

## Silicon PV 2013

(株) 科研テック 中上明光  
神鋼リサーチ (株) 大西良彦

2013年3月25日から3日間にわたりドイツのハーメルンで開催された標記国際学会に参加した。本学会では太陽電池の中で高い変換効率が期待できる結晶シリコン(Si)太陽電池に特化して議論され、今年で3回目となる。世界22カ国から324人が参加(去年は425人)し、国別ではドイツが57%と半数を占め、フランス7%、オランダ4%、韓国3%、米国3%、日本2%などであった。発表論文・ポスターは170件に及び(去年は149件)、連日活発な議論が行われた。ハーメルン



Silicon PV 2013 学会会場

の地元研究機関である ISFH (ハーメルン太陽エネルギー研究機構) の見学会も開催された。

今回の Silicon PV 2013 では、高効率結晶 Si 太陽電池とモジュール及び材料について議論された。また太陽電池・モジュールの信頼性・耐久性についても報告があった。

以下に、高効率結晶シリコン太陽電池、太陽電池・モジュールの信頼性・耐久性、汎用的な結晶シリコン太陽電池の高効率化の取り組み、p 型結晶シリコン太陽電池の光誘起劣化現象の解明等に関するトピックスを紹介する。

### (1) 高効率結晶シリコン太陽電池

議論の対象として主として取り上げられたセルとしてヘテロ接合型とバックコンタクト型太陽電池がある。ヘテロ接合型太陽電池は n 型単結晶 Si 基板の両面にアモルファス Si(a-Si:H)をヘテロ接合した上下対称構造太陽電池であり、a-Si:H の堆積により界面のパッシベーション(不活性化処理)をして、光生成キャリアを確保することが特徴である。低価格化のため Ag 電極に代わる Cu 電極の発表があった。

一方、バックコンタクト(IBC: Interdigitated Back Contact)型は表面側の電極による太陽光のシャドー領域を無くして、裏面に p 電極、n 電極を集め、光生成キャリアを収集したもので、この型の発表が最も多い。電極加工技術として、印刷法が開発中である。

今回の学会で高効率セルとして注目されたヘテロ接合型太陽電池の中から 2 つの報告を紹介する。一つは”Influence of the Interplay of a-Si:H Emitter and TCO Properties on a-Si:H/c-Si Solar Cell Performance”と題して Helmholtz-Zentrum Berlin, Institute for Silicon Photovoltaics から発表された。ヘテロ接合型太陽電池の構造として、n 型単結晶 Si の上に(i)a-Si:H/(p)a-Si:H を積層し、透明導電膜の ITO/ZnO:Al 電極を堆積する。ヘテロ接合にすることにより開放電圧 Voc の増加が期待されるものの、曲線因子 FF やセルの直列抵抗の増加、透明導電膜 TCO/金属電極の比抵抗の増加による変換効率低下の影響が懸念される。特に、透明導電膜 TCO/(p)a-Si:H 接触による FF の低下(界面でのキャリア再結合に関係する)は界面でのショットキー接合のような影響を受ける。n 型単結晶 Si/ (i)a-Si:H/(p)a-Si:H の構成で堆積し、TCO(ZnO:Al)の堆積前後でキャリアライフタイムを測定した。更に TCO をエッチングで除去した後に再びライフタイムを測定した。TCO 製膜後のライフタイム測定から低濃度側(p 型層のドーピング濃度が低い)でライフタイムが低下し、計算で求めた I-V 曲線の FF が低下する。TCO を除去すると FF は回復する現象が見られた。n 型単結晶 Si の代わりに p 型単結晶 Si を用いて(p)c-Si/(i)a-Si:H/(n) a-Si:H /TCO 構成のセルのライフタイム測定結果は n 型単結晶 Si の場合と同じ様子であった。さらに、TCO と

