

VHF-PECVDを用いて成膜したp型ナノ結晶シリコンのヘテロ接合太陽電池への応用

海汐 寛史・松井 卓矢・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

シリコンヘテロ接合(SHJ)太陽電池の高効率化に向け、a-Si:H窓層の光学的な吸収ロスの低減が課題の一つであるが、その手法としてナノ結晶シリコン(nc-Si:H)の利用が挙げられる[1]。nc-Si:Hはa-Si:Hに比べ短波長領域の光吸収係数が小さいため、寄生吸収ロスを低減することが可能である。また、両面受光による発電量増加やタンデム構造を用いた高効率化にもnc-Si:Hの利用が期待されている。本研究では、SHJ太陽電池窓層への応用に向けたp型nc-Si:Hの品質化を目指し、very-high-frequency plasma-enhanced chemical-vapor-deposition (VHF-PECVD)を用いたnc-Si:H成膜について検討を行った。特に、nc-Si:H(p)膜厚を変化させることで、結晶成長過程がセル特性に及ぼす影響を調査した。

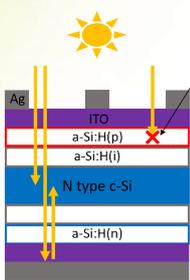


図1. SHJ太陽電池内の光吸収モード図

寄生吸収による J_{SC} 減少
 nc-Si:H(p)の利用

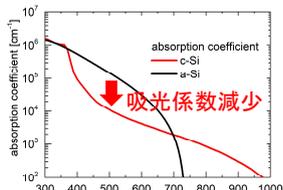


図2. 結晶シリコン[2]及びアモルファスシリコンの光吸収係数

Very-High-Frequency(VHF) PECVD [3]
 13.56 MHz (Radio-Frequency) → 65 MHz

原料ガス分解効率の向上

- 多量の水素ラジカルによるパッシベーション
- 結晶化促進、高速成膜

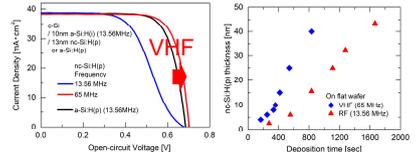


図3. RF及びVHFを用いてp型エミッタを成膜したセルの発電特性[4]

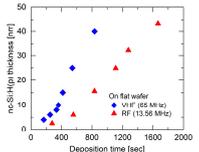


図4. nc-Si:H(p)膜厚の成膜時間依存性

実験

VHF-PECVD (65 MHz) → nc-Si:H(p) : 4 - 40 nm

RF (13.56 MHz) → a-Si:H(p)

両面電極型セル

- Double-side polished
- Textured

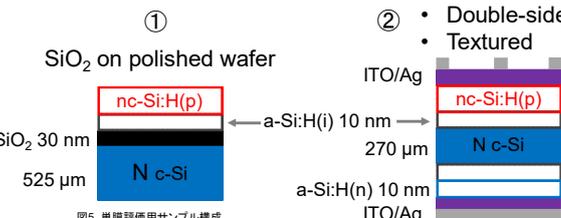


図5. 単膜評価用サンプル構成

図6. 太陽電池特性評価用サンプル構成

- 膜厚評価 (エリブソメトリ, 透過型電子顕微鏡(TEM))
- 結晶化率評価 (Raman分光法: 325 nm(UV), 532 nm laser)
- J-V特性(ソーラーシミュレータ)
- EQE
- implied V_{OC} , iFF (QSSPC)

●UV-Raman

- 325 nm laser →
- c-Si中の侵入長: ~5 nm
- 高強度のラマン散乱光

⇒ 数 nmの極薄nc-Siを評価可能

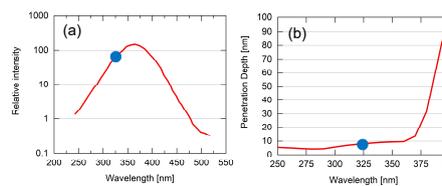


図7. c-Si(111)から放出されるラマン散乱光強度(a)及びc-Si内への光の侵入長の励起レーザー波長依存性(b)[2]

