

# 多結晶太陽電池の高効率技術開発

## High-Efficiency Cell Technologies for Multi-Crystalline Silicon Solar Cells

布 居 徹\*  
Tohru Nunoi

### 要 旨

シリコン太陽電池の低コスト化のため、より安価な半導体基板である多結晶シリコン基板を用いた太陽電池が開発された。この太陽電池は、従来の低コストな拡散方法や印刷電極形成では、現状単結晶シリコン太陽電池レベルの高い変換効率を安定して得ることは困難であることから、実用化を目指して、この多結晶太陽電池の高効率化技術について開発を進めてきた。開発試作成果として、10cm角のキャスト法シリコン多結晶基板のセルで、これまで最高の変換効率値17.2%に達した。

開発したセル技術を中心に、その経緯を含め技術解説する。

Solar cells using multi-crystalline silicon substrates have been developed for cost reduction. The cells using only conventional low cost processes like thermal diffusion and screen printing electrodes could not show sufficient conversion efficiency. High efficiency technologies have been extensively studied for the practical utilization. As a result, a record high conversion efficiency of 17.2% was obtained for a 10 × 10cm<sup>2</sup> cast silicon substrate.

This paper describes high efficiency technologies of the multi-crystalline solar cells and its progress.

### まえがき

近年の地球環境問題への関心の高まりから、クリーンエネルギー開発への期待は増大している。太陽光エネルギーの太陽電池による電力への変換技術は、将来性のある技術として、種々の構造の太陽電池について変換効率の向上や発電コストの低減を目指し、活発な研究開発が行われてきている。

単結晶シリコン基板を用いた太陽電池は、従来から高い変換効率と長期信頼性に優れているため電力用太陽電池として多くの実績を持っているが、さらにコスト低減を行うための新たな技術として、1980年代から多結晶シリコン太陽電池の開発が本格化した。この開発では原料還元技術や基板作製技術の開発<sup>1)</sup>とともに、セルの連続自動生産方式の開発<sup>2)</sup>や、セル変換効率を向上させ出力当たりのコスト低減を図るための、セルの高効率化技術の開発<sup>3)</sup>が重点的に行われてきている。

コスト低減を目指した実用大面積セル(10 × 10cm<sup>2</sup>)については、図1に示すように、当初8%台であった変換率は、グループ表面のセルで最適化の結果、ほぼ2倍の17.2%(研究試作での最高値)まで向上した。なお、小面積セル(1cm<sup>2</sup>)では、18.6%の変換効率<sup>4)</sup>が発表されており、多結晶シリコン太陽電池は、さらに高い変換効率の得られる可能性を有する。

この報告では、NEDO委託研究で行われてきたセル構造開発や、その量産技術開発等について解説する。

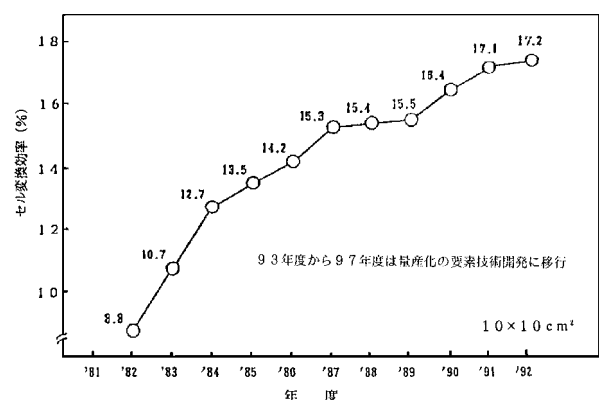


図1 多結晶太陽電池の効率推移

Fig. 1 Progress in multi-crystalline silicon solar cells.

### 1. 多結晶シリコン太陽電池の特長

CZ(チョクラルスキー)成長法に代わりインゴット製法の簡略化を図ったキャスト法と呼ばれる多結晶

\* 技術本部 エネルギー変換研究所

シリコンインゴットの作製方法は、るつぼに入れたシリコン原料を 1400 以上の高温で溶解後、冷却して固化することで得られる<sup>5)</sup>。これを板状にスライスして太陽電池の基板とする。この太陽電池の基本セルは、単結晶シリコンセルと同様に、1つの接合面を有する構造であるが、低コストなシリコンを原料とし、多結晶状態の基板を用いたものであり、表1に示すような4つの特長を持っている。

表1 多結晶シリコン基板の太陽電池  
Table 1 Features of multi-crystalline silicon solar cells.

