

実用化加速チームの概要

Outline and Recent Activities of Innovative Technology Transfer Team

坂田 功 Isao Sakata

・実用化加速チームのミッション(Mission of our team) :

結晶シリコン系太陽電池関連技術について、

- (1) 産総研で開発した技術の産業界への移転
- (2) 産業界との共同研究による新技術の創出
- (3) 基盤技術の研究開発

を行い、産業界の競争力強化に資するとともに、結晶シリコン系太陽電池の高効率化・低コスト化を実現する。

Transfer of crystalline silicon solar cell technologies developed in AIST
to industries

R&D of basic technologies of crystalline silicon based solar cells

結晶シリコン太陽電池の現状・課題と産総研の研究開発の位置づけ

- ・現状：
 - ・太陽電池の全生産量の80%以上を占める
 - ・高効率、高信頼性の太陽電池として普及
- ・課題：
 - ・一層の高効率化(ただし低コスト化と両立させながら)
 - ・低コスト化
 - ・日本企業の競争力低下 → 海外企業との差別化をいかに図るか？
- ・産総研の研究開発の位置づけ：
 - ・開発した技術の産業界への移転、産業界との共同研究による新技術の創出、
基盤技術の研究開発を行い、産業界の競争力強化に資するとともに、
結晶シリコン太陽電池の高効率化・低コスト化を実現
 - ・ハブ機関として研究開発プラットフォームを提供

今回紹介する最近の研究内容 (Recent Research Topics):

- ・サンドブラストを利用した表面テクスチャー形成技術
Texture formation technology utilizing sandblast process
→ 低コスト化、民間企業3社との共同研究
- ・次世代結晶シリコン太陽電池コンソーシアム
Next-generation crystalline silicon solar cell consortium
→ 高効率、低コスト、高歩留まり、ハブ機関としての役割
- ・結晶SiGe薄膜太陽電池
Crystalline SiGe thin-film solar cells
→ 高効率、基盤研究、NEDOプロジェクト

サンドブラストを利用した表面テクスチャー形成技術

考え方と特長:

- ・サンドブラストでエッチングサイト(きっかけ)を作る
- ・従来の化学エッチングが適用しづらい場合に有効
- ・テクスチャー形成の新しい制御性を導入

適用例:

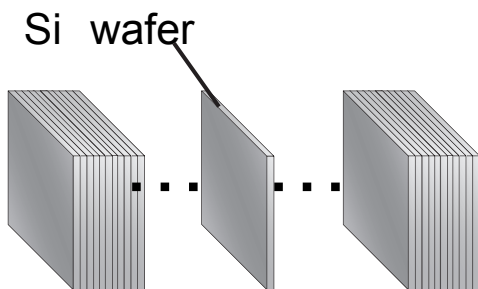
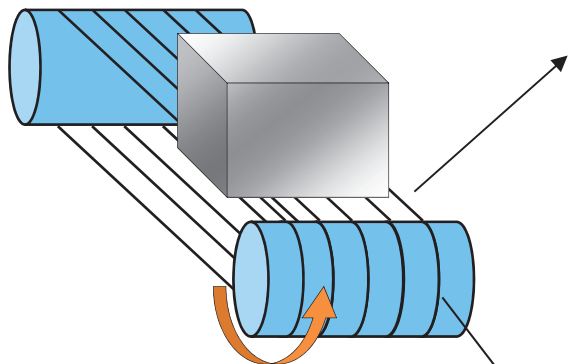
1. 固定砥粒方式でスライスした多結晶基板
 - ・化学的なエッチングだけでは良好なテクスチャが得にくい
 - ・新規の酸系エッチング液との組み合わせ
2. 片面テクスチャー形成
 - ・裏面を平坦に保つ ← 裏面電極型セル、裏面の再結合抑制に有効
 - ・保護膜不要

課題:

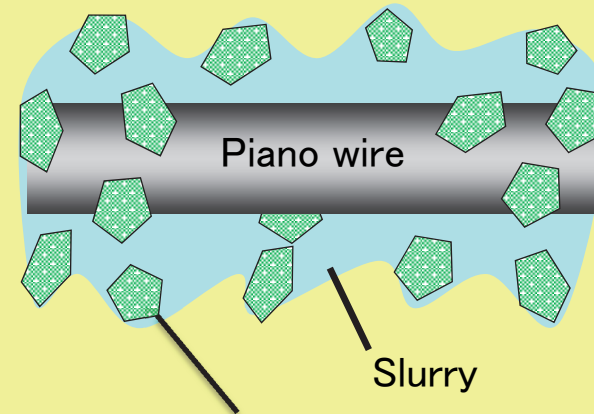
- ・基板への機械的なダメージの検討
- ・薄型基板への適用の可能性

シリコンインゴットのスライス

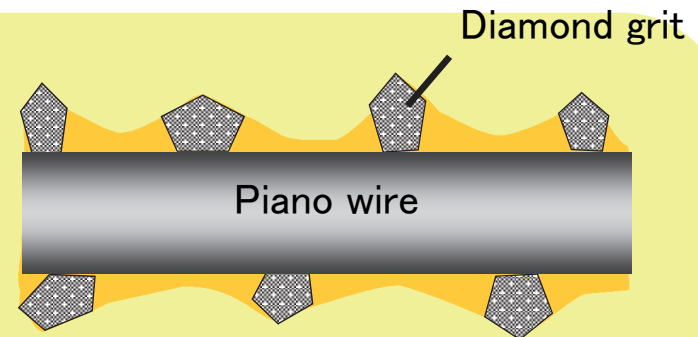
マルチワイヤーソーによるスライス



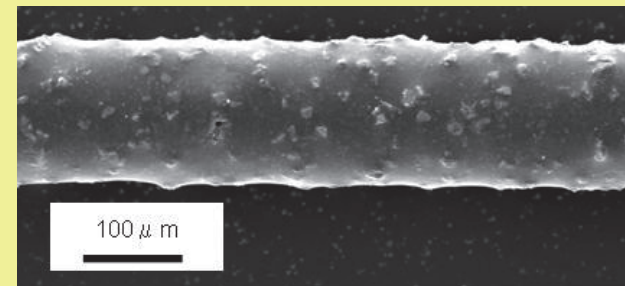
遊離砥粒方式
ピアノ線＋スラリー



固定砥粒方式
ダイヤモンドワイヤ
＋クーラント



接着
電着または、
レジン



固定砥粒によるシリコンインゴットスライス

利点:

- ・スライス速度が高い
- ・環境負荷が小さい
- ・ウエハに導入されるダメージ層が薄い

近い将来、遊離砥粒方式に入れ代わることが期待されている

課題:

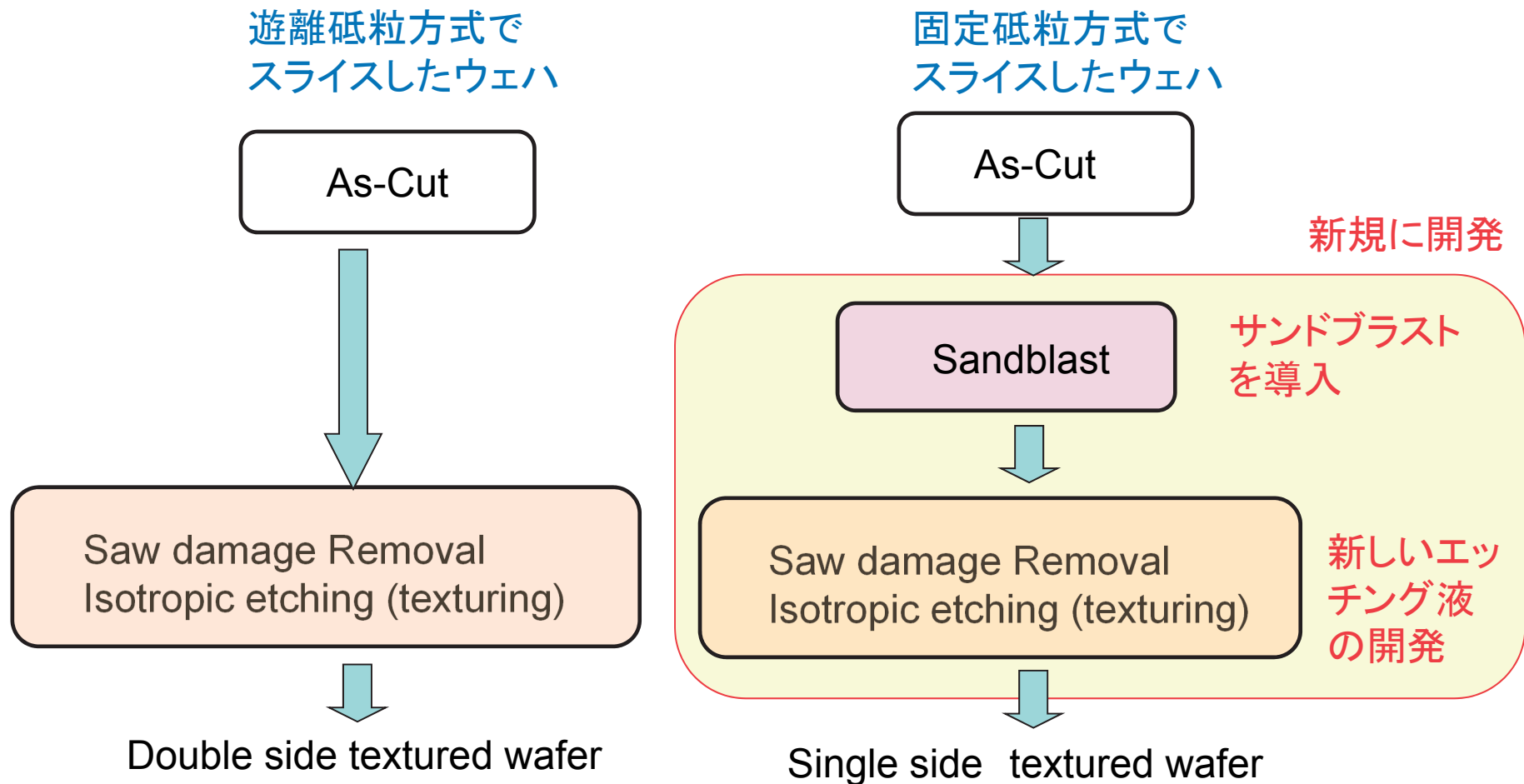
- ・固定砥粒方式でスライスした多結晶シリコン基板は、テクスチャー形成が困難

新しい表面テクスチャー形成技術の提案

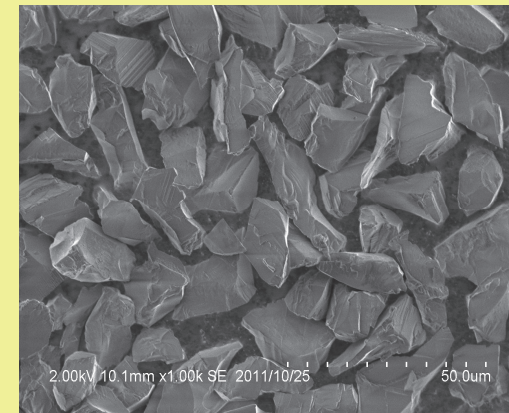
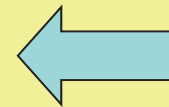
(ノリタケ、不二製作所、和光純薬との共同研究)

New texture formation technology for poly-Si substrates sliced with fixed abrasive wires

