに比べて高い内部量子効率を実現できる。(寄生吸収口の低減効果)



### 単接合セルの高効率化

Single junction device:

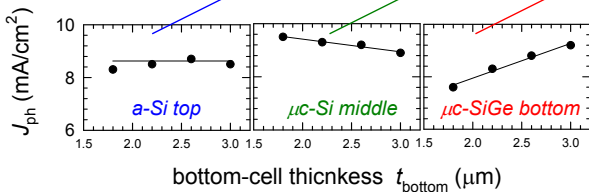


半分の膜厚で同じ電流  
→ 低コスト化

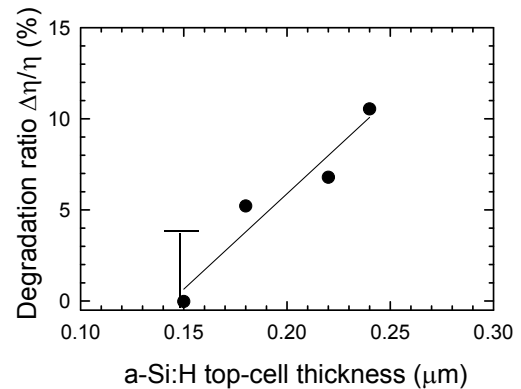
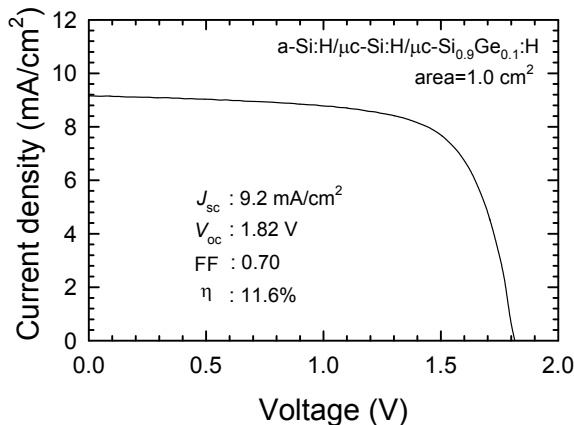
同じ膜厚で高電流  
→ 高効率化  
→ 材料の高品質化に課題  
→ アクセプタ欠陥

### 三接合型太陽電池の特性

※三菱重工業株式会社との共同実施



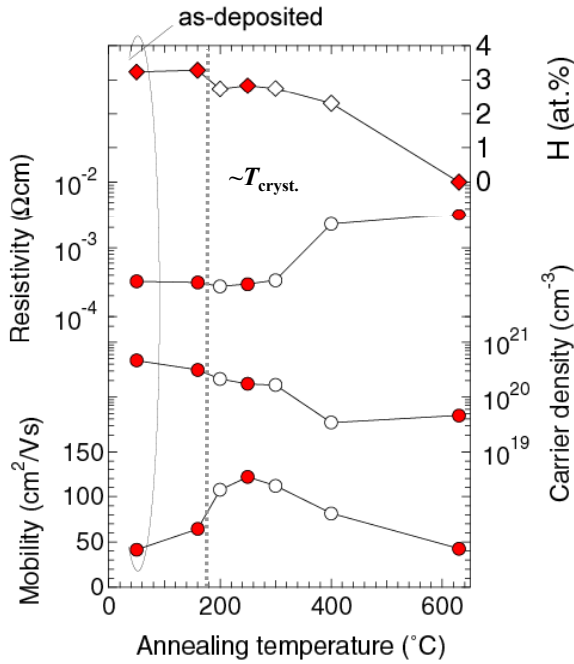
- ミドルセル電流もボトムセル膜厚に依存
- ボトムセル膜厚~2.2 μmのとき、 $J_{ph} \sim 9$  mA/cm<sup>2</sup>で電流整合し、初期変換効率11.6%を得た



