

## 三菱重工の高効率大面積太陽電池



## High Efficiency Large Area Solar Module in Mitsubishi Heavy Industries

山内 康弘\*1  
Yasuhiro Yamauchi高塚 汎\*2  
Hiromu Takatsuka米倉 義道\*3  
Yoshimichi Yonekura野田 松平\*4  
Matsuhei Noda竹内 良昭\*5  
Yoshiaki Takeuchi山下 信樹\*6  
Nobuki Yamashita

当社は我が国の太陽電池普及加速に向けた低コスト化技術開発計画に沿い、VHF プラズマ CVD による高効率大面積薄膜シリコン太陽電池の開発を行っている。既にアモルファス Si 太陽電池で、独自のラダー電極を開発し、VHF プラズマの大面積化に成功した。現在アモルファス Si / 微結晶 Si からなるタンデム型太陽電池を開発中で、5 cm 角の小面積ガラス基板試験で、13.1 % のタンデムセル効率を得た。これらの技術を大面積基板に反映して、変換効率 12 % を目指した大面積タンデムモジュールの開発を(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究で実施中である。

## 1. はじめに

現在、我が国では NEDO にて、太陽電池普及加速に向けた低コスト化技術開発が精力的に行われている。特に薄膜シリコン太陽電池は原料の制約がないことから、低コスト化には最も有利な技術と考えられている。しかしその実現のためには、変換効率の向上と、生産性の向上が必要不可欠である。当社は、高効率化にアモルファス Si セルと微結晶 Si セルとをタンデム化した 2 接合太陽電池が有効と考え、その第一ステップとして既にアモルファス Si 太陽電池の生産を 2002 年に開始した。高生産性の実現には、薄膜 Si 太陽電池の製膜プロセスであるプラズマ CVD 大面積高速製膜技術が重要で、高速・高品質製膜が可能な VHF プラズマ CVD 法に着目して開発を行っている。

VHF プラズマは、従来の RF プラズマに比べプラズマ密度が高く、イオンダメージが少ないため、高速・高品質製膜に適している<sup>(1)(2)</sup>。しかし VHF は RF に比べて電磁波の波長が短いため、大面積化に課題があった。これに対し当社は独自のラダー電極(図 1)と、その電極へ給電する VHF の位相を制御する方法(位相変調法)<sup>(3)(4)</sup>により、VHF プラズマの大面積化に成功した。その結果、太陽電池用としては世界最大の 1.1 m × 1.4 m サイズの大面積ガラス基板に、アモルファス Si を 1.0 nm/s で高速製膜可能な VHF プラズマ CVD 装置の開発に成功し、大面積・高速製膜技術を確立した。

タンデム型太陽電池は、VHF プラズマ CVD の高品質製膜性を活かした高効率化を行い、5 cm 角ガラス

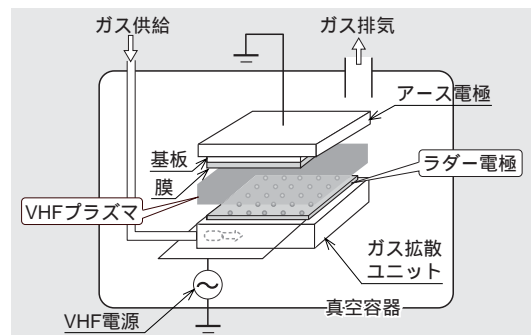


図 1 ラダー電極を用いた VHF プラズマ CVD の概念

基板試験で、初期効率 13.1 %<sup>(5)</sup>を得た。これらの技術を大面積基板に適用して、変換効率 12 % を目指した大面積タンデムモジュールの開発を実施中で、平成 14 年度に 40 cm × 50 cm サイズモジュールの初期効率として 11.2 %<sup>(6)</sup>を得ることができた。

微結晶 Si は吸収係数が小さいため、膜厚をアモルファス Si と比べ 5 倍以上にする必要があり、アモルファス Si と同じ時間で作るには 5 倍の高速製膜技術が必要である。また、高速高品質製膜には、高圧力化が必要で、圧力が高いとプラズマの局在化がより顕著となるため、均一製膜が一層難しくなる。この対策として、電極棒ピッチを小さくし、電極棒断面形状を変えることで、1 m 級の大面積均一製膜で 1.6 nm/s の製膜速度が得られるようになった。この高速製膜技術を 40 cm × 50 cm サイズモジュールに適用することにより、現在、微結晶 Si-i 層の製膜速度が 1.3 nm/s で変換効率 11 % を得ている。

今後、更なる膜質改善、光閉じ込め技術の高度化な

\*1 長崎造船所太陽電池事業室主席

\*2 長崎造船所太陽電池事業室長

\*3 技術本部長崎研究所応用物理研究室長

\*4 技術本部長崎研究所主幹

\*5 技術本部長崎研究所応用物理研究室主席 理博

\*6 技術本部長崎研究所先進技術研究センター先進材料グループ主席

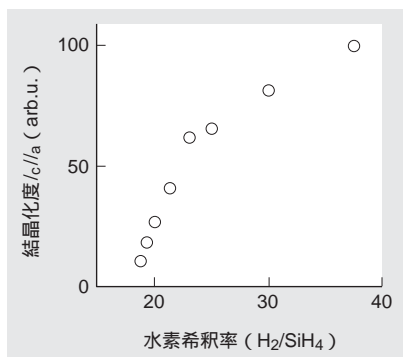


図2 微結晶i層結晶化度の水素希釈率依存性

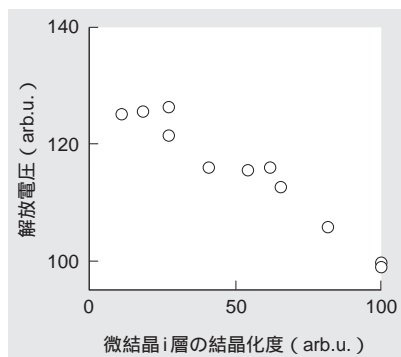


図3 微結晶Siシングルセル開放電圧のi層結晶化度依存性