して ZnO:Al、ITO いずれの場合もライフタイム特性には差は無かった。

まとめとして、ヘテロ接合型太陽電池において、TCO 膜はキャリアライフタイムを a-Si:H ドーピング濃度の低濃度側で低下させる、FF を上げるには TCO/a-Si:H 接触での空乏層を最小にし、フラットなバンドが望ましいなど、界面でのバンドダイアグラムの詳細な解析と実証が必要との結論であった。ヘテロ接合太陽電池の最高変換効率はパナソニックの所謂 HIT 型の 23.9% であり、この値を超える 0.1% の効率化競争が展開されている。

高効率化の太陽電池の研究のもう一つの例は、"Approach for a Simplified Fabrication Process for IBC-SHJ Solar Cells with High Fill Factors" と題して同じく Helmholtz-Zentrum Berlin, Institute for Silicon-Photovoltaics から発表された。IBC (バックコンタクト) 型太陽電池の表面には電極が無いので高い短絡電流密度  $J_{sc}$  が得られる可能性がある。SHJ (Si ヘテロ接合) 型では高い開放電圧  $V_{oc}$  の可能性がある。この IBC と SHJ を組み合わせると、より高い  $J_{sc} + V_{oc}$  (つまり高い変換効率) が得られる可能性がある。いわゆる「いいとこ取り」の期待がある。昨年の Silicon PV 2012 でベルギーの imec 研究所はこのタイプの構想を紹介したが、構造が複雑であり実施の報告は無かった。今回、ドイツの上記研究所でこのタイプのセルが試作された。IBC 型であるため、電極は全て裏面に回されており、n 型 Si 基板/p 型電極の a-Si:H(p) エミッターへの金属電極(Al)被覆率は 100% とし、n 型電極側の a-Si:H(i/n)BSF (裏面電界) では 100% に近い金属電極被覆率 (p 電極と n 電極を分離する必要があり 100% にはできない) が必須であることが分かった。セルのフォトルミネッセンス(PL)マッピングを見ると、セルの全面で PL 強度が低下していることから、電極堆積によるキャリア再結合が増加し、変換効率の低下を示唆している。途中報告であるが、電極間のギャップパッシベーションとして a-Si:H(i/n)BSF を用いた IBC-SHJ 型太陽電池で、19.4% の変換効率を確認した。このセルの FF は高く、FF=77.7 であった。さらなる改善で高効率化を目指すとのこと。

## (2) 太陽電池・モジュールの信頼性・耐久性

太陽電池の信頼性評価についての発表が注目された。2012 年 6 月 (独) Fraunhofer 研究機構の PID(Potential Induced Degradation : 電圧誘起出力低下)の発表に端を発し、この学会でも大きな話題となった。Fraunhofer 研究機構から現状報告、原因解明途中の速報がホットな話題として提供された。

シリコン太陽電池の PID 劣化についての議論が今年の学会で注目された。昨年 6 月、ドイツ Fraunhofer 研究機構がドイツ国内外メーカーの 13 のモジュールを入手し、50°C、50%RH、48 時間、-1000V を印加したモジュールの中に出力低下が見られた。13 モジュールのうち、劣化が見られなかったのは 4 モジュールのみだったというもの。この PID (Potential Induced Degradation : 電圧誘起出力低下)現象が発表され、以降世界的に注目を集め、PID 現象の原因究明が進められている。

Silicon PV 2013 でも Fraunhofer 研究機構から PID の原因究明の途中経過として、"Towards a physical model for potential-induced degradation (PID) of silicon solar cells" と題して発表があった。光照射側ガラス表面と太陽電池間に大きな電圧がかかると、ガラス、封止材、反射防止膜中の可動イオンのドリフトにより PID が発生する。PID が起こると、p 型太陽電池を持つ PV システムの電力出力の大幅な減少が観察され、並列抵抗の減少や短絡にまで至るものもあった。Fraunhofer 研究機構では昨年より数を増やし 95 モジュールについて 50°C・50%RH、印加電圧-1000V の条件で 48 時間保持し、PID 耐性を評価した。95 のうち半数のモジュールが初期出力の 95% 以下となり、劣化の領域に入って