固定砥粒スライス基板に適したテクスチャー形成方法



サンドブラスト法



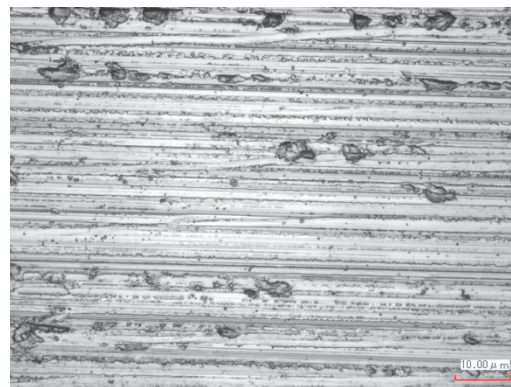
砥粒の例

対象物に砥粒を吹き付けて表面を加工

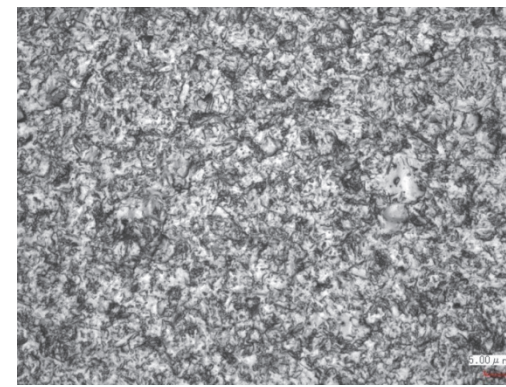
サンドブラスト処理の導入

固定砥粒方式によるスライス＋サンドブラスト処理

- ・サンドブラスト処理を導入することで、基板表面を均質に粗面化
- ・サンドブラスト処理の条件により、ダメージ層の深さ・形状を制御できる。
- ・非真空、高速処理、低コストプロセス



