

## 16WCSSCM 速報

柿本浩一（九州大学）

会議名：The 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes

開催期間：2006年8月6日～9日

開催場所：Denver Marriot City Center Hotel (Denver、CO、米国)

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*

2006年8月6日から9日に米国のデンバーにて、16<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes が開催された。世界の14カ国から126名の参加者があり、材料とプロセスの観点から太陽電池用シリコン結晶とモジュールに関して活発な議論がなされた。会議は13のセッションと2つのポスターセッションで構成されており、(結晶成長：2、太陽電池プロジェクト紹介：1、不純物と欠陥：2、原料問題：2、結晶評価：1、表面不活性化：1、薄膜とヘテロ接合デバイス：1、電極問題：1、モジュール：1、ウエハー破壊問題：1)、合計26件の講演とパネル討論、そして2つのポスターセッションが行われた。さらに、“Toward 100 ミクロンウエハーに向けてとその後”と題したランプセッションが開催され、いずれのセッションも非常に活発に質疑が行われていた。

本稿では、各発表に対して印象に残ったトピックについて発表のポイントを報告する。

\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

今回の16<sup>th</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes は、前回までの開催地である米国のコロラド州ロッキー山脈中のリゾート地とは異なり、デンバー市内の中心にあるホテルマリオットシティーセンターで開催された。参加者は126名で、米国93名、日本9名、ドイツ4名、台湾4名、ノルウェー3名、オランダ3名、カナダ2名、ベルギー2名、アラブ首長国連邦、アルメニア、スペイン、メキシコ、オーストラリア各1名の構成である。また、発表件数は、口頭発表が26件、ポスター発表が22件であった。本会議は、コロラドのゴールデンにある National Renewable Energy Laboratory (NREL)の主催によるもので、特に Sopor博士と Sandy 女史の、毎年この会議に対する精力的な貢献は、頭が下がる思いである。

口頭発表が26件、ポスター発表が22件の全発表数48が13のセッションに分けられ、4日間の日程で講演が行われた。セッション数の内訳は、(結晶成長：2、太陽電池プロジェクト紹介：1、不純物と欠陥：2、原料問題：2、結晶評価：1、表面不活性化：1、薄膜とヘテロ接合デバイス：1、電極問題：1、モジュール：1、ウエハー破壊問題：1)であった。今回の会議のテーマは、“Getting More (Watts) for Less (Si)”であり、発表のトピックスから判断すると「原料問題」と「薄型化」等がキーワードである印象を得た。本会議は、毎年会議のテーマが設定され、これに対して結晶成長、材料、プロセス、評価、デバイス関係の研究者が一堂に会して多方面から意見を自由に発表できるユニークなワークショップとなっている。

今回の会議では、この会議でここ数年熱心に議論されてきた「原料問題」と「薄型化」の問題に対して、何か解決策が見えてきており、楽観視する意見が多くなってきている印象を得た。

本稿では、以下に示すように各セッションで印象に残った発表をまとめて報告する。

## 2. 結晶成長

結晶成長に関するセッションは2つあり、日本から3件と Discussion で多数の議論が行われた。最初に SUMCO ソーラーの金子氏より、電磁キャストの報告があった。結晶の長さは 3.8 から 7 メートルにもおよび、重量としては 2 トンにもなるインゴットが製造可能であることが報告され、会場の注目を集めていた。成長速度は約毎分 1.2mm であり、他のキャスト法と比較して数倍大きく、生産性に関して他の成長方法と比較して少しよい結果が報告されていた。また、短絡による素子の劣化率はキャスト法では 2.2-3.6% であるのに対して、EMC 法では 1.2% と低く、EMC 法の特徴が報告されていた。

次に九州大学の柿本からキャスト法による不純物の数値解析結果が報告された。CZ 法についても報告をしており、CZ 法の発表に対しても質問があった。さらに、結晶中の応力を測定する場合、ラマン散乱法が利用される場合があるが、この精度向上のために 2 次ラマン法を使用する提案がなされた。

