

## Silicon PV 2015 結晶シリコン太陽電池国際学会

(株) 科研テック 中上明光

2015年3月23日から3日間にわたりドイツ最南端のコンスタンツ(Konstanz)で開催された標記国際学会に参加した。

本学会は太陽電池の中で世界で最も多く生産され、出荷されている(約90%)結晶シリコン(Si)太陽電池のセルおよびモジュールに特化した研究開発の成果を発表する国際会議で、今年で5回目となる。



Silicon PV 2015 学会会場

世界31か国から350人が参加し(去年は330人)、国別ではドイツ134人、オランダ25人、フランス21人、アメリカ18人、オーストラリア11人、ベルギー・韓国10人、日本7人等であった。発表論文・ポスターは昨年と同様の178件に及び、3日間活発な議論が行われた。本会議翌日n型Si太陽電池に特化したnPV workshopが開催された。

今回の開催地であるドイツ・コンスタンツのコンスタンツ大学の太陽電池研究施設の見学会も開催された。

今回のSilicon PV 2015では昨年から継続してセルおよびモジュールの信頼性や耐久性の評価に加え、太陽電池アレイ中の異常(劣化)モジュールの検出と解析・評価も新たに今年から紹介された。

個別の発表のなかで注目されたものは、①PID(電圧誘起出力低下)の主原因はガラス中のNaのみではない、②太陽電池アレイ中のPIDの影響を受けた欠陥モジュールの迅速な選定にドローンを用いたサーモグラフィ画像撮影による電力損失予測が有効、③大面積ヘテロ接合の高効率化・プロセスの簡素化に電極材料、プロセスに注目、④2層タンデム太陽電池のトップ層に話題のペロブスカイト太陽電池を用いた場合の変換効率の理論解析、⑤ヘテロ接合太陽電池の重要技術：パッシベーションにおけるa-Si:H膜形成と膜の評価技術、などであった。上記5つのトピックスについて以下に紹介する。

### (1) PID(電圧誘起出力低下)の主原因はガラス中のNaのみではない

Fraunhofer研究所(ドイツ)から『PID-s 結晶欠陥の欠陥エッチングとコロナ処理劣化後のNaの装飾の証拠』と題して発表があった。PIDによるモジュールの異常・劣化についてはFraunhofer研究所が2012年、世界の13種類の製品PVモジュールについてPID試験(50°C、50%RH、48h、1000V)を実施し、4種類のみ初期の出力を維持しているが、残り9種類は出力低下が認められた。中には10%以下のものもあった。この発表をきっかけに太陽電池メーカー、材料メーカーのPIDの関心(懸念)が高まり、各社対策を講じてきた。その後、Fraunhofer研究所はこのPIDによる出力電流の大幅な低下はセルの並列抵抗の低下(短絡、シャント、PID-sと表記)であるとした。その主たる原因はソーダライムガラス封止材中のNaが樹脂封止材や反射防止膜を通してSi平面欠陥：積層欠陥を通路としてセル自体のシャント抵抗を低下させると説明してきた。Silicon PV 2015ではFraunhofer研究所はガラス封止材中のNaが主たるイオン源ではなく、環境(大気、雨、樹脂)中のNaイオンによることもありうると説明した。ガラス封止材、樹脂封止材を用いないペアシリコンのみのセルでもPID劣化は発生した。実験としてコロナ放電による損傷と欠陥場所でのSTEM/EDX(走査型透過電子顕微鏡/エネルギー分散型X線分析)の観察/分析を行った。ガラス封止無し太陽電池セルにコロナ放電により損傷を与え、Naで装飾された欠陥場所

(積層欠陥)を観察し、PIDと同様の現象を確認した。NaはセルのSiN層の表面にコロナ放電前に存在していたと思われる。

### (2) 太陽電池アレイ中のPIDの影響を受けた欠陥モジュールの迅速な選定にドローンを用いたサーモグラフィ画像撮影による電力損失予測が有効

Fraunhofer 研究所の上述とは別のグループから『PIDの影響を受けたシリコン太陽電池モジュールのサーモグラフィ画像からの電力損失予測』と題して発表があった。PIDの影響を受けるPVシステムが依然として多くある。作業中のPV電力システムの中のPIDの影響を受けた太陽電池モジュールを素早く識別するために研究に取り組んだ。分析・評価方法としてサーモグラフィ画像に基づく電力損失予測を採用した。測定には屋根上のPVシステムを無線操縦マルチコプター(いわゆるドローン)に赤外線カメラを搭載して、飛行高度:3~30mで観察し、1時間内で500kWpの検査を行った。PIDの影響を受けたと思われる高温状態(周辺のモジュールに比べ2~3K高い)にあるモジュールを取り外し、EL(電界発光)画像パターンとの比較を行った。視覚比較ではモジュールのサーモグラフィ画像とEL画像での良い一致が見られた。風によりモジュールに沿って温度勾配が見られる。強制熱伝達を考慮した解析を加えると、さらに両者の画像の相関はよくなった。この解析システムを用いると、任意のPVシステムについての出力損失の予知は良好な精度で可能とのことであった。