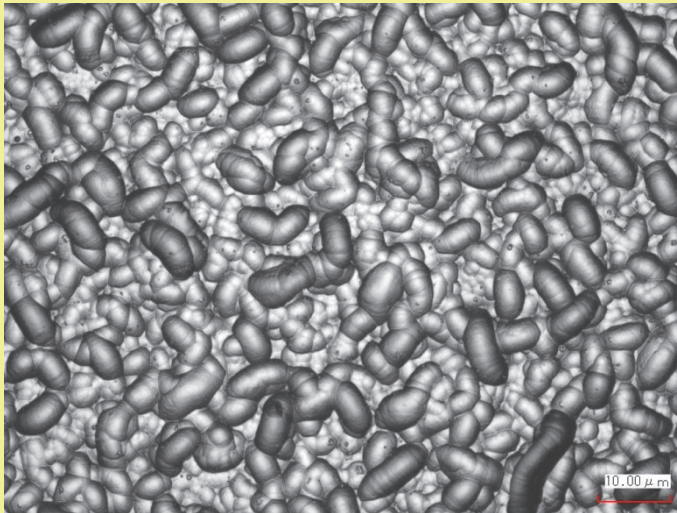
アズスライス基板



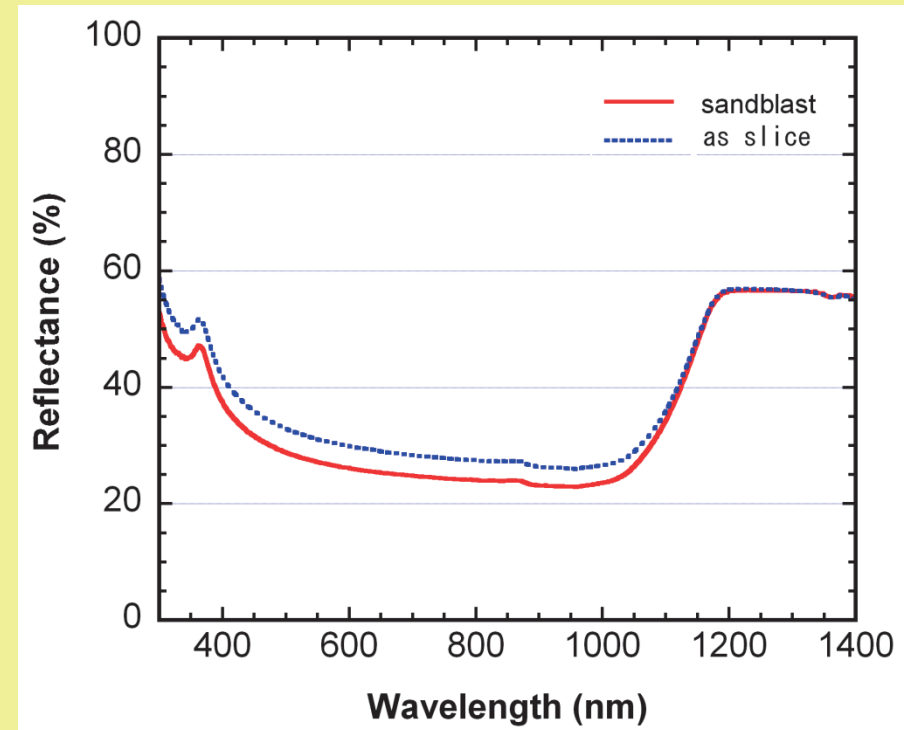
サンドブラスト処理後

Control of surface conditions of as-sliced substrates by sand blast treatment

サンドブラスト+酸エッチングによる表面テクスチャー形成



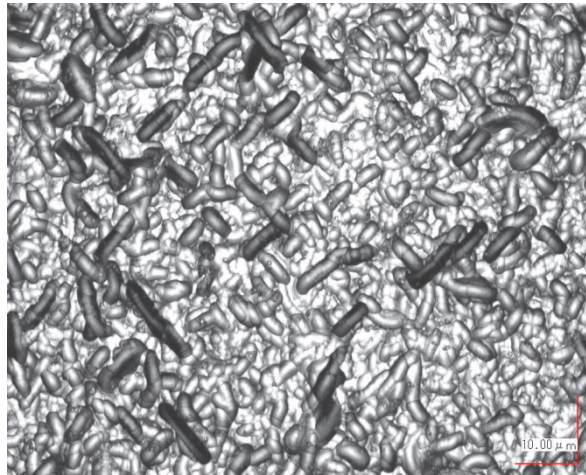
Textured surface



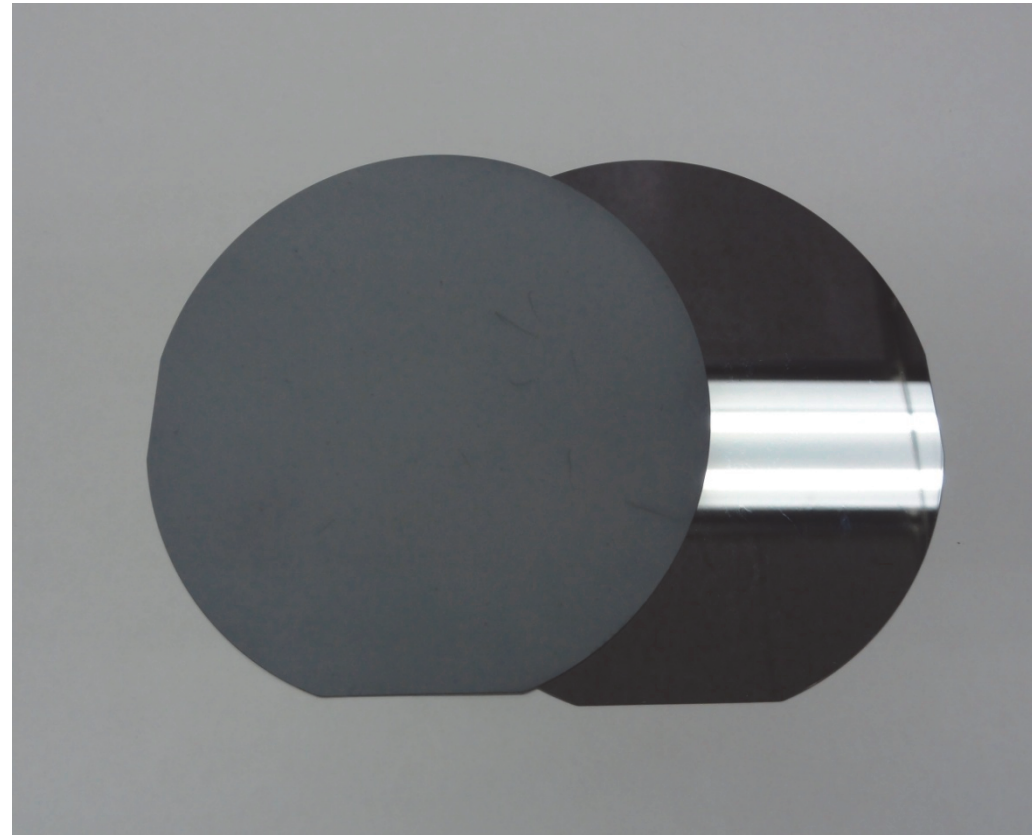
Reflectance

固定砥粒スライス+サンドブラスト処理+酸エッチングによるテクスチャーにより、低反射率テクスチャー構造が得られた。

片面テクスチャ形成

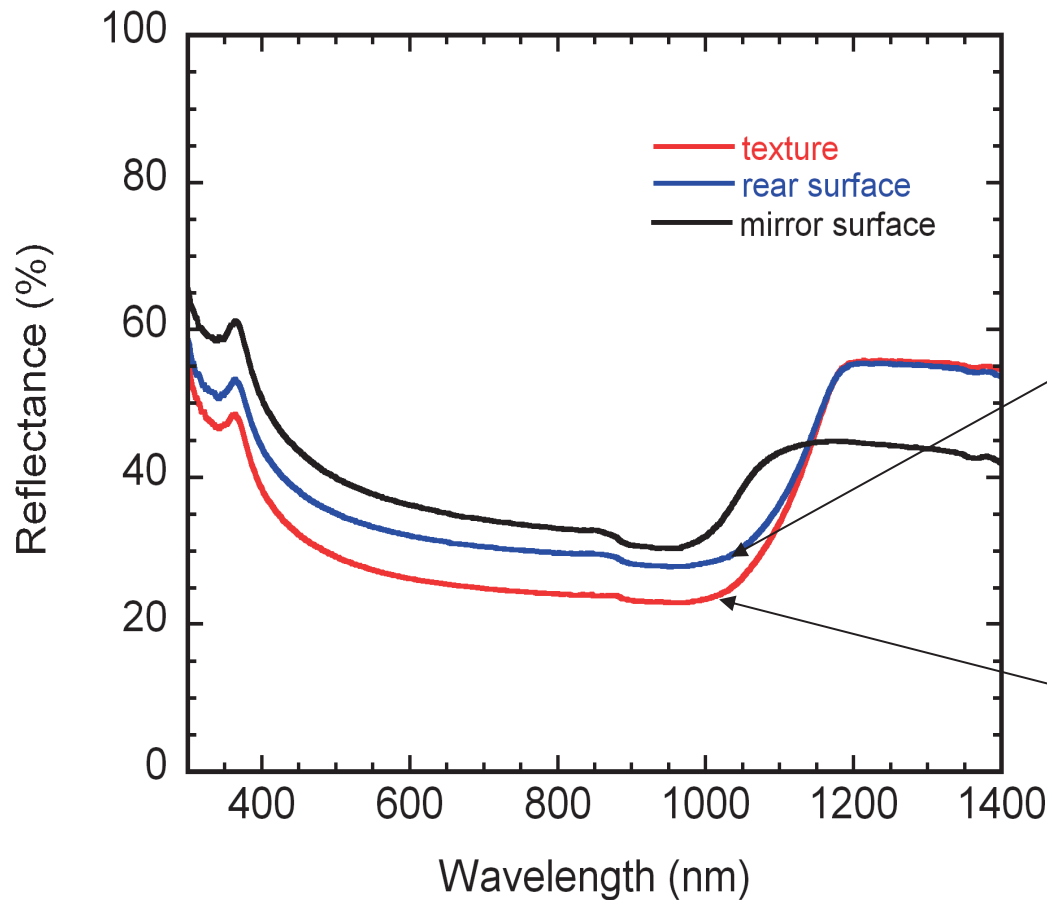


1. 単結晶シリコン基板
(両面鏡面)
2. サンドブラスト
3. テクスチャーエッチング

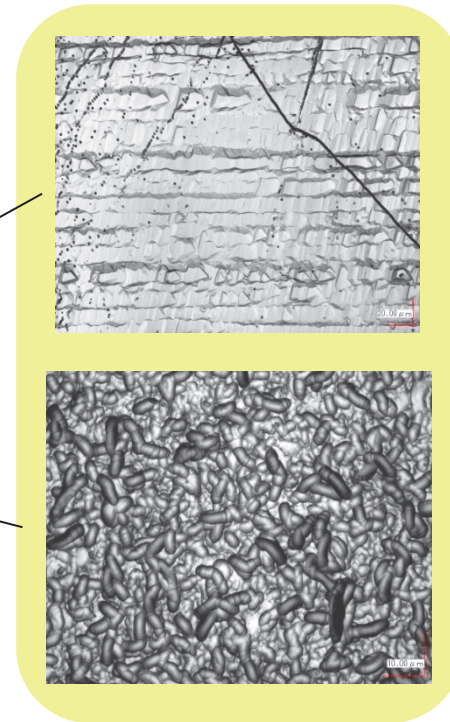


両面鏡面の基板でもサンドブラスト処理により片面にテクスチャ構造を形成できる。

反射率： 片面テクスチャ形成



1. 固定砥粒方式でスライス
2. ダメージ層エッチ (KOH)
3. ブラスト処理
4. テクスチャーエッチング



反射率の違い



低反射率の表面を実現

次世代結晶シリコンPVコンソーシアム

概要

背景

- 2011年度の所内予算で計画していた
- 震災以降のエネルギー政策の転換
- 再生可能エネルギーによる福島復興
補正予算→ 予算的には当初の10倍以上の規模

- 太陽光発電への期待
- 国際競争の激化（日本の市場シェアの低下）
- 国内産業の空洞化
- 空洞化しない国内産業としての太陽光発電の可能性？

H23年度第3次補正予算：最新鋭太陽電池試作ラインの基盤技術開発

事業の内容

・事業内容

日本で生産し新興国に勝てるモノづくり実現のため、太陽電池モジュールの構造を一新するゲームチェンジテクノロジーの開発を目指し、国内唯一のオープンな一貫太陽電池試作ラインを企業と共同で構築、関連基礎プロセス開発設備、評価設備の整備を行う。

・研究開発要素と産総研の役割

現行のコストを30%以上低減するため、高度なハンドリング技術と精密な製造プロセスの管理が必要な薄型結晶と低コスト軽量薄膜の製造技術を、材料から最終製品まで一貫的に研究開発する。産総研は参加企業の中核機関としてプロジェクト全体を主導する。

・売りとなるインフラ(テストベット)

超薄型シリコン(100ミクロン)と薄型強化高機能ガラスを利用する最新鋭の一貫試作ラインをオープンな設備として国内企業に広く開放する。

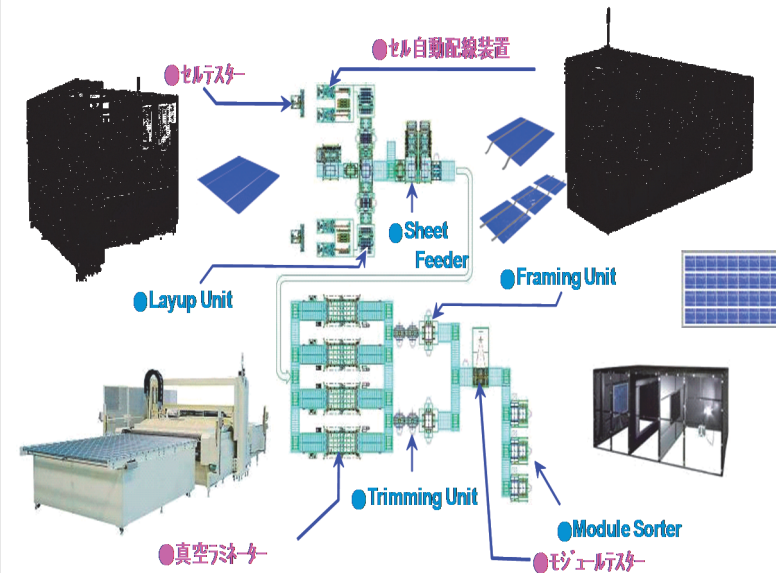
・産業化のイメージ

産総研で技術開発を進展させ順次企業移転し、集積メリットにより産業集積、巨大企業コングロマリットの形成を図り、年産10GW、売上1兆円規模の世界最大級の太陽電池生産拠点を形成する。

想定規模

- ・AIST研究者： 数名～10名
- ・現地雇用スタッフ： 10～20名
- ・参加企業： 太陽電池、素材、装置、部材など20社程度
- ・当初予算： 30 億円（年間維持費 3億円程度）
- ・スペース： 6000 m²

事業イメージ



屋外曝露



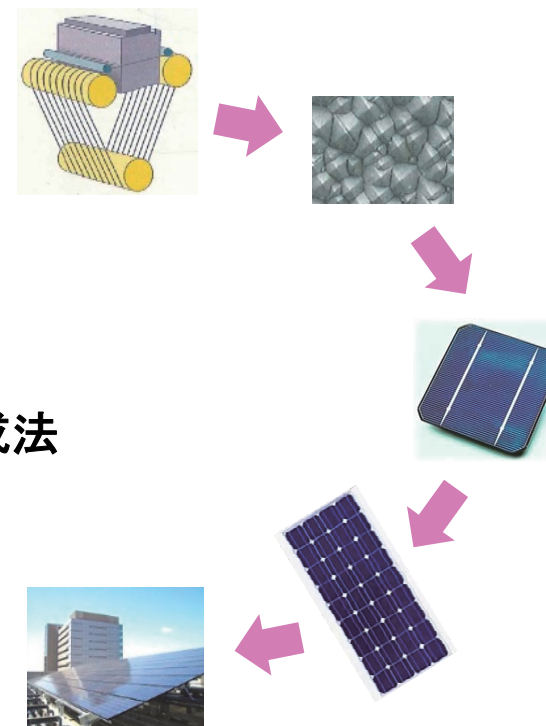
屋内試験

次世代結晶シリコンPVコンソーシアムの概要

- 国内唯一の最先端結晶シリコンPV量産試作ラインを備えた研究拠点。
- 世界トップクラスの性能と低コストを両立出来る次世代結晶シリコン太陽電池の量産型試作ラインとこれをバックアップする研究体制を構築し、産業界との共同研究あるいは試作ラインを企業の技術開発に開放することで、結晶シリコン太陽電池技術の高度化と材料など周辺産業も含めた太陽電池産業の育成・競争力の強化を実現。
 - ✓ 高効率、低コスト薄型結晶シリコンPV開発・試作プラットフォーム構築
 - ・ 要素技術の研究開発とともに、量産を目指した一貫製造プロセスの開発
 - ・ 超薄型単結晶ウエハの製造、ウエハ加工、ウエハハンドリング、セル化プロセス(ウェット・ドライプロセス、印刷プロセス)、モジュール化プロセスまでを一貫して開発し、信頼性試験、屋外曝露試験までを行う。
 - ✓ 次世代結晶シリコン太陽電池PVモジュールの高付加価値コンセプト開発
 - ✓ 次世代結晶シリコン太陽電池PV製造装置・部材・検査機器の開発支援
- 結晶シリコンPV技術情報と人材の集約及び人材の育成

開発分野

1. 結晶シリコンの評価
2. ウェハ加工技術
スライス、ウェットエッチング
3. セル材料の開発・評価
パッシベーション膜、ペースト、インターコネクタ
4. セル化技術
テクスチャ形成法、パッシベーション法、接合形成法
5. モジュール化技術
新構造、配線、封止材、部材
6. 評価
信頼性評価、一貫フィードバックループ



研究目標

- 次世代の高性能、高付加価値(高信頼性、軽量化、高機能化)太陽電池モジュールの国内製造コストを2020年に50円/W以下に低減することを目的として、超薄型(単)結晶シリコンウェーハを用いたセル・モジュールを部材、装置、モジュールに関連する企業との共同研究の下で一貫して開発する。また高性能化、高付加価値化、低コスト化ばかりでなく、高歩留まりを実現する製造技術を開発する。
- 超薄型単(多)結晶ウエハ(80~100 μ m)の高歩留まり量産技術を確立し、原料利用効率を高める。
- 薄型ウエハと標準的なセル構造を用いた高効率太陽電池の要素技術開発を行う。
特殊構造セルについては個別に開発を行う。
エッチングプロセス、印刷プロセス、製膜プロセス、接合プロセスなど次世代セルに必要な技術を開発する。
- 薄型ウエハを用いたモジュール化技術を開発する。軽量化モジュールの開発やその他高付加価値モジュールの開発も併せて行う。
- 完成したモジュールは屋内外で性能および信頼性を評価する。
- 新型セル、モジュールの普及に必要な標準化活動も並行して行う。
- 中立的な技術評価、製品評価を行う。

共同研究イメージ

1. 新技術を持ち込み試作ライン構築に協力、半量産化実証。(装置は原則として産総研が購入設置)。
2. 薄型結晶シリコンセルの開発に協力、必要に応じてコンソで作製した薄型ウェハを持ち帰り、自社セル開発に利用。
3. 自社開発薄型結晶シリコンセル・モジュール製造・評価装置を持ち込みコンソ試作ラインに組み込みオンサイト評価。
4. 薄型セルに対応した部材を持ち込み、セル・モジュールを作製評価、屋外曝露試験までを実施。(年間1000枚程度のモジュール作製評価を想定)

活動スケジュール(暫定)

- 研究開発拠点： つくば、福島県

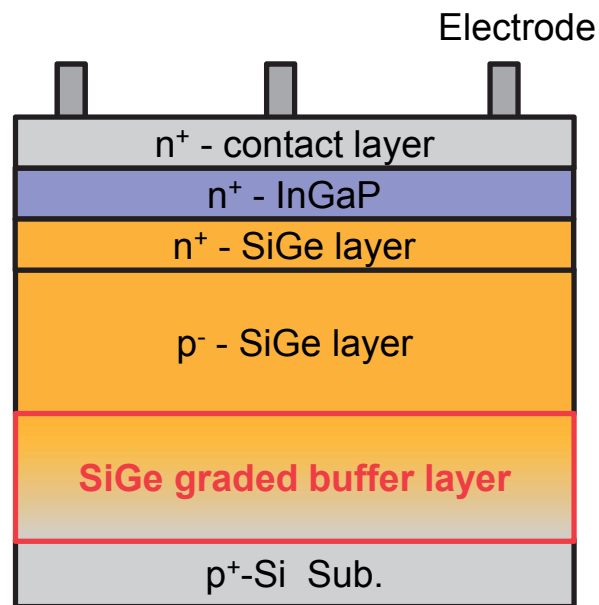
- 資金提供型共同研究：
 - 参加企業からテーマをご提案いただき、研究資金も提供いただく
 - 現在(2012年5月)もご提案を受付中
 - お問い合わせ： c-si_conso@m.aist.go.jp

