

高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発 ／ 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発 ／ 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発

大下 祥雄※

豊田工業大学※・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学

令和元年10月17日(木)

問い合わせ先
豊田工業大学
E-mail: y_ohshita@toyota-ti.ac.jp
TEL: 052-809-1876

事業概要

1. 期間

開始:平成27年5月

終了(予定):令和2年2月

2. 最終目標

3. 成果・進捗概要

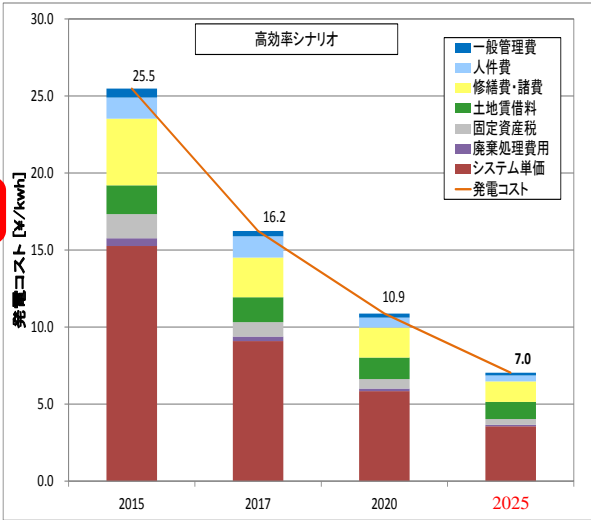
機関名	最終目標	成果・進捗概要
豊田工業大学	25%高効率太陽電池標準プロセス確立	従来型ヘテロ接合セルでセル効率22.4%(Jsc: 39.0mA/cm ² , Voc: 728mV, FF: 0.790 pFF: 0.852, Pseudo Eff. 24.2%)達成⇒標準試作プロセス確立。電子選択コンタクトTiO _x 、正孔選択コンタクトMoO _x を用いたCSCセル試作。高い正孔選択性(Voc>700mV)、高FF(FF>76%)を確認。>21%見込。
明治大学	25%高効率太陽電池量産化のための新規材料・プロセス評価・解析技術確立	結晶成長における冷却過程を改良。析出核密度・表面積の抑制指針を獲得。室温発光活性化PL(RT-PL)法により極低濃度炭素の変化検出に成功。ヘテロ接合セル透明導電膜プロセス評価により基板・界面劣化メカニズムの解明に進捗。
九州大学	p型基板2~5msec、n型基板5~7msecのバルクライフタイム実現	p型で2msec、n型で9msecの τ_b を実現。9インチシリコン単結晶育成に成功。
名古屋大学	新型ヘテロ接合材料の吸収係数(@600nm): $1 \times 10^2 \text{cm}^{-1}$ 、導電率: $1 \times 10^{-3} \text{S/cm}$	水素プラズマ処理により、ライフタイムが2倍増大。暗導電率を $1 \times 10^{-3} \text{S/cm}$ 程度に保ちつつ、光学ギャップを広帯化。低密度SiO _x 中間層を用いたALD-TiO _x で1.7 msのライフタイムを達成。
東京工業大学	表面再結合電流:10 fA/cm ² 裏面再結合電流:10 fA/cm ²	SiH ₄ を使用しない対向ターゲットスパッタ法によるi-a-Si:Hを用いたシリコンヘテロ接合太陽電池で変換効率17.4%達成。
兵庫県立大学	表面再結合電流、裏面再結合電流、およびバルク再結合電流総和を400 fA/cm ² まで低減	ミストCVDによるTiO _x 低温製膜とAlO _x へのMg,Ga導入による膜質制御を実現。LIAスパッタによるAlO _x 膜の高温熱処理耐性条件を見出す。

2025年発電コスト7円/kWh実現へのシナリオ

発電コストを大幅に低減するためにモジュール開発で為すべきことは...？

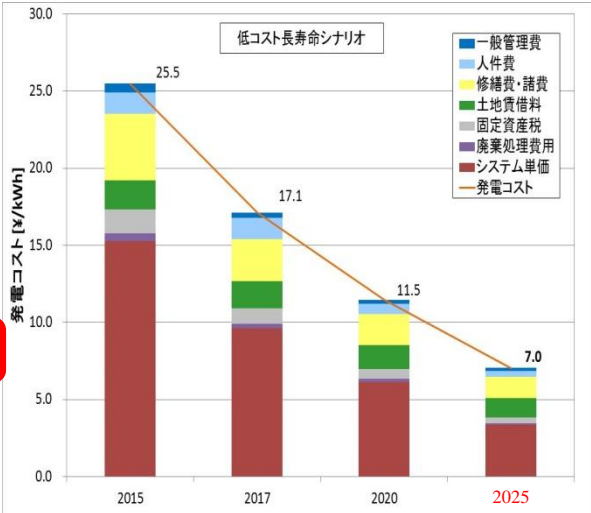
■ 高効率化による発電コスト低減シナリオ

	2015年	2017年	2020年	2025年
ポリシリコン価格	¥1,600/kg	¥1,000/kg	¥1,000/kg	¥700/kg
インゴット製造経費	¥2,600/kg	¥2,000/kg	¥1,700/kg	¥1,500/kg
ウェハ加工費	¥47.0/枚	¥22.0/枚	¥19.0/枚	¥18.0/枚
セル効率	20.0%	23.0%	25.0%	26.5%
モジュール効率	17.7%	20.4%	22.1%	25.0%
モジュール製造原価	¥56.9/W	¥34.8/W	¥27.4/W	¥24.9/W
運転年数(寿命)	20.0年	20.0年	25.0年	30.0年
システム単価	¥280,438/kW	¥161,138/kW	¥125,925/kW	¥93,603/kW
設備利用率	13.0%	13.0%	13.7%	15.0%
発電コスト	¥25.5/kWh	¥16.2/kWh	¥10.9/kWh	¥7.0/kWh



■ 低コスト長寿命化による発電コスト低減シナリオ

	2015年	2017年	2020年	2025年
ポリシリコン価格	¥1,600/kg	¥1,000/kg	¥1,000/kg	¥700/kg
インゴット製造経費	¥2,600/kg	¥1,700/kg	¥1,200/kg	¥800/kg
ウェハ加工費	¥47.0/枚	¥22.0/枚	¥19.0/枚	¥18.0/枚
セル効率	20.0%	21.0%	21.5%	23.0%
モジュール効率	17.7%	18.6%	20.3%	22.1%
モジュール製造原価	¥56.9/W	¥32.5/W	¥25.6/W	¥19.8/W
運転年数(寿命)	20.0年	20.0年	25.0年	35.0年
システム単価	¥280,438/kW	¥170,845/kW	¥133,208/kW	¥97,601/kW
設備利用率	13.0%	13.0%	13.7%	15.0%
発電コスト	¥25.5/kWh	¥17.1/kWh	¥11.5/kWh	¥7.0/kWh



豊田工大コンソーシアムの基本コンセプト



高効率化

超高品基板

τ : 5~7msec (n-type)

高生産性アモルファスプロセス

吸収係数: $1 \times 10^2 \text{cm}^{-1}$ 導電率: $1 \times 10^{-3} \text{S/cm}$

$J_{0\text{front}}$: $<10 \text{fA/cm}^2$ $J_{0\text{rear}}$: $<10 \text{fA/cm}^2$

低コスト長寿命

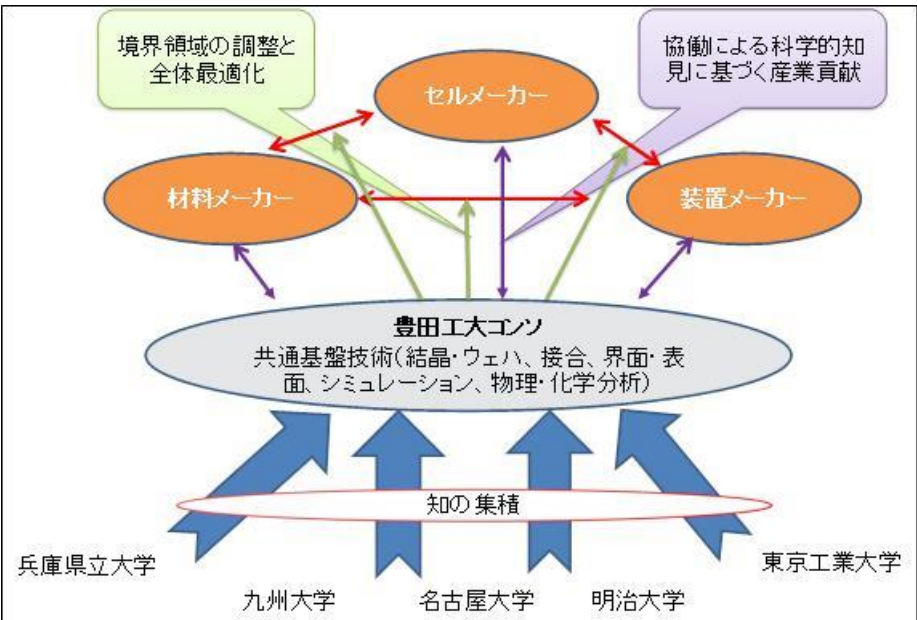
高品質・低コスト基板

τ : 2~5msec (p-type)

3~6msec (n-type)

高生産性・低コストプロセス

$J_{0\text{front}} + J_{0\text{rear}} + J_{0\text{bulk}}$: $<400 \text{fA/cm}^2$



得られた知見や指針、および開発された共通基盤技術をセルメーカー、材料メーカー、装置メーカーなどの企業に提供し、これらの企業群と連携して共同(協働)で研究開発を推進

高効率化シナリオと低コスト長寿命化シナリオの実現

2020年グリッドパリティ14円/kWh
2025年ジェネレーションパリティ7円/kWhへ



中間目標: p型基板では1.5~3msec、n型基板では3~6msecのバルクライフタイムの実現

最終目標: p型基板では2~5msec、n型基板では5~7msecのバルクライフタイムを実現

1. 酸素濃度、炭素濃度制御による変換効率向上
2. 酸素濃度、炭素濃度制御によるウェハー価格低減
3. 不純物濃度制御によるn-type Siの均一抵抗率の実現

p型2msec、n型9msecを達成!!

低コスト

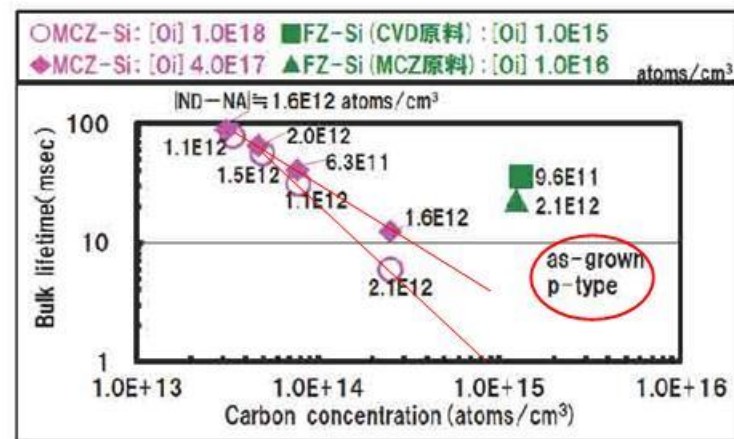
高効率

炭素濃度とライフタイム

バルクライフタイムは炭素濃度に依存
炭素濃度 $1e14/cm^3$ 以上で 酸素濃度依存性あり

ライフタイムへの影響因子

- ・ 転位 : 転位密度に反比例してLT減少
- ・ 重金属: 濃度に反比例してLT減少
- ・ 酸素: 酸素析出によりLT減少
- ・ 炭素: 酸素析出を促進してLT減少

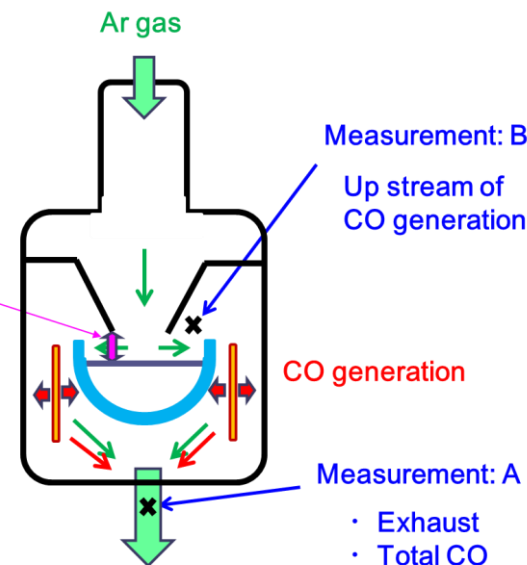


日笠 光朗, 永井勇太, 中川聡子, 鹿島 一日兒, 2014秋応物学会, 20a-A20-3.