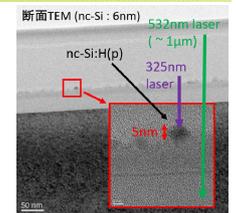


図8. nc-Si:H(p)薄膜TEM像及びレーザー侵入の模式図

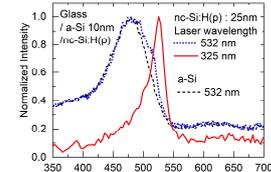


図9. 各種シリコン薄膜のラマンスペクトル

結果及び考察

1. UV-Ramanによる結晶粒解析

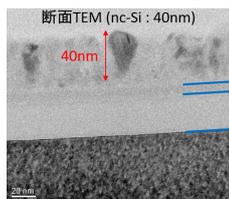


図10. 膜厚40 nmにおけるnc-Si:H(p)薄膜のTEM像

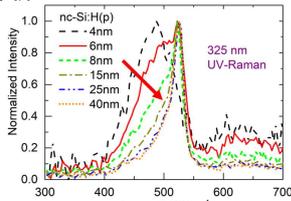
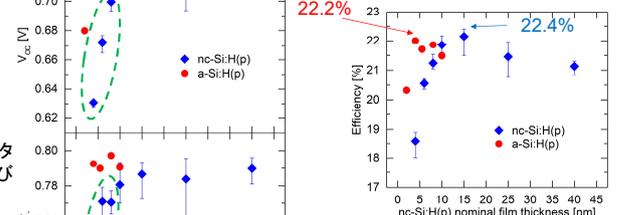
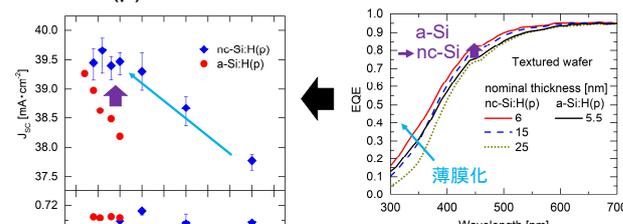


図11. 各種膜厚におけるnc-Si:H(p)薄膜のラマンスペクトル

c-Si内への紫外レーザー侵入長は5 nm程度のため、深さ方向のc-Si検出には限界が存在
 ⇒ 深さ方向の結晶成長に加え、膜面におけるc-Siの被覆率の増加を評価

2. nc-Si:H(p)エミッタセルの太陽電池特性



3. 極薄nc-Si:H(p)エミッタを用いた場合の V_{OC} 及びFFの低下

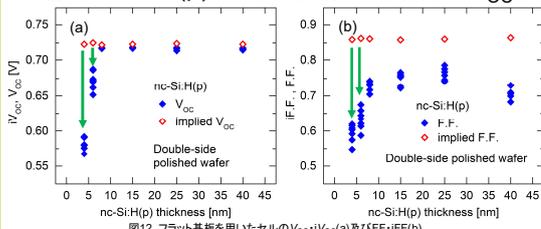


図12. フラット基板を用いたセルの V_{OC} - iV_{OC} (a)及び iFF - iFF (b)

極薄のnc-Si:H(p)エミッタを用いた場合、 V_{OC} 及びFFが大きく低下する。
 ⇒ 更なる高効率化に向け、原因の解明が必要

結論

- VHF-PECVDを用いて成膜したnc-Si:H(p)の品質化を目的とし、nc-Si:H(p)の結晶成長過程が太陽電池特性に及ぼす影響を調査した。
- VHF-PECVDを用いることで、高品質のnc-Si:Hを比較的高速で成膜可能
- nc-Si:H(p)の膜厚が厚くなる程、深さ方向の結晶成長及び結晶による膜表面の被覆率は増加すると考えられる。
- nc-Si:H(p)を用いることで短波長の寄生吸収が減少し、 J_{SC} が上昇する。
- nc-Si:H(p)エミッタで高い V_{OC} 及びFFを得るためにはa-Si:H(p)よりも厚い膜厚が必要となる。更なる高効率化のため、原因の解明が課題となっている。

参考文献

- A. N. Fioretti *et al.*, IEEE J. Photovoltaics **9**, 1158 (2019).
- M. A. Green, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **92**, 1305 (2008).
- I. A. Yunaz *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **93**, 1056 (2009).
- P.-L. Chen *et al.*, WCPEC-7, Hawaii, 2018.
- M. Yoshikawa, BUNSEKI KAGAKU **60**, 533 (2011).

謝辞

この研究はNEDO委託のもと行っております。また、パナソニック株式会社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。