- 建屋建設ならびに装置導入(仮)スケジュール
 - 2012年1月～ 実験棟、試作装置導入検討
 - 2012年4月～ コンソ立ち上げ,
先行試験研究スタート(つくば)
 - 2014年4月頃～ 福島拠点での研究開発実施

結晶系ナローギャップ材料SiGe太陽電池の研究

- Si材料系3接合太陽電池に向けたボトムセル(0.9eV以下)開発
- 組成傾斜バッファ層技術の開発 → 高品質なSiGe単結晶成長

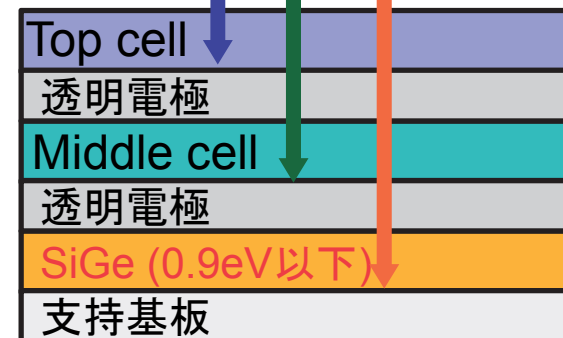
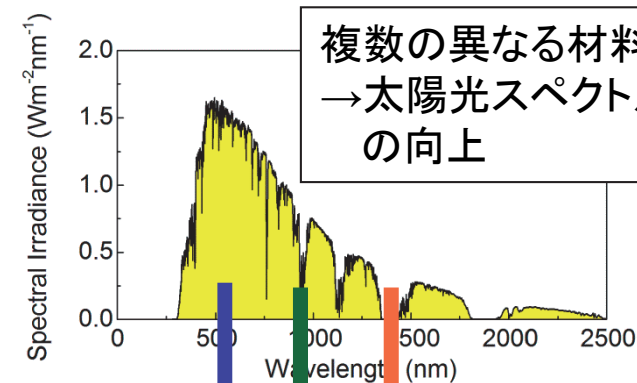
単結晶SiGeへテロ接合太陽電池



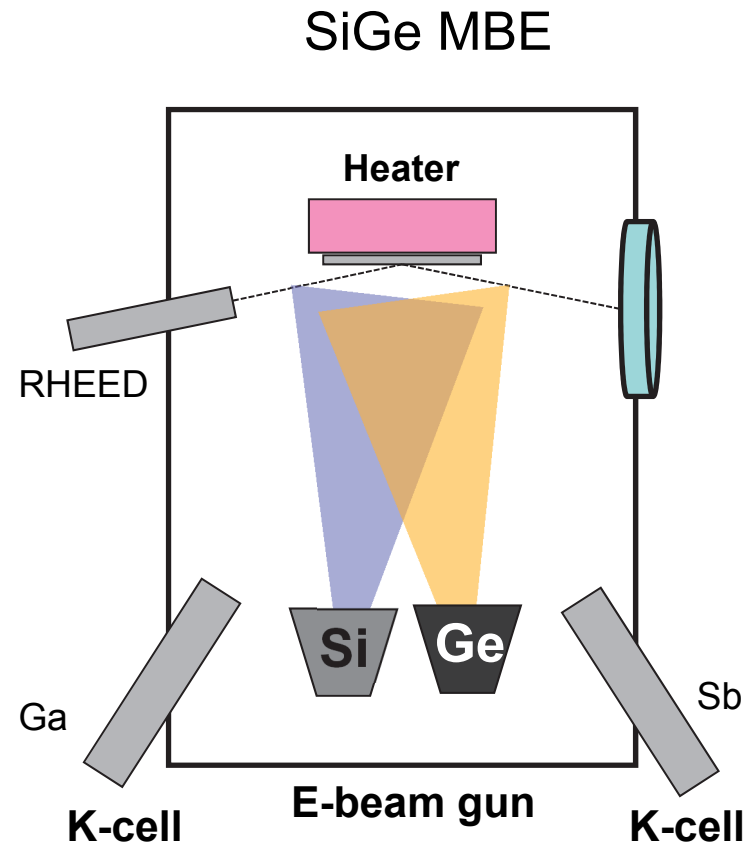
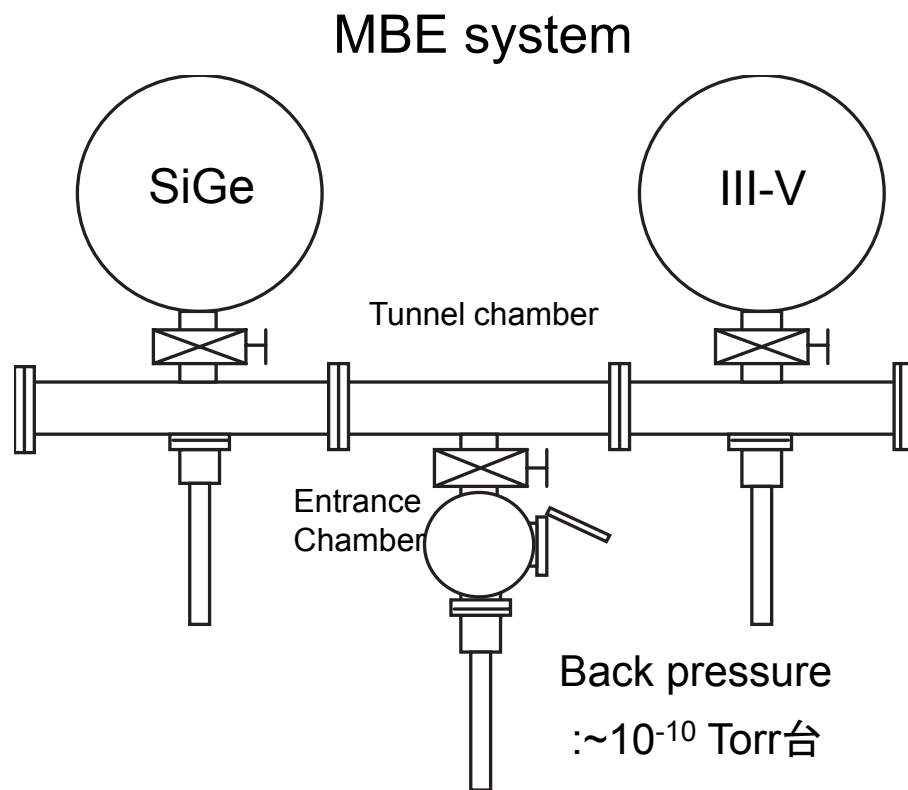
SiとSiGeの格子定数差 >3%

➡ 転位の制御技術

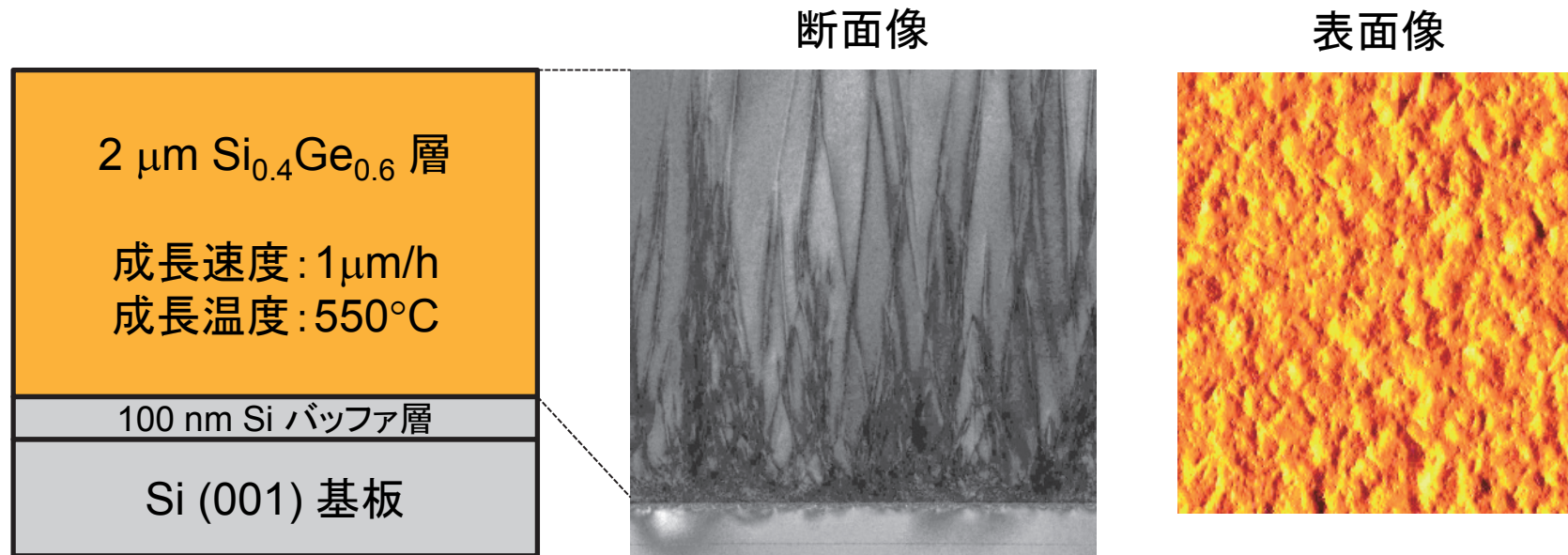
Si材料系多接合太陽電池



分子線エピタキシー(MBE)装置



Si(001)基板上Si_{0.4}Ge_{0.6} 薄膜のMBE成長



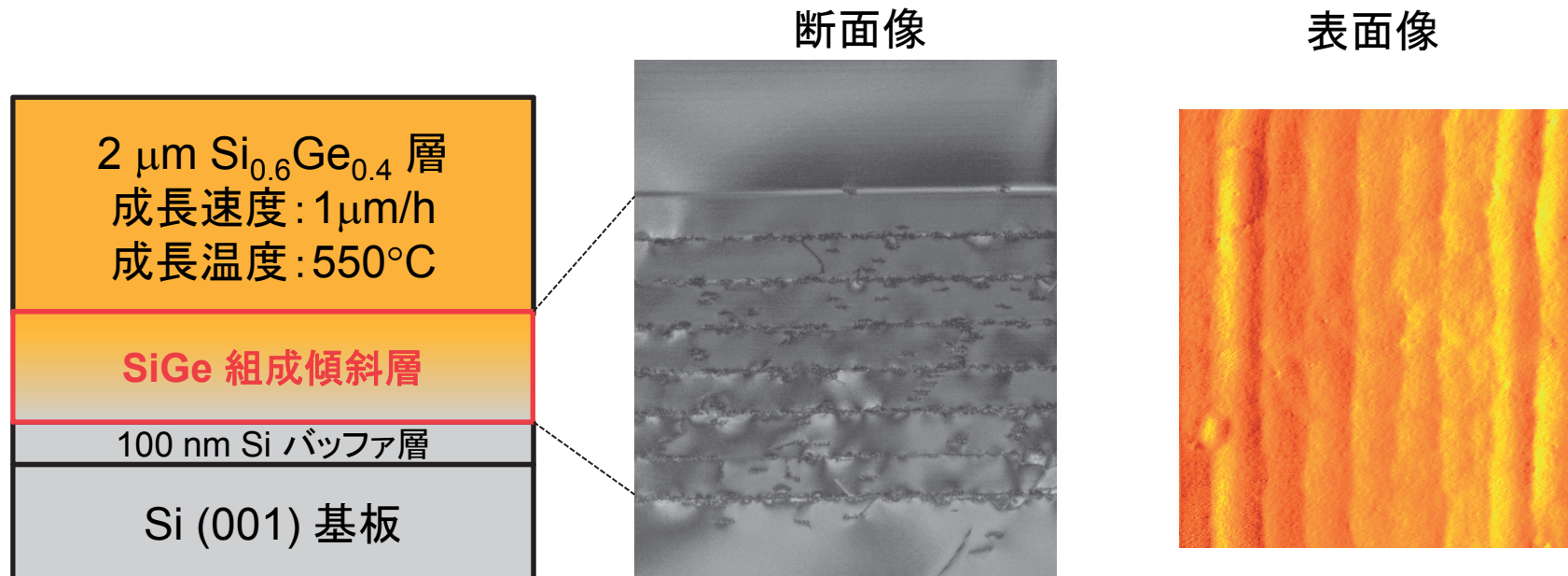
格子ミスマッチ

$$(a_{\text{Si}} - a_{\text{SiGe}}) / a_{\text{Si}} = \sim 3\%$$

貫通転位密度 : $3.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$
表面粗さ平均(RMS) : 6.507nm