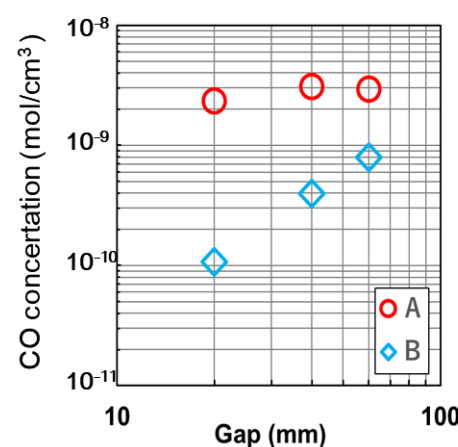
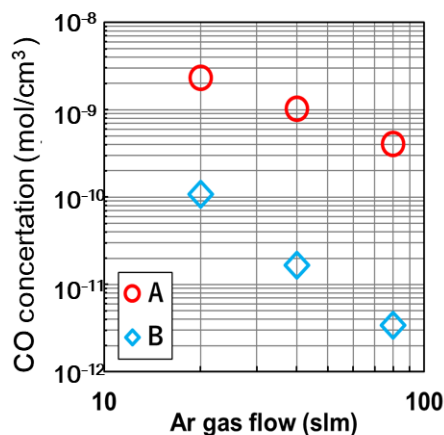
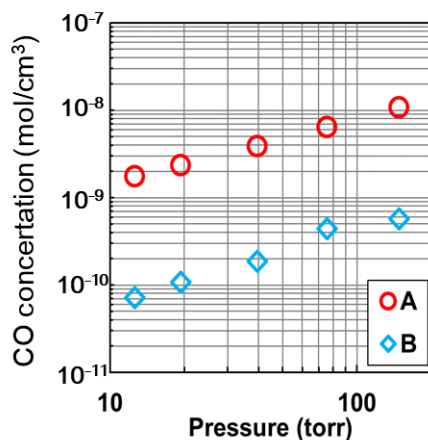
- a) 低炭素濃度 ($10^{12} \sim 10^{14}/cm^3$) では、炭素濃度増加に伴い LT低下
- b) 高炭素濃度 ($>10^{14}/cm^3$) では、酸素濃度増加に伴いさらにLT低下

炭素低減による高ライフタイム結晶成長技術を確立

The diagram illustrates a gas chromatography setup. On the left, a blue cylinder represents the **CZ furnace**, which contains an **18" crucible** and is maintained at **4 torr**. An arrow labeled **Ar** with **20 slm** indicates the argon gas flow rate into the furnace. A black line representing the gas line connects the furnace to a yellow box labeled **Gas chromatograph**. Below the furnace, a blue valve is shown. The gas chromatograph is identified as **GL Science GC-4000 PLUS C IF** and is configured for **Every 11 min.** analysis of **CO, CO₂**. A second blue valve is located on the line between the gas chromatograph and a blue box labeled **Pump**. On the right, a chromatogram plot shows **Intensity** on the y-axis and **Time** on the x-axis. Two distinct peaks are marked with pink arrows and labeled **CO** and **CO₂**. The CO peak is at approximately 1.087 minutes, and the CO₂ peak is at approximately 1.331 minutes. The plot also includes a legend with the text: **1st**, **検出** (Detection), **ガス** (Gas), **クロマトグラム** (Chromatogram), **検出** (Detection), **ガス** (Gas).



炭素の低減：ガス流量、炉内圧力、ギャップ依存性



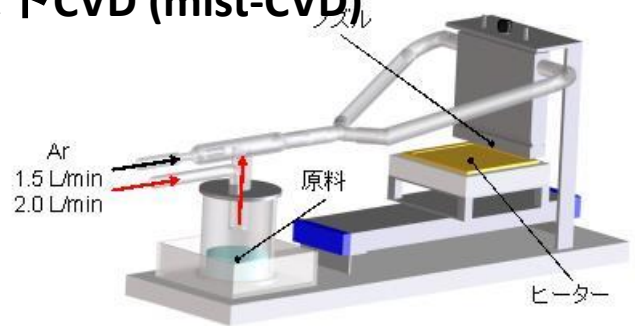
9インチ結晶育成成功



ミストCVD法およびLIAスパッタ法による高性能パッシベーション膜の開発

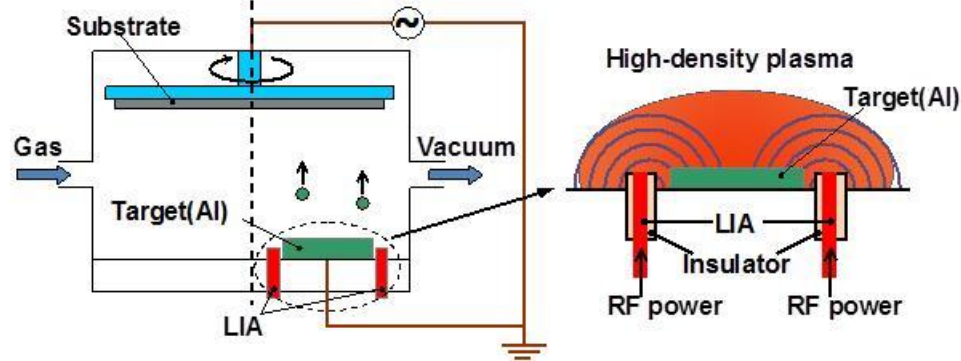
危険な原料($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, SiH_4 , ..)をせず、安価なプロセス

ミストCVD (mist-CVD)



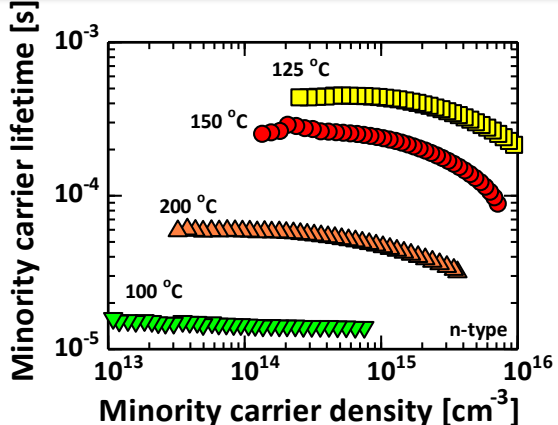
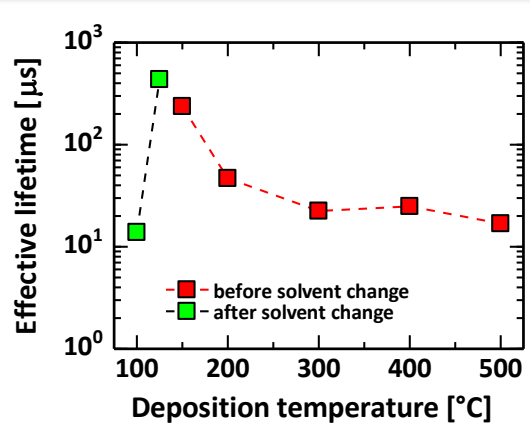
- ☑超音波振動子で原料溶液を霧化させ、加熱基板上に原料溶液を供給し製膜
- ☑大気中で成膜可能なため、大幅な低コスト化が可能

LIA援用反応性スパッタ (LIA-SPT)



- ☑LIA(低インダクタンスアンテナ)によるプラズマダメージの低減

mist-CVD法によるパッシベーション膜の低温形成(TiO_x 膜)

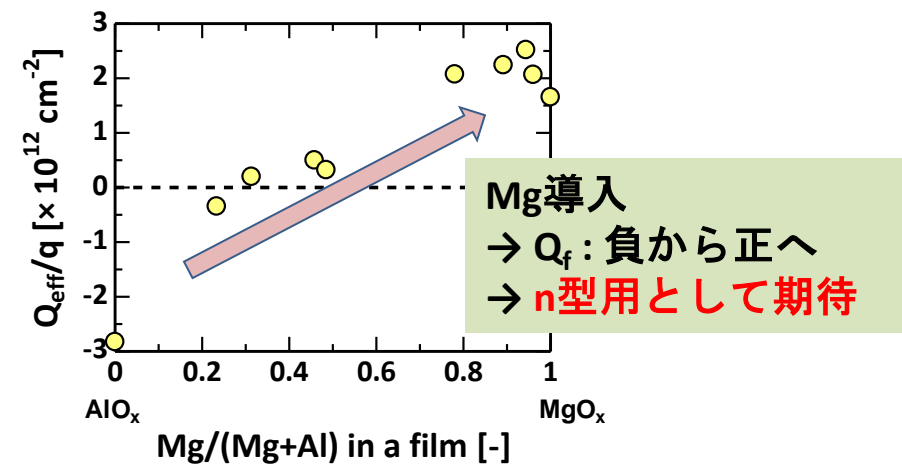


- 100 °C での製膜に成功
- 125 °C での製膜が最も高いライフタイム (as-deposited)
- 300 °C 以上で TiO_x が結晶化

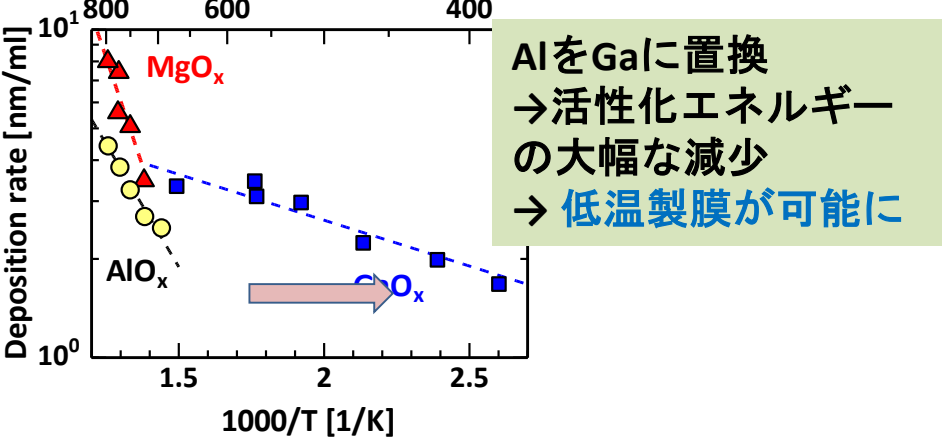


mist-CVD法による新規パッシベーション膜の開発

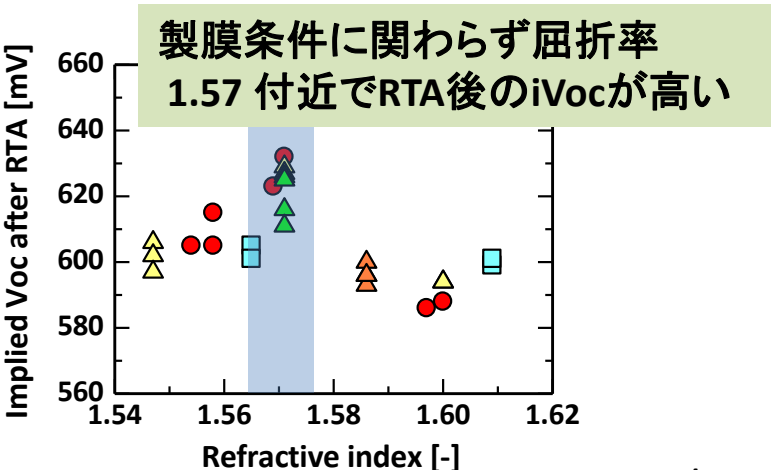
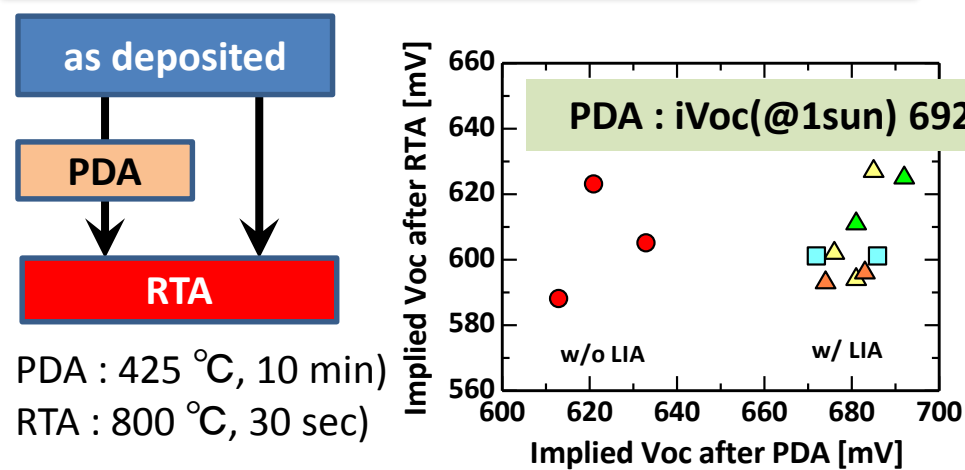
AlO_x (p型用パッシベーション膜) に
・イオン価数の異なる Mg を添加