いた。劣化を起こしたセルを調査すると、高いネガティブバイアス（-1000V）を受けた p 型セルはシャント（短絡）状態にあり、p/n 接合は局所的にシャントされる。PID テスト後に劣化を生じたセルは EL 像、EBIC 像で欠陥が観察され、TOF-SIMS 分析のマッピング像では EBIC 像の欠陥位置に Na が局所的蓄積されているのが分かった。断面 TEM-EDX 分析によると、Si の積層欠陥中に Na が偏析している。今後、さらに発生のメカニズムを追求していくとのことであった。

### (3) 汎用的な結晶シリコン太陽電池の高効率化の取り組み

ヘテロ接合型太陽電池や IBC 太陽電池は、n 型単結晶シリコンを用いて 20%を超える変換効率が得られるが、プロセスコストの低減にはまだ時間がかかる。現在主流の p 型結晶シリコン太陽電池でコストを抑えたまま、変換効率を 20%に近づける試みが続けられてきた。太陽電池の表面、裏面、結晶内部でのキャリアの再結合をできる限り低減するセル構造、PERC(Passivated Emitter and Rear Cell)構造や PERL(Passivated Emitter and Rear Locally-diffused)構造が提案された。SCHOTT Solar の"Industrial High Performance Crystalline Silicon Solar Cells and Modules based on Rear Surface Passivation Technology"と題した講演で、これらの基本構造を元に電極を Ag ペーストから Cu メッキへの変更などの技術も併せて同社での p 型シリコンで変換効率 20%を可能にするセル構造の改良の歴史がレビューされた。

さらに imec 研究所の"Power-Loss Analysis of Advanced PERC Cells Reaching 20.5% Energy Conversion Efficiency"と題した講演の中で、PERC 構造のセルの理論変換効率は 29.7%まで可能であることを示した。さらに、現状の最高効率 20.5%とのギャップ 9.2%のうち、5.4%は再結合による損失、3.0%は光学的損失、0.8%は抵抗損によるという、シミュレーション結果を発表した。

### (4) p 型結晶シリコン太陽電池の光誘起劣化現象の解明

p 型結晶シリコン太陽電池には、光照射下で変換効率が数%低下するという現象があり、光誘起劣化（LID: Light Induced Degradation）と呼ばれている。LID は、シリコン結晶中の格子間に存在するホウ素 B と酸素 O が結合して、これに光が当たると再結合中心となりキャリアの寿命を低下させることが原因とされている。LID は、暗所で高温処理すると元に戻る現象であるが、モジュールに組立てられてからは高温処理することが困難なため、p 型結晶シリコン太陽電池の宿命的な欠点と考えられていた。

しかし最近、LID のセルを光照射下で高温処理すると回復したうえ、以後も LID 現象が起こりにくいことが判り、再生(Regeneration)と呼ばれている。ISFH 等の報告では、この再生現象は、光照射により分離した B 元素が大きめのナノサイズの B 析出物に吸収される "Ostwald-ripening" という現象によると解釈している。

### (5) その他トピックス

結晶シリコン太陽電池セルの製造コストの約 2/3 がシリコンウェハのコストであることから、①シリコン原料、②インゴット製造、③ウェハのスライシングの各プロセスで抜本的な低コスト化を図る試みが続けられている。

①シリコン原料の低コスト化については、現在のシーメンス法のコスト低減が進んだことにより、冶金的手法で金属シリコンを高純度化する UMG-Si の研究開発のアクティビティは低下している。Elkem Solar や PHOTOSIL プロジェクトのメンバーであった Apollon Solar では単結晶シリコン原料として研究開発が続けられている。

②インゴット製造では、Fraunhofer 研究機構と PV Crystalox のグループが、シーメン

ス法で作製された Si ロッドをそのまま FZ (Floating Zone) 法で再結晶化させる方法を提案している。

③ウェハスライシングでは、従来からカーブロスのないプロセスが提案されてきた。ISFH の研究グループは、コストが比較的安い方法として、微細孔付きシリコンウェハ製造手法を開発している。裏面から光照射してシリコン中にキャリアを生成しながら表面からエッチングすることにより、シリコンに微細孔を深くまで形成する技術を開発した。さらに、適当な深さで照射光を強くすれば孔径が増大するため切り離すことができる。

以上