- SiGe層とSi層の界面で、ミスフィット転位が集中的に発生
- 転位の多くは最表面まで伝搬し、同構造での転位の制御は困難

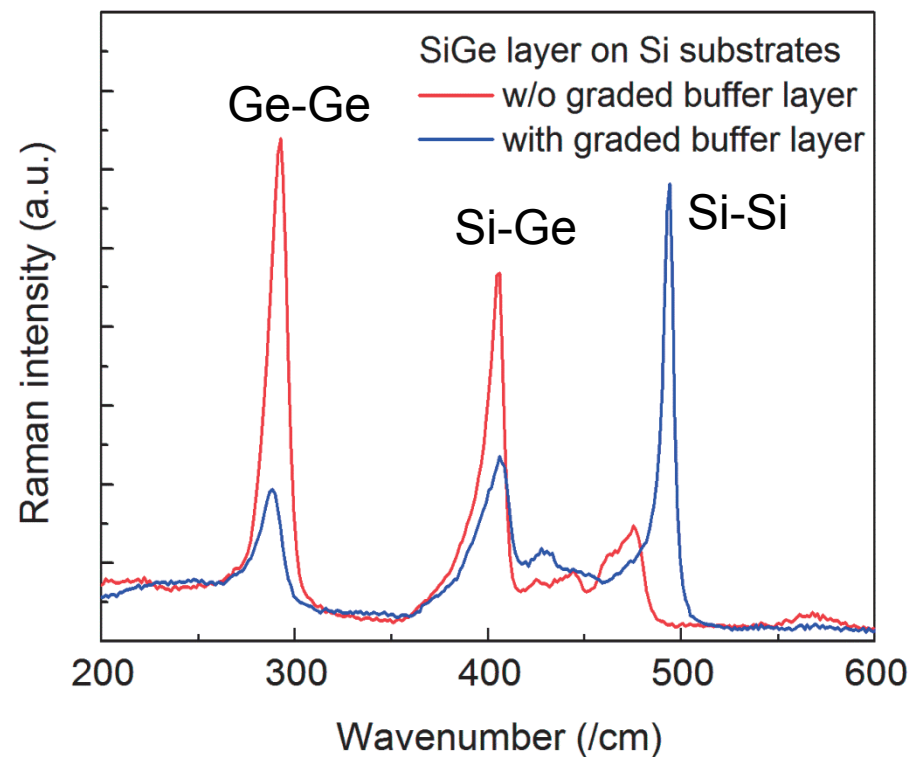
組成傾斜層による転位制御技術の開発



貫通転位密度 : 10^6 cm^{-2} 以下
表面粗さ平均(RMS) : **0.904 nm**

- Ge組成(格子定数)を、一定勾配で目的組成まで増加
- 組成傾斜層内に転位を効果的に閉じ込めることに成功
- SiGe層への転位の伝搬、SiGe層内での転位の発生は生じていない

ラマン分光法による歪み量解析



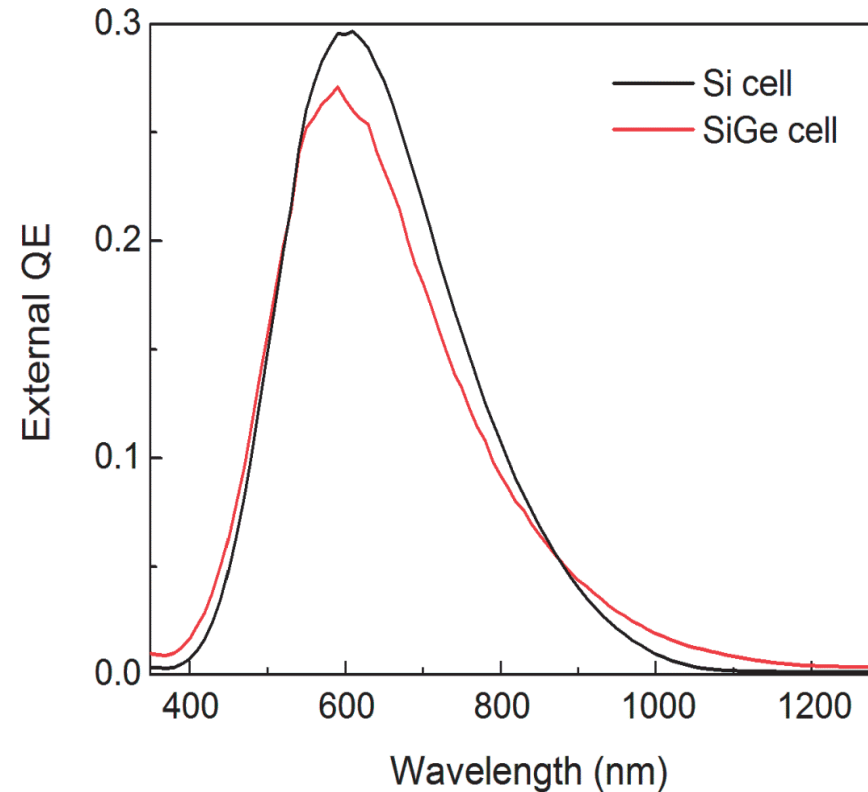
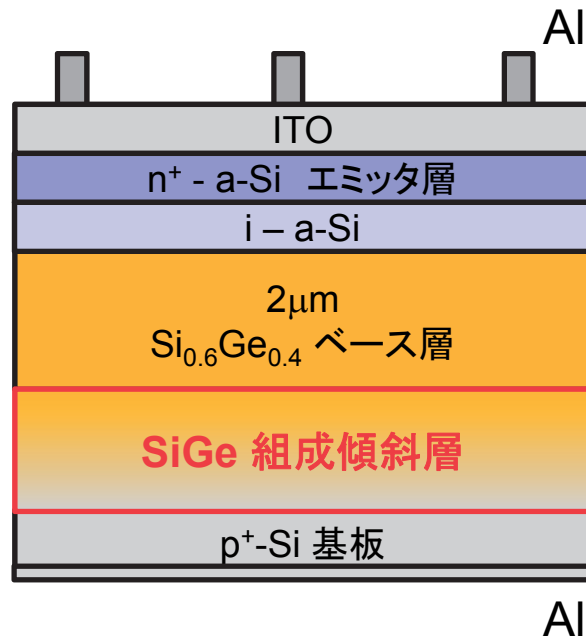
組成傾斜層	$\omega_{\text{Ge-Ge}}$ (cm^{-1})	$\omega_{\text{Si-Ge}}$ (cm^{-1})	$\omega_{\text{Si-Si}}$ (cm^{-1})	Strain ϵ
有	288.778	407.048	490.328	0.0004
無	291.51	405.983	475.367	0.0060

残留歪みの
大幅な減少



SiGeへテロ接合太陽電池の作製

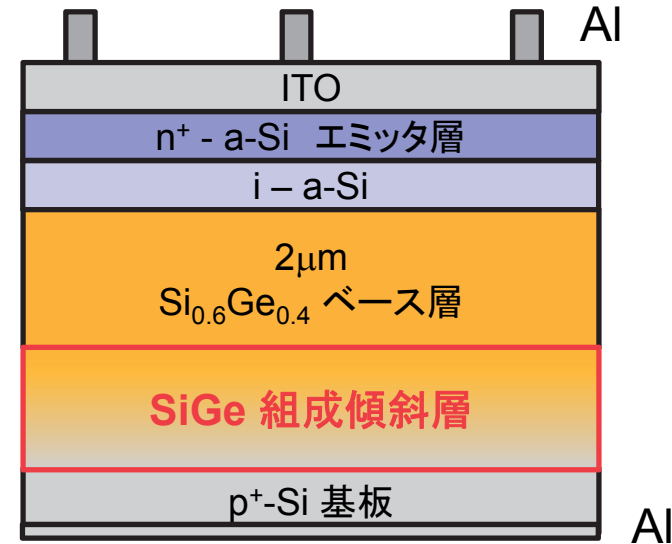
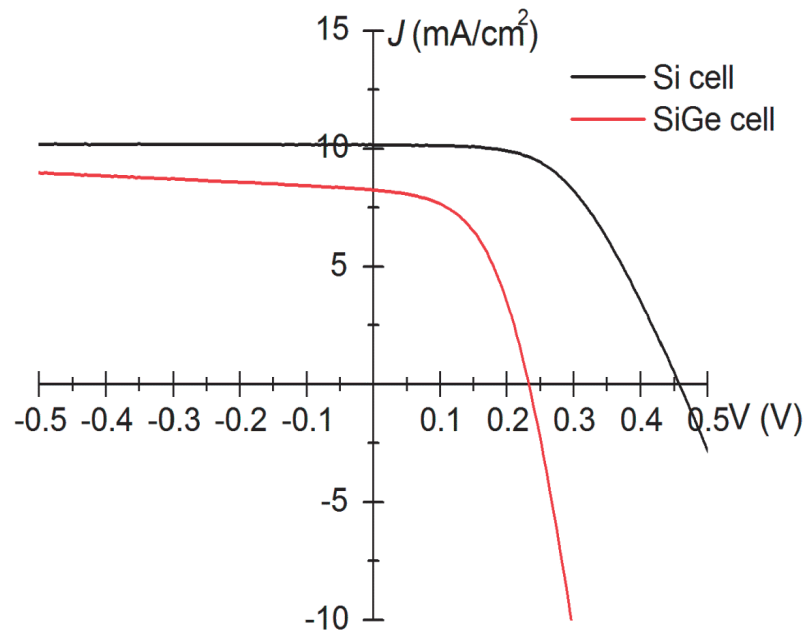
量子効率測定



- SiGeセルの吸収端は1200 nmであり、Si(1100nm)に比べて長波長化
→SiGeの組成制御による禁制帯幅(吸収端)の制御が可能
- 長波長領域の感度向上が課題 →厚膜化、光閉じ込め技術

