

PEDOT:PSS 正孔輸送層の厚さが Si ヘテロ接合太陽電池特性に及ぼす影響

Influence of PEDOT:PSS thickness acting as hole transport layer

on electrical properties of Si heterojunction solar cells

河内 碧己 (電気電子工学科) Aoki Kawachi

高機能デバイス研究室 指導教員 相川 慎也 准教授

1. 緒言

Si は地殻で 2 番目に豊富な材料であり、それを用いた太陽電池は、長期安定性などの優れた特徴から市場で 95 % のシェアを誇る。結晶 Si 太陽電池は、大きくホモ接合型とヘテロ接合型に分けられ、ヘテロ接合型はホモ接合型に比べ幅広い材料選択が可能という特徴を持つため、高効率化と低コスト化を図る事ができる。そのため、2015 年以降、高効率な結晶 Si 太陽電池の開発は Si ヘテロ接合太陽電池(SHJSC)が大部分を占めている[1]。

近年では、接合材料として有機材料を用いる Si/有機ヘテロ接合太陽電池が注目を集めている[2]。様々な有機材料の中で PEDOT:PSS は最も開発が進んでおり、正孔輸送に適したバンドアラインメントを有することから、正孔輸送層かつ電子ブロッキング層として機能する[3]。結晶 Si/PEDOT:PSS 接合を有する SHJSC の高効率化を図るにあたり、主に界面、構造、合成の観点から研究が行われている[4]。しかしながら、膜厚の違いに対する透過率と導電率の相関及び、電気特性への影響調査は十分になされていない[5]。

そこで本研究では、PEDOT:PSS 層の膜厚とそれらのシート抵抗値および透過率との相関を明らかにするとともに、SHJSC 特性への影響を調査することを目的とする。

2. 実験方法

透過率、抵抗値測定用のサンプル作製にはガラス基板(15×15 mm²)を用いた。PEDOT:PSS を 2000, 3000, 4000, 5000 rpm でそれぞれ 30 秒間スピコートし、ホットプレート上で 120 °C、15 分間アニールを行った。

光電流および電流電圧特性を調査するため、以下に示す方法で SHJSC を作製した。まず、反応性イオンエッチング装置で Si 基板表面の酸化膜を CF₄ で除去した。Si の親水処理のため、エッチング後の基板に対し、UV 照射を行い、20 分間で表面を酸化させた。成長させた酸化膜の上に PEDOT:PSS を 2000, および 5000 rpm でスピコートし、120 °C、15 min 大気雰囲気アニールした。その後、前面電極として Boron ドープ In₂O₃ を 100 nm、背面電極として Cu 電極を貼り付けた。

3. 実験結果および考察

PEDOT:PSS の膜厚を変化させたサンプルの透過率を Table 1 に、シート抵抗値を Table 2 に示す。Table 1 より透過率は、近紫外光領域から Si が発電に利用する事のできる近赤外線領域までの波長領域(300~1100 nm)において、回転数の増加に対し、増加した。また、Table 2 よりシート抵抗値に対しても回転数の増加に対し増加した。

次に、PEDOT:PSS の回転数と得られた開放電圧、短絡電流及びフィッファクター(FF)を Table 3 に示す。PEDOT:PSS の膜厚を変化させた結果、短絡電流密度 J_{sc} に 1.09 倍の差が確認された。

Table 1 PEDOT:PSS の回転数と平均透過率

回転数 (rpm)	近紫外光領域 (300~380 nm) (%)	可視光領域 (380~780 nm) (%)	近赤外線領域(780~1100 nm) (%)
2000	78.5	89.9	88.6
3000	79.9	90.2	89.4
4000	79.2	90.2	89.4
5000	80.3	91.9	92.1

Table 2 PEDOT:PSS の回転数とシート抵抗値

回転数 (rpm)	膜厚 (nm)	シート抵抗値 (MΩ)
2000	370+10	2.16
3000	194+13.6	2.34
4000	82.5+16.4	2.69
5000	75+7.1	2.82

Table 3 作製した SHJSC の開放電圧、短絡電流密度及び FF

回転数 (rpm)	開放電圧 V_{oc} (V)	短絡電流 J_{sc} (10 ⁻³ mA/cm ²)	FF (%)
2000	0.048	1.67E-03	24.9
5000	0.067	1.82E-03	22.7

この結果は、透過率の高い 5000 rpm の SHJSC の方が光をより効率的に利用できたためであると考えられる。また、開放電圧 V_{oc} にも差が確認された。

従来の n-Si / PEDOT:PSS 界面は、ショットキー接触として扱われており、逆方向電流密度 J_0 は(2)式により定義されていた。しかしながら、 J_{sc} の増加のみで V_{oc} の増加を説明するのは難しく、矛盾が生じる。そのため、近年では n-Si / PEDOT:PSS 界面を pn 接合としてみなし、 J_0 を(3)式により見積もることが行われている[6]。

そのため、回転数の増加による V_{oc} の増加は、透過率の違いに

$$V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (1) \quad J_0 = A^{**} T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_B}{kT} \right) \quad (2)$$

$$J_0 = \frac{n_i^2 \mu_p kT}{L_p N_D} \quad (3) \quad \mu_p = \frac{1}{e \rho N} \quad (4)$$

よる J_{sc} の増加に加え、 J_0 の減少により説明することが出来る。 J_0 の減少は、回転数の増加により抵抗率 ρ が増加し、(4)式より移動度 μ_p は減少する。そのため、(3)式より、 J_0 が減少したと考える。また、FF も膜厚に依存し、2000 rpm の方が高い値を示した。2000 rpm の膜の方がシート抵抗値が低く直列抵抗が低いためであると考えられる。

4. 結論

本研究では、PEDOT:PSS の膜厚を調節し、透過率とシート抵抗値の関係を明らかにした上で電気特性への影響を調査した。その結果、膜厚変化に対し、透過率と抵抗値にトレードオフの関係が得られた。また、SHJSC を作製した結果、短絡電流密度と開放電圧に関しては膜厚が薄い方が高い値を示し、FF に関しては膜厚が厚い方が高い値を示す結果となった。本研究の結果から、PEDOT:PSS の膜厚の変化は、SHJSC の電気特性に影響を及ぼすことが示唆された。

5. 参考文献

- [1] Y. Liu, *et al.*, Mater. Sci. Eng.: R: Rep., Vol. 142, pp.100579 (2020).
- [2] A. Kumar, *et al.*, 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE), pp.1-3 (2020).
- [3] M. Pietsch, *et al.*, J. Phys. Chem. C, Vol. 117, pp.9049-9055 (2013).
- [4] F. Wenzhong, *et al.*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., Vol. 31, pp.6398-6405 (2020).
- [5] M. Javadi, *et al.*, Appl. Phys. Lett., Vol.112, pp.113302 (2018).
- [6] S. Jäckle, *et al.*, Sci. Rep., Vol.5, pp.13008 (2015).