特 長	課 題
セル作製に最適な角形基板が得られ面積利用効率が高い 低コスト精製シリコンなど、使用できる材料の品質幅が大きい シリコンインゴットの大型化容易で、連続作製の可能性が高い インゴット固化成長の安定性が高い	結晶粒(数mm)毎の結晶方位が一樣でなく、化学的な全面テクスチャ化困難 結晶内の欠陥密度は、CZ法単結晶成長よりも大きく、セル特性が単結晶に比べ低くなるので、セル特性向上技術が必要

しかしながら、多結晶シリコンとは、単結晶のような特定シリコン配列以外の多様な状態を総称するもので、材料や固化条件により、結晶粒界とともに、微視的には、結晶欠陥、不純物などに関して多様な状態が存在する。太陽電池作製の段階においては、表1に示した2つの課題があるが、次項で述べるような高効率技術を適用することで、単結晶シリコン太陽電池と同様に長期安定性に優れているので、低コストな実用太陽電池となる。

## 2. セル特性向上のための要素技術

これまで検討してきた主な特性改善技術を表2に示す。まず基板品質に関しては、不純物のゲッターリングや水素プラズマ処理によるパッシベーション効果(表面安定化)が検討された。セル表面については、エッチングでのテクスチャ表面形成(10 μm程度のピラミッドが集積した形状)の他、連続常圧CVD(熱分解)法による高品質な反射防止膜形成、グループ(溝)形成での多結晶基板表面で効果的な反射低減等の検討を行った。接合については、高速拡散の検討を初め、気相での接合と反射防止膜の同時形成他の開発

を行った。電極形成に関しては、微細電極化、電極占有面積の低減、そして表面電極ピッチ最適化を行った。

以下、多結晶セルに関し特徴的で、特性向上効果の顕著であった水素プラズマ処理効果と、セル表面の反射低減を中心に述べる。

表2 セル化における主な高効率技術の検討  
Table 2 High efficiency technologies for multi-crystalline cells.

基 板	りんゲッターリング 水素プラズマ処理 セルの裏面電界形成
表 面	テクスチャ表面加工での反射低減 常圧 CVD 法反射防止膜の形成 グループ加工での表面反射の低減
接 合	高速拡散の検討 常圧 CVD 法での接合と反射防止膜の同時形成 拡散条件の最適化(接合深さ、シート抵抗)
電 極	線幅低減による微細電極化 電極占有面積の低減 表面電極ピッチ最適化

### 2・1 水素プラズマによる特性向上

開発当初、最も顕著な改善効果を示した水素プラズマ実験について述べる<sup>6)</sup>。

実験方法は、低圧の水素雰囲気中に、対向する電極を設け、負極側には接合を拡散で形成した45mm角の多結晶シリコン基板を置いた状態でプラズマ放電を行った。放電条件としては、電圧500Vで1時間とした。その後、電極を形成してセル化した。

キャスト法多結晶セルの動作特性は、電流値の46%向上など大幅な改善が明らかにされたが、このセル表面の光起電力の状況を、OBIC(Optical Beam Induced Current)測定法で調べた結果、図2に示すように、水素パッシベーション効果は、多結晶シリコン基板の結晶粒界の他、結晶粒内部の光感度も向上させることが明らかになった。

以上の実験からは、イオン化された活性な水素原子が、少なくともシリコン表面ないしは深さ数μmまでのシリコン原子の未結合手と結合することで、光吸収で発生する少数キャリアに対するパッシベーション効果が生じ、基板品質の改善に寄与したと考えられる。その後の検討で、向上率は基板品質と密接な関わりがあり、品質の良好な基板ほど向上率としては低下する傾向も明らかにされた。

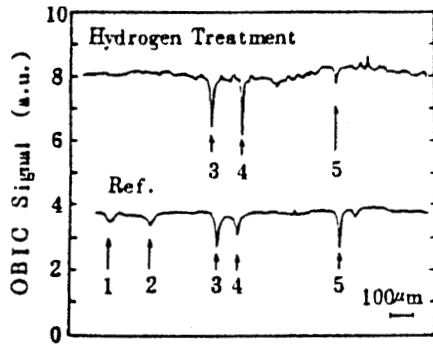


図2 水素プラズマ処理を行った多結晶太陽電池のOBIC特性  
Fig. 2 Optical beam induced current characteristics of multi-crystalline silicon solar cell after hydrogen plasma treatment.