SiGe太陽電池の出力特性

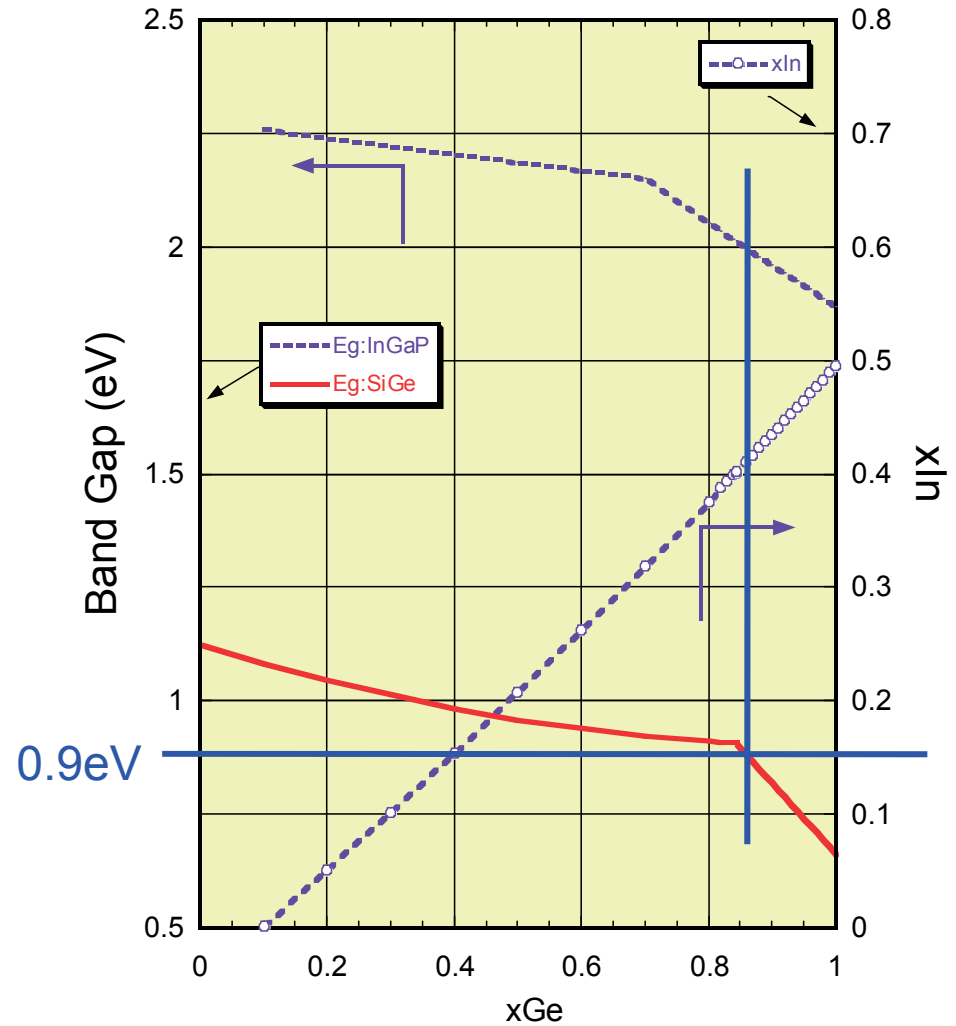
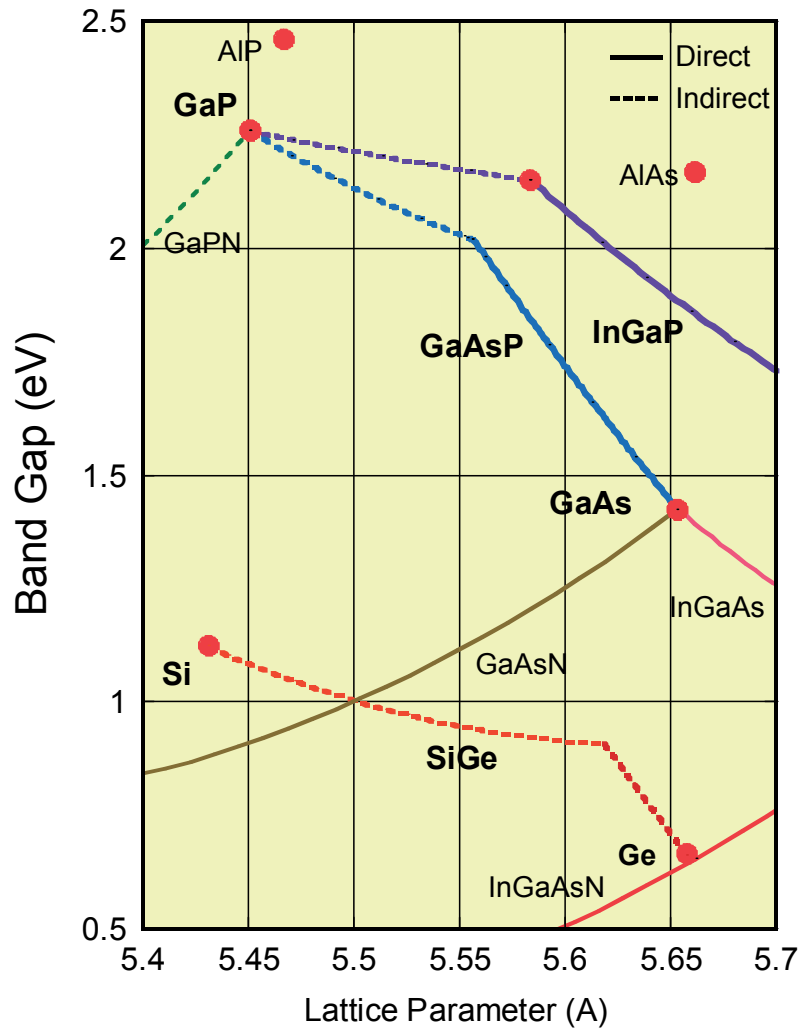
P-V特性



	η (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF
Si	2.479	10.155	458	0.533
SiGe	0.980	8.251	233	0.509

- 良好な整流性、FF値が得られており、結晶性に優れたSiGe単結晶が得られている。
- 更なる変換効率の向上には、ドーピング制御などの精密な設計が必要である。

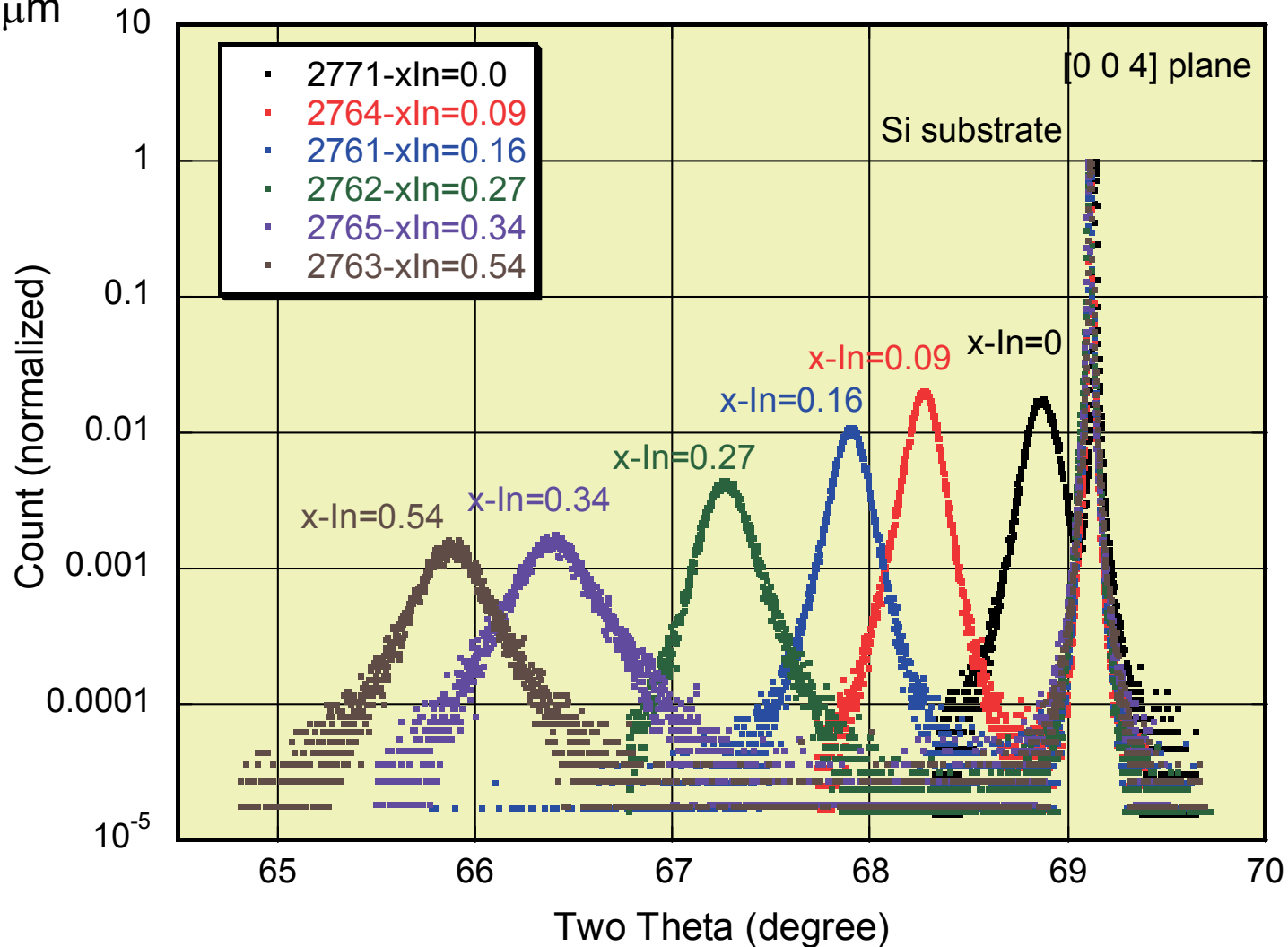
Lattice match conditions for $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ and $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{P}$



