

## 35th IEEE PVSC ショート速報 [薄膜シリコン太陽電池]

松井 卓矢 (産業技術総合研究所)

会議名 : 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference

開催期間 : 2010年6月20日-25日

開催場所 : Hawai'i Convention Center, (ホノルル、ハワイ州、米国)

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*  
薄膜シリコン太陽電池のセッションでは、アモルファスシリコンや微結晶シリコン、薄膜多結晶シリコンなどフィルム状のシリコン材料を用いた太陽電池について議論される。今回は、これら薄膜シリコン材料の基礎的な物性研究から最新の太陽電池デバイス・モジュールの結果にいたるまで幅広い内容のトピックスがあった。特に、薄膜多結晶シリコン太陽電池の性能の進展やアモルファスシリコンの光劣化現象の解明に向けた新しいアプローチ、10%の安定化変換効率を達成した大面積 (1.1×1.4 m<sup>2</sup>) アモルファスシリコン/微結晶シリコンタンデム型太陽電池モジュールの報告などに注目が集った。

\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

Area 5 では、アモルファスシリコン(a-Si)や微結晶シリコン ( $\mu$ c-Si)、薄膜多結晶シリコンなど、主に製膜により得られるフィルム状の薄膜シリコン太陽電池に関する内容が議論された。原料は同じシリコンでも、シリコンウェハを用いた結晶シリコン太陽電池 (Area 4) とは作製方法や特性が異なるため、領域が分けられている。Area 5 の論文件数は、1件のプレナリー講演、3件の招待講演、21件の口頭発表、66件のポスター発表で、合計91件であった (会議全体の約10%、キャンセルされた発表を含む)。以下、主なトピックスについて報告する。

## 2. トピックス

## (1) 薄膜多結晶シリコン太陽電池

プレナリーセッションでは、IMEC (Interuniversity Microelectronics Center、ベルギー) の研究グループから薄膜多結晶シリコン太陽電池の研究開発について講演があった。薄膜多結晶シリコンは、一般的に、アモルファスシリコンの再結晶化や化学気相成長 (CVD) 法など比較的高温 (600~1000°C) のプロセスを経て形成される。膜厚は数ミクロンから数十ミクロンの範囲であることから、シリコンウェハを用いない超薄型の多結晶シリコン太陽電池の実現を目指した手法として位置づけられる。問題は品質で、いかに低コスト基板の上に多結晶シリコンウェハと同水準の材料を製膜できるかが課題となる。講演では、シリコンとアルミニウムの共晶反応により形成したシード層やアモルファスシリコンのレーザーアニールにより再結晶化したシード層の上に、CVD法で薄膜多結晶シリコン光吸収層を成長した太陽電池の性能が紹介され (変換効率5-8%)、結晶粒径の増大のみならず結晶粒内の欠陥の低減が高効率化への鍵であることが示された。その他、

薄膜多結晶シリコン太陽電池に関しては、ヘルムホルツ研究所（ドイツ）とCSGソーラー（ドイツ、オーストラリア）の研究グループの発表が注目を集めた（招待講演）。電子ビーム蒸着で高速形成（10 nm/s）したアモルファスシリコンの再結晶化（ $\sim 600$  °C）とポスト欠陥低減プロセス（ $\sim 950$  °C）を用いて薄膜多結晶シリコン太陽電池を作製し、7.8%の変換効率を達成した。一般的に高額な設備投資が必要となるCVD装置を用いていない点が大きな特徴であり、プロセスの低コスト性と結晶シリコンという高い変換効率のポテンシャルを秘めた材料として今後のさらなる進展が期待される。

### （2）アモルファスシリコンの物性研究

アモルファスシリコン太陽電池の光劣化の問題は過去 30 年以上にわたる長年の研究テーマであるが、その難解さゆえに、最近では光劣化現象の解明に向けた話題が少なくなってきたように感じる。そのような中で、NREL（National Renewable Energy Laboratory、米国）からは、水素化アモルファスシリコンの光劣化の起源であるダングリングボンド欠陥について興味深い発表があった（招待講演）。具体的には、水素の同位体であるトリチウムを含有したアモルファスシリコンを作製し、ダングリングボンド欠陥を終端したトリチウムが $\beta$ 崩壊する過程で欠陥密度が時間とともに増加することに着目し、その欠陥生成の挙動と膜中水素との関係について系統的な調査がなされたものである。アモルファスシリコンの光劣化現象は膜中に含まれる水素と密接な関係があることがわかっており、そのメカニズムの解明に向けた重要なデータが示されたと考えられる。また、1977 年にアモルファスシリコンの光劣化現象（Staebler-Wronski effect）を発表した Wronski 教授（ペンシルバニア州立大、米国）の研究グループからは、水素化アモルファスシリコンのバンドギャップ内に存在する 3 つの局在準位について報告があり、そのうち特に、最も価電子帯に近いエネルギーレベルに位置する局在準位が太陽電池の光劣化特性に強く影響を及ぼすことを示した。薄膜シリコン太陽電池の性能改善には依然としてアモルファスシリコン太陽電池の高効率化と高安定化が重要な課題であり、上記のような光劣化現象の解明とその抑止法の開発を目指した粘り強い基礎研究を続けていくことが肝要と思われる。

