

薄型結晶シリコン太陽電池の光閉じ込めに関する検討

齋 均

産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 先進プロセスチーム

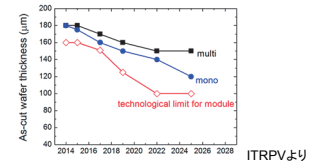
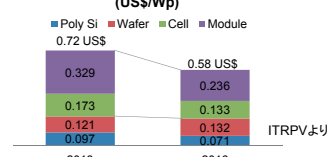
研究の目的

太陽光発電の更なる普及には、発電コストの更なる低減が必要である。太陽光発電の主たるデバイスである結晶シリコン太陽電池の発電コスト低減には、発電効率の向上を通じた部材コストや、材料費で大きな割合を占めるシリコン基板(ウェハー)コストの低減が必要とされる。

シリコンウェハーコストの低減には、結晶インゴット一本当たりから取れるウェハー枚数を増やす必要があり、ウェハー薄型化およびカーフロス低減が有効である。しかし、ウェハーの薄型化は発電効率および製造プロセスに大きな影響を与える。本研究では、将来想定される基板厚100 μm以下のウェハーを念頭に、ウェハー薄型化に伴って顕在化する課題である光閉じ込めに関し、基礎的な検討を行った。

結晶シリコン太陽電池のコストとウェハー厚の開発動向

C-Si module price break down (US\$/Wp)



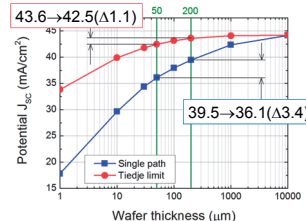
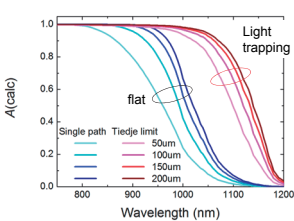
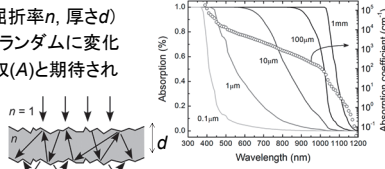
- モジュールコストに占める基板コスト
- 単結晶シリコン基板 (mono-Si) は厚さ 100 μm 以下へ

薄型結晶シリコンにおける光閉じ込め - 理想的な場合

< Lambertian limit >

- 誘電体スラブ (光吸収係数 α , 屈折率 n , 厚さ d)
- ランバート面: 光の進行方向がランダムに変化
- Tiedjeモデル[1]に基づき光吸収(A)と期待される短絡電流密度(J_{sc})を計算

$$A = \frac{\alpha}{\alpha + \frac{1}{4n^2d}} \text{ when } \alpha d \ll 1$$



Potential J_{sc} (mA/cm²)

Wafer thickness	200 μm	100 μm	50 μm
Single path	39.45	37.95	36.11 (-8.5%)
Tiedje limit	43.61	43.14	42.45 (-1.6%)
Δ	-4.16	-5.19	-6.34

- 光閉じ込めで光吸収・ J_{sc} とも増大
- ウェハー厚を200 μmから50 μmに薄型しても、光閉じ込めにより J_{sc} 低下量を1.6%に低減可能 (43.6→42.5 mA/cm²)

ウェハー厚と発電効率 - 計算

簡易1次元モデル(PC1D)にて、光閉じ込め効果と表面再結合速度の影響を解析

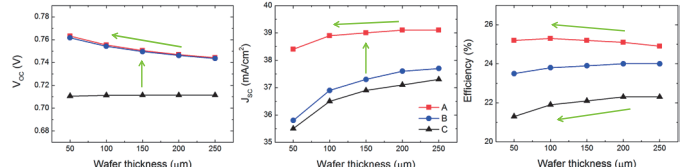
< 固定パラメータ >

- base : n型 3Ωcm
- バルクライフタイム 10 msec
- ピラミッドテクスチャ
- 反射防止膜あり

< 可変パラメータ >

- ウェハー厚さ : 50 - 250 μm
- 内部反射率 R_{int} : 50% or 95%
- 表面再結合速度 SRV: 10 or 1000 cm/s

	A	B	C
光閉じ込め (内部反射率 R_{int})	Good (95%)	Bad (50%)	Bad (50%)
表面パッシベーション (SRV(cm/s))	Good (10)	Good (10)	Bad (1000)



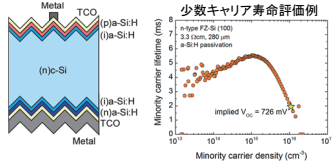
- SRV低減により V_{oc} 顕著に増大。ウェハー薄型化で V_{oc} が更に向上。
- 内部反射率向上により J_{sc} 増大。同時にウェハー薄型化による J_{sc} 低下も緩和。
- 効率: 上記二つの相乗効果により、ウェハーを50 μm程度にまで薄型化しても、発電効率の維持・向上が可能。

光閉じ込め + 表面パッシベーション

実験的検討① - 薄型a-Si:H/c-Siヘテロ接合セル

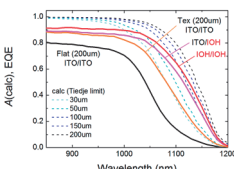
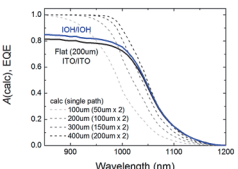
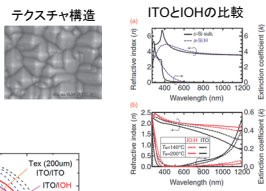
< a-Si:H/c-Siヘテロ接合セル >

- 優れた表面パッシベーション
 - 低温プロセス
 - 裏面対称構造が可能
 - 高い発電効率
- ➡ 薄型セルに好適



< デバイスによる光閉じ込め評価 >

- n-type CZ, $t \sim 200 \mu\text{m}$
- Flat or Textured (alkali)
- (i)(p)(n)a-Si:H by PECVD
- $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) or $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ (IOH)[2] by RF-SP
- Full-area rear Ag electrode by DC-SP

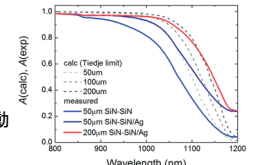


- ミラー基板: 理論計算と良く一致し、TCOによる差異無し。
- テクスチャ基板: TCOの高透明化によりLambertian limitに近く。表裏のウェハー厚さ: 30 μm (ITO) → 150 μm (IOH) ($J_{sc} = 40.3 \text{ mA/cm}^2$)

実験的検討② - 極薄ウェハーでの光吸収

< $\text{SiN}_x/\text{c-Si}/\text{SiN}_x$ 積層構造の光吸収評価 >

- Alkali-textured Si, $t \sim 50 \text{ \& 200 } \mu\text{m}$
- SiN_x 膜: 吸収損失の無いTCOを模擬
- Full-area rear Ag coating



- 裏面反射構造があれば、Lambertianに近い挙動を示すことを確認。→ 光閉じ込めが有効に作用

結論

- 将来のウェハー薄型化を念頭に結晶シリコン太陽電池の光閉じ込め効果を検証。
- 良好な光閉じ込めが実現できればウェハー厚50 μm程度まで効率を維持可能。
- a-Si:H/c-Siヘテロ接合型セルおよびセル模擬構造にて薄型セルを実験的に検証。テクスチャによる光散乱、光吸収損失低減、裏面反射、の重要性を確認

参考文献

- [1] T. Tiedje et al., IEEE Trans. ED **31**, 711 (1984).
- [2] T. Koida et al., APEX **1** 041501 (2008)

謝辞



NEDO関係各位に感謝致します。