

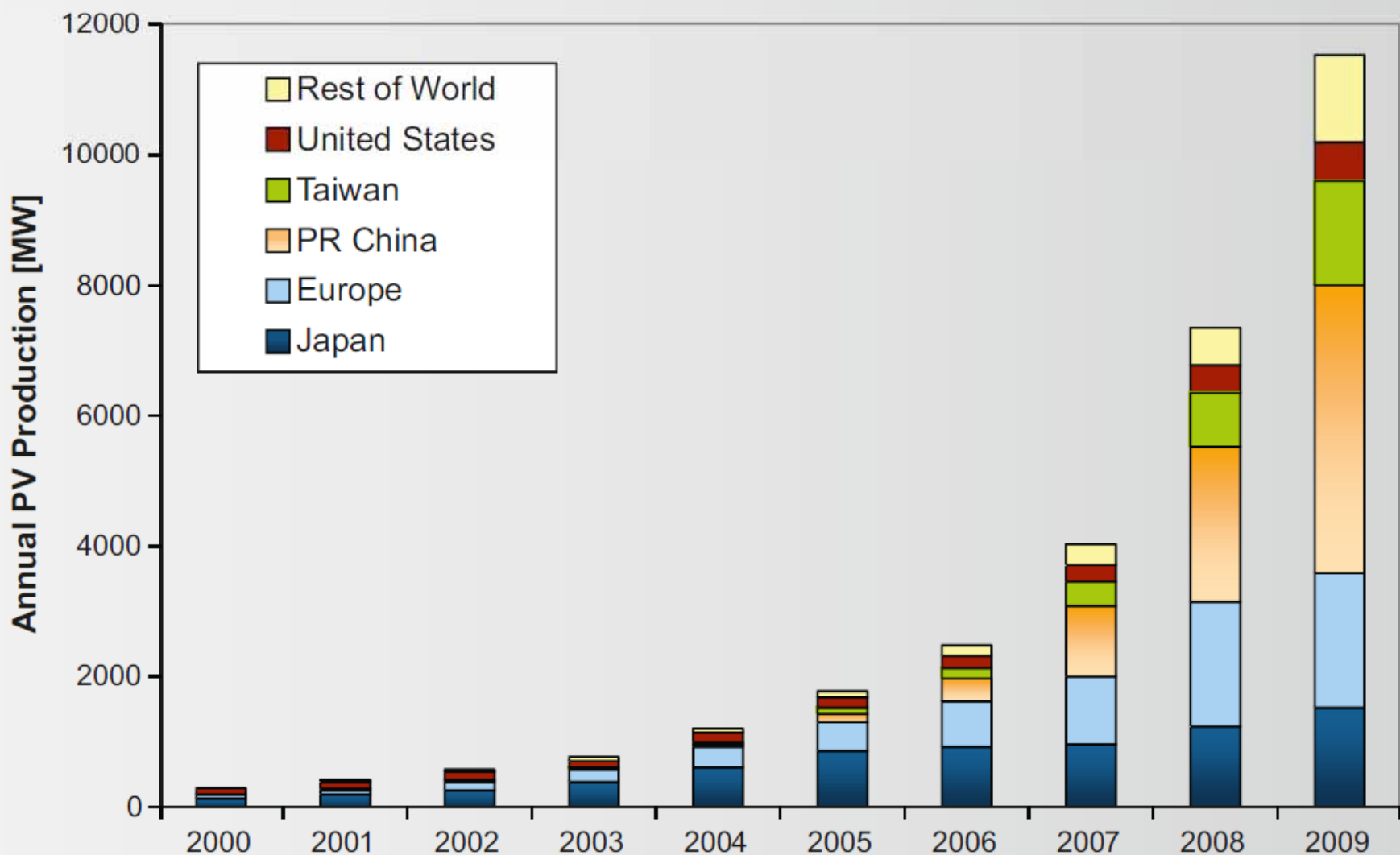
太陽電池の研究開発における 先端計測分析技術・機器開発の必要性

東京工業大学
大学院理工学研究科 電子物理工学専攻

教授 小長井 誠



世界の太陽電池生産量の年次推移



世界の太陽電池製造設備の今後の展開