### (3) 大面積ヘテロ接合の高効率化・プロセスの簡素化に電極材料、プロセスに注目

imec(オランダ)より『大面積ハイブリッドシリコンヘテロ接合太陽電池のプロセスの簡素化』と題して発表があった。imecでは大面積(6インチウエハサイズ)の背面エミッタのハイブリッドa-Si:H/c-Siヘテロ接合太陽電池の高効率化、プロセスの簡素化を進めている。昨年のSilicon PV 2014では表面電極NiSi/Niの局所的アニールのため(裏面にはa-Si:H膜がありセル全体を200°C以上には上げられない)エキシマレーザーアニールを用いた成果を発表した。出席者からエキシマレーザーアニールは必要ではないのではとのコメントがあった。また、裏面電極のAgからCuに替えるとコストを下げられるのではないかとのコメントもあった。これらのことも踏まえ、裏面コンタクトの簡素化に取り組んだ。裏面にCu電極を用いると、Cuの拡散が起こる。それを阻止するためITO/Cu電極とした。スパッタITOの膜のダメージを回復するため150°Cまでのコンタクトアニールでよいことがわかった。a-Si:H中のHの離脱を懸念した局所表面アニールを狙ったエキシマレーザーアニールは必要ではなくなった。さらに裏面電極材料としてITO/Cu/Alを用い、プロセス開発で変換効率21%(ウエハサイズセル)が得られた。

### (4) 2層タンデム太陽電池のトップ層に話題のペロブスカイト太陽電池を用いた場合の変換効率の理論解析

ECN-Solliance(オランダ)から『薄膜ワイドバンドギャップのトップセルとc-Siボトムセルを組み合わせた4端子太陽電池モジュール』の発表があった。単接合Si太陽電池セルの変換効率は昨年ようやくシャープとパナソニックが25.1%および25.6%を達成したが、モジュールの世界記録は~22%である。30%が可能であろうか。Siをボトムセルとした2層タンデム太陽電池では29%の変換効率がEU PVSEC 2014(オランダ)で報告された。Siをボトムセルとしたタンデム太陽電池で30%が可能であろうかということが研究の動機である。高効率化には上下のそれぞれ異なるバンドギャップを持つ太陽電池が効率よく太陽光スペクトルを吸収することにある。セル構造の自由度から4端子タンデム構造を採用した。SiのボトムセルにはIBC(バックコンタクト)型Siセルを用いた。その上にテクス

チャー付ガラス/TCO/薄膜セルを用いた。トップセルにはワイドバンドギャップ太陽電池として a-SiO:H, a-Si:H, CIGS、ペロブスカイト型太陽電池を選び、Si 太陽電池との組み合わせによる反射率、吸収率などを理論的に解析した。その結果、トップセルにペロブスカイト型太陽電池が有効であることが分かった。今後の改良を通して 30%のモジュール効率は可能である。

#### (5) ヘテロ接合太陽電池の重要技術：パッシベーションにおける a-Si:H 膜形成と膜の評価技術

開催地のコンスタンツ大学より『不活性化アモルファスシリコン層の形態と水素』の発表があった。ヘテロ接合太陽電池（いわゆる HIT 型）の高効率化に最も寄与した重要技術はパッシベーション（不活性化処理）である。a-Si:H を用いたパナソニック（日本）の HIT のコンセプトは変換効率 25.6%を達成した。水素は a-Si:H/c-Si 界面での欠陥を飽和状態にするためには不可欠である。熱処理は成膜中に埋め込まれた水素が動き易くし、欠陥を回復するステップである。パッシベーションの品質は a-Si のモフォロジーに依存する。a-Si:H の製膜ガス SiH<sub>4</sub>/Ar 比はモフォロジーの相違を生ずる。SiH<sub>4</sub> のみによる PE-CVD 成膜では a-Si 膜の形態は非柱状的であり、一方 SiH<sub>4</sub>+Ar では柱状的になる。この差が埋め込まれた水素の量、Si との結合の種類を変える。c-Si 表面の a-Si の膜厚、水素量は核共鳴反応解析(NRRA 法)により行った。解析結果、(i)a-Si:H は c-Si をパッシベート（不活性化）する(初期状況)、品質と安定性はモフォロジーに依存する(初期状況)、品質と安定性は c-Si のドーピング（p 型か n 型か）に依存する。(i)a-Si のモフォロジーの選択は c-Si のドーピングに依存する。結果、c-Si をパッシベーションするための推薦は p 型 c-Si に対しては非柱状の(i)a-Si:H、n 型 c-Si に対しては柱状の(i)a-Si:H が良いことが分かった。

以上