

Summary of Doctoral Thesis

Title of Doctoral Thesis: Understanding and control of the effect of potential induced degradation in p-type crystalline silicon solar cells

(p型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化 (PID) の影響の理解と制御)

Name: Nguyen Chung Dong

Summary of Doctoral Thesis:

The actual potential induced degradation (PID) mechanism, which is affected by high voltage, temperature, humidity, and even UV light radiation in both intact and micro-cracked solar modules in the field, is not examined clearly. Therefore, a more precise understanding of the PID phenomenon has to be investigated for such issues.

Chapter 2 presents the performance deterioration of PID-affected micro-cracked solar cells through current density-voltage (J-V) characteristics, electroluminescence, lock-in thermal images. A built model shows the Na-decorated micro-cracked areas cause PID shunting defects in the solar cells. The model of the PID mechanism related to micro-cracks was confirmed by energy-dispersive X-ray spectroscopy mapping.

Chapter 3 shows that apart from causing PID shunting defects, micro-cracks also act as additional recombination centers. Besides, this chapter also indicates that the performance degradation of PID-affected micro-cracked solar cells could be regenerated effectively but incompletely by applying a reverse bias voltage. After eleven PID degradation/regeneration test cycles, the received results show the decreasing tendency in the relative loss of electrical characteristics due to the PID stress process after each cycle. This trend is favorable for minimizing the PID effect.

Chapter 4 shows that UV light in the 300–390 nm wavelength range on p-type c-Si solar cells during the PID stresses can slow down the PID effect. The increased SiN_x conductivity under the UV light is attributed to the key mechanism to delay the power loss rate due to PID.

Chapter 5 elucidates the PID mechanism and the PID recovery possibility for micro-cracked solar cells and demonstrates the PID delay effect of UV light in the 300–390 nm wavelength range. The achieved PID behavior in this work is more realistic and accurate for solar modules in the field. Also, UV light should be considered as an essential factor for both outdoor and indoor PID tests.

論文審査結果の要旨:

近年、電圧誘導劣化 (PID) は、太陽電池モジュールの性能劣化に大きな影響を与えるため、重要な課題となっている。特に、PID による深刻な電力損失は、結晶シリコン (c-Si) 太陽電池モジュールで主に観察される。一方、マイクロクラックは太陽電池の非発電領域を形成し、電氣的性能と機械的安定性の両方の低下につながる可能性がある。特に、屋外に設置されたモジュールは、PID ストレスとマイクロクラックなどの機械的応力を同時に受ける可能性がある。したがって、PID 現象をより正確に理解して、このような問題を調査し、解決する必要がある。

PID 効果の観測にはエクトロルミネセンス (EL)、ロックインサーマル (LIT) 画像を用いて、ホットスポット現象として微小亀裂領域に注目した。その結果、以下の内容が明らかになった。マイクロクラック領域でのパフォーマンスの低下は、PID シャンティング現象によって引き起こされる。高電位下では、Na イオンはフロントカバーガラスからアクティブセル表面に移動し、マイクロクラック領域の PN 接合部に浸透することで劣化が引き起こされる。Na で覆われたマイクロクラック領域が局所欠陥として機能すると想定された。ローカル欠陥の密度が十分に高い場合、ローカル欠陥は PN 接合全体にシャントパスを形成し、シャント抵抗と FF および Voc の低減につながる。マイクロクラックによる PID メカニズムのモデルを提案し、エネルギー分散型 X 線分光マッピングによって確認した。

微小亀裂は再結合センターとして機能し、PID ストレスプロセス後の J_{sc} 、Voc、および太陽電池モジュールの有効キャリアの寿命 (τ_{eff}) を短縮した。これは、外部量子効率応答、および PID ストレスの前後のマイクロクラック領域でのマイクロ波光コンダクタンス減衰法によって確認できた。さらに、PID の影響を受けたマイクロクラックのある太陽電池は、逆電圧バイアスをかけることにより、効果的に再生された。また、分解/再生サイクル後の PID 動作の PID ストレスおよび回復プロセスの持続時間に対する依存性を評価することでモデル化した。その結果、PID 劣化/再生サイクル後の電氣的特性の損失の減少傾向を確認した。

PID ストレス中に p 型 c-Si 太陽電池に 300~390 nm の波長範囲の UV 光を照射すると、PID 効果が抑制されることを確認した。そのメカニズムを以下のように考察した。窒化ケイ素 (SiN_x) 層は、紫外光を吸収して電子と正孔を生成し、その結果、 SiN_x の導電率が増加し、 SiN_x に印加される電界を減少させる。

このように、本論文は太陽電池の信頼性劣化のメカニズムの解明、その改善対策について詳しく調査した結果を報告しており、審査員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。