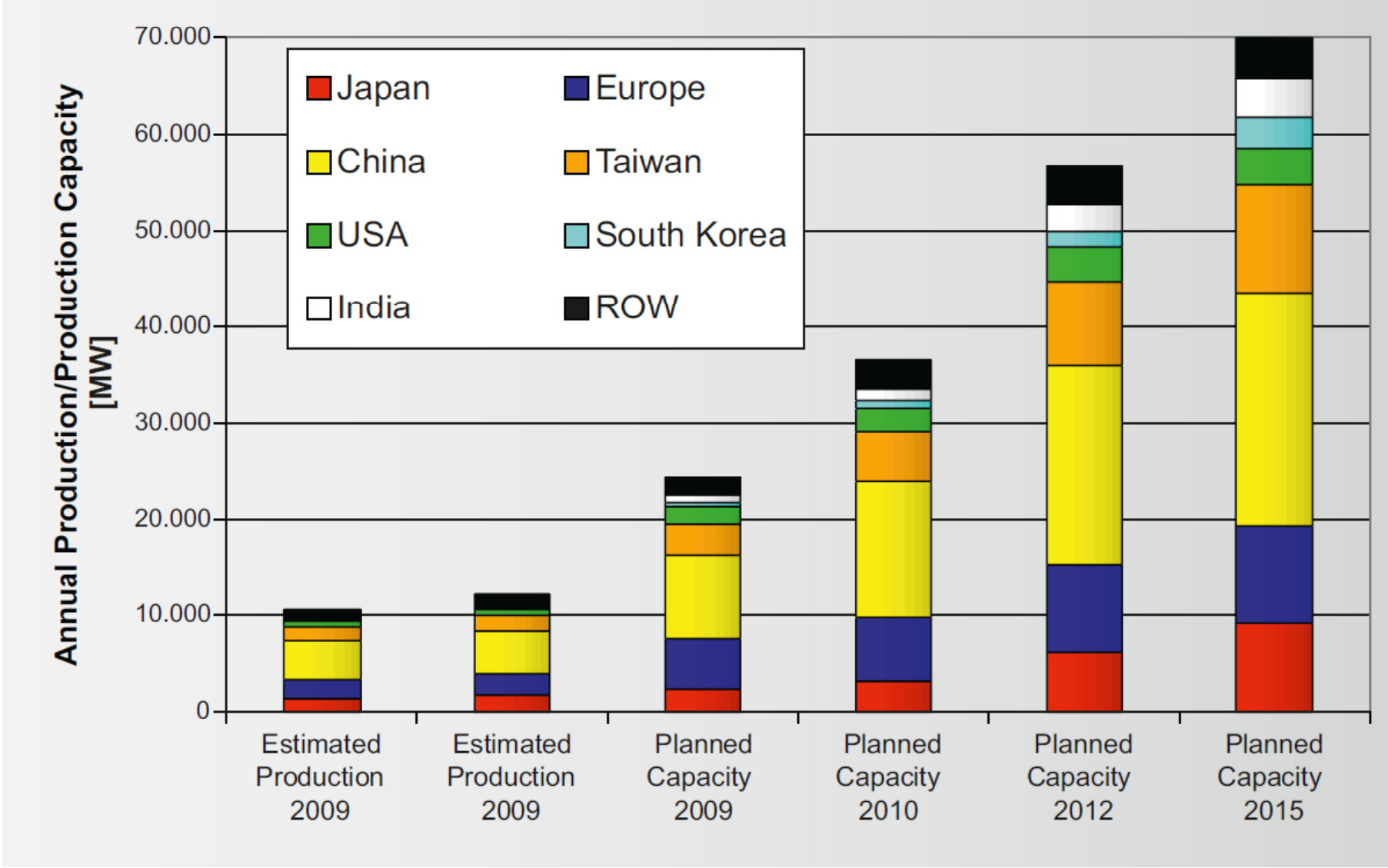
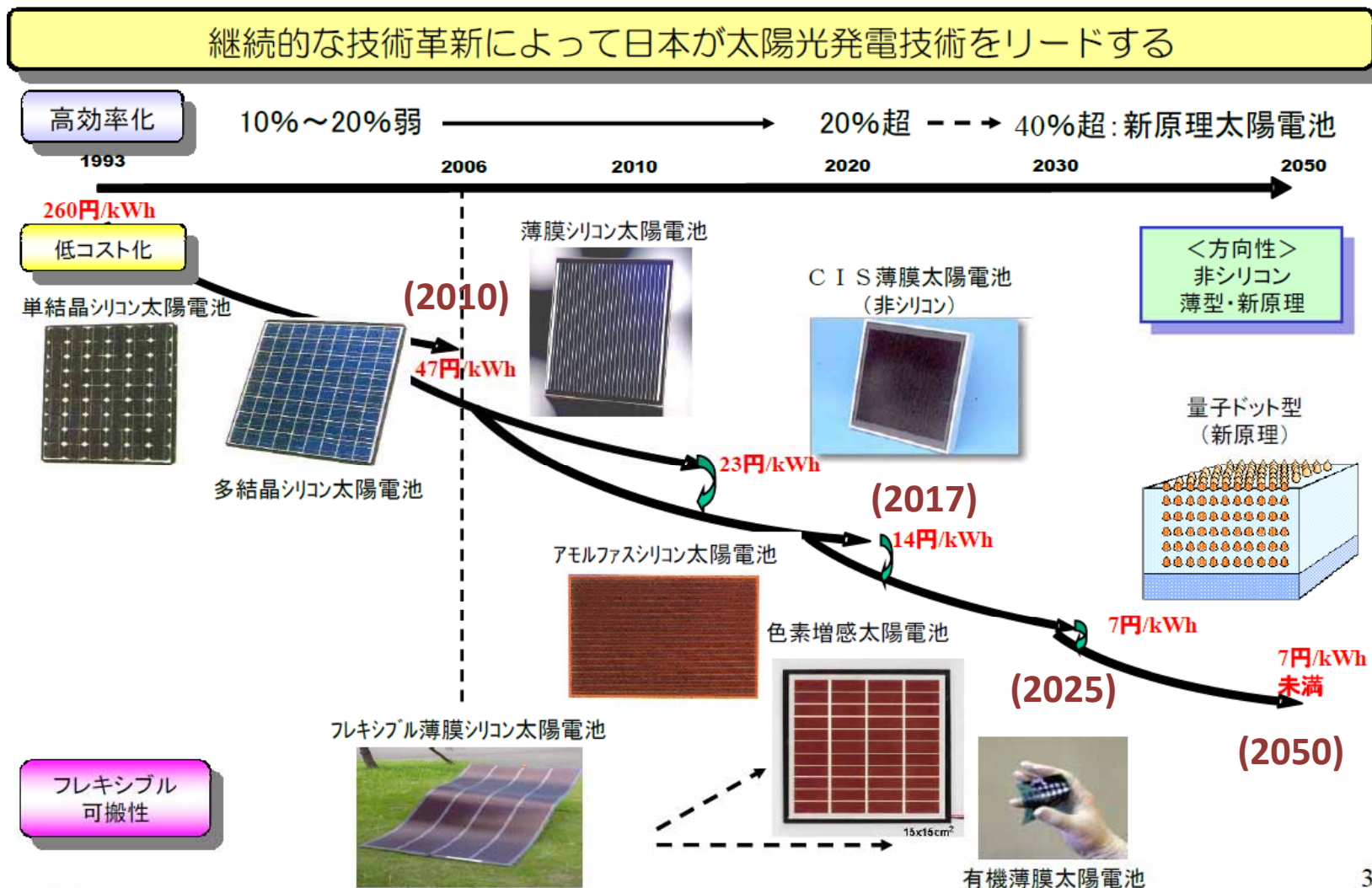


Fig. 6: World-wide PV Production 2009 with future planned production capacity increases