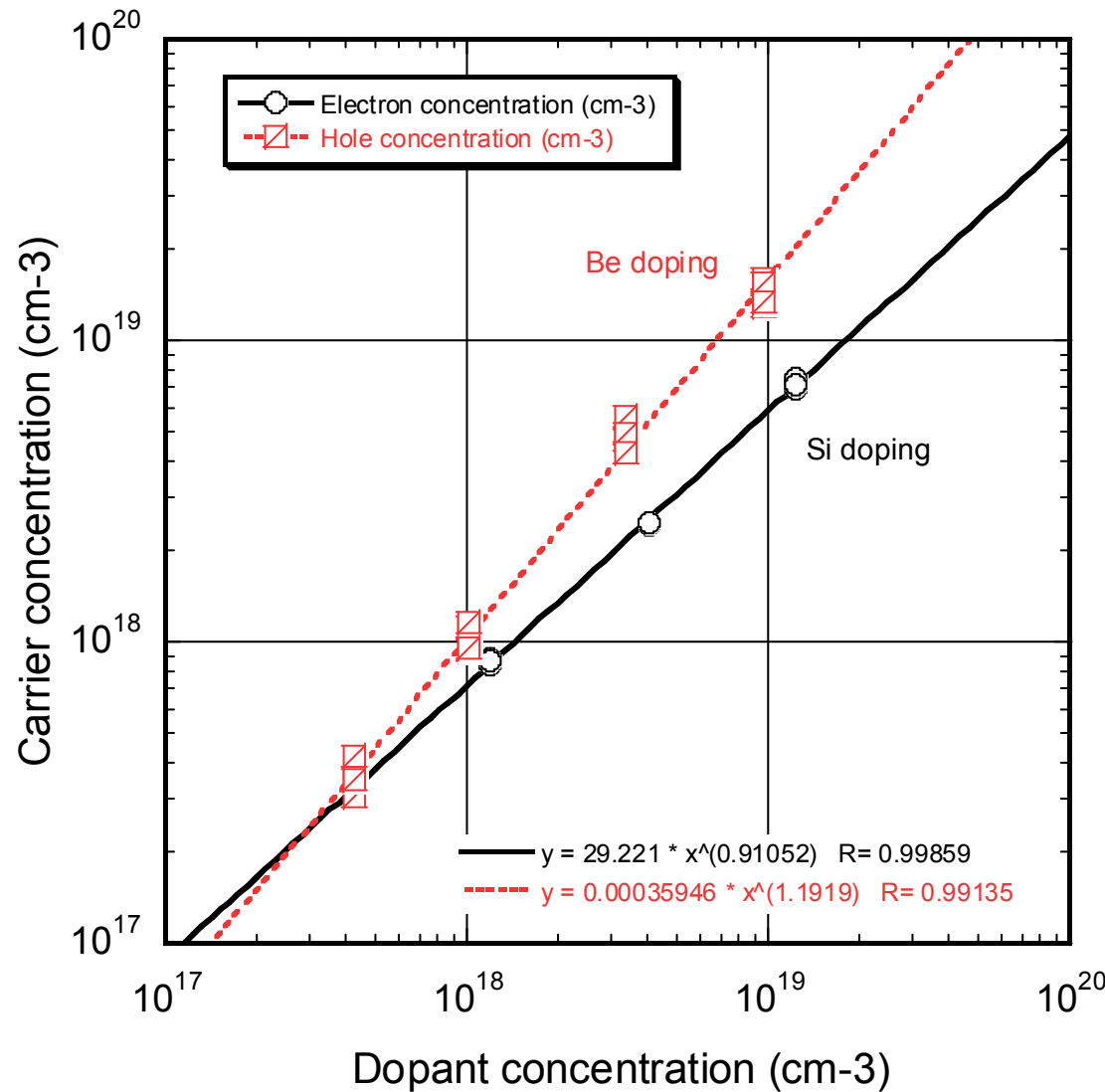
XRD spectra for InGaP on Si

MBE成長
 Ts : 460°C
 膜厚 : 1.0-1.5 μm

エピタキシャル成長を確認 In組成: 0 - 0.54



キャリア密度とドーパント濃度の関係



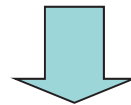
N型ドーパント: Si
P型ドーパント: Be

- ・広い範囲でキャリア濃度を制御
- ・活性化率は100%に近い
- ・窓層に必要な高濃度ドーピングを実現

SiGe 薄膜太陽電池動作解析の必要性

SiGe:

- ・高効率多接合太陽電池の狭バンドギャップ半導体
SiGe: $E_g \text{ --- } 0.664 \text{ eV} \sim 1.124 \text{ eV}$
- ・間接遷移 --- バンド端の吸収係数の緩やかな立ち上がり
厚膜の必要性？
- ・表面・界面再結合とバルク欠陥の影響？
- ・光閉じ込めの効果？



SiGe混晶太陽電池動作性能をPC1Dで計算

η : 効率, FF : 曲線因子, V_{oc} : 開放電圧, J_{sc} : 短絡電流
評価パラメータ

E_g : バンドギャップ, τ : キャリア寿命, t : セル厚,
 S_f : 表面再結合速度、 R_f : 光閉じ込め、

Device Structure and Material Parameters

デバイス概略図と 評価パラメータ

- Eg (バンドギャップ) :**
0.664 - 1.124 eV
- tau (キャリア寿命) :**
0.1 - 100 μ s
- t (セル厚) :**
0.2 - 200 μ m
- Sf (表面再結合速度):**
100 - 10⁶ cm/s
- Rf (光閉じ込め) :**
60 - 100 %

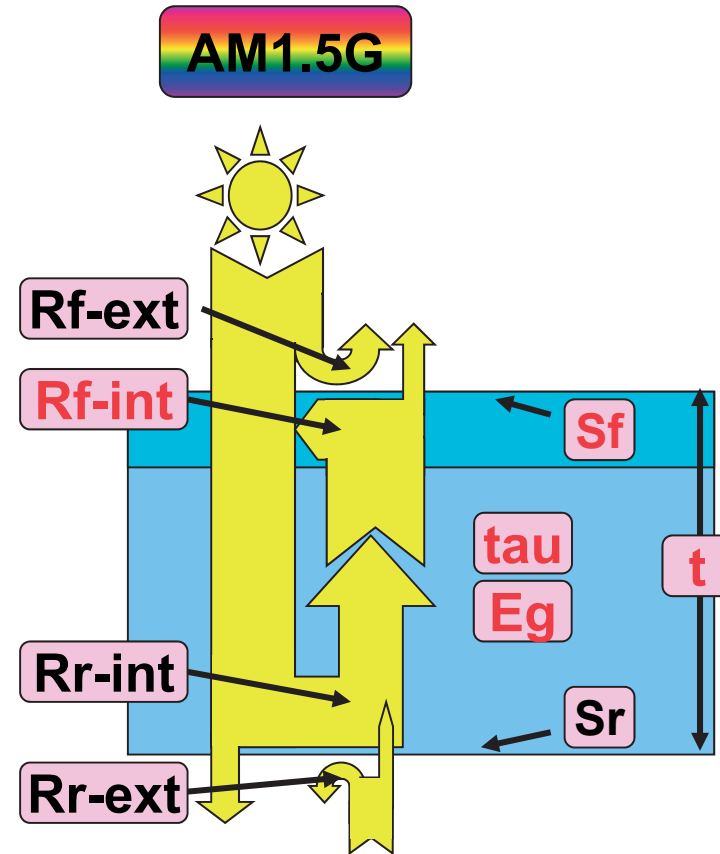


Fig. 1 Schematic illustration of device and parameters.

Band Gap (E_g) and thickness (t)

$E_g \uparrow$:
 $\eta, Voc, FF \uparrow$
 $Jsc \downarrow$
 $t \downarrow$:
 $\eta, Voc \uparrow$

薄膜セルが有利:
Vocの向上

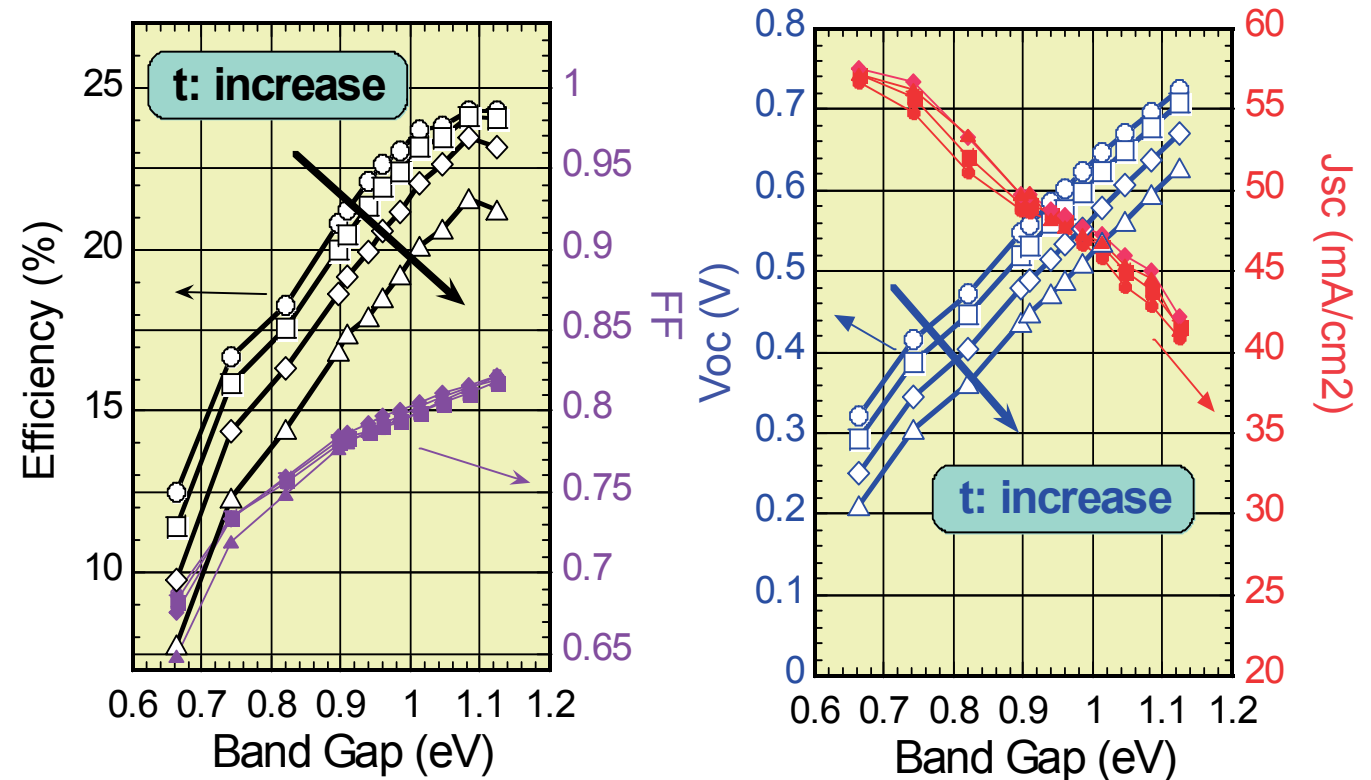


Fig. 1. E_g と η , FF, Voc, Isc。パラメータ: t
 $t = 2 \mu\text{m}$ (○, ●), $5 \mu\text{m}$ (□, ■), $20 \mu\text{m}$ (◇, ◆), $100 \mu\text{m}$ (△, ▲)
 $S_f = 1000 \text{ cm/s}$, $\tau = 10 \mu\text{s}$, $R_f = 100 \%$

Minirotary carrier lifetime (τ)

$\tau \uparrow$:
 $\eta, Voc \uparrow$
 $Jsc \rightarrow$

少数キャリア
 寿命の向上
 が重要

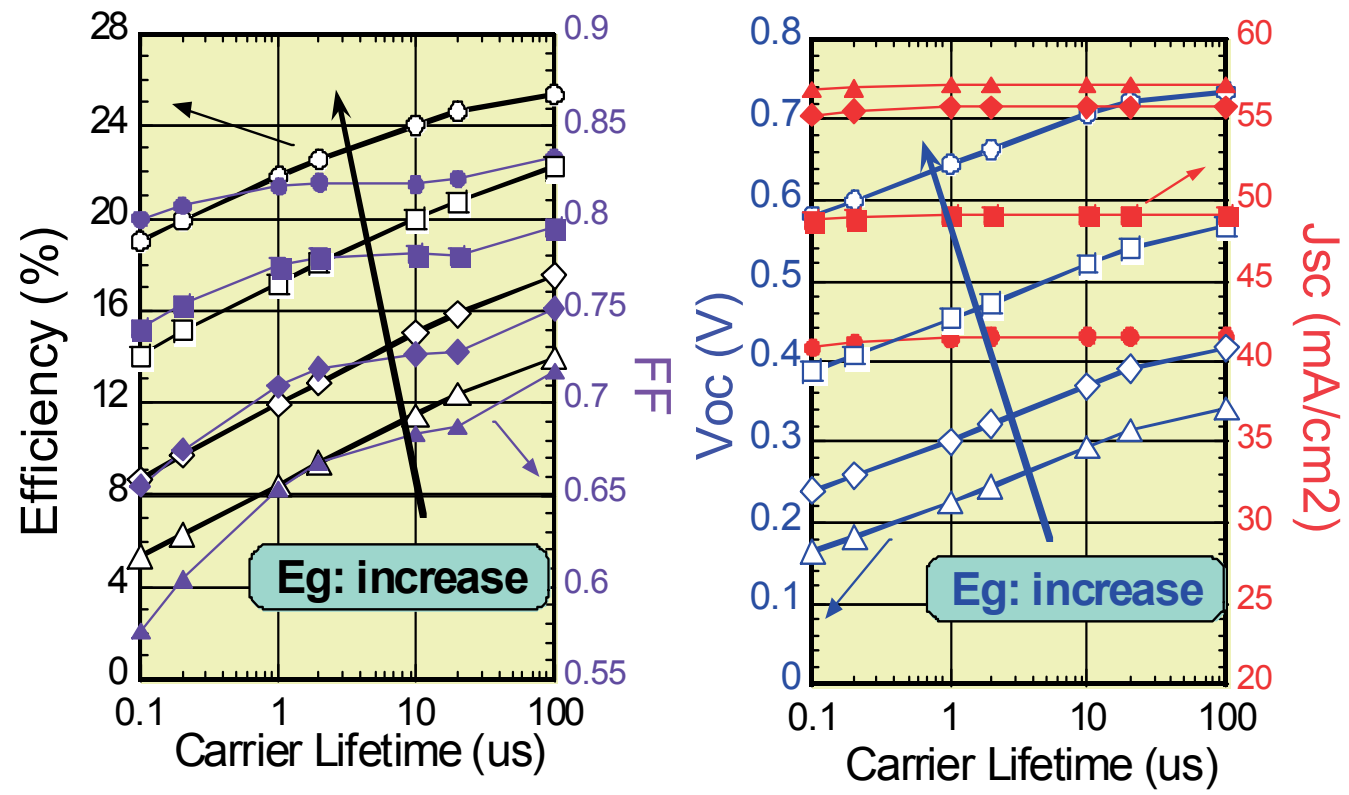


Fig. 2. キャリア寿命と η , FF, Voc, Isc。パラメータ: Eg
 Eg= 1.124 eV (xGe-0) (○, ●), 0.898 eV (0.85) (□, ■),
 0.742 eV (0.95) (◇, ◆), 0.664 eV (1.0) (△, ▲).
 Sf = 1000 cm/s, t = 5 um, Rf = 100 %