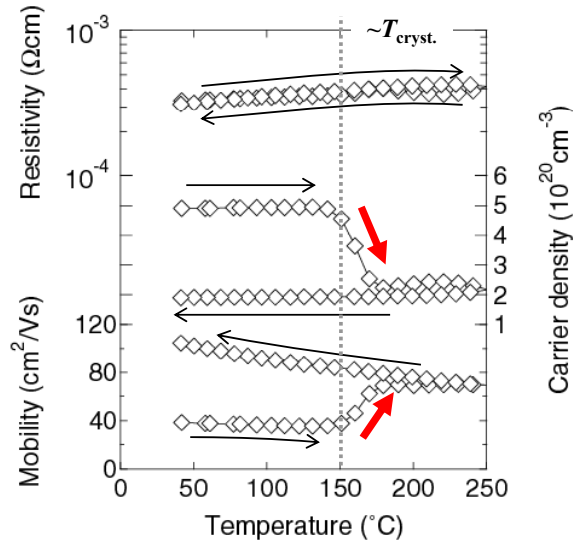
# 高移動度 TCO

赤外吸収、シリーズ抵抗

Film thickness: ~70 nm

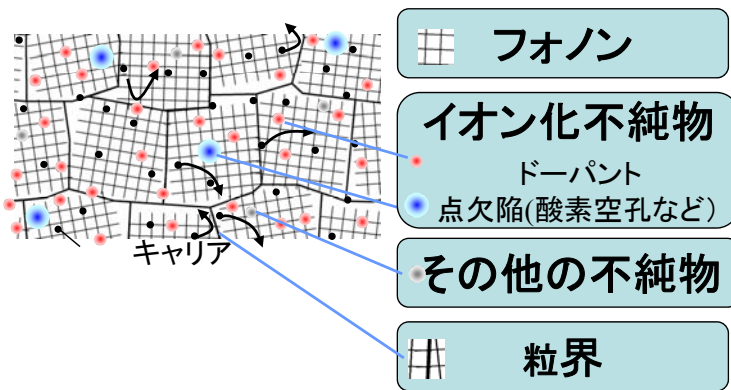


## 結晶化に伴う電気特性変化

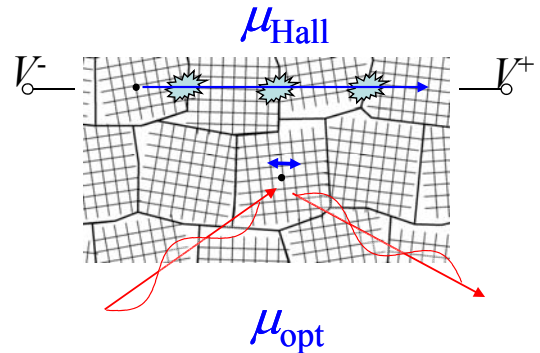


固相結晶化 ( $T_a \sim 170^\circ\text{C}$ )  $\Rightarrow$   $N: \sim \times 1/2, \mu: \sim \times 3$   
 $T_a \geq 400^\circ\text{C}$   $\Rightarrow$  電気特性劣化

# キャリアの散乱機構の解明 (なぜ高移動度か?)



## 粒界の影響



## イオン化不純物散乱に支配された移動度

$$\mu_{ii}(Z) = [24\pi^3(\epsilon_0\epsilon_r)^2\hbar^3n]/[e^3m^{*2}g(x)Z^2n_I]$$

$$g(x) = \ln(1 + 4/x) - (1 + x/4)^{-1}$$

$$x = (4e^2m^*)/[4\pi\epsilon_0\epsilon_r\hbar^2(3\pi^5)^{1/3}n^{1/3}]$$

Pisarkiewicz, TSF 174,217(1989).

Z=1: singly charged donor  
 Z=2: doubly

$\epsilon_r=8.9$  Hamberg, JAP 60, R123 (1986).  
 $m^*$ : This study (SE)

$\mu_{Hall}$  (Hall mobility)  
 $\mu_{opt}$  (optimal mobility)  
 $\mu_{ii}(Z)$  (ionized impurity scattering mobility)