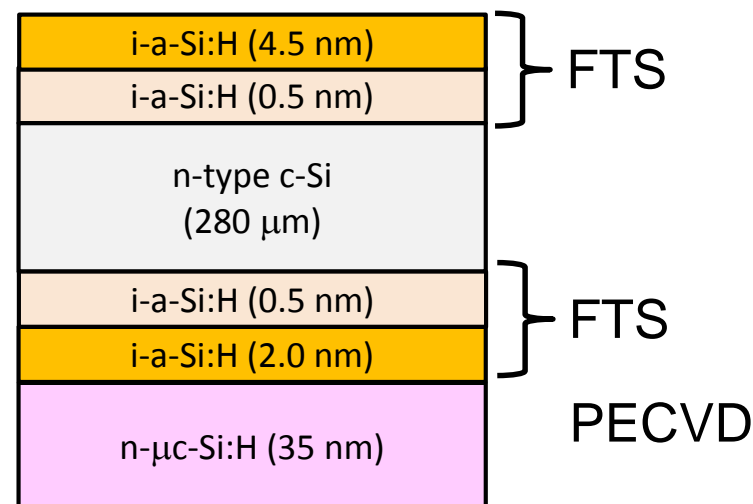
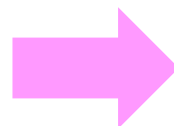
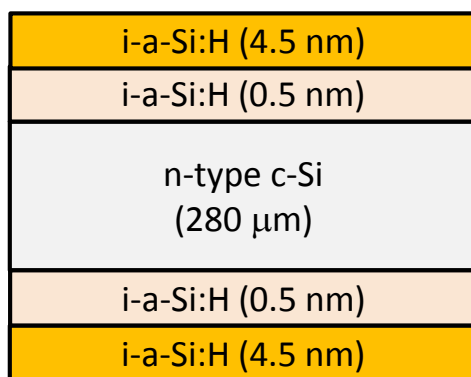
・イオン価数が同じ Ga と置換



LIA-SPT AlO_x膜の高温熱処理耐性評価



**SiH₄を使用しない対向ターゲットスパッタ(FTS)法で
作製したi-a-Si:Hを用いて高いパッシベーション効果を実現**



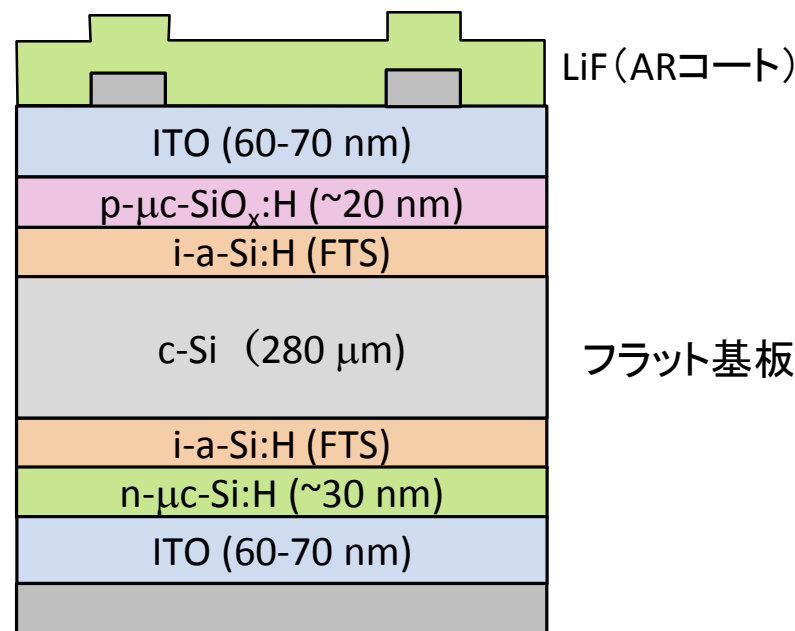
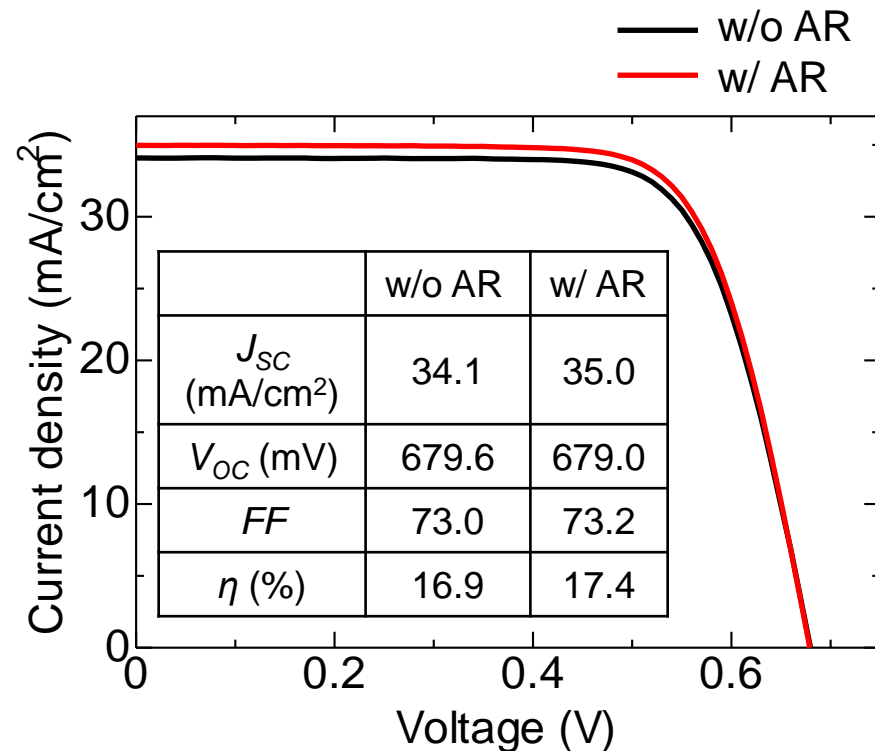
iV_{oc} @ 1 sun : 0.701 V

iV_{oc} @ 1 sun : 0.705 V

直列抵抗成分を抑制できる2.5 nmのi-a-Si:H(製膜時間は10秒)
でもn型層と組み合わせれば良好なパッシベーションが可能

テクスチャ基板上にも均一な製膜ができることを確認

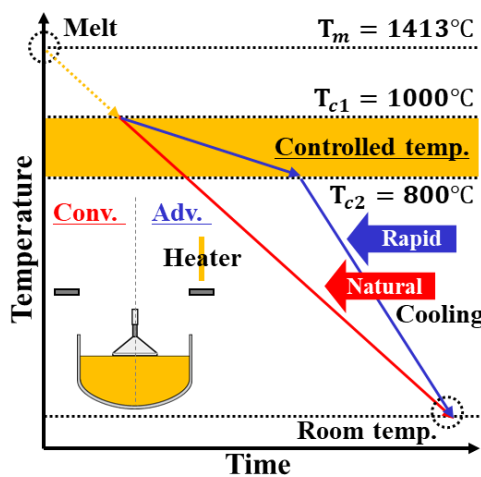
SiH₄を用いない手法で作製したi-a-Si:Hを用いた太陽電池



SiH₄を用いない手法で作製したi-a-Si:Hを用いた
太陽電池で初めて良好な特性を実現

表面テクスチャ化、ドーピング層の高品質化により
更なる高効率化が可能

冷却過程を改良した結晶成長

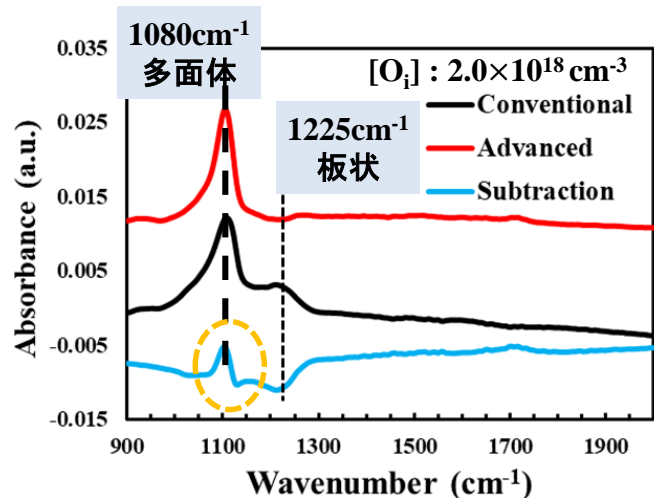


Crystal growth	Conventional	Advanced
Carrier lifetime	Low	High
Precipitate density	High	Low
Precipitate size	High	Low
Dislocation density	High	Low
Vacancy density	-	-

改良冷却プロセス
→ゲッターング効果: 高
→熱処理後のライフタイム: 高

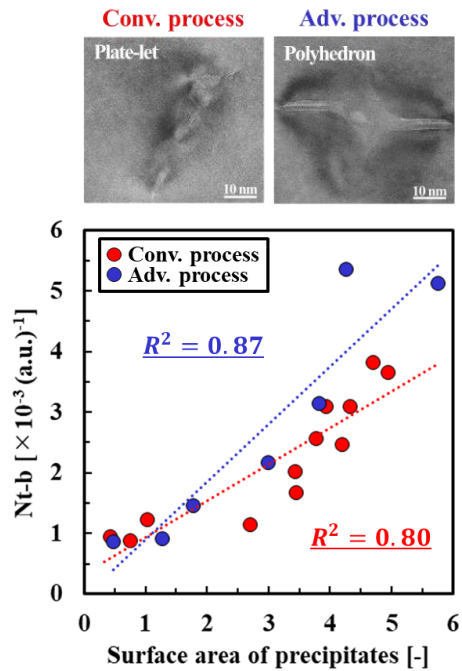
- ・結晶成長における冷却過程を改良 →ゲッターング阻害を抑制するプロセスを開発
- ・酸素析出核の形状制御による析出核密度の低減指針を獲得
- ・主たる再結合中心が、酸素析出物/Siマトリクス界面、および、転移形成であることを明らかにし、析出物表面積の抑制指針を獲得

IRスペクトル

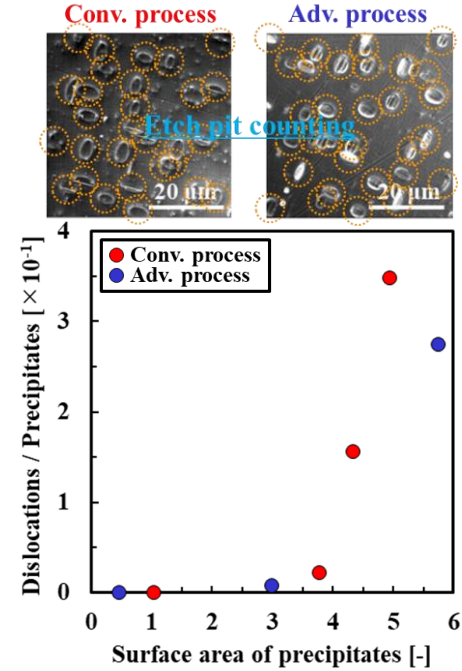


酸素析出核の形状制御
(多面体 > 平板)