### （3）光閉じ込め技術

シリコンウェハーを用いたバルク結晶シリコン太陽電池と比較すると、薄膜シリコン太陽電池の最大の弱点は薄膜であるが故に光の吸収が少ないことであり、変換効率の改善には光閉じ込め技術の躍進が求められている。東京工業大学は、反応性イオンエッチングにより表面処理を施したガラス基板の上に、有機金属化学気相堆積（MOCVD）法でZnO層を製膜する方法で高い光散乱性能（ヘイズ率）を示す透明電極基板を開発し、これをアモルファスシリコン太陽電池の基板に適用することで長波長感度を改善できることを実証した。通常、高ヘイズ基板を用いた場合は、太陽電池特性がむしろ低下する傾向にあるが、今回開発された基板を用いた場合、アモルファスシリコン太陽電池の開放電圧が減少していない点が興味深く、今後、タンデム型太陽電池への適用が注目される。なお、本論文はポスターアワードを受賞した。一方、スタンフォード大学（米国）とNREL（米国）の研究グループは、規則的なナノドーム形状を有するアモルファスシリコン太陽電池を開発し、表面反射防止効果と光閉じ込め効果により、平坦な基板を用いたものに比べて短絡電流密度を大幅に改善（ $11.4 \rightarrow 17.5$  mA/cm<sup>2</sup>）できることを報告した。

より高度な光閉じ込め構造の開発を目的として、産総研は、化学機械研磨（CMP）法により太陽電池の表面と裏面の凹凸構造（テクスチャ）を独立に制御した微結晶シリコン太陽電池を開発した。裏面側のテクスチャは

電流の向上に大きく寄与する一方、発電に寄与しない光吸収損失も同時に増加させる負の効果があることを報告した。光閉じ込め構造の最適化に向けた一つの指針が示されたと思われる。

#### (4) 太陽電池デバイス・モジュール

太陽電池デバイス・モジュールのセッションでは、多接合太陽電池の開発とモジュール特性の改善についていくつかの発表があった。United Solar (米国) は、フレキシブルポリマー基板を用いたa-Si/ $\mu$ c-Si/ $\mu$ c-Si 3 接合太陽電池サブモジュール (2320 cm<sup>2</sup>) で 11.2%の安定化効率を達成した。また、小面積ではあるが、a-Si/a-Si/ $\mu$ c-Si/ $\mu$ c-Si 4 接合太陽電池の試作結果も示され、多接合太陽電池の作製技術が高度化している印象を受けた。その他、多接合太陽電池に関しては、筆者らのグループ (産総研) と三菱重工業の共同研究で、赤外感度に優れた微結晶シリコンゲルマニウム ( $\mu$ c-SiGe) をボトムセルに適用したa-Si/ $\mu$ c-Si/ $\mu$ c-SiGe 3 接合太陽電池で、11.6%の初期効率 (劣化率: 約 5%、面積: 1cm<sup>2</sup>) が得られたことを報告した。高効率化にはさらなる赤外感度の改善が必要であるため、 $\mu$ c-SiGeの高Ge濃度化と膜質の改善が課題である。一方、大面積太陽電池モジュールに関しては、薄膜シリコン太陽電池のリーディングカンパニーのひとつであるカネカが、中間反射層をトップ・ボトムセル間に挿入したa-Si/ $\mu$ c-Siタンデム型太陽電池モジュール (1.2×1.0 m<sup>2</sup>、ハイブリッドプラス) の生産を本格化し、2015 年までに年間生産量を 1GWまで増産する計画を発表した (招待講演)。また、三洋電機は、G5.5 サイズ (1.1×1.4 m<sup>2</sup>) の局所高密度プラズマ生成技術を開発し、微結晶シリコンの製膜速度の改善 (2.4 nm/s) に成功した。さらに同社は、同サイズのa-Si/ $\mu$ c-Siタンデム型太陽電池モジュールで初期効率 11.1%および安定化効率 10.0%を達成している。タンデム型太陽電池モジュールでボトムセルの高速製膜化と 10%のモジュール安定化効率を同時に達成したことは非常にインパクトの強い成果であり、今後、事業化への展開に注目したい。

### 3. おわりに

薄膜シリコン太陽電池は省シリコン資源で大規模生産の可能性がある一方、他の太陽電池と発電コストで競争するためにはモジュールの変換効率の改善が急務となっている。そのためには、既存の技術を高度化していくことも重要であるが、アモルファスシリコンの光劣化などの根本的な問題や新材料・新構造の開発など、より挑戦的な課題にも積極的に取り組んでいく必要があると思われる。今回の会議は、特に area-chair の意向により、太陽電池の成果のみを話題の中心とせず、基礎的研究から新規概念まで広く話題をカバーした内容だった。様々なアイデアを結集して、薄膜シリコン太陽電池の高性能化を実現していかなければならない。