非晶質 : 2価  
 結晶質 : 1価

のイオン化不純物による散乱  $\rightarrow$  酸素欠損由来  
 $\rightarrow$   $H^+$

結晶化によりキャリア散乱 & 生成機構の変化

# 光閉じ込め 薄膜Si太陽電池のキーテクノロジー

テクスチャ構造による光閉じ込め

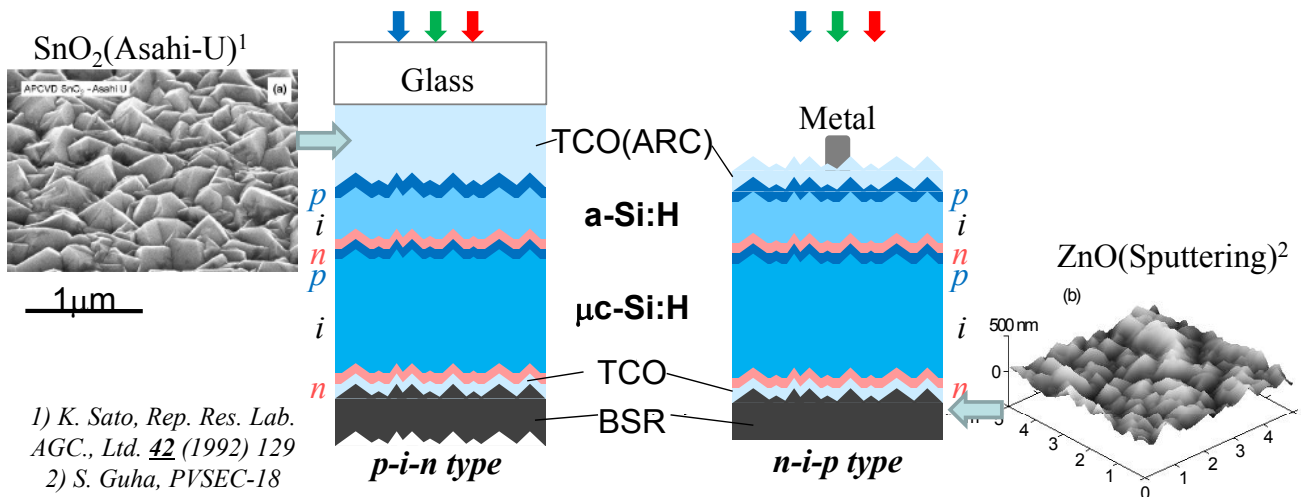
- 光散乱による光路長増大
- 屈折率マッチングによる反射低減

通常は表裏両面にテクスチャが形成

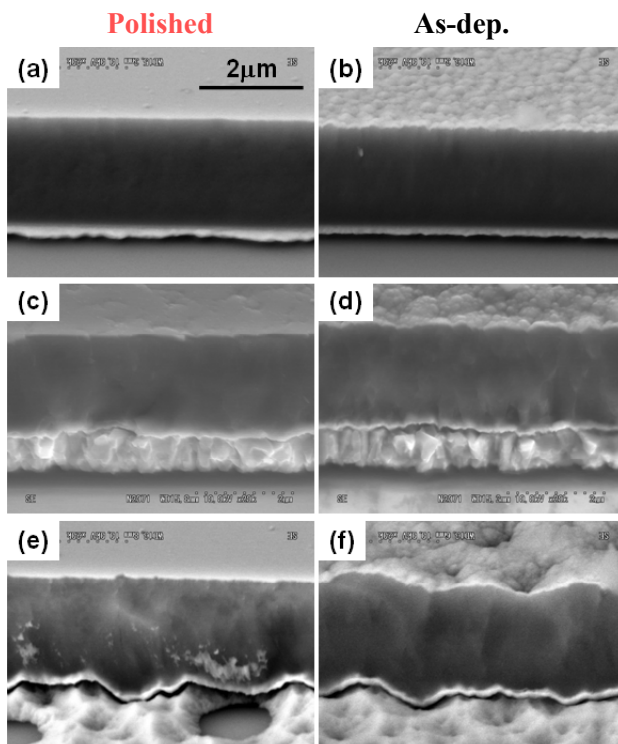
Q. 表面、裏面の寄与はどのぐらい？

片面側のみテクスチャを持つ  
太陽電池の作製・評価

↓  
表/裏面テクスチャの役割を**実デバイス**  
**上**で定量化し、光閉じ込め構造の更なる  
改善に向けた指針を得る。



## 太陽電池: SEM像



Front/Back

\* /Flat

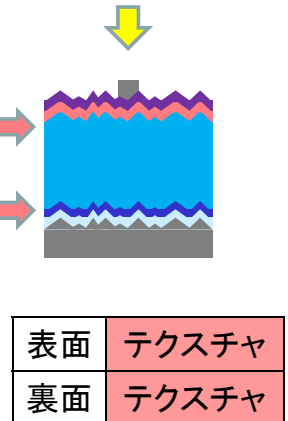
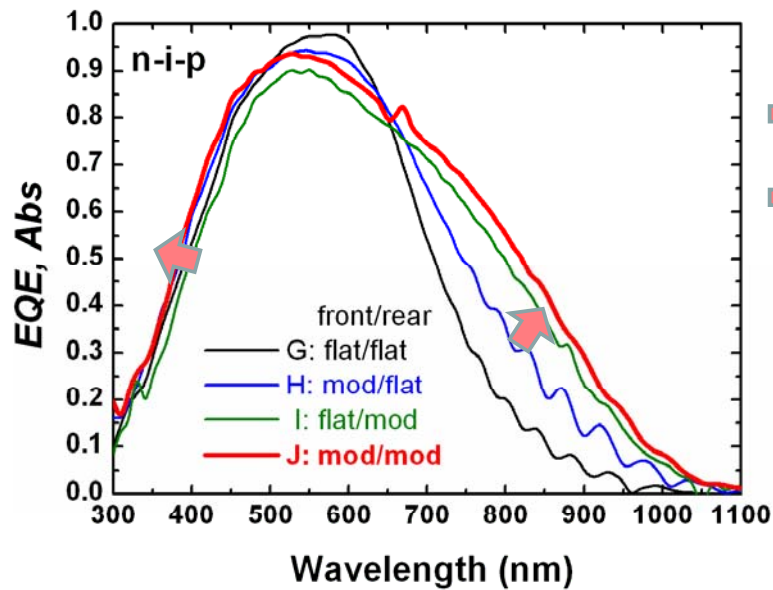
\* /Medium

