

p型c-Si太陽電池モジュールのPID計算機モデルの開発

吉田 弘樹¹、亀山 展和¹、大橋 史隆¹、傍島 靖¹、増田 淳²、野々村 修一¹
¹岐阜大学
²産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター

研究の目的

Si太陽電池モジュールの劣化現象であるPIDについて、Na等の不純物に関するSiN_x膜表面上での分布[1]やテクスチャ構造における電界による移動[2]に関する報告がある。また、PIDのメカニズムに関して、SiN_x膜内の電界による不純物の移動が一つの要因として報告されている[3][4]。しかしながら、機器分析装置等で不純物の分布を評価するには試料を破壊せざるを得ず、同一試料における不純物分布の経時変化を評価するのは困難である。そこで、PID計算機モデルとしてNaイオンの熱拡散と電界ドリフトを扱い[5][6]、Naイオン分布の経時変化をシミュレーションする。シミュレーションとPID試験との結果を比較することで、Naイオン移動の機構を検討する。

実験

以下の式(1),(2)で示すNaイオンの熱拡散と電界ドリフトをPID計算機モデルとして与える。

$$\frac{\partial F_{Na}(z, t)}{\partial t} = -D_{SiNx, Na} \frac{\partial C_{Na}(z, t)}{\partial z} + \mu_{SiNx, Na} q C_{Na}(z, t) E(z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial F_{Na}(z, t)}{\partial t} = -D_{Si, Na} \frac{\partial C_{Na}(z, t)}{\partial z} + \mu_{Si, Na} q C_{Na}(z, t) E(z) \quad (2)$$

ここで、 F_{Na} はNaイオンのフラックス、 C_{Na} は密度、 E は電界である。 D は拡散係数、 m は移動度であり、それぞれの添え字SiN_x, NaはSiN_x膜中での、Si, NaはSi中での、Naに対する値である事を意味する。また、 z はSiN_x膜表面からの距離であり、Si側を正の向きとする。 t はPID試験開始後の時間である。表1にSiN_xと単結晶Siの D と m を示す。SiIに関しては表中の転位拡散(displacement)を用いた。

表1 SiN_xとSiにおける D と μ の値

	SiN _x [7]	Si [8]		
		Non-defective Si	Dislocation in Si	Stacking faults in Si
D [cm ² /s]	~10 ⁻¹⁸	2.1 × 10 ⁻²²	5.41 × 10 ⁻¹⁷	3.36 × 10 ⁻⁷
μ [cm ² /V·s]	~10 ⁻¹⁵	8.12 × 10 ⁻²¹	2.09 × 10 ⁻¹⁵	1.30 × 10 ⁻⁵

図1に示すのはPID試験前のNaイオンの分布密度であり、横軸で0 ≤ z ≤ 80 nmの領域はSiN_x膜、 z ≥ 80 nmはSiである。モジュールのカバーガラス表面に対する電極への印加電圧は0 kV、セル温度は85°Cとし、SiN_x表面($z = 0$)における C_{Na} の境界条件を1.0 arb. unitsに固定してある。この状態で24 h経過させたのち、PID試験開始条件として $t = 0$ hで電極への印加電圧を0 kVから-1 kVに変える。

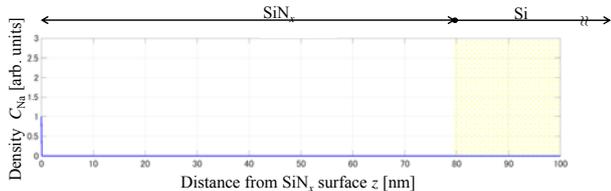


図1 SiN_x膜表面におけるNaイオン分布(境界条件)

結果

図2に示すのは、前述のPID計算機モデルを用いて得たNaイオン分布密度の経時変化である。上から順にPID試験時間 $t = 0$ hから6 h毎の分布を示している。PID試験直後にSiN_x膜近傍に分布していたNaイオンが、PID試験開始と共にSiN_x膜中を拡散しながら z の正方向にドリフトし、Si膜との境界に達し、さらにSi中を拡散している。