再結合中心濃度



転位密度



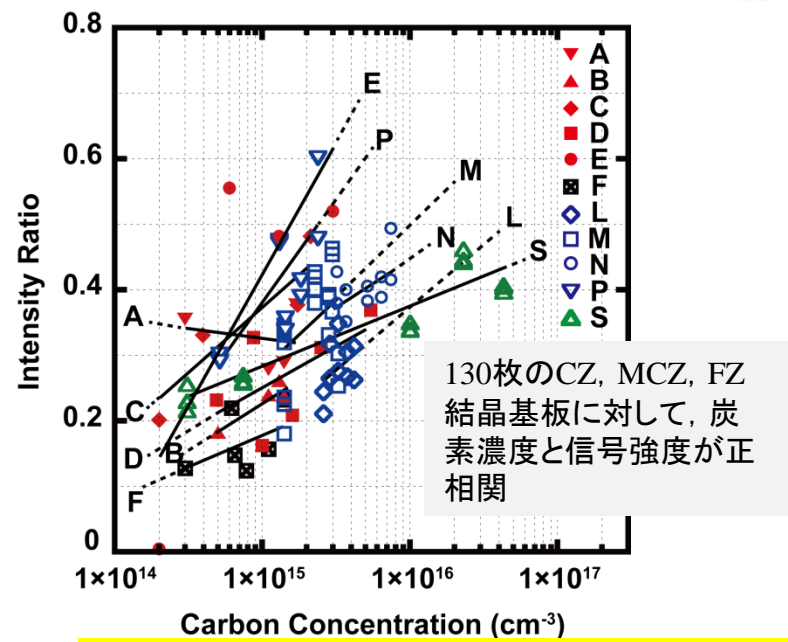
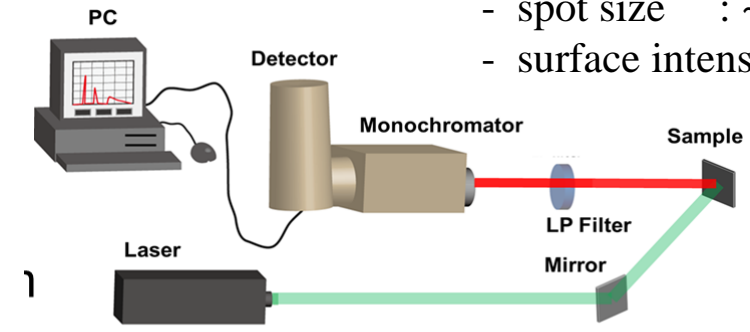
酸素析出物表面積の抑制がキー技術

室温発光活性化PL (RT-PL) 法の実用化に向けた課題を解決

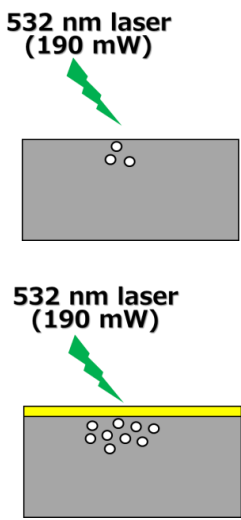
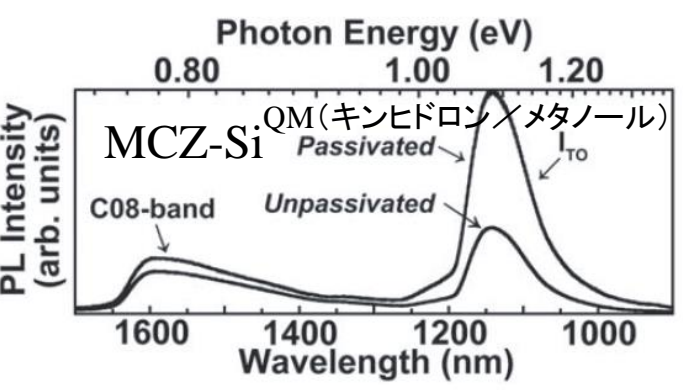
室温発光活性化PL法 C関与欠陥構造変化を伴わず長時間測定可能

RT-PL spectroscopy

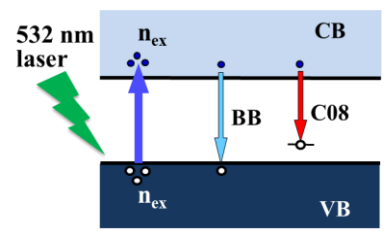
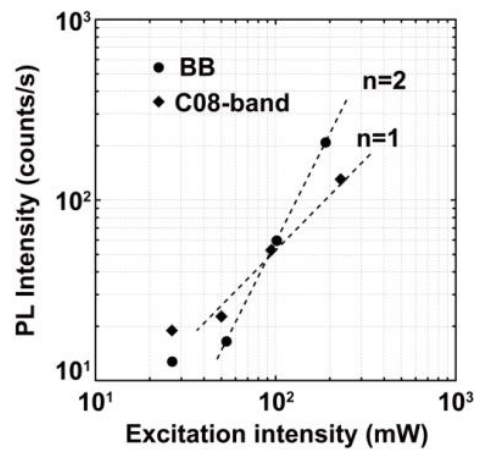
- wavelength: 532nm
- spot size : ~2.3mm
- surface intensity: 190mW



極低濃度 ($10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) の変化検出に成功



表面パッシベーションによりレーザ照射直後の発光強度増加・安定化が可能



$$I_{BB} \propto n_{ex}^2$$
$$I_{C08} \propto n_{ex} \cdot N_{C08}$$

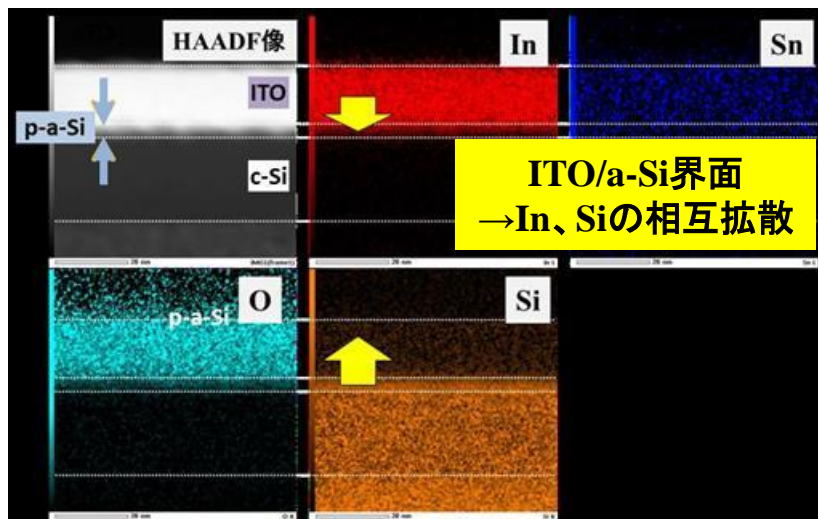
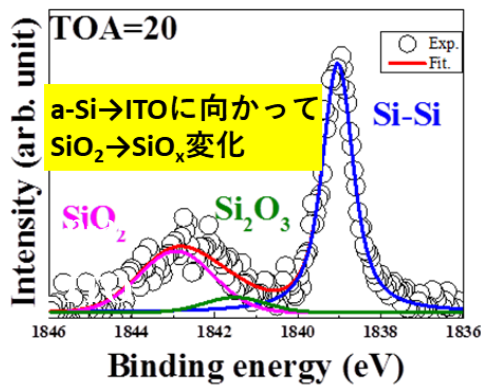
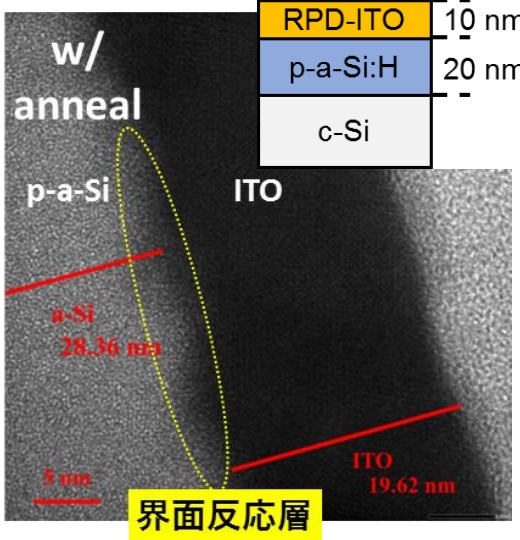
N_{C08} : C08 density

不純物・欠陥定量の際に生じる誤差要因を抑える指針
(励起光強度の一定範囲への調整が必要) 12 / 26

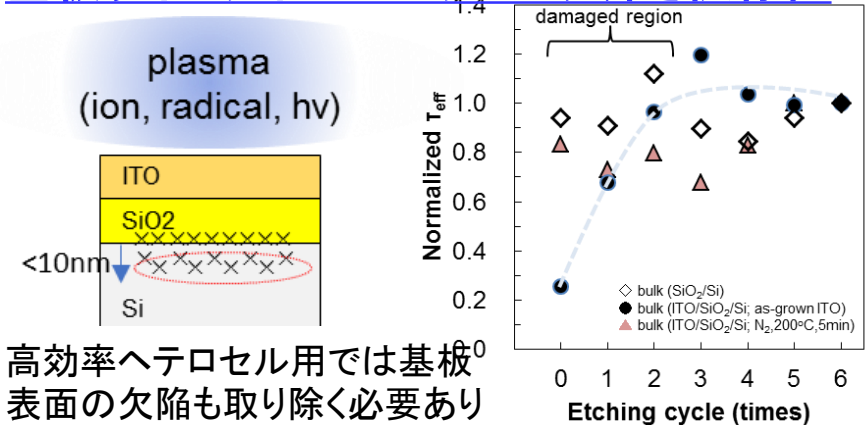
反応性プラズマ堆積(RPD)プロセス起因の基板・界面劣化メカニズムの解明に進捗

- ・RPDプロセス誘起のITO/a-Si界面反応層の微細構造・化学結合状態を決定し、課題を明らかにした。
- ・RPDプロセス誘起の再結合欠陥がSi表面近傍約10 nmのごく浅い領域にも形成されることを見出した。
- ・RPDプロセスダメージによるSi基板のライフタイム劣化要因として、炭素起因の複合欠陥形成の可能性を見出した。

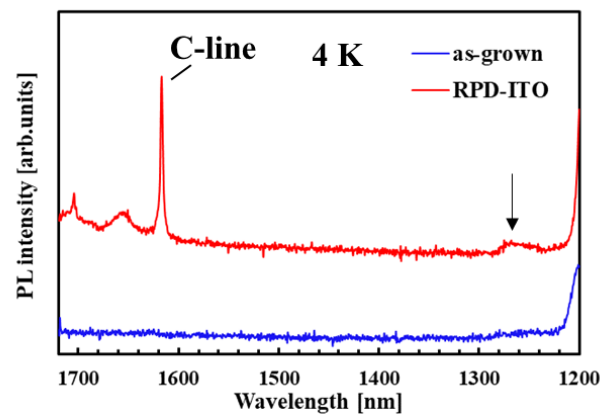
ITO/a-Si界面反応層の微細構造・化学結合状態評価



基板ライフタイムのエッチング深さ依存性



基板のPL評価



C-line
(C_i-O_i 複合体)
形成を示唆
(※PECVD-SiNxプロセスでは観測されず)

- ・基板破断メカニズムを共焦点光学顕微鏡、ラマン分光測定、マイクロPL等による評価を総合して検討し、スライス後表面条件と基板破断との関係を明らかにした。
- ・破断のない100 μm 厚以下の十分フレキシブルな基板スライス技術に貢献。

90 μm 厚スライス基板

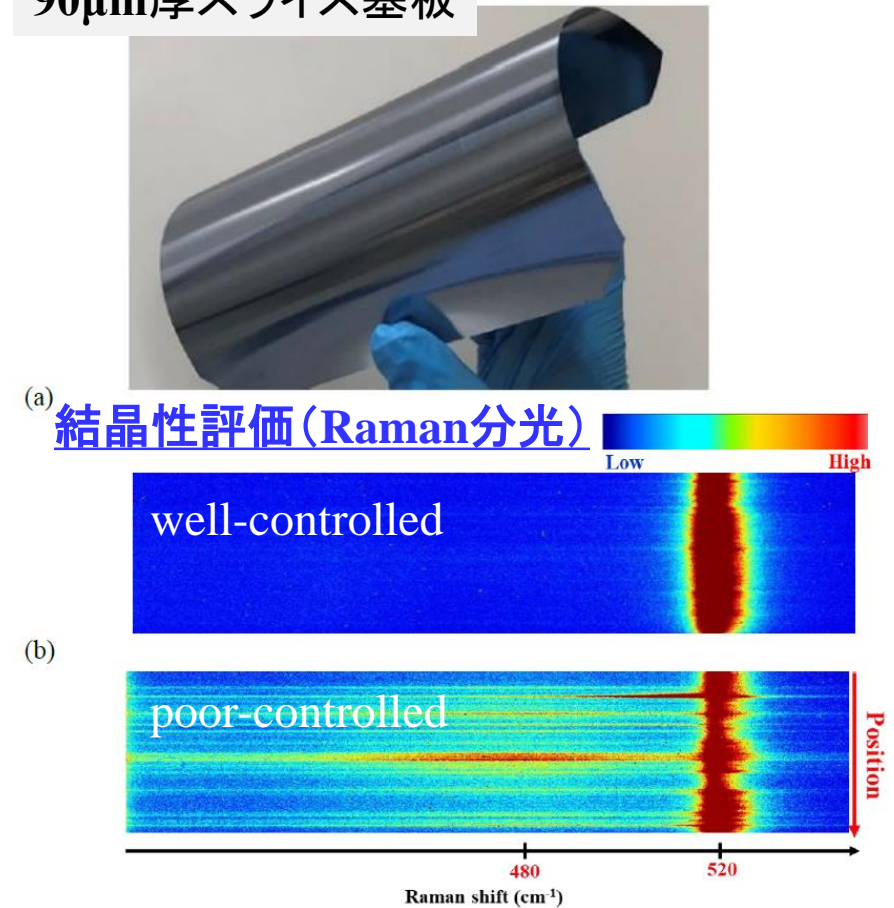


Fig 2. Raman images from (a) well-controlled and (b) poor-controlled slicing surface.