\* /Rough

人為的な研磨

→ 表面と裏面の効果の分離

## 量子収率スペクトルによる解析 (サブストレート型)

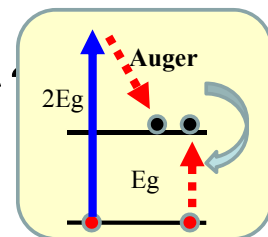


- 全波長帯でEQE向上: 両面テクスチャで光閉じ込め向上  
ただし、両面 < (表面 + 裏面)

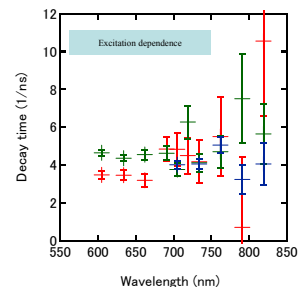
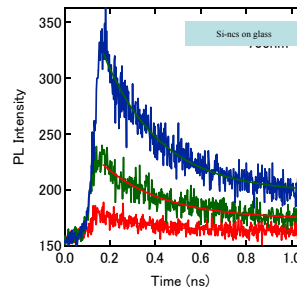
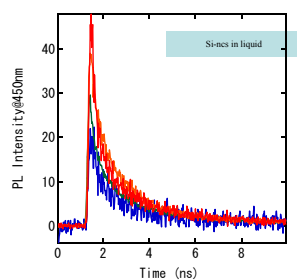
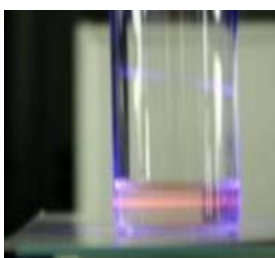
## 新材料ピックアップ-1

- ナノ結晶シリコン  
→ 量子ドットで多重励起子生成は起こるか

MEG in colloidal Si-ncs with quantum confinement effect → Svrcsek (poster)



Multi-Exciton

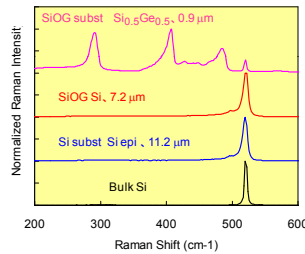
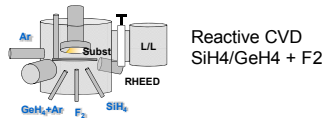




## 新材料トピックス -2

### ●ガラス上単結晶シリコン薄膜 (コーニング社、東工大と共同研究)

Single crystalline silicon thin film on glass



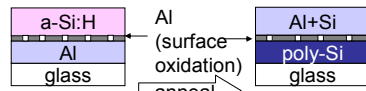
単結晶シリコン薄膜転写 (0.1ミクロン)



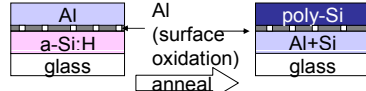
単結晶シリコン低温エピタキシー (ゲルマニウム合金にも適用)

### ●高配向性多結晶シリコン薄膜 (ミュンヘン工科大と共同研究)

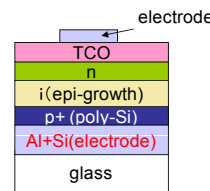
ALILE



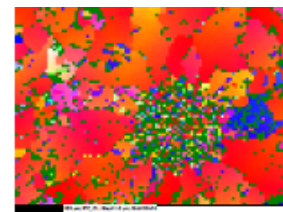
Inverted-ALILE



Inverted-ALILEプロセスによる太陽電池



(100) 配向を実現



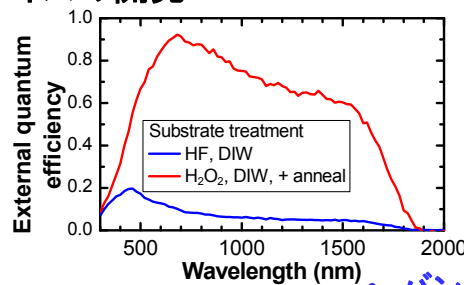
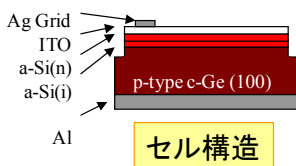
独立行政法人 産業技術総合研究所

