

太陽電池応用へ向けた液相結晶化シリコン薄膜の電気特性向上に関する検討

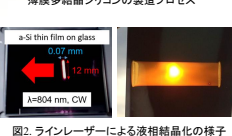
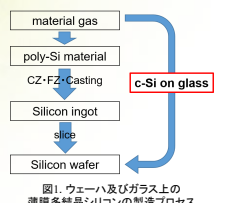
海汐 寛史¹, 松井 卓矢¹, 齋 均¹, 櫻井 岳暁², 松原 浩司¹

¹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, ²筑波大学

研究の目的

● 研究背景

結晶シリコン太陽電池の更なる発電コスト低減に向け、高効率化及び材料コスト削減が求められている。材料コスト削減には、シリコン基板の薄型化が有効だが、割れによる製造歩留まりの低下が懸念される。本研究では、抜本的な低コスト化を目指して、ガラス基板上に堆積したアモルファスシリコンを高強度のラインレーザー照射により瞬時溶融・再結晶化させる液相結晶化法 (Liquid Phase Crystallization: LPC) に着目した。本手法を用いれば、結晶性の高い大粒径の多結晶シリコン薄膜を頑強なガラス基板上に直接形成できるため、割れの問題を回避した上で、さらに、製造プロセスの大幅な簡略化により製造コスト低減が可能となる。近年では650 mVを超える V_{OC} が報告されるなど特性向上が進んでおり、注目を集めている。



● 本実験の目的

液相結晶化シリコン薄膜 (LPC-Si) 太陽電池は、依然、変換効率でウェーハベースの太陽電池に大きく劣り (表1)、改善が必要。

改善の指標を得る上で、LPC-Siの粒径及び粒内の欠陥密度の変化が電気特性 (キャリア移動度・ライフタイム) に与える影響の評価が不十分。

LPCプロセスにおけるレーザーのスキャン速度を粒径及び粒内欠陥を変化させるパラメータとし、結晶粒を変化させた際の電気特性や太陽電池特性に関して詳細を調査した。

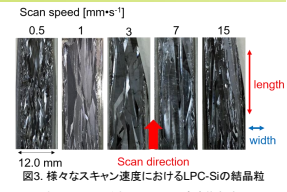
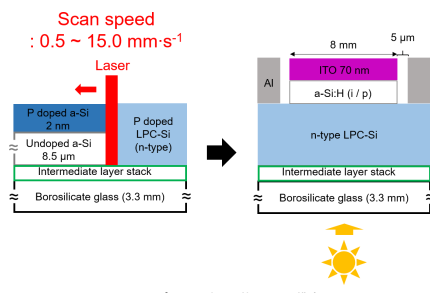
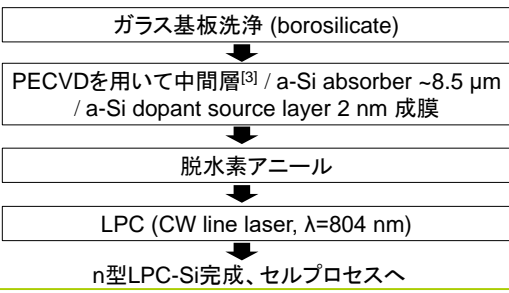


表1 シリコン系太陽電池の最高変換効率

	Efficiency [%]	J_{SC} [mA/cm ²]	V_{OC} [mV]	FF [%]
単結晶[1]	26.7	42.65	738	84.9
多結晶[2]	22.3	41.08	674	80.5
LPC [3]	14.2	29.0	654	75.0
SPC [4]	10.5	29.7	492	72.1
μc-Si [5]	11.9	28.74	550	75.0
a-Si [6]	10.2	16.36	896	69.8

実験

● 液相結晶化シリコン薄膜 (LPC-Si) 形成法

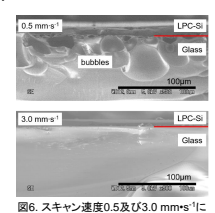
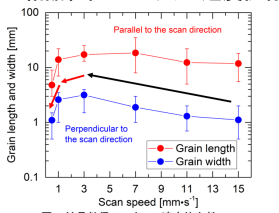