### 2・2 多結晶セルの表面反射低減

一般的に、セル表面への入射光の反射損失低減には、シリコン表面の微視的な形状（テクスチャ面等）効果と、干渉原理による反射防止コーティングが併用される。多結晶シリコン基板は、結晶粒（1～10mmの大きさ）毎に結晶方位が異なるので、面方位のシリコン溶解速度差を利用したアルカリ水溶液等での表面テクスチャ化は、基板面積の半分程度において反射低減の形状効果としては十分でない。

この課題克服のため、セル全面の大幅な反射低減を目指してグループ表面を持つセル構造の開発を行った。この基本セル構造は、図3に示すように、表面の反射低減と同時に、厚さ0.3 μm程度の薄い拡散層の折り畳まれた構造が、電極に向かう電流の直列抵抗成分低減の、2つの効果によりセル特性向上が期待できる<sup>7)</sup>。

グループ表面の反射低減の実験結果<sup>8)</sup>について紹介する。試作セルは、深さ70 μm、ピッチ120 μmのグループ面に反射防止膜として常圧CVD法でTiO<sub>2</sub>を単層で形成したセル、同じくTiO<sub>2</sub>上にMgF<sub>2</sub>層を重ね2層反射防止膜としたセルを試作した。なお、リファレンスセルとしては、テクスチャ表面に、単層TiO<sub>2</sub>反射防止膜層を形成した。

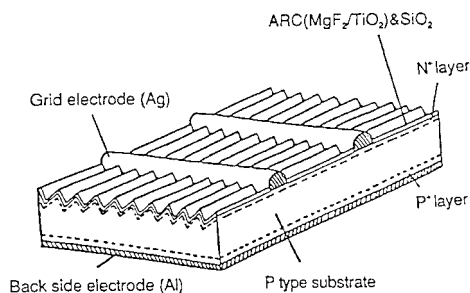


図3 高効率多結晶シリコン太陽電池の基本構造  
Fig. 3 Basic structure of a high efficiency polycrystalline silicon solar cell.

各セルの表面分光反射率の測定結果は、図4に示すように、単層の反射防止膜セルでの比較において、グループセル表面は短波長側と長波長側で大幅な反射低減が達成されているが、2層反射防止膜を形成した場合には更に低反射化できた。

これらの改善効果は、セルの分光感度の向上にも確実に反映できており、グループ表面が、多結晶シリコン基板セルの表面反射低減に効果のあることが明らかになった。なお試作セルのAM1.5光源下（擬似太陽光）の変換効率値は、グループ表面の2層反射防止膜形成セル（16.4%）では、テクスチャ表面のリファレンスセルよりも効率値で1.1%（絶対値）の改善が見られた<sup>9)</sup>。

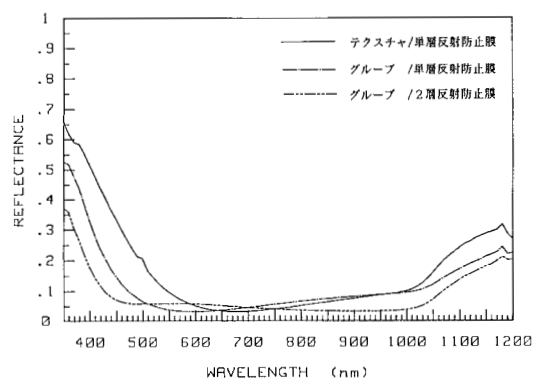


図4 表面構造を変えた時のセル分光反射特性の比較  
Fig. 4 Comparison of cell spectral reflectance under various surface condition.

### 3. 高効率キャストセルの試作

これまで最高の変換効率値の得られた多結晶太陽電池の試作実験について述べる。キャスト法による10cm角多結晶シリコン基板（P型、比抵抗：1 Ω・cm、住友シチックス製）の片面に、先端角を最適化（頂角40度）したベベル加工のブレードを用いて、ピッチ70 μm、深さ70 μmのグループをダイシング装置により形成した。加工歪層はNaOH水溶液中に5分間浸すことで除いた。次にPOCl<sub>3</sub>による拡散方法で、シート抵抗78 Ω/□の0.2 μmの浅い接合層を形成した。その後、表面安定化のためのSiO<sub>2</sub>パッシベーション膜と、反射防止膜の第1層目となるTiO<sub>2</sub>膜を順次積層した。続いて裏面の拡散層をエッチングにより除去した後、Alペーストの印刷、焼成によりBSF（Back Surface Field）層を形成し<sup>10)</sup>、TiO<sub>2</sub>膜の上からAgペーストの印刷、焼成<sup>11)</sup>により、グリッドピッチ2.0mmと高密度に最適化した受光面電極を形成した。最後に反射防止膜の第2層目となるMgF<sub>2</sub>膜を蒸着した。完成セルの基板厚は約250 μmである。