太陽光発電技術開発ロードマップPV2030+

2050年に向けた太陽光発電のイノベーションの展望



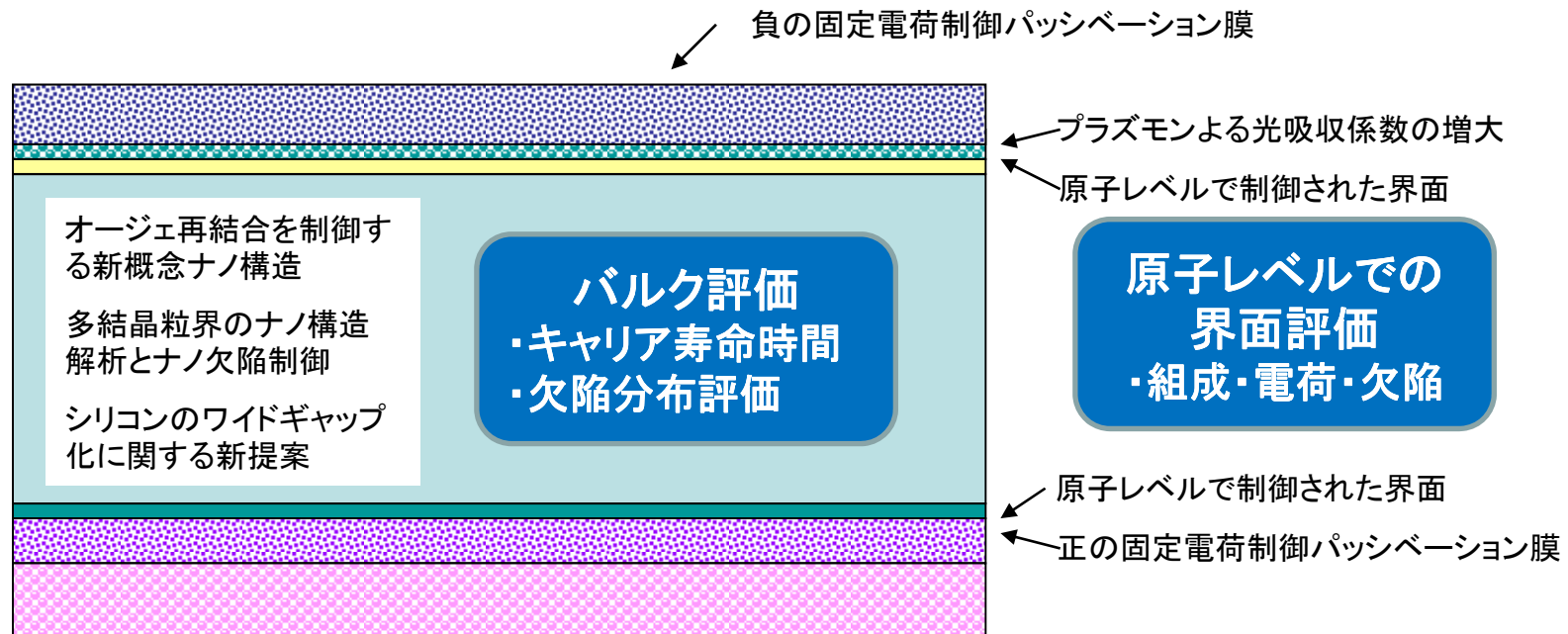
資料協力: NEDO

シリコン太陽電池のナノ界面・表面サイエンス

研究課題と評価すべき項目

研究課題:

- 厚さが50 μm 以下のシリコン太陽電池でエネルギー変換効率25%以上を達成するため、**ナノ界面・ナノ表面構造を徹底的に追及**に、再結合速度1cm/s台の究極的な界面・表面技術の基盤を確立する。
- バルク再結合を支配している要因を極限まで減少させる基礎基盤を確立する。
 - ・オージェ再結合を制御可能なナノ構造の提案・原理の探索
 - ・多結晶粒界のナノ構造解析と、ナノ欠陥制御
- ナノ・フォトニック結晶の概念を用いた光閉じ込め構造や、プラズモンなどの新概念を利用した光マネジメント基盤技術を確立する。
- ナノ構造を利用したシリコンの禁制帯幅の制御(ワイドギャップ化)法の探索**

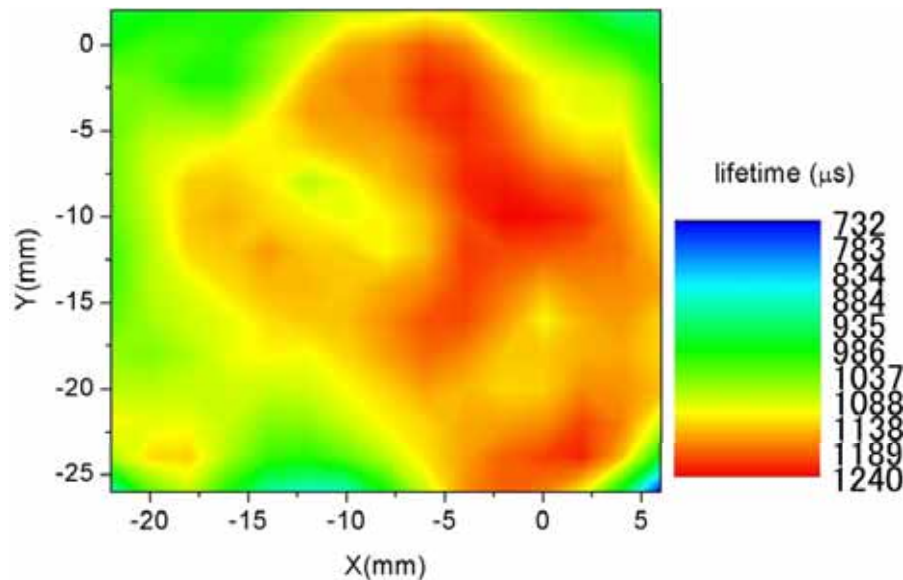


ナノ・フォトニック結晶の概念を取り込んだ光閉じ込め

産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に 開発を期待する技術・機器又は開発領域案

マイクロ波光導電減衰法測定装置

パルス状に入射したレーザー光によって生成された光をマイクロ波で減衰曲線を検出することで少数キャリアのライフタイムを測定する。



AlO_x:H膜をパッシベーション膜として
用いたSi基板のライフタイム分布



現状のマイクロ波光導電減衰法測定装置

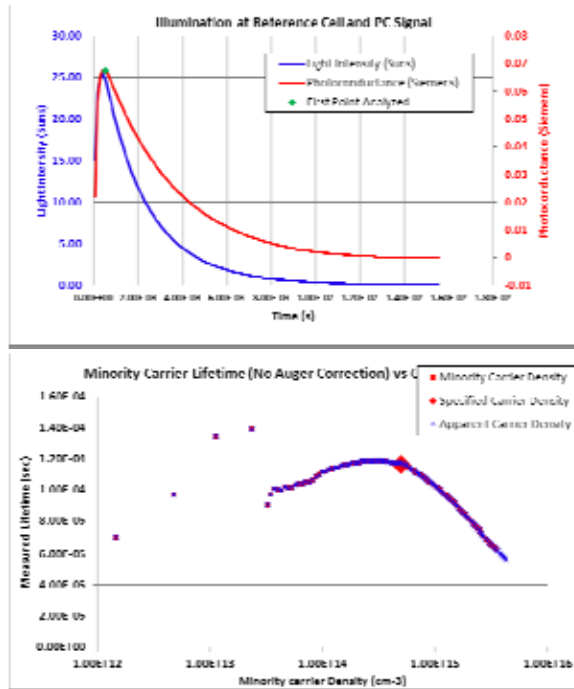
評価装置開発課題:

波長可変による表面再結合速度の直接測定することが可能になれば、異なる濃度・厚さをを用いた基板でも容易に比較ができる。また、照射強度の連続変化で、照射強度依存性を測定することが可能になれば、p-n接合における再結合の評価も可能となる。これにより、大幅な効率向上への指針が得られる。

産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に 開発を期待する技術・機器又は開発領域案

擬定常状態光伝導度測定装置 (QSSPC)

照射光を減衰させながら電気伝導度の時間依存性を測り、ライフタイムの注入量依存性を求める。これにより、p-n接合の評価も可能である。



QSSPC測定データ

上: 減衰曲線

下: ライフタイムの注入量依存性

現状のQSSPC測定装置

右: 測定台(フラッシュランプ+誘導結合コイル)

左: 制御用パソコン

評価装置開発課題:

二次元マッピングができるようになれば、面内のライフタイムの分布を瞬時に測定できるようになる。性能向上のための研究開発、ならびに製造工程での評価に利用。

産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に
開発を期待する技術・機器又は開発領域案

光第二次高調波によるパッシベーション膜内部の電界分布の評価

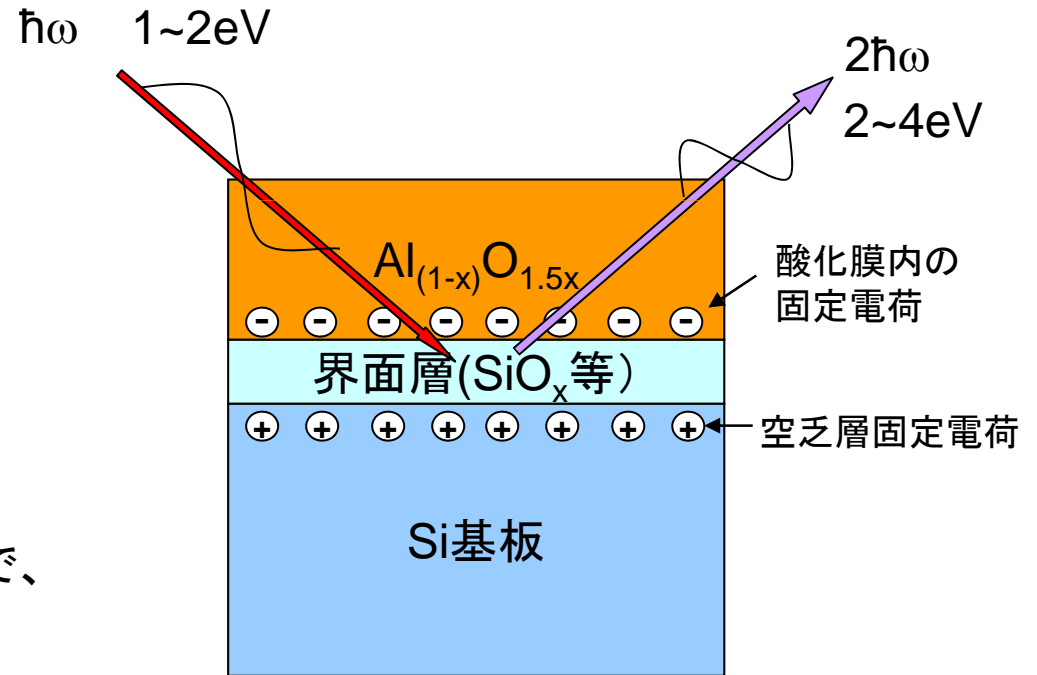
評価装置開発の現状： まだ製品化されていない。

利点：

- ・非接触・非破壊測定
- ・内部電界に非常に敏感
- ・特にSiは中心対称構造のため、
表面の電気双極子に対して敏感



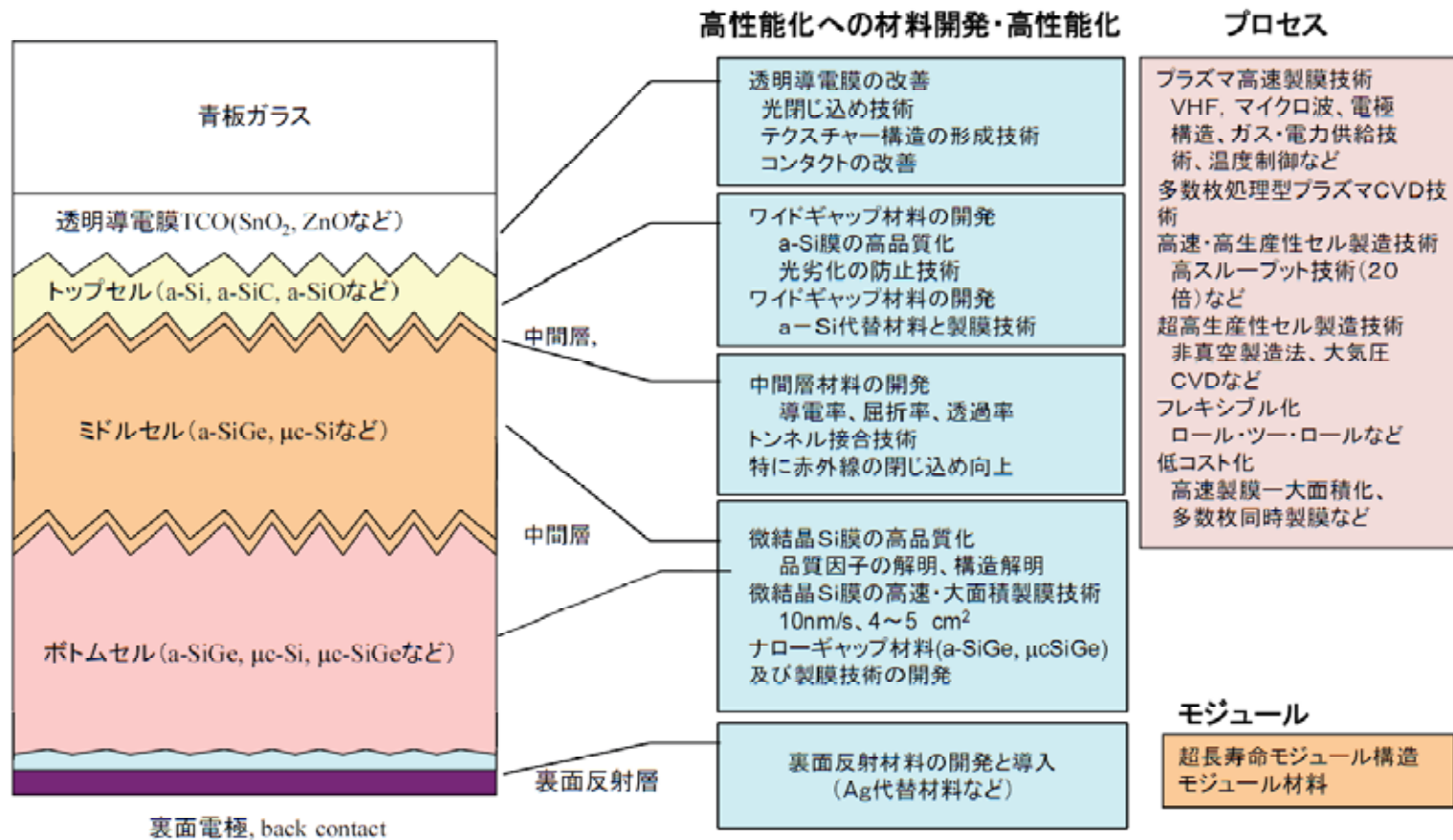
- ・電場誘起第二次高調波(EFISH)の
強度や時間依存性などを調べることで、
内部に埋もれている酸化膜/Si界面の
情報を得ることができる。
- ・Si太陽電池の大幅な性能向上に直結