● 評価内容

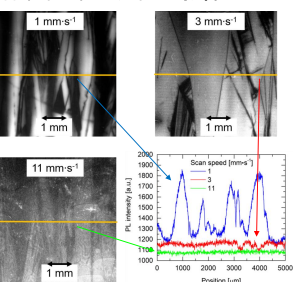
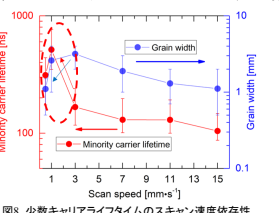
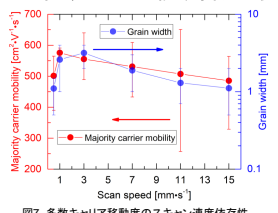
- <LPC-Si膜>
 - ドープ濃度 : SIMS
 - 多数キャリア移動度 : Hall測定
 - 少数キャリアライフタイム : Band-to-band photoluminescence (PL) peak decay
 - 粒内欠陥 : Band-to-band PL intensity mapping
- <セル評価>
 - 簡易構造セル : I-V, 内部量子効率 (IQE)

結果

● 結晶粒径のスキャン速度依存性



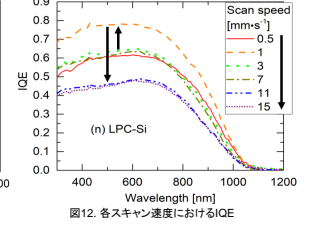
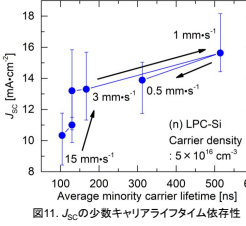
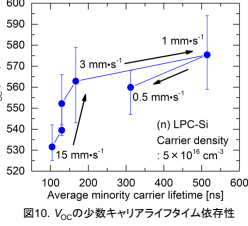
● 多数キャリア移動度及び少数キャリアライフタイムに対する結晶粒径・粒内欠陥の影響



- 結晶粒径はスキャン速度低下とともに増大する。
→ シリコンの冷却速度が減少、結晶成長時間が確保され大粒径化。
- しかし極低速 (<1 mm·s⁻¹) では結晶粒径はむしろ小さくなる。
- スキャン速度0.5 mm·s⁻¹ では、断面観察の結果、結晶化後のガラス基板中に多量の気泡と、一部で膜の変形が確認された。
→ 極端な低速化は熱伝導によるガラスの変質を招き結晶成長を阻害。

- 結晶粒径の変化にともなって多数キャリア移動度が増減する。
→ 粒界散乱がキャリアの移動に大きく影響している。
- スキャン速度が3 mm·s⁻¹を下回ると、結晶粒径は減少するにもかかわらず少数キャリアライフタイムが大きく増加する。
- PL強度マッピングの結果から、PL強度の最大値および平均値は、スキャン速度の減少と共に増大する。
→ スキャン速度の低下に伴い、粒内欠陥が減少することを示唆

● LPC-Siセル特性



- 少数キャリアライフタイムの増加に伴い、 V_{OC} 、 J_{SC} ともに向上する。
 - 1 mm·s⁻¹のスキャンにおいて V_{OC} = 594 mVを得た。(ポストパッシベーション処理無しとしては、世界最高レベルの V_{OC})
 - スキャン速度の最適化でキャリア収集率が上昇
- スキャン速度を最適化することで、粒径が増大、粒内欠陥も減少した。これによりキャリア移動度及びライフタイムが増加、キャリア拡散長が改善し、結果的に太陽電池特性も改善された。

結論

- LPC-Siの結晶粒径および少数キャリア寿命は、レーザースキャン速度に強く依存する。
- 結晶粒径はレーザースキャン速度の低下と共に増大するが、極低速のスキャン (<1 mm·s⁻¹) ではむしろ減少し、ガラス基板の熱変質が影響している可能性がある。
- 多数キャリア移動度は結晶粒径と相関があり、粒界散乱がキャリア移動に影響している。
- 少数キャリアライフタイムは、スキャン速度の低下と共に向上し、必ずしも結晶粒径と対応しない。スキャン速度低下による粒内欠陥の低減が示唆される。
- 適切なスキャン速度を選択することにより、590 mV を超える高い V_{OC} 及び高いIQEが得られ、少数キャリア拡散長の改善を確認した。

参考文献

- [1] K. Yoshikawa et al., Sol. Energy Mater. and Sol. Cells **173**, 37 (2017).
- [2] J. Benick et al., IEEE J. Photovoltaics **7**, 1171 (2017).
- [3] C. T. Trinh et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **174**, 187 (2018).
- [4] M. A. Green, Appl. Phys. A **96**, 153 (2009).
- [5] H. Sai et al., Appl. Phys. Express **11**, 022301 (2018).
- [6] T. Matsui et al., Appl. Phys. Lett. **106**, 053901 (2015).

謝辞

この研究はNEDO委託のもと行っております。また、Helmholtz-Zentrum Berlin及び株式会社アイテスより研究協力を賜りました。関係者の皆様に感謝致します。