試作したセルの外観は図5に示すように、表面反射低減により多結晶太陽電池特有の結晶粒界は殆ど見られなくなり、10cm角の多結晶シリコン太陽電池としては、これまで最高の17.2%（機電検測定、現JQA）を確認した<sup>12)</sup>。

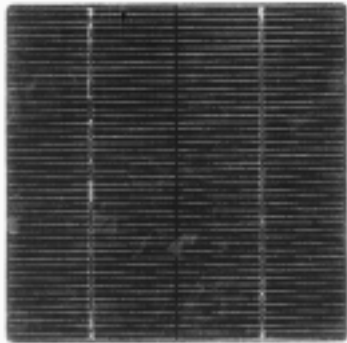


図5 グループ表面を持つ結晶太陽電池セルの外観  
Fig. 5 A high efficiency multi-crystalline silicon solar cell with grooved surface.

#### 4. モジュールの試作検討

ここではTiO<sub>2</sub>単層の反射防止膜を形成したグループ構造のキャストセルを用いて、モジュールを作製した結果について述べる。従来のテクスチャ表面を有するセルとグループ表面のセルについて、図6に示すように、反射防止膜TiO<sub>2</sub>の厚さに対する短絡電流特性の変化から、グループセルはモジュール構造でも、より高い電流値の得られることが確認できた。10cm角セル36個を直列に接続した960×425mm<sup>2</sup>のスーパーストレイト構造のモジュールでの特性は、平均のセル変換効率16.0%で、モジュール変換効率としては14.1%と従来の単結晶シリコン太陽電池モジュールの特性に匹敵する高い効率値が多結晶シリコン基板を用いた太陽電池で得られた<sup>13)</sup>。

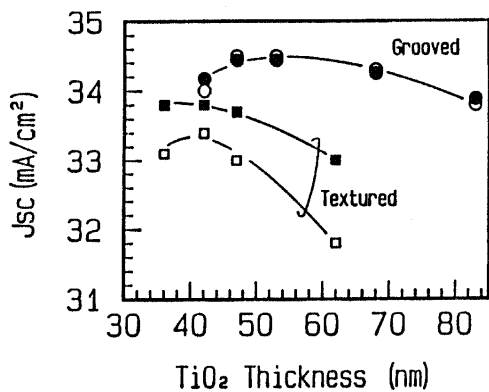


図6 モジュール構造での反射防止膜の最適化  
Fig. 6 Optimization of AR coating thickness.

#### 5. 量産技術開発

グループ表面多結晶太陽電池の実用化に必要なセルとモジュールの量産要素技術の開発を行った中で、グループ加工の高速化、電極焼成の高速化の、2つの技術開発について概要を述べる<sup>14)</sup>。

機械的なグループ加工の課題は、加工速度の大幅な向上である。当初の試作実験で、1枚の高速回転刃を備えたダイシング装置での10cm角の表面加工には、ほぼ1時間を要した。図7に示すようなマルチ刃の加工方式について開発を行った結果、同基板で30秒までの高速化が確認されている。

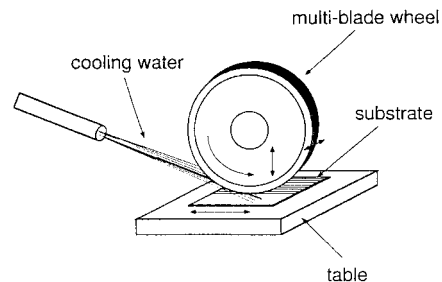


図7 開発したマルチブレード加工方式の概要図  
Fig. 7 Outline of a multi-blade wheel grinding method.