解析可能なパラメータの例

- ・界面の固定電荷密度
- ・酸化膜あるいは酸化膜/界面層のトラップ密度
- ・その場観察による成長初期層の構造変化

Si系薄膜太陽電池セル/モジュールの変換効率を飛躍的に向上させるための課題と先端計測装置



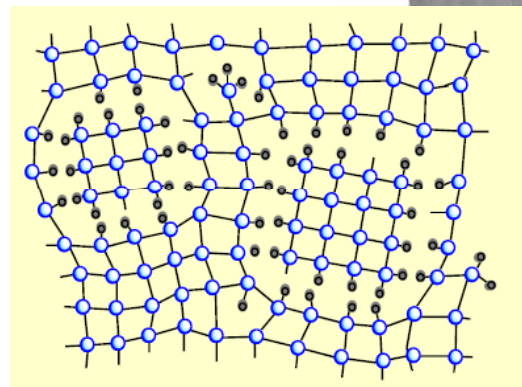
アモルファス・微結晶Siの評価

- ・結晶化率(ナノレベル)
- ・ギャップ準位(吸収係数 $10^{-1}/\text{cm}$ レベル)
- ・ナノレベルの粒界の電気的性質

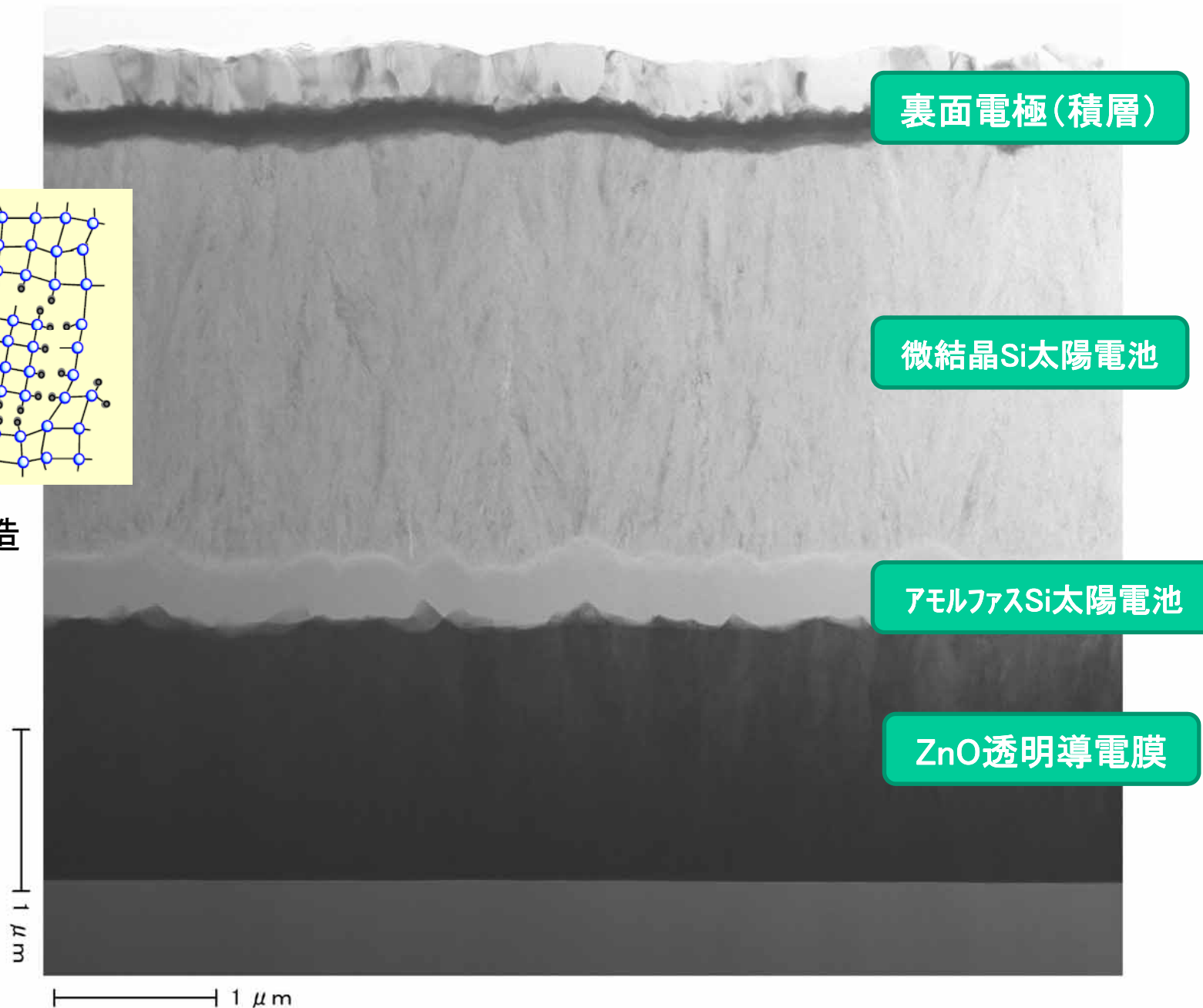
大面積ガラス(5m²)基板上での分布評価

- ・分光エリプソによる屈折率、膜厚分布
- ・ラマン散乱による結晶化率分布

ZnO/a-Si/ μ c-Si /ZnO/Ag/Al タンデム太陽電池の断面透過電子顕微鏡像



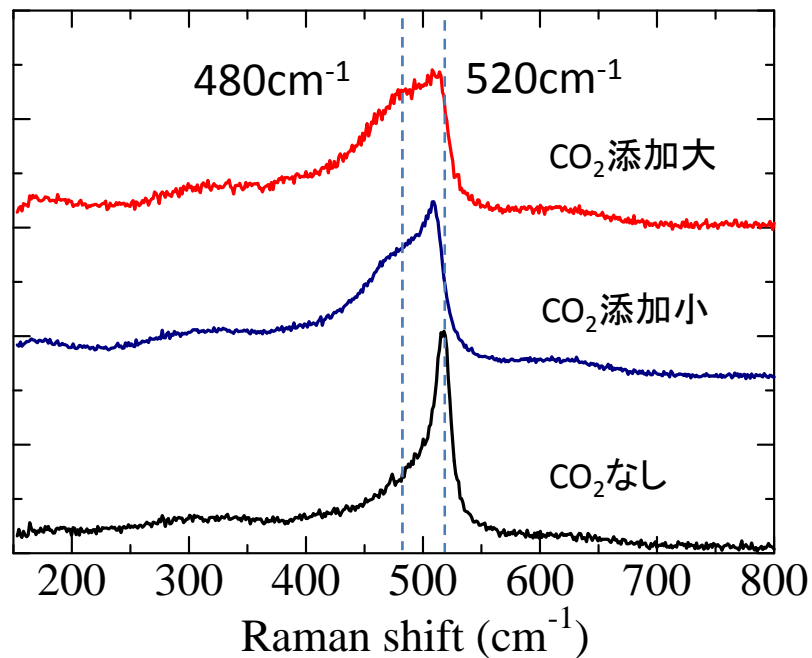
微結晶Siの構造



