

Title	高効率n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化のメカニズム解明
Author(s)	山口, 世力
Citation	
Issue Date	2019-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/16067
Rights	
Description	Supervisor : 大平 圭介, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	山 口 世 力		
学 位 の 種 類	博士(マテリアルサイエンス)		
学 位 記 番 号	博材第 472 号		
学 位 授 与 年 月 日	令和元年 6 月 24 日		
論 文 題 目	高効率 n 型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化のメカニズム解明		
論 文 審 査 委 員	主査 大 平 圭 介	北陸先端科学技術大学院大学	教授
	大 島 義 文	同	教授
	堀 田 將	同	教授
	村 田 英 幸	同	教授
	増 田 淳	産業技術総合研究所エネルギー・環境領域 太陽光発電研究センター	副研究センター長

論文の内容の要旨

Potential-induced degradation (PID), which is caused by potential differences between a grounded frame and cells, has been identified as one of the central issues of photovoltaic (PV) modules deployed in very large-scale PV systems. This is because PID causes a relatively large degradation in a short time. The PID of conventional p-type crystalline silicon (c-Si) PV modules has been mainly investigated. On the other hand, there have been few studies on the PID of n-type c-Si PV modules. However, their PID is a very important issue because n-type PV cells have higher energy conversion efficiencies than p-type ones. In this study, investigated is the PID of two kinds of n-type c-Si PV modules, n-type front-emitter (n-FE) c-Si and silicon heterojunction (SHJ) PV modules.

In accelerated PID tests in which a bias of -1000V was applied to n-FE PV modules at $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, they started to degrade within 5 s and their degradation saturated within 60 s. This behavior suggested that the PID was caused by positive charge accumulation in the front SiN_x passivation films. Performing tests with a larger bias of -1500V revealed that the degradation rate strongly depended on the applied bias whereas the saturation value was independent of the magnitude of the applied bias. Regeneration tests on modules degraded, in advance, in PID tests for durations of 5 and 10 min were performed by applying a positive bias of $+1000\text{ V}$ at $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Both degraded modules almost completely recovered their performance losses within 60 s regardless of the pre-degradation test duration. On the basis of these results, I proposed that these positive charges accumulating in the front SiN_x films originate from positively charged K centers formed by extracting electrons from neutral and negatively charged K centers. This model readily explains the observed degradation and regeneration behavior. To test the model, I determined the fixed positive charge densities (Q_f) of a silicon nitride passivation film before and after PID, for which it was found that Q_f showed similar saturation behavior. Additionally, the saturated Q_f value was of the same order as K center density. These results strongly support my model involving a charging process of K

centers.

A negative bias of -1000 V was applied to SHJ PV modules (fabricated from n-type SHJ cells with tungsten-doped indium (In) oxide (IWO) films on both sides) with respect to the cover glass surface at $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, which significantly reduced their short - circuit current density (J_{sc}) within several days. The results of dark current density–voltage measurements implied that the reduction in the J_{sc} was attributed to optical losses rather than carrier recombination. X - ray absorption fine structure spectroscopy suggested the formation of metallic In in the IWO layers of a degraded cell, which implies that the root cause of the optical loss was a darkening of the front IWO layers caused by the precipitation of metallic In. In extremely severe PID tests, the SHJ PV modules exhibited not only a further reduction in the J_{sc} but also a moderate reduction in the open - circuit voltage (V_{oc}). These J_{sc} and V_{oc} reductions were probably caused by sodium being introduced into the n-type base of the cells. A comparison of the PID test results of the SHJ PV modules with those of other types of PV modules indicates that SHJ PV modules have a relatively high resistance to PID. As a module with an ionomer encapsulant exhibited little degradation, their high PID resistances may be further improved by using encapsulants with high electrical resistances. These findings are significantly important to understand PID phenomena in n-FE c-Si and SHJ PV modules. Additionally, they help us develop low-cost measures to prevent the PID. In future, the proposed mechanisms will have to be further verified by additional experiments.

Keywords: n-type crystalline silicon solar cell, photovoltaic module, photovoltaic system, potential-induced degradation, reliability

論文審査の結果の要旨

大規模太陽光発電所において、太陽電池モジュールのフレームとセルとの間の電位差が原因で生じる劣化現象である電圧誘起劣化(potential-induced degradation: PID)の問題が顕在化している。すでに広く普及している p 型結晶 Si 太陽電池については、そのメカニズム、対策ともに研究が進んでいるが、p 型と比べ高い変換効率を有し、今後の普及拡大が見込まれている n 型結晶 Si 太陽電池の PID に関する報告は少ない。本研究は、n 型フロントエミッタ型(n-FE)結晶 Si 太陽電池および Si ヘテロ接合(SHJ)太陽電池という二つの主要な n 型結晶 Si 太陽電池モジュールについて、その PID 挙動およびメカニズムの解明に取り組んだものである。

n-FE 結晶 Si 太陽電池モジュールにおいては、セルへの負電圧印加によりセル表面の窒化 Si 膜に正電荷が蓄積し、p⁺エミッタ層における少数キャリアである電子の濃度が結晶 Si 表面で増加することで表面再結合が増大することによる短絡電流および開放電圧の低下が劣化の原因であることが、先行研究ですでに示されているが、この PID の詳細な時間依存性や、正電荷の起源は明らかになっていなかった。本博士論文において、短絡電流および開放電圧が急速に低下し ($85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、電位差 1 kV の典型的な試験環境下では $1\text{--}2\text{ min}$ 程度で低下)、その後飽和する傾向を示すことを明らかにした。また、この劣化挙動から、窒化 Si 膜中の Si 未結合手の一種である K

センターが電子を失った状態（ K^+ センター）が、この正電荷の正体であるという説を独自に提案し、その妥当性について多方面からの検証を行い、各実験結果と矛盾のないことを確認した。

SHJ 太陽電池においては、PID の発現自体が未確認であったが、本博士論文においてはじめて確認された。また、その初期の劣化挙動が、開放電圧の低下を伴わずに短絡電流のみが低下する現象であることを見出し、その原因が、セル表面の In_2O_3 膜の還元による光学損失であることも解明した。さらに、長時間の PID 加速試験を実施することにより、開放電圧の低下も発現することを見出した。これらの劣化は、他種の太陽電池モジュールと比較して顕著に遅い時定数で進行するため、SHJ 太陽電池モジュールが本質的に優れた PID 耐性を有することと、モジュールに使用する封止材の変更により、PID をほぼ完全に抑止できることも確認した。

以上、本博士論文は、結晶 Si 太陽電池モジュールの長期信頼性の向上に大きく寄与しうる、応用物理学上優れた成果を示しており、その背後にある物理についても深く吟味されていることから、学術的にも貢献するところが大きい。よって、博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として、十分価値のあるものと認めた。