次に、電極形成の高速化の検討結果について述べる。太陽電池の電極形成は、銀ペースト材料をスクリーン印刷し、ベルト搬送方式の炉で温度800℃付近で焼成し微細なグリッド電極とするが、量産化には特に焼成速度の向上が課題であった。開発したベルト炉は、ランプ加熱方式であるが、シリコン基板が効果的に加熱できるように工夫されたものである。

実験の結果は、図8に示すように、従来の焼成速度400mm/分から、速度10倍以上の5m/分の高速焼成を行った場合でも従来と同等の特性の得られることが確認できた。

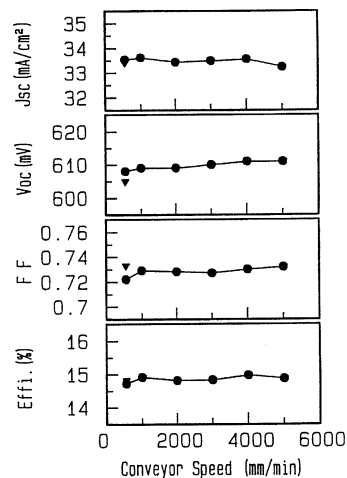


図8 電極焼成ベルト炉の速度とセル特性  
Fig. 8 Cell performances as a function of conveyor speed.

## むすび

10cm角のキャストセルの変換効率は17.2%の値に達した。このプロセスを基本として作製したセルを36個直列接続したモジュールの試作結果として、モジュール変換効率14.1%に達した。

従来の単結晶シリコン太陽電池では基板品質自体がほぼ一定であることに対し、多結晶シリコン基板は、インゴット内でも基板品質が異なり、その最適化自体にも多くのノウハウと高度な技術が必要となる。特に、その高効率化技術については、基板の製法、基板作製条件、品質の向上に伴い、セルでの特性改善効果は異なる。

多結晶シリコン太陽電池は、低コストなシリコン材料の有効利用を図りながら、高信頼性と、単結晶シリコンに次ぐ高い変換効率の得られる低コストな電力用の太陽電池として今後の発展が期待できる。

多結晶太陽電池の開発で得られた多くの知見は、超高効率太陽電池の開発成果とともに、次世代の結晶質薄膜シリコン太陽電池の研究、開発を進める上でも有効な技術ベースとなる。

## 謝辞

多結晶太陽電池セルの高効率化の研究、量産化技術の開発は、サンシャイン計画に基づき新エネルギー・産業技術総合開発機構により推進されたもので、その研究開発に当たりご指導を頂いている関係各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) K. Kaneko et al., "Cold Crucible Induction Casting of Semi-Conductor Silicon for Solar Cell" IEEE Proc. of 21st PVSC p.674 (1990).
- 2) T. Nammori et al., "A New Automated Plant for Low Cost Solar Cell" PVSEC-1 p.805 (1984).
- 3) 兼岩 "高効率Si太陽電池の最近の動向" 応用物理学会第105回結晶工学研究会(1998年3月)
- 4) A. Rohatgi et al., 25th IEEE PVSC, Washington, DC, (1996).
- 5) T. Misawa et al., "Cast Methods of Low Cost Polycrystalline Silicon for High Efficiency Solar Cells" PVSEC-4 p.449 (1989).
- 6) 南森他 "多結晶太陽電池の水素プラズマ処理" 第35回応用物理学会(1998年3月)
- 7) T. Nunoi et al., "Cast polycrystalline Silicon Solar Cell with Grooved Surface" IEEE Proc. of 21st PVSC p.664 (1990).
- 8) T. Machida et al., "Efficiency Improvement in Polycrystalline Silicon Solar Cell with Grooved Surface" IEEE Proc. of 22nd PVSC p.1033 (1991).
- 9) 町田他 "薄型高効率多結晶シリコン太陽電池" シャープ技報, 50 p.15 (1991年9月)
- 10) K. Okamoto et al., "Rapid Firing of Printed Pastes for BSF Solar Cell under High Intensity Light Source" IEEE Proc. of 16th PVSC p.818 (1982).
- 11) T. Nunoi et al., "High Performance BSF Silicon Cell with Fire Through Contacts Printed on AR Coating" IEEE Proc. of 14th PVSC p.805 (1980).
- 12) H. Nakaya et al., "Polycrystalline Silicon Solar Cells with V-grooved Surface" PVSEC-7 (1993).
- 13) T. Okuno et al., "Improved Efficiencies of polycrystalline Silicon Solar Cell and Module" 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Switzerland (Oct 1992).
- 14) T. Machida, H. Kumada, M. Murakami et al., "Development of Low Cost Production Technology for Polycrystalline Silicon Solar Cells" PVSEC-9 (1997).

(1998年1月23日受理)