産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に
開発を期待する技術・機器又は開発領域案

ラマン散乱分光測定装置

520 cm^{-1} (結晶層におけるSi-Si結合によるピーク)と480 cm^{-1} (アモルファス層によるピーク)によるピーク比からSi薄膜の結晶性を知ることができる。



微結晶SiO_xのRaman散乱スペクトル



Raman散乱分光測定装置

(左)測定装置(レーザー+分光器)

(右)制御用パソコン

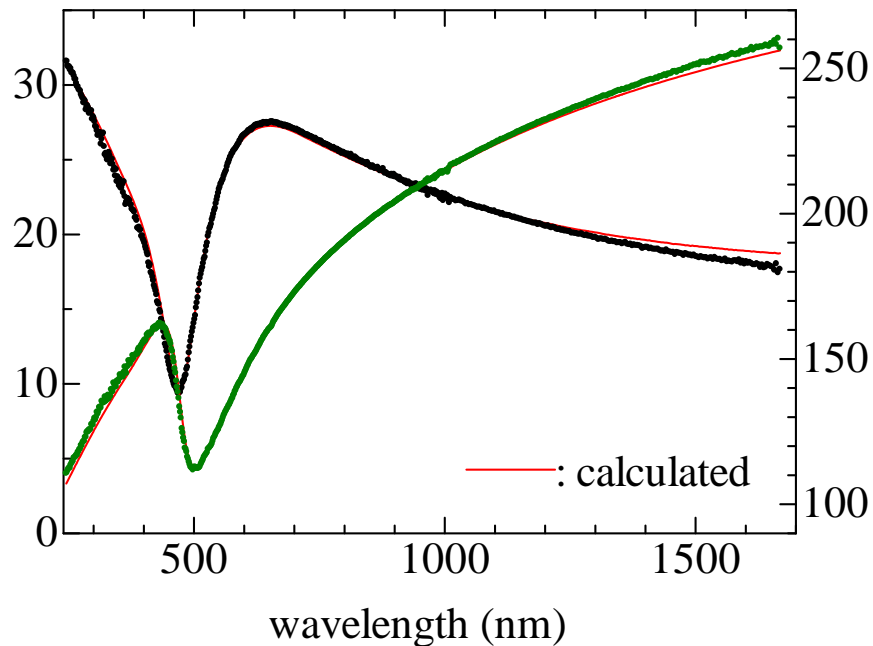
評価装置開発課題:

波長連続可変機構を導入し、吸収係数の差を利用した深さ方向のマッピングが可能になれば、微結晶Siの結晶化度が成長方向にどのように変化するか、という知見が得られる。

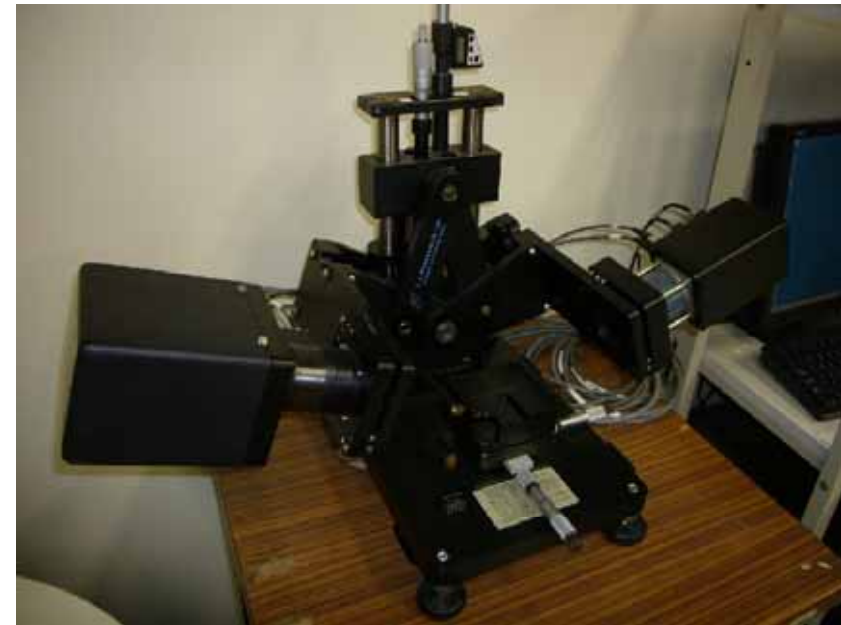
産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に
開発を期待する技術・機器又は開発領域案