最後に、東北大の宇佐美氏からグレインサイズを大きくすることが可能な結晶成長法について発表が行われた。過冷却を利用する方法で、グレインサイズを数 cm くらいまで大きくすることが可能である。これに対して、NREL の Sopori 氏から、グレインサイズが大きくなると、グレイン内の不純物がグレインの境界に集まり、短絡事故を起こすのではないかと質問に、現在検討中であるとの回答があった。

次に討論の時間が設定され、どの成長方法が今後主流となるかとのテーマで活発に議論がなされていた。おそらくキャスト法が主流であることが続くであろうとの意見が出され、フランスでもこの方法を使用して多結晶を育成する会社が創設されているとのコメントがあった。また、EMC 法について、使用電力量はどの程度かとの質問に、金子氏は太陽電池の価格の 0.01% であり、ほとんど電気代は問題にはならないとの回答があり、EMC 法も今後有望な結晶育成方法のひとつになるであろうとの印象を得た。また、米国で開発されたリボン結晶法についても転位が問題ではあるが、1986 年には無転位のリボン結晶を育成した実績があり、この方法も今後の有望な成長法の一つである。

また、少数キャリアのライフタイムを決定しているのは、グレインサイズではなく転位に関係した欠陥であるとの認識が米国、ヨーロッパで圧倒的に強く、今後の研究の行方を左右する大事な要素のひとつであることは注意を要する。

## 3. 太陽電池プロジェクト紹介

NREL では、米国エネルギー局の太陽エネルギー技術プログラムの一環として、太陽電池を設置して使用する場合、どの程度の費用が発生するかシミュレーションが簡単にできるようなプログラムが用意されている。このツールは、一般ユーザがウェブを用いて簡単にアクセスでき、モジュール、インバータ、蓄電装置、設置等の各項目の価格を提示することが可能で、ユーザがどの程度の資金を準備すればよいか簡単に推算可能となっている。また、個人資金をキャッシュ、ローン等の項目ごとに利息等を詳細に設定でき、ユーザがより実際の状況を考慮して設置判断ができるシステムとなっている。日本でも、このようなシステムがあれば、太陽電池の普及に役立つのではないかと思ったのは私だけであろうか。

次に、NREL で進行中の太陽電池プロセス統合プロジェクトの紹介があった。新しく NREL に建築した研究棟の広さは、約 40000 平方メートルであり、その中に成長装置、エッチング装置、評価装置を一つの装置に組み込んだクラスタータイプのプロセス装置の構築を計画している。研究チームとしては、ヘテロ接

合構造グループ、多結晶グループなどがあり、シリコンシステムグループとしては、電気—光学グループ、モデリンググループ等が設置されている。NREL は、今後このような分野に集中して研究を行う姿勢をアピールするものであり、印象的であった。

次に、ジョージア工科大学の太陽電池製造イニシアチブプログラムの紹介があった。ジョージア工科大学は、NREL と強い関係の下太陽電池研究が盛んな大学であり、セル製造プロセスと製造技術に関する研究チームが設定されていた。研究テーマとしては、スクリーン印刷技術や応力解析チームが結成されている。この一環として応力解析チームの研究成果をポスターセッションで発表していた。筆者が、転位と応力との関係について質問を行ったが、まだ研究が開始されたばかりのようで、今から期待したい研究内容であった。また、薄型ウエハーの搬送に必要なウエハーグリッパ法に関しては、ベベル型グリッパ法が提案されており、流体力学を上手に使用したグリッパ法で、薄型結晶のハンドリングに活用できそうである。