結晶性: 高 → 破断耐性: 高

ラフネス解析 (共焦点光顕)

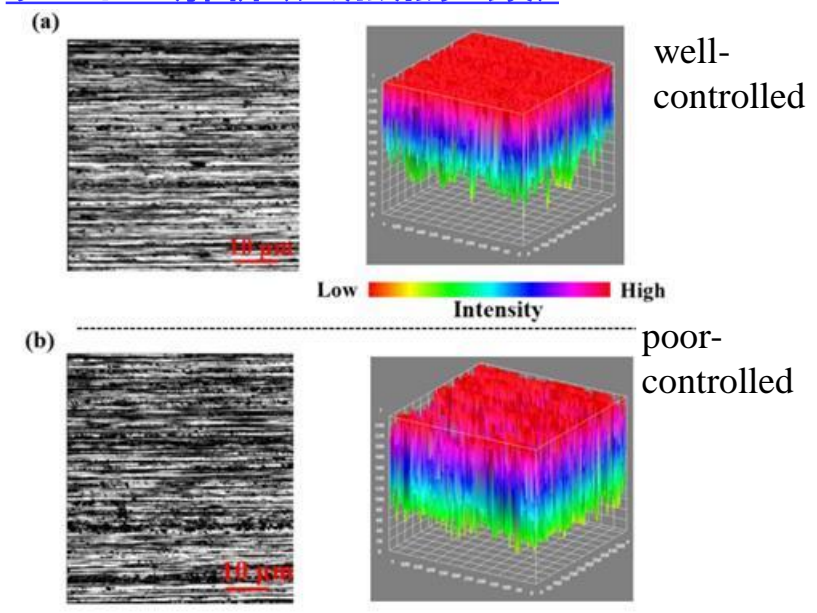


Fig 1. Confocal optical microscope images and roughness scaling on the (a) well-controlled and (b) poor-controlled slicing surface.

表面ラフネス: 大 → 深いスライス傷 → 破断耐性: 低

100 μm 厚薄板セル作製

Cell thickness	J_{sc} (mA/cm^2)		V_{oc} (V)		η (%)	
	Front	Rear	Front	Rear	Front	Rear
180 [μm]	39.6	37.7	0.642	0.641	19.8	19.6
100 [μm]	38.4	37.5	0.639	0.635	18.8	19.2

Fig 4. N-type bi-facial solar cell performance with 100 and 180 μm -thick wafers



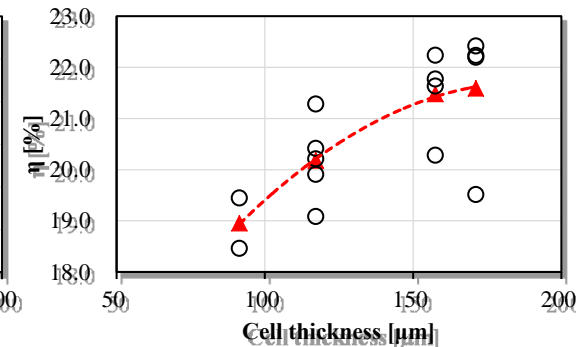
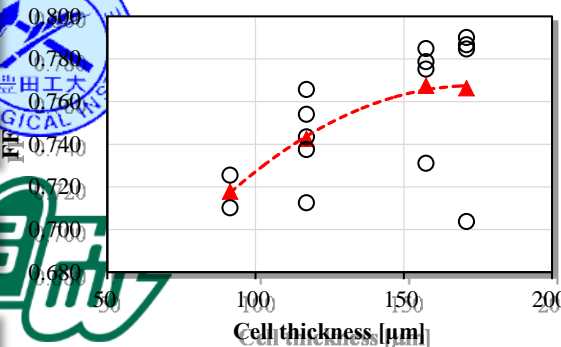
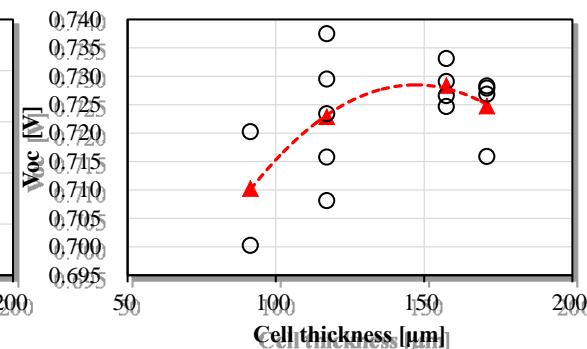
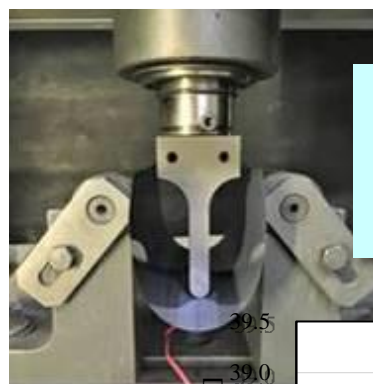
N-type Cz

基板改質
(ゲッタリング)

アモルファス製膜

電極形成

セル特性



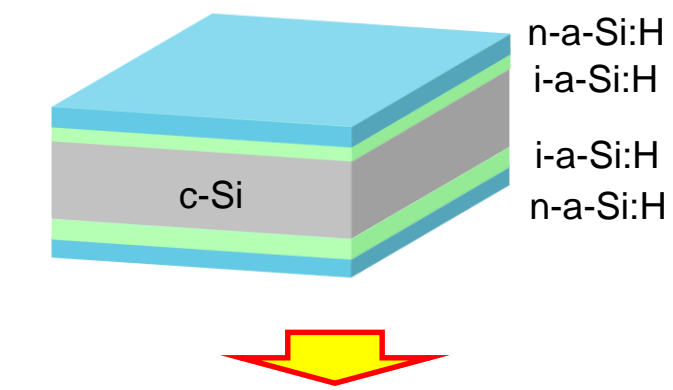
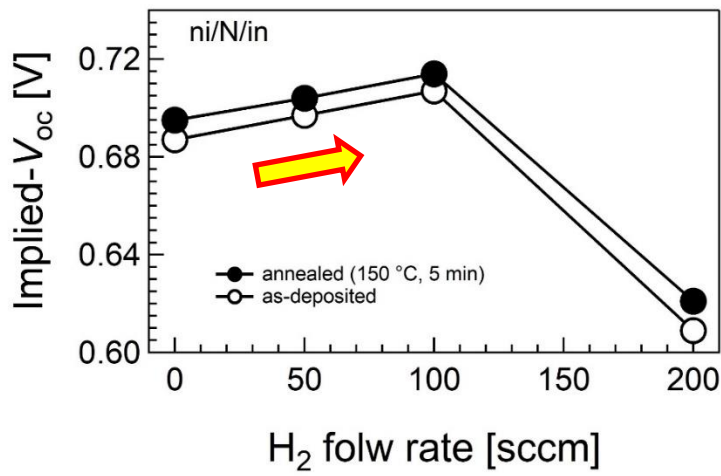
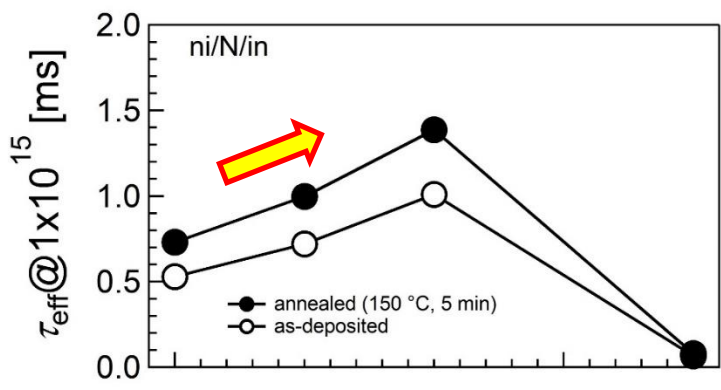
分析・評価

156mm□極薄(91 μ m厚)ヘテロ
接合セルの実現可能性を示す

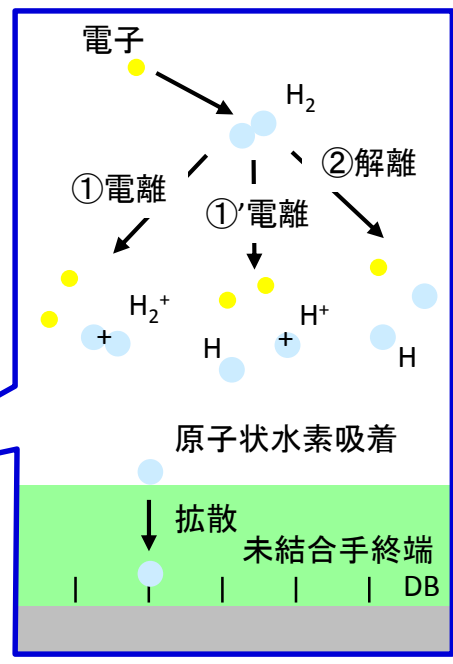
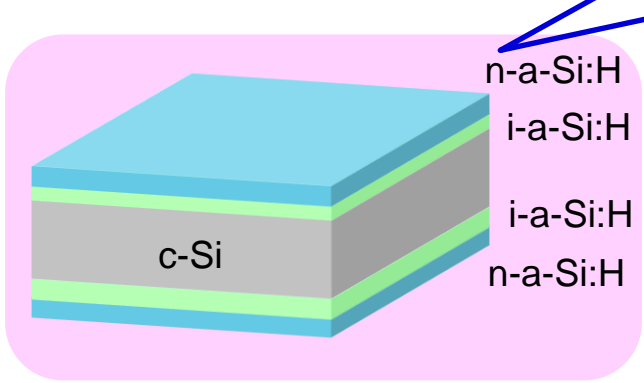
明治大学
MEIJI UNIVERSITY



a-Si:Hパッシベーション膜の高性能化



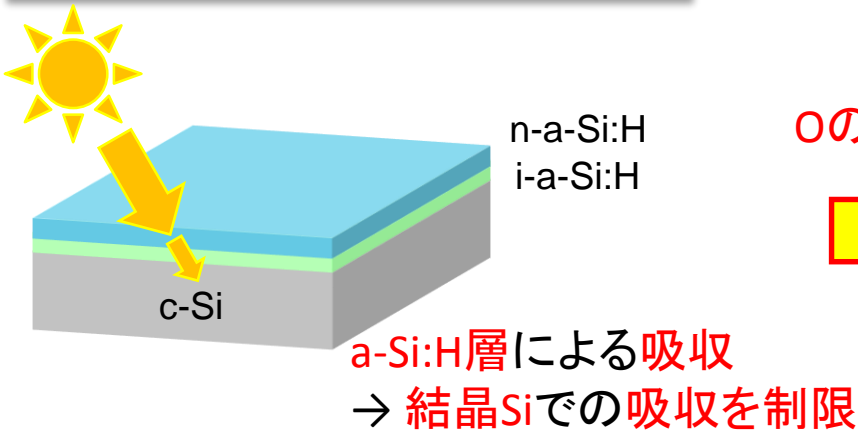
Hydrogen plasma treatment (HPT)