分光エリプソメトリー測定装置

位相差を検出し、それを光学モデルを用いた計算と組み合わせることで、膜厚および薄膜の n, k を算出することができる。



a-Siの分光エリプソメトリー測定および
モデルフィッティング結果



分光エリプソメトリー
(左)測定装置(レーザー+位相検出器)
(右)制御用パソコン

評価装置開発課題:

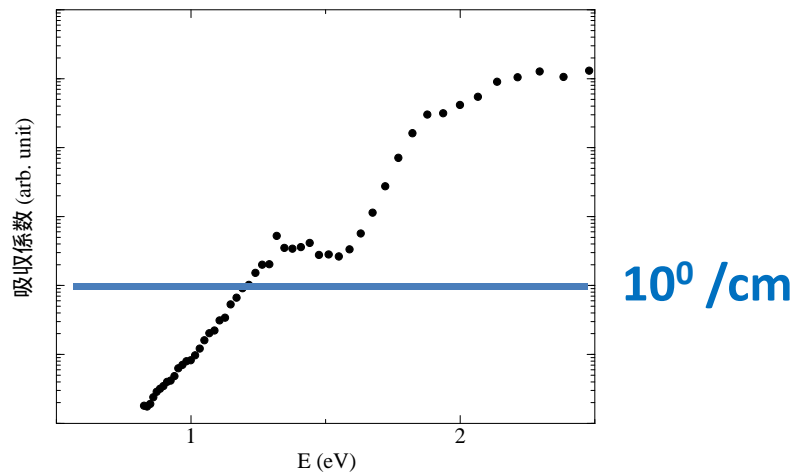
a-Siなどの薄膜太陽電池モジュールなどの大面積における2次元マッピング機能を高速に備えることで、薄膜の均一性などを即時に得ることができるようになる。

産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に 開発を期待する技術・機器又は開発領域案

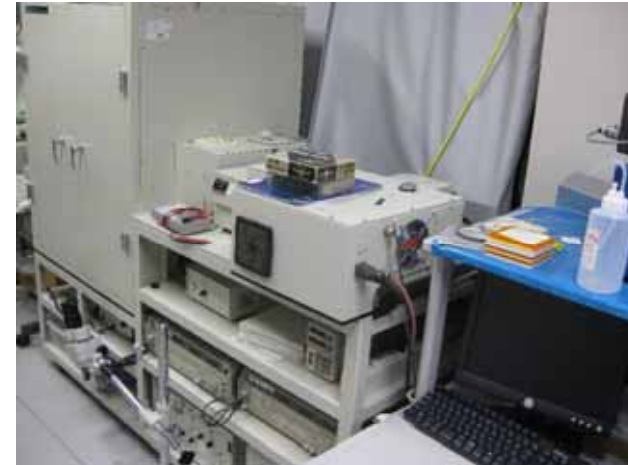
一定光電流法/光熱偏向分光法測定装置(CPM/PDS)

CPM: 光電流を一定になるように光量を調節することで薄い膜においてもサブギャップ内の弱い吸収を測定することが可能となる。これにより、試料の欠陥密度を見積ることができる。

PDS: 試料を媒質内に挿入した状態で、試料がサブギャップ内での光吸収を起こすと最終的に熱に変化し、その熱により媒質の屈折率が変化する。それを通過するレーザ光の偏向量を測定することで高感度に光吸収係数を測定する方法である。



CPM測定結果



現状のCPM・PDS法測定装置

左: 測定用ボックス

中央: 分光器

右: 制御用パソコン

評価装置開発課題:

PDSの測定には、温度に対する屈折率の変化の大きい CCl_4 と言った媒質を用いるが、発がん性が指摘される物質であることから近年は使用が控えられている。 CCl_4 と同じような温度に対する屈折率変化の大きい媒質であり、人体に比較的安全な物質の確保が必要である。

高信頼性に関して

産総研メガソーラ

国産品・輸入品モジュールの故障率

5年間に2%の太陽電池パネルが故障

輸入品の故障率は 3.4%

国産品の故障率は 1.3% 0.5%

(A社製特定ロットを除くと0.5%)

{ 例外 A社製の特定ロット、解決済み }

$\frac{\text{輸入品の故障率}}{\text{国産品の故障率}} = 1/3 \sim 1/7$

現状,

圧倒的に国産品が優位

高効率化と高信頼性により
更なる優位性を確保するために

資料提供:AIST 近藤道雄センター長

薄膜太陽電池・多結晶Siの
高効率化、高信頼性
に向けた指針

問題点

- (1) 接合特性の不均一性評価
- (2) 粒界の特性の不均一性評価
(粒界領域の不動態化の評価)
- (3) p, i, n, および中間層の膜質の不均一性評価
- (4) TCO/p(n), p(n)/中間層界面のオーミック性

SPMによるナノメータ分解能を有する
光起電力特性評価装置の開発

現在、微結晶Siの粒界の電気的特性がマイクロメータ程度の精度で計測できる。今後、ナノメータのレベルまで測定できる機器が開発されれば微結晶Si太陽電池に要求されるナノメータサイズでの膜質改善と高信頼性が実現できる。

光起電力顕微鏡の開発

導電性SPMを用いた光起電力顕微鏡を
駆使して*高性能化*高信頼性を実現する。

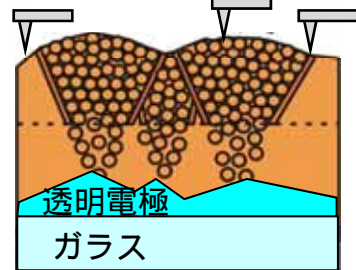
欧米やアジア勢との差別化

薄膜Si太陽電池研究開発の課題と、望まれる評価技術開発

- ① a-Si:H太陽電池のナノ領域光起電力特性評価技術の開発と性能劣化原因の探索法の確立
- ② $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池のナノ領域光起電力特性評価技術の開発と性能劣化原因の探索法の確立
- ③ a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ タンデム太陽電池モジュール評価技術の開発と性能劣化原因の探索法の確立