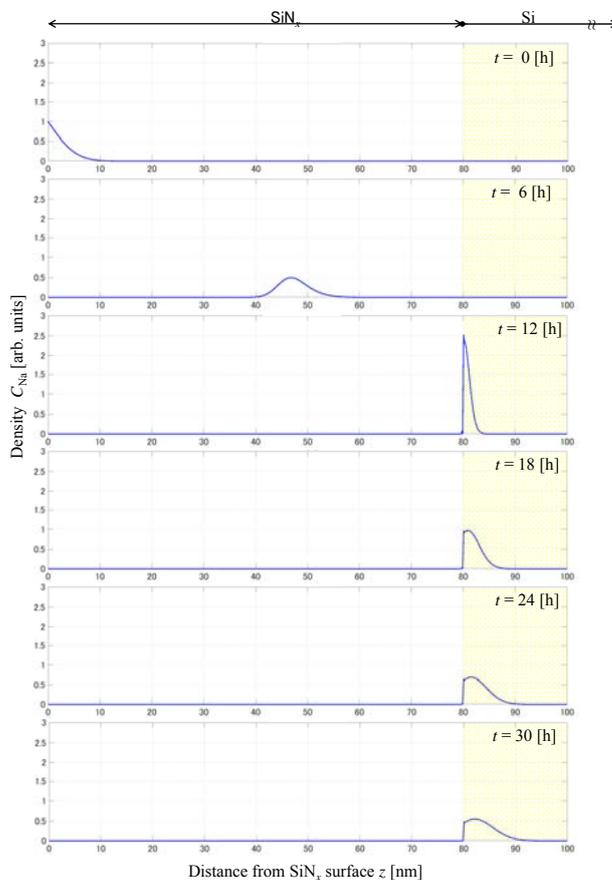


図2 PID試験開始後のNaイオン分布の経時変化

考察

PID試験開始後、Naイオンは数時間のオーダーでSiN_x膜とSiとの境界に達する。SiN_x膜内の高い電界によりNaイオンはSiN_x膜側からSi側に侵入する。逆に、Si側から再びSiN_x膜側に拡散するNaイオンの密度は低く無視できる。したがって、その後NaイオンはSi側のみで熱拡散する。

今回のNaイオンの転位拡散を扱った数値計算では、Si側を転位拡散するNaイオンは数十時間のオーダーでSiN_x膜近傍に分布する事が分かった。一方、PID試験結果[3][4]からNaイオンはより短い数時間のオーダーで発電層に到達すると考えられ、転位拡散では説明ができない。そこで、Naイオンが発電層に到達する機構として拡散係数が10桁大きい格子欠陥中の拡散が示唆される。

結論

PID計算機モデルとしてSiN_x膜とSiにおけるNaイオンの拡散とドリフトを扱い、Naイオンの移動を数値計算した。Naイオンは数時間のオーダーでSiN_x膜とSiとの境界に達する。その後、NaイオンはSi側のみで熱拡散する。PID試験結果と比較し、NaイオンはSi中の格子欠陥を拡散すると考えられる。

謝辞

本研究はNEDOプロジェクトの一環として行われました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Ohashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 08RG05 (2018).
- [2] 橋本, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 10p-W611-8 (2019).
- [3] 城内他, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 10p-W611-5 (2019).
- [4] 増田, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 19p-B12-8 (2019).
- [5] 吉田他, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 21p-B12-1 (2019).
- [6] H. Yoshida *et al.*, PVSEC 29, China, 7MoP.40/773 (2019).
- [7] M. Wilson *et al.*, Solar Energy Materials & Solar Cells **142**, 102 (2015).
- [8] J. Yang *et al.*, WCPEC 7, Hawaii, 1081 (2018).