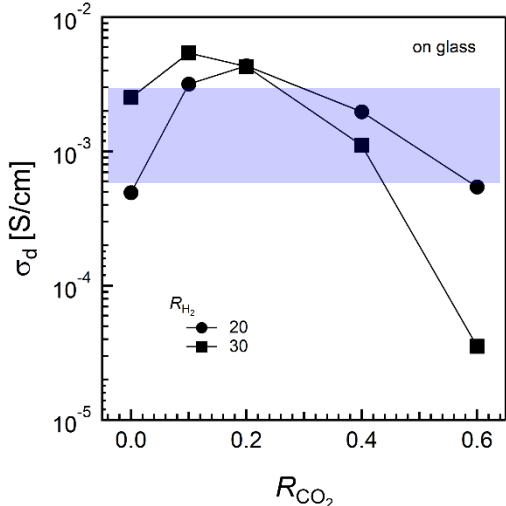
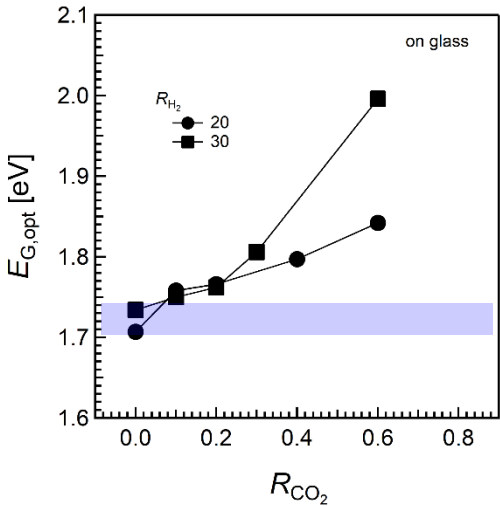
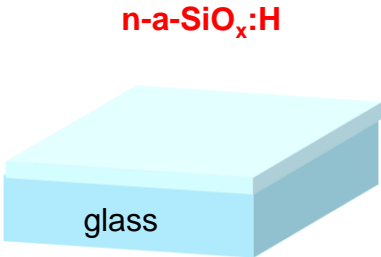
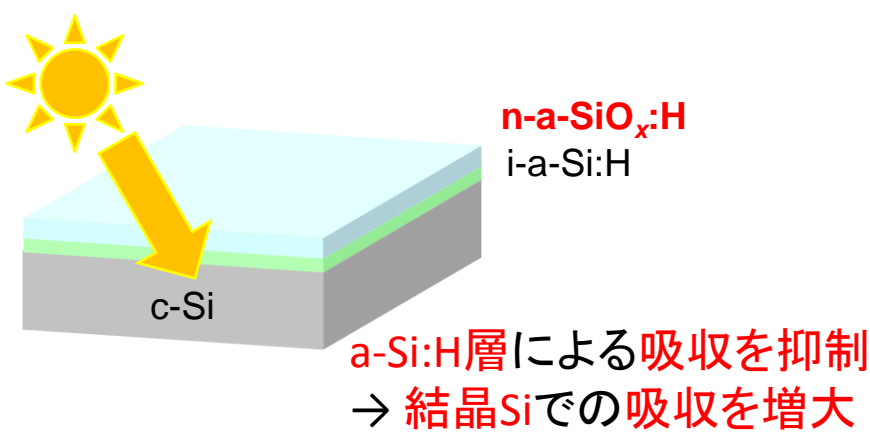
水素プラズマ処理によりパッシベーション性能が改善



低吸収a-Si:H膜の条件検討



Oの導入



a-SiO_x:H化によりn-a-Si:Hと同等の暗伝導率を保持しつつ
光学ギャップが広帯化

新規高効率標準試作ラインの構築

高効率



名古屋大学クラスター型CVD装置を使って豊田工大・名古屋大・ナミックス様連携による従来型ヘテロ接合セル標準試作プロセス構築を推進

従来型ヘテロ接合セルでセル効率**22.4%**(Jsc: 39.0mA/cm², Voc: 728mV, FF: 0.790 pFF: 0.852, Pseudo Eff. 24.2%)達成⇒標準試作プロセス確立

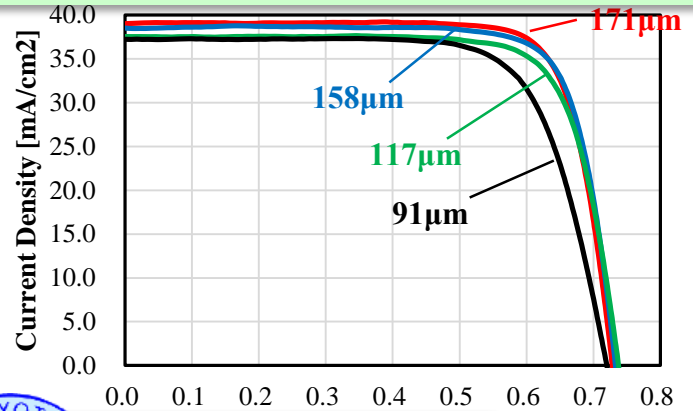
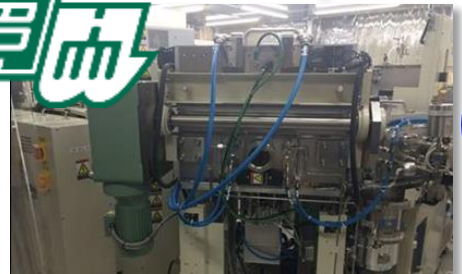
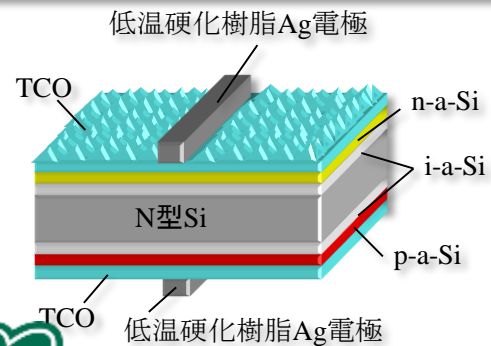
- 豊田工大

N-type Cz Si
ゲッターリング処理
片面Texture
ラウンドエッチング
製膜前洗浄
- 名古屋大

i/n a-Si製膜
i/p a-Si製膜
- 豊田工大

表面TCO製膜
裏面TCO製膜
- ナミックス

裏面Agペースト印刷・乾燥
表面Agペースト印刷・乾燥
熱硬化



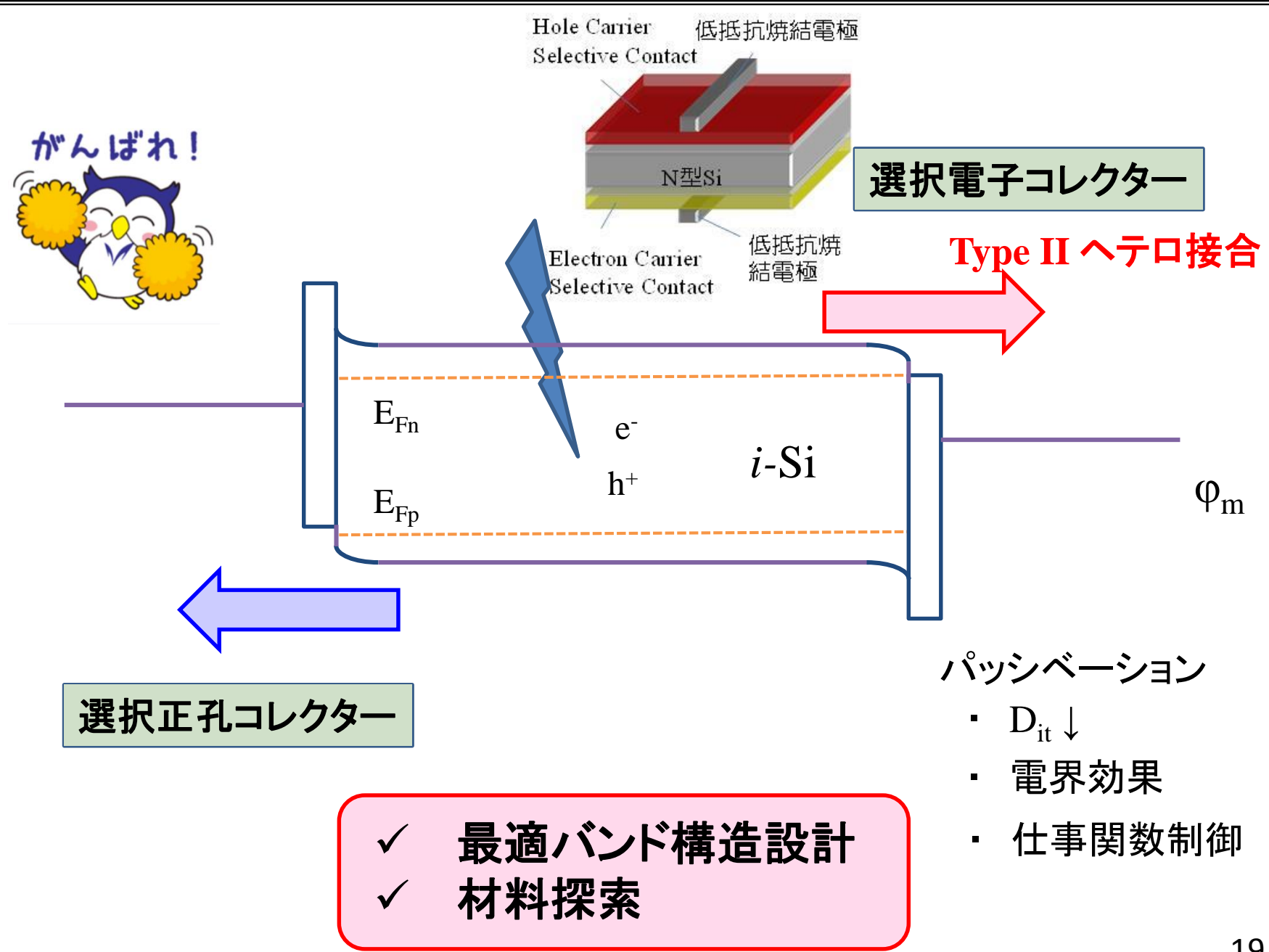
(156mm角フルセル)

NAMICS



Cell thickness [μm]	Jsc [mA/cm ²]	Voc [mV]	FF	η [%]	pFF	Pseudo Eff. [%]
171	39.0	728	0.790	22.4	0.852	24.2
158	38.6	733	0.785	22.2	0.852	24.1
117	37.7	737	0.766	21.3	0.848	23.6
91	37.2	720	0.725	19.4	0.825	22.1

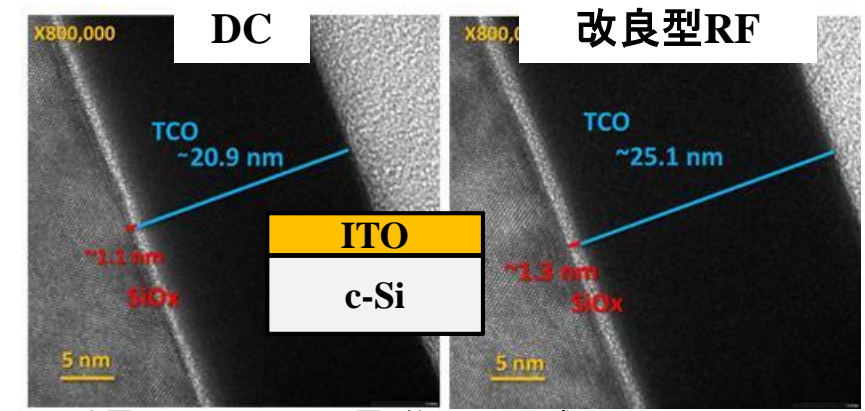
バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料の探索



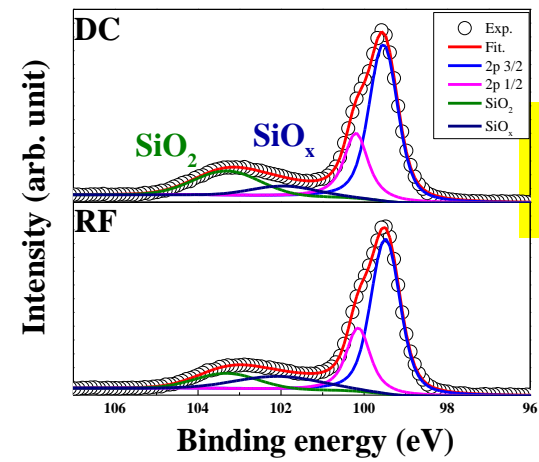
新規スパッタプロセス評価・開発

- ・下地膜界面の酸化を抑制する改良型（“低ダメージ”）スパッタプロセスに関して、その酸化過程を微細構造・化学結合状態の観点から評価し、**高効率プロセス開発技術にフィードバック**
- ・プラズマプロセス誘起の欠陥の再結合特性を評価し、**プロセス改善指針の獲得**に向け進捗