課題

a-Si 領域の電気伝導
ナノ結晶Si領域の電気伝導
粒界の電気伝導

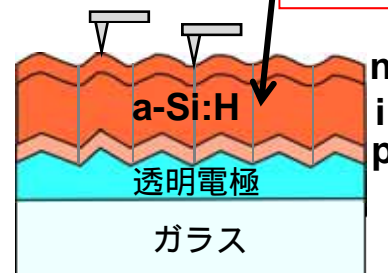


A. Fejfar教授より

課題

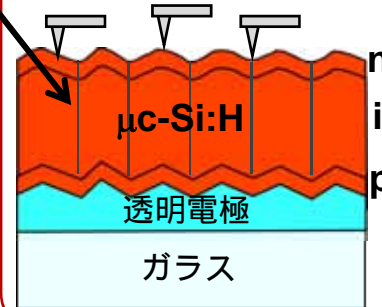
- * i 層の膜質・膜厚不均一性
- * p, n 層の膜厚不均一性
- * 透明電極モフォロジーによる欠陥発生領域の検出
- * 長期使用による劣化原因となる欠陥発生領域の検出

粒界



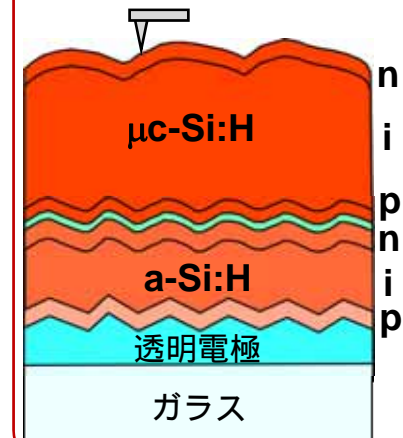
課題

- * p, n 層の膜質・膜厚不均一性
- * i 層の膜質・膜厚不均一性
- * ナノ結晶Si領域の発電特性
- * 粒界領域の発電特性
- * 透明電極モフォロジーによる欠陥発生領域の検出
- * 長期使用による性能劣化原因となる欠陥発生領域の検出



課題

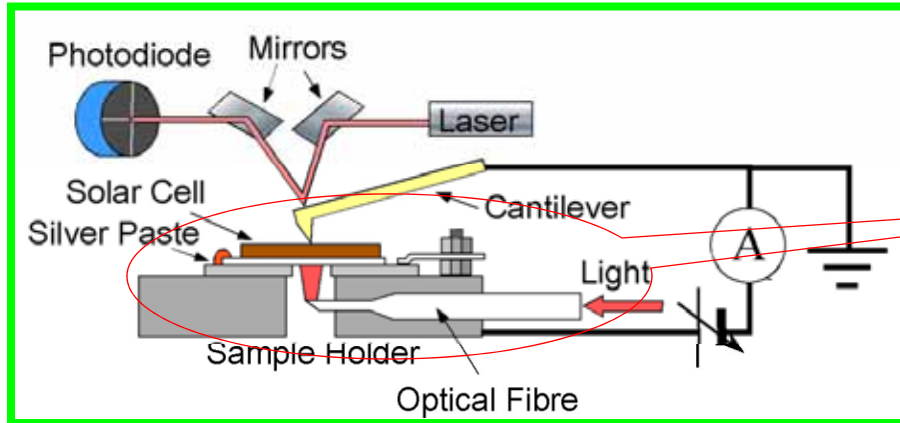
- * タンデム化に伴う特性不均一性
- * モジュール評価手法の開発



産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】に
開発を期待する技術・機器又は開発領域案

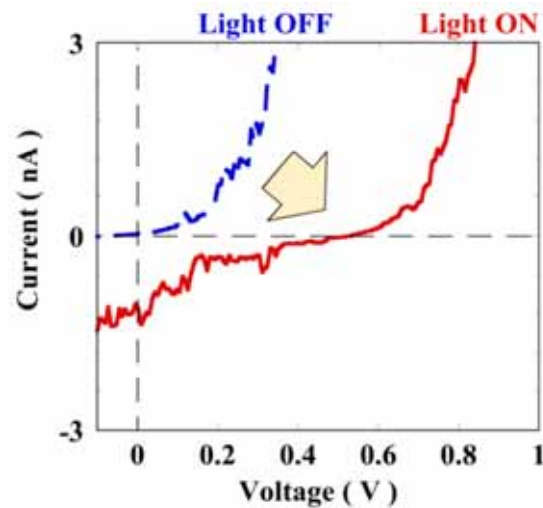
岐阜大、野々村教授

走査型原子間力顕微鏡を用いた光起電力(光照射 I-V)特性 評価手法

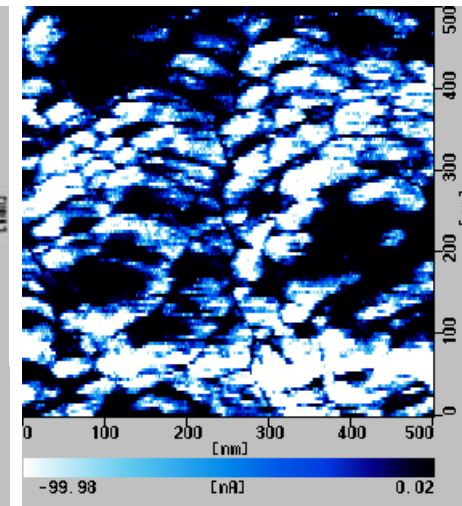
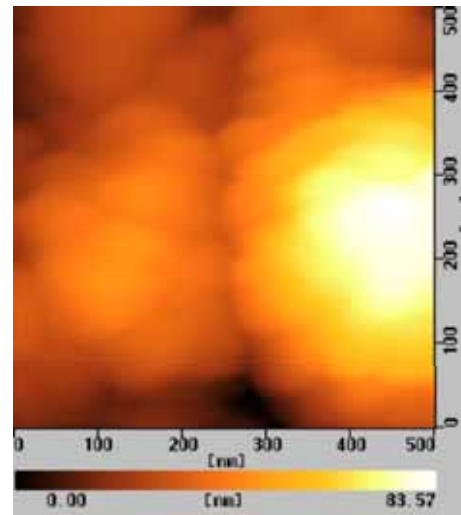


走査型原子間力顕微鏡の試料ホルダー
光ファイバーにより太陽電池への光照射
を可能としている。

走査型原子間力顕微鏡(Conductive-AFM)を用いた薄膜Si太陽電池の
光起電力(光照射 I-V)特性評価装置の概要。



ナノ領域 I-V 特性。青色のデータは光照射
無し、赤色のデータは光照射あり。



アモルファスSi太陽電池の表面トポロジー(凹凸)像[左図]。光照射時のナノ
領域光起電力による光電流分布図。 - 2Vの電圧を印可した光電流の分布図。

Submitted to Current Applied Physics.
19th PVSEC, Korea, Nov. 9-13, 2009, Poster presentation ASI-P3-57(Poster Award),