#### 4. 不純物と欠陥

Estreicher 氏が、第一原理計算を用いてシリコンの中の鉄、炭素、酸素水素の結合状態を定量的に解析していた。さらに、鉄と炭素、酸素、水素の結合エネルギーをも解析していた。その結果、A センター（酸素と空孔との複合欠陥）と鉄との反応により格子位置の鉄と格子間の酸素になることを示して、シリコンと鉄の欠陥反応を定量的に解釈していた。このような高精度の解析がゲッターリングの解析の基礎データとなるために、今後極めて重要になってくると考える。

次にフラウンホーファーから、FZ シリコン中の鉄とモリブデンの少数キャリアライフタイムに与える影響についての発表があった。鉄もモリブデンも両方とも少数キャリアライフタイムを短くする働きをしており、酸素が存在しなくても両方の不純物でライフタイムに大きな影響を与えることがわかっている。さらに、開放端電圧に関しても、両方の不純物で 30-40mV の電圧低下が考えられ、両方の不純物が酸素が存在しなくてもやはり開放端電圧に影響を与えることを実験的に示していた。このような基礎的実験は、米国、ヨーロッパ、オーストラリアの研究グループが活発に行っており、日本でもさらに活発に研究を推進すべきであるとの印象を得た。

#### 5. 原料問題

原料不足の問題が本ワークショップのひとつの大きなテーマになっているが、ノルウエーの SINTEF から金属グレードシリコンからソーラーグレードシリコンを作成する報告がなされた。シリコンカーバイトとクオーツを混合加熱することにより、シリコン融液中にシリコンカーバイトの粒を析出させ、これを沈殿することにより、純度の比較的高いソーラーグレードシリコンを作成することが可能となったとの報告である。詳細についてはほとんど説明がなかったが、質問のときに、シリコンカーバイトの粒の大きさを聞かれ、約 15 ミクロン程度以上の粒径のシリコンカーバイトは沈殿し、残りのシリコンカーバイトは偏析で除去することである。実験結果として、不純物の偏析現象をシャイルの式を用いて解析しているので、おそらく上記の現象が起こっていることは間違いないようである。

詳細が不明ではあるが、いずれにしても従来のプロセスよりも簡単な方法でソーラーグレードシリコンを作成することが可能となったことは、原料供給問題を解決する点で太陽電池業界、そして LSI 用結晶業界にとって朗報である。

この発表の前に、米国エネルギー省の Mazer 氏から、‘ソーラアメリカイニシアチブプロジェクト’の説明

があった。目標は2015年までに太陽電池のコスト削減をテーマにしたプロジェクトである。このために、国の研究機関等に2007年に60億円、2008年に66億円、2009年に73億円の予算を投入して研究開発を推進するというものである。アメリカの国としては、太陽電池は自分の国で初めて作成されたという自負のもとに、太陽電池産業のイニシアチブをとりたいという願望からか R&D に予算の投入が始まっているようである。

また、NREL の Surek からは2005年までは LSI のほうが太陽電池よりもシリコン原料を多く使用していたが、2006年は太陽電池のほうが多く消費するようになるであろうとの予測が報告された。また、キャストと単結晶の比率は今のまま当分続き、後は薄膜がどこまで伸びるかがかぎとなるであろうとのことである。その他の方法は、研究開発段階が当分続くであろうとの見解を述べていた。この見解は、出席者のほとんどが同意するところであると思う。

## 6. 結晶評価

New South Wales 大学から、“シリコン理想的な評価方法”と題しての講演があった。理想的な方法とあるの期待して講演を聴いたが、さほど驚くほどの素晴らしい評価法ではなく、従来の方法を太陽電池の結晶評価に用いたとの報告であり、少し拍子抜けした思いである。内容は、PL と EL の評価方法で、一般に EL は電極を開放した状態で測定し、欠陥により形成されていると思われる非発光センターを介して発光しない場所を特定し、これを欠陥の存在位置とする方法である。しかし、今回は、外部電極を短絡し、これにより欠陥に敏感な発光パスが形成され、ここが発光し、欠陥の存在位置が確認できるという報告である。このように、PL と EL そして短絡 EL とでも呼ぶ方法の複合評価により、欠陥の場所の同定が可能となってきていることは、結晶評価やデバイス作成の観点から興味深い方法である。