下地膜との界面の構造・化学結合状態評価

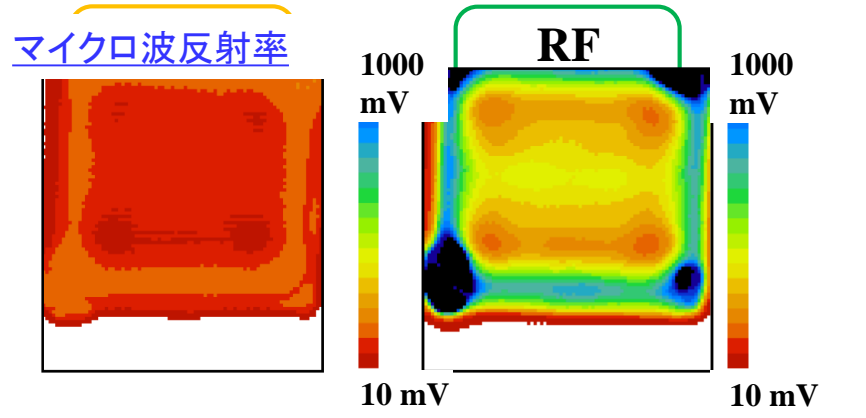
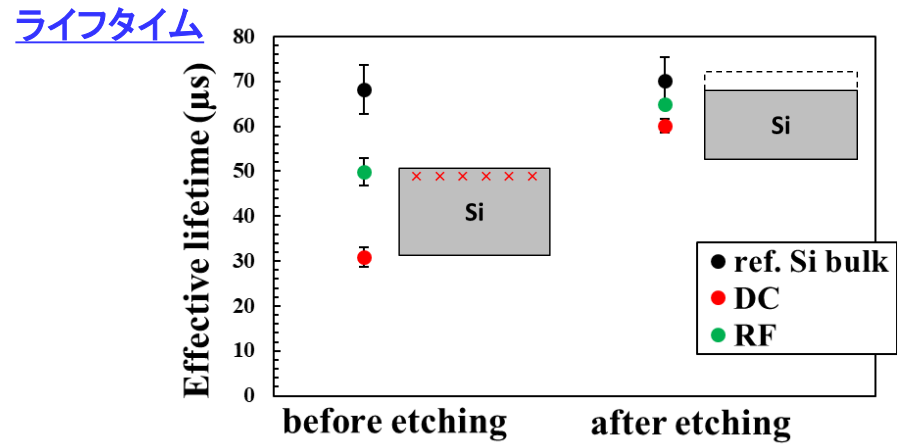


下地層との界面にSiO_x層（約1 nm）形成
（放電形態によらない）
→アモルファスSiでは不明瞭な点であった酸化層形成を確認



下地界面に酸化層を形成
放電形態により異なる性質

基板表面ダメージ層評価

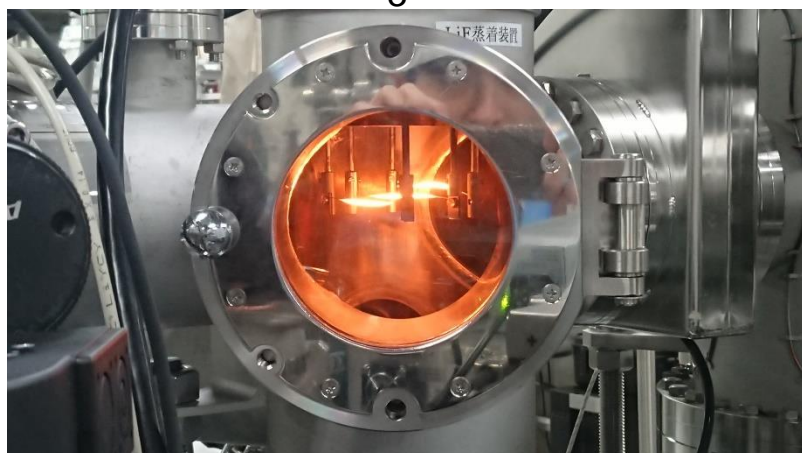


表面近傍にダメージ層の形成
改良型ではより低ダメージ

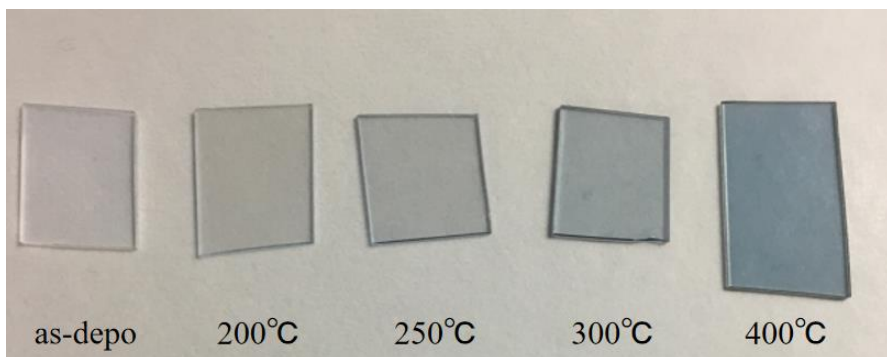
- スパッタCu₂O:Nを用いたCu₂O:N/c-Siヘテロ接合の太陽電池動作を確認
- さらなる高効率化のためには低ダメージバッファ層が必要

金属酸化物エミッタ用バッファの低ダメージ製膜技術

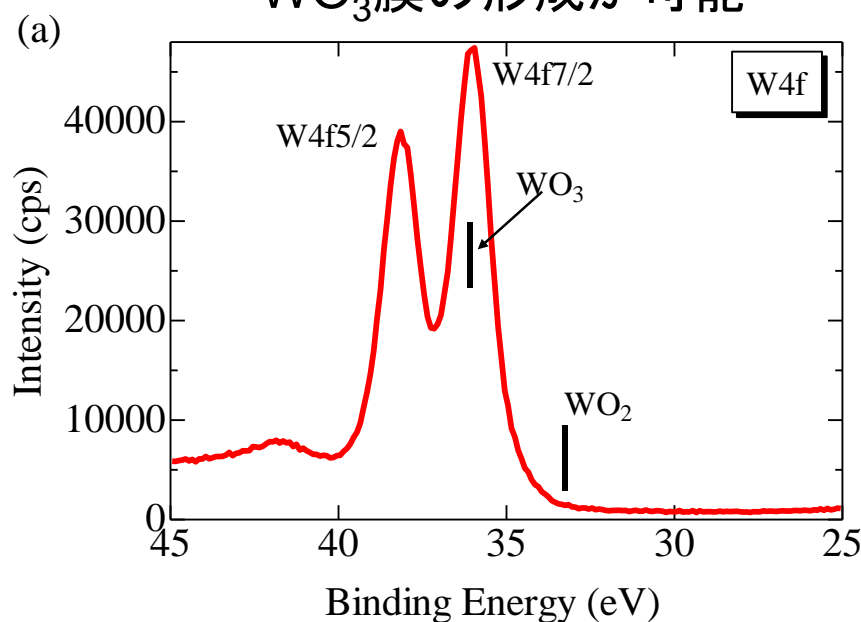
ホットワイヤー法を用いた
WO₃バッファ



既存のCat-CVD装置が使用できる可能性
酸素もしくは空気のみを使用



80°C以下の基板温度で
WO₃膜の形成が可能



還元雰囲気での熱処理により透過率が変化

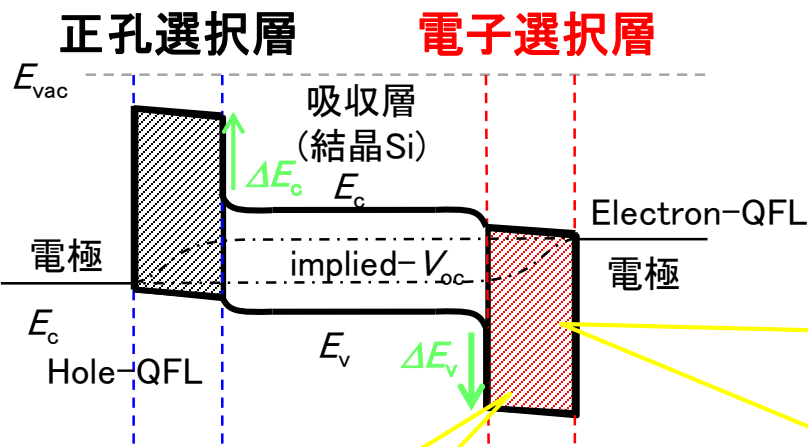
300°Cの熱処理では透明性は大きく損なわれないまま、導電率が 8.4×10^{-3} S/cmまで向上

→エミッタ層としても使用できる可能性

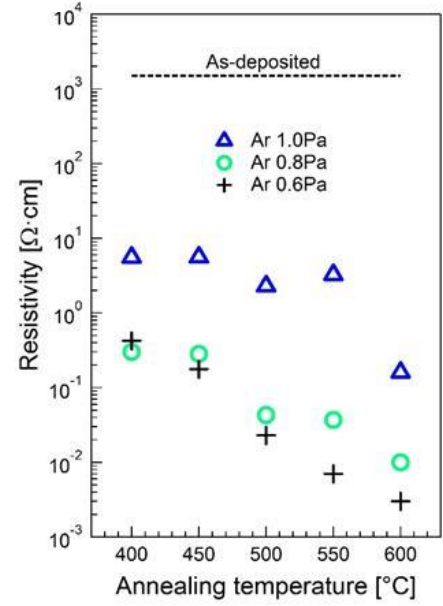
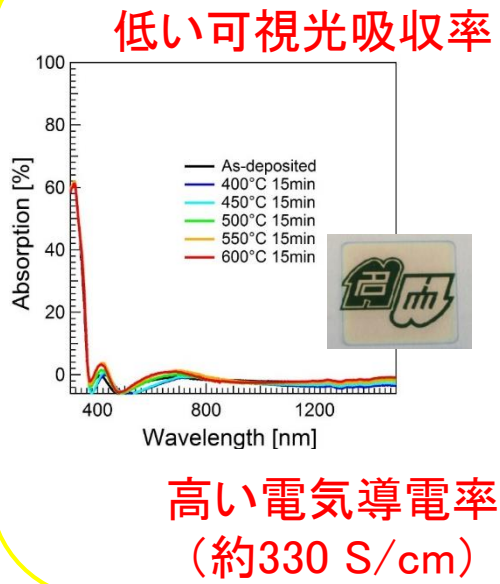
バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料の探索

次世代Carrier Selective Contact(CSC)キャリア選択コンタクト開発: 材料探索

キャリア選択に有利な
バンドラインナップを示す材料

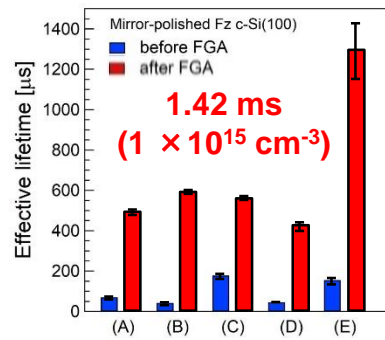
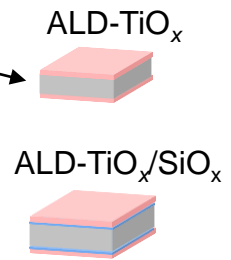


導電用酸化チタン(TiO₂:Nb)

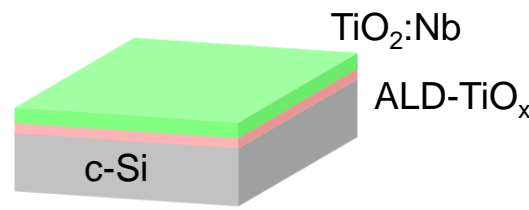


パッシベーション用酸化チタン(ALD-TiO₂)

- sample-(A)... 酸化処理なし
- sample-(B)... DI-O₃
- sample-(C)... H₂O₂
- sample-(D)... HNO₃ (110°C)
- **sample-(E)... HNO₃ (室温)**