Al 中間層を用いたサンプルでの EBSD による結晶方位

## 新材料トピックス -3

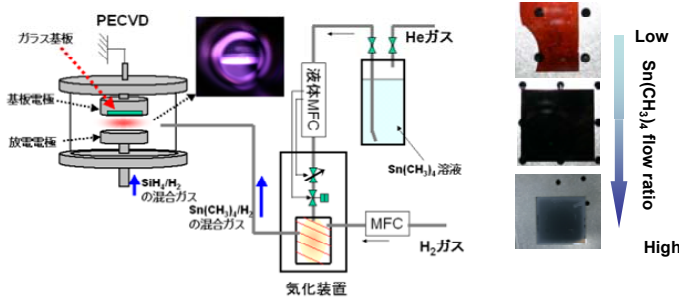
### ナローギャップ材料、デバイスの開発 単結晶Geへテロデバイスの開発

- 高電流密度 47mA/cm<sup>2</sup>
- 界面処理による高電圧化

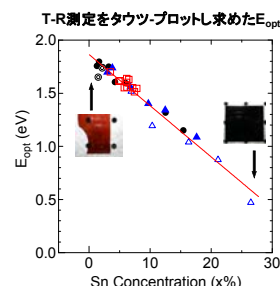


### Si-Sn材料の開発

■ プラズマCVD法によるSiSn薄膜の作製



- バンドギャップの連続制御に成功
- 光感度の確認
- デバイス化、高品質化が課題



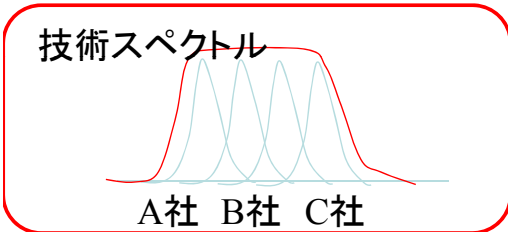
独立行政法人 産業技術総合研究所

薄膜Si太陽電池の国際競争力強化に向けた試み ; オールジャパンコンソーシアム

競争力が個別企業に分散 → 力の集結、知の集積が必要

薄膜シリコン : 液晶ディスプレイにも波及した日本の強み

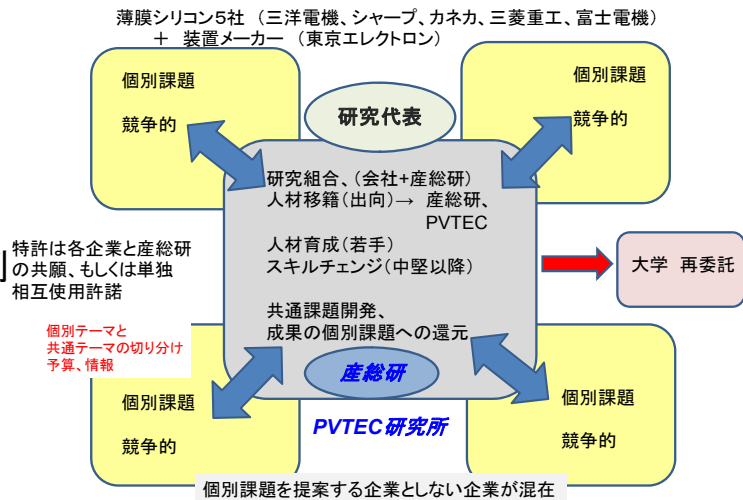
世界的な競争 : CdTe太陽電池、中国など新興国



● 共通重要課題の共同研究体制  
競争力のボトムアップ

● 知財戦略  
競争力と収益の持続

イノベーションハブとしての  
産総研の役割



まとめ (Summary)

1 薄膜Siタンデム太陽電池の開発

- 微結晶SiGe材料
- 高移動度透明導電膜
- 最適光閉じ込め構造の探索

2. 新材料の開発

- ナノシリコンにおける多重励起子生成の可能性
- 薄膜単結晶SiおよびSi-Ge合金材料
- 高配向性多結晶Si薄膜の形成 → (100)配向
- 狭ギャップ材料、デバイス(単結晶Ge、Si-Sn)

3. オールジャパンコンソーシアム