次に、宇宙研の田島先生から PL を使用した結晶欠陥の詳細な報告が行われた。この報告では、PL を用いた欠陥のマッピングとスペクトロスコピーの測定結果が報告され、少数キャリアライフタイムを決定する欠陥は転位近傍に存在することがわかってきている。さらに、この欠陥は転位中心にはなく、転位の周囲に存在する欠陥であることまでが示された。このような詳細な解析は、やはり日本のお家芸であり、LSI の開発に多大な貢献をしてきた実績が、太陽電池の分野においてもいかに発揮されていると思う。日本で長い間培ってきた LSI の知識を太陽電池の解析に応用することは、人的財産と機械的財産を考える上で有効に活用することができると思う。

ポスター発表では、豊田工大の新船氏からシンクロトロンを用いたシリコン中の鉄の分布を測定した結果が報告されており、聴衆の興味を引いていた。実験結果はシリコン中に存在する鉄は、あるグレインバウンダリーの周囲に集まり、熱処理をするとまた消滅するとの報告が行われた。実験的に困難なマイクロ XANES を用いて、鉄の分布を可視化することは結晶評価の観点からきわめて有用な情報が得られているために、今後の研究に大きな期待が寄せられている。

また、討論の時間には、エバグリーンの Bounaccici から非常に根気のいる実験である結晶全領域エッチングの実験から、転位の3次元構造を明らかにしている報告が紹介された。これは彼自身の研究結果ではないが、このように根気の要る仕事を続けて、視覚的に転位分布を認識するような仕事も研究開発の上で重要な位置をしめるのではないかと思う。

最後に、本ワークショップの主催者である Sopori 氏から、シリコン中の鉄をバックコンタクトのアルミニウムを用いて溶体化する技術の報告がされた。これは、試料の温度を上げることによりシリコンとアルミニ

ウムの界面に過剰に存在する空孔を鉄析出物に注入し、鉄の溶体化を加速する方法である。さらに、シリコンとアルミニウムの共晶点以上の温度にあげることにより、鉄の溶体化により発生する格子間シリコンを、シリコンとアルミニウムの界面に拡散輸送することにより、シリコン中に鉄を溶体化させることが可能であるという技術である。これも、LSI で構築された知識を太陽電池に応用している技術である。このように、LSI で培われた技術を太陽電池で上手に応用することは、これからの太陽電池の研究開発に必要な項目であると考えられる。

## 7. 表面不活性化薄膜とヘテロ接合デバイス

表面不活性化問題については、IMEC の Dekker 氏が PCVD で  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜をシリコン基板上に堆積させる場合、ガスの組成と基板温度によって  $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜の組成が変化し、これにより開放電圧が変化すると報告があった。また、水素と重水素を用いることにより、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜からの水素の抜けかたに差があり、重水素によるパッシベーションの可能性について言及していた。

次に産総研の林氏により、三洋電機が開発した HIT 構造のバンド構造の測定結果が示され、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜の後熱処理の有用性について報告がなされていた。

最後に、NREL の Page 氏より HIT 構造の i 層の堆積温度とライフタイムの関係が示された。これによると、堆積温度が高くなると再結合速度が極端に大きくなり、ライフタイムが小さくなってくることが報告された。この結果から、いかに低温で i 層を堆積させるかが HIT 構造のパッシベーション効果を左右すると考えられる。

## 8. 電極問題

New South Wales 大学の Wenham 氏から、低コスト高効率太陽電池のためのペーストの開発状況の報告があった。この報告では、shallow メタルと Semiconductor fingers という低抵抗領域を電極トレンチのそこに形成することで、電気抵抗を下げるのが可能となり、効率の向上が期待できるとの発表である。この報告は、中国で今話題となっている Suntech Power の石氏との共著であり、Suntech Power ではこのペーストを使用し、この秋に製品を出荷する予定であるとのことである。