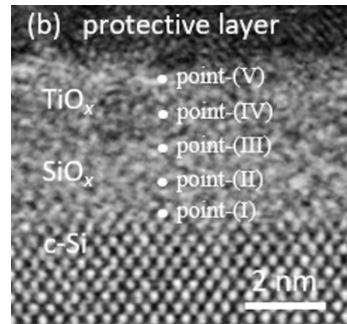
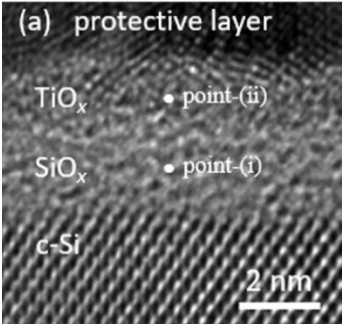
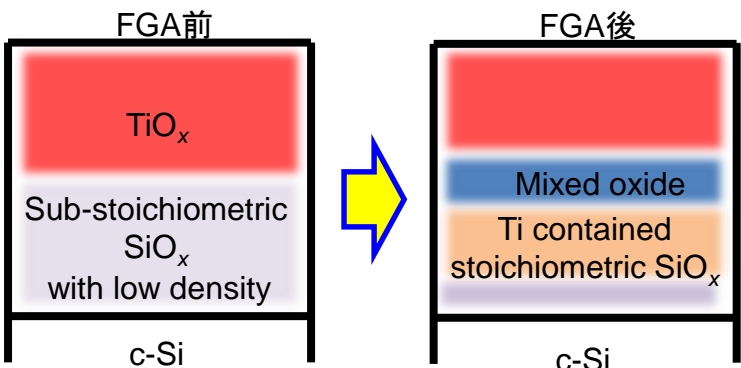
SiO_x 中間層の導入により
高いパッシベーション性能を達成



オール酸化チタン
新規電子選択層の開発



次世代セルのキャリア選択コンタクト開発: 材料探索



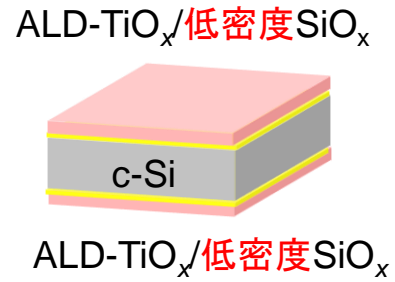
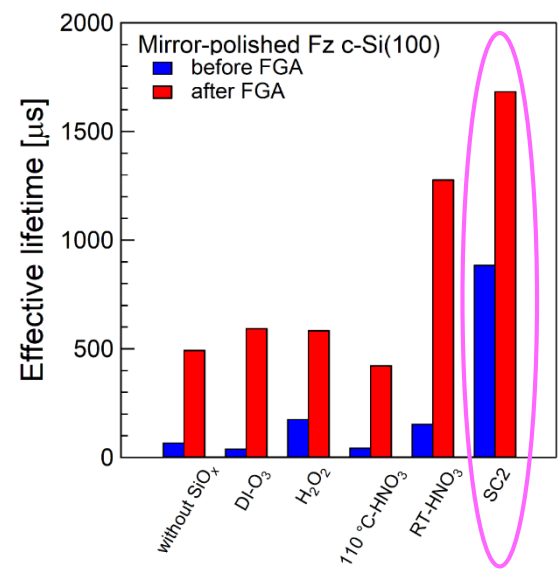
低密度酸化膜の導入により、
ライフタイムが1.7 msまで向上

パッシベーション
性能の向上

低密度SiO_x中間
層の導入

パッシベーション
メカニズムの理解

熱処理による、
OとTi原子のSiO_x中間層への拡散

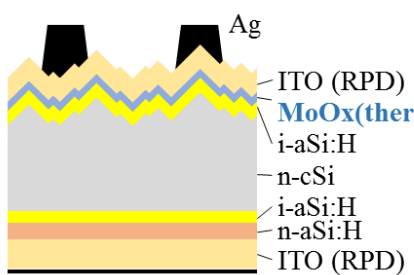


TiとO原子の拡散促進

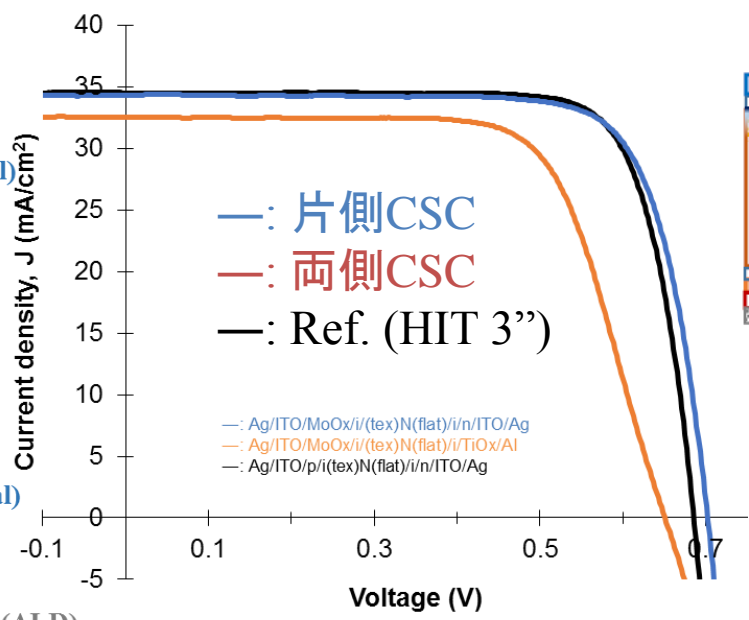
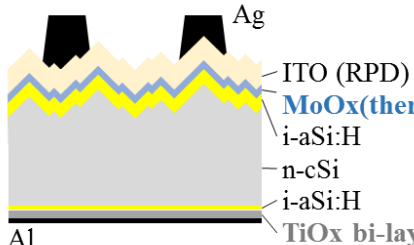
- 成膜後熱処理なしで高い正孔選択性(700mV)、高FF(77~)
(156角プロセス同等電流で>21%見込)

MoO_x型, TiO_x型CSCセル開発

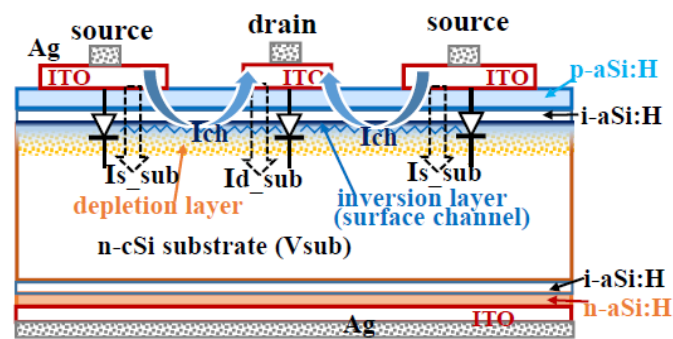
片側CSC(正孔)セル



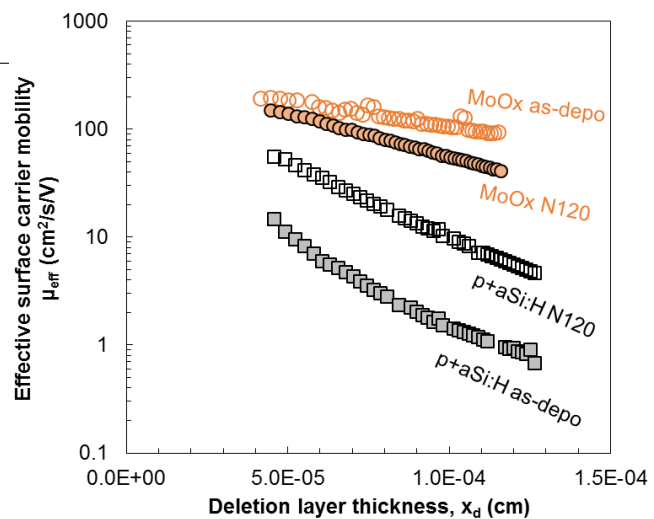
両側CSC(正孔)セル



新規評価手法によるc/a界面評価



反転層少数キャリア実効移動度



ライフタイム, Voc評価では捉えられなかったより高感度なc/a界面特性評価手法

セル	Voc (mV)	Jsc (mA/cm2)	FF (%)	Eff (%)
片側CSC 表: ITO/MoOx/i 裏: HIT(i/n)	702.7 (707)	34.30 (37仮定)	76.87 (pFF=81.4)	18.53 (pEff=21.3)
両側CSC 表: ITO/MoOx/I 裏: i'''stack"-TiOx	651.0 (652)	32.49 (37仮定)	69.78 (pFF=85.0)	14.76 (pEff=20.5)
Ref. SHJ ("HIT")	686.0 (691)	34.50 (37仮定)	78.33 (pFF=80.8)	18.54 (pEff=20.6)

◆波及効果

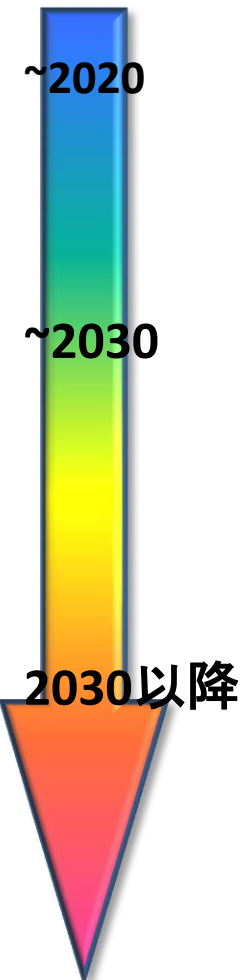
大学コンソによる共通基盤技術の確立

連携先企業による研究開発成果の実用化・事業化

人材育成

製造拠点の国内回帰

雇用拡大



次世代セル

目標:~26.5%

- ・従来技術の延長線上の高効率Siセル技術
- ・高度プロセス技術、光マネジメント技術

理想Siセル

目標:27-28%

- ・Si単体での理論限界
- ・脱a-Si, ヘテロ構造
- ・バンドギャップ・仕事関数エンジニアリング
(→光学・電氣的に最適な材料・構造探索)

Beyond the Limit of Si

目標:>28から30%超へ

- ・高効率結晶Siセルをベースに、薄膜系、新材料系、新構造系などのセルとのタンデム構造
- ・新原理の組み込み(量子効果、革新的光マネジメント等)



まとめ

豊田工業大学 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発

- ✦ 従来型ヘテロ接合セルでセル効率**22.4%**(J_{sc} : 39.0mA/cm², V_{oc} : 728mV, FF: 0.790 pFF: 0.852, Pseudo Eff. 24.2%)達成⇒**標準試作プロセス確立**
- ✦ 電子選択コンタクト**TiO_x**、正孔選択コンタクト**MoO_x**を用いた**CSCセル**試作。高い正孔選択性(**Voc>700mV**)、高FF(**FF>76%**)を確認。156角プロセス同等電流で**>21%**見込。

明治大学 材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発

- ✦ 結晶成長における冷却過程を改良。析出核密度・表面積の抑制指針を獲得。
- ✦ **室温発光活性化PL(RT-PL)法**により極低濃度炭素の変化検出に成功。
- ✦ ヘテロ接合セル透明導電膜プロセス評価により**基板・界面劣化メカニズムの解明**に進捗。高効率プロセス技術開発にフィードバック。

九州大学 高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究開発

- ✦ **p型**で**2msec**、**n型**で**9msec**の τ_b を実現。**9インチ**シリコン単結晶育成に成功。

名古屋大学 新規ヘテロ接合用材料に関する研究

- ✦ **水素プラズマ処理**により、**ライフタイムが2倍増大**。
- ✦ 暗導電率を 1×10^{-3} S/cm程度に保ちつつ、**光学ギャップを広帯化**。
- ✦ **低密度SiO_x中間層**を用いた**ALD-TiO_x**で**1.7 msのライフタイム**を達成。

東京工業大学 アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究

- ✦ **SiH₄を使用しない対向ターゲットスパッタ法**によるi-a-Si:Hを用いたシリコンヘテロ接合太陽電池で変換効率**17.4%**達成。

兵庫県立大学 低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究

- ✦ **ミストCVD**によるTiO_x低温製膜とAlO_xへのMg,Ga導入による膜質制御を実現。**LIAスパッタ**によるAlO_x膜の高温熱処理耐性条件を見出す。