Surface recombination (Sf, Sr)

Sf↑:
 $\eta, Voc \downarrow$
 但し $Eg \uparrow$ で顕著
Jsc →

Ge-richでは
 表面再結合の
 影響は比較的小さい

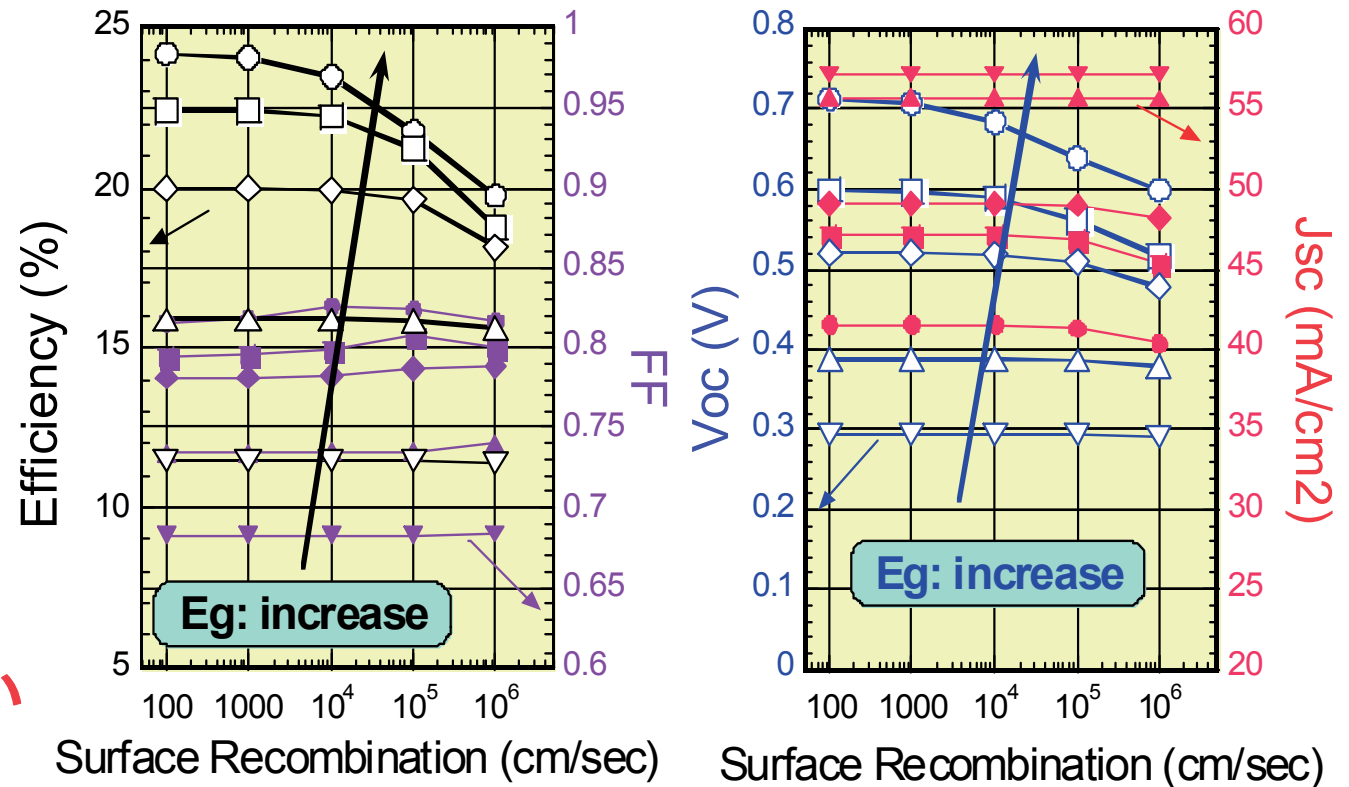


Fig. 3. 表面再結合速度と η , FF, Voc, Jsc。パラメータ: Eg
 $Eg(xGe) = 1.124 \text{ eV (0.0) (}\bigcirc, \bullet\text{)}, 0.985 \text{ eV (0.4) (}\square, \blacksquare\text{)}, 0.898$
 $\text{eV (0.85) (}\diamond, \blacklozenge\text{)}, 0.742 \text{ eV (0.95) (}\triangle, \blacktriangle\text{)}, 0.664 \text{ eV (1.0) (}\nabla, \blacktriangledown\text{)}.$
 $t = 5 \text{ }\mu\text{m}, \tau = 10 \text{ }\mu\text{s}, R_f = 100 \%$

Optical confinement (Rf-int)

Rf↑:
 η, J_{sc} ↑
 但しEg↑で顕著
 V_{oc} →

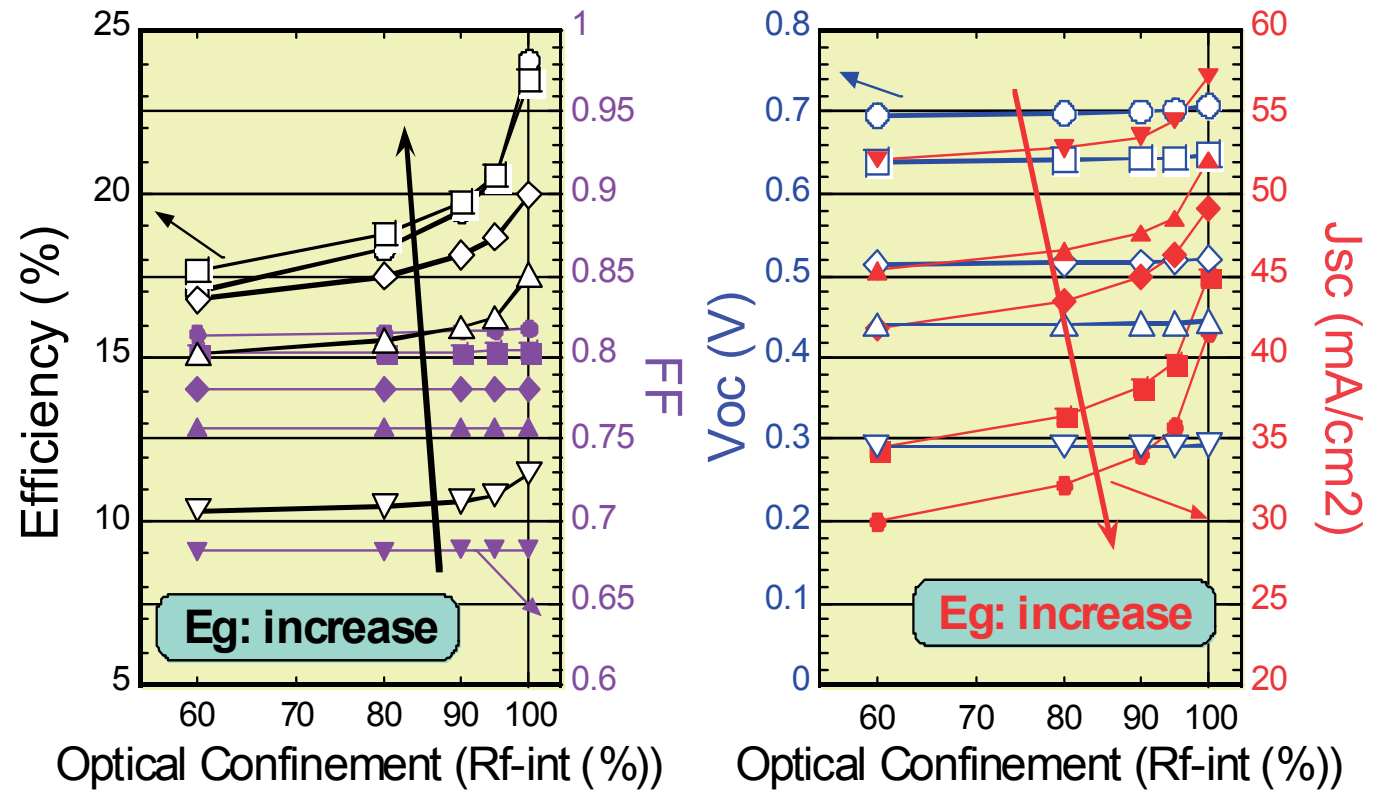


Fig. 4. 光閉じ込めと η , FF, Voc, Isc。パラメータ: Eg

Eg(xGe) = 1.124 eV (0.0) (○, ●), 0.985 eV (0.4) (□, ■), 0.898 eV (0.85)(◇, ◆), 0.742 eV (0.95)(△, ▲), 0.664 eV (1.0) (▽, ▼).

t = 5 μ m, τ = 10 μ s, Sf = 1000 cm/s

セル動作解析の結果： SiGeセルの設計指針

- **SiGe薄膜セルの効率**は主に**Voc**で決まっている
: Eg増大によるVoc上昇効果は、Jsc減少効果よりも効率向上に効果的。
- **薄いセルの方が効率が高い**
: 表面再結合よりも、**バルク再結合が損失が大き**く、効率を決める。
- **キャリア寿命は、効率を決めるベースとなる**
: tauが大きくなると、Vocは確実に上昇し、効率を向上させる。
: バルク品質(tau)の向上は、効率向上のために避けて通れない。
- **表面再結合は、Si richセルで顕著にVocを下げ、効率を小さくする**
- **光閉じ込めは、Si richセルで顕著にJscを増やし、効率向上に寄与**
: 90%以上の光閉じ込めで効果が顕著となるが、Ge richセルでは目立たなくなる
- **Ge richセルでは、5 μm 厚程度で十分な動作特性が得られる**

まとめ

1. サンドブラストを利用した表面テクスチャー形成技術
 - ・固定砥粒方式でスライスした多結晶基板への適用
 - ・片面エッチングの実現
2. 次世代結晶シリコン太陽電池コンソーシアム
 - ・高効率、低コスト、高歩留まり薄型結晶シリコン太陽電池のセル・モジュール技術の研究開発
 - ・2012－2014年度に実施
3. 結晶SiGe薄膜太陽電池
 - ・高品質結晶SiGe薄膜形成技術：組成傾斜バッファ層による貫通転位密度低減
 - ・ヘテロ接合形成技術：InGaP形成
 - ・セル動作解析：結晶SiGe薄膜の高品質化が最重要、薄型セルの妥当性