また、Ferro Corp の Salami 氏からは、リンペーストやボロンペーストの開発に関する発表が行われた。ここで、質問として LSI で使用されている銅のペーストの可能性はないのかとの質問があった。昔はシリコンには銅は禁物であったが、最近 IBM が銅の配線に実現により、配線抵抗を低減した例があまりにも有名である。これに対して、LSI 経験者からは“とんでもない”との意見が強かったが、太陽電池プロパーの研究者からは、可能性があるのではないかと意見があった。これに関して熱い意見交換がされたが、まだ結論は出していない。ちなみに、韓国のグループはすでに銅配線で太陽電池を作成して何の問題もないとコメントしていたが、長期信頼性、すなわち 20 年、25 年、30 年の保障が可能であるか疑問であるとの意見が多く出されていたのが印象的である。

## 9. モジュール

モジュールの寿命についての議論が行われ、ポリマーフィルムの耐久性、電極の腐食や裏面剤のはがれ等の実例の報告があった。特に、ガラスと太陽電池との接着問題や気泡の発生等について写真を見せて実例を紹介していた。

## 10. ウェハー破壊問題

最初に、GTSolarのKhattak氏から赤外線を用いたバルクシリコン中のSiCや亀裂の観測結果が報告された。シリコン結晶は0.8-1.5 $\mu\text{m}$ の光を通すために、この波長の光をバルクシリコンに照射し透過法で異物の観測を行っていた。この方法は、非常に鮮明に画像が得られるが、SiCなのか亀裂なのかの判定が素人には困難なように感じた。この点に関して、どのようにしてSiCと亀裂とを判別するのかとの質問があった。これについて、講演者は、映像の形状からSiCなのか亀裂なのかの判定を行うとのことであった。これを判定できるようになるには、結構時間がかかりそうであるとの印象である。

次に、NRELのSoporiが、レーザ光を使用してウェハーの亀裂の検査を行う方法を提案していた。この方法は、レーザ光をウェハーの一部に照射し、その温度の上がり方で亀裂を測定しようとのアイデアである。講演の後の質問で、このように局所的にレーザ光をウェハーに当てると、最初に存在した亀裂を広げて使用可能なウェハーでも使用できなくなる可能性はないかとの質問があった。これは、考えられる質問であり複数の人が同じコメントをしていた。その後にととう講演者が考えを変える一幕もあった。このように、議論の時間が十分取れるといろいろな議論ができ非常に面白い会議である。

最後の討論の時間には、今後5、10、15年後にはどのような技術が太陽電池を製造しているかとの質問に、キャスト法とCZ法が依然として主流であろうとの意見が大半であった。薄膜やリボン結晶は約5%のシェアにとどまるとの意見があり、ましてや量子ドット等を用いた新規太陽電池は、相当大きなブレークスルーがない限り実用化されることはないとの意見が大勢を占めていた。やはりキャスト法とCZ法が依然として主流であるのは間違いなく、現実的にはこの方法の研究開発を行う必要があるとの意見でほとんどの参加者の意見が一致した。

## 11. おわりに

本会議は、講演と討論とポスターの比率が時間的にほぼ等配分されており、非常に中身の濃い討論ができたことは参加して非常に参考になった。今後この会議の進むべき方向を議論していたときに、企業の最先端の研究者からの発表が欲しいとの意見があった。これは私も同じ意見であるか、実際のところ企業秘密に触れる点が多く存在するらしく、現実的にはあまり多くの発表は期待できそうにもないようである。来年は、また開催場所をロッキー山脈中のリゾート地に移し、やはり3泊4日の日程で行うようである。日曜日から始まる日程に関しても議論があり、特にご当地のNRELからの参加者数が少ないとの指摘があった。

今後もこの会議は続くようであり、日本からもたくさんの研究者が参加し議論できるといろいろ実り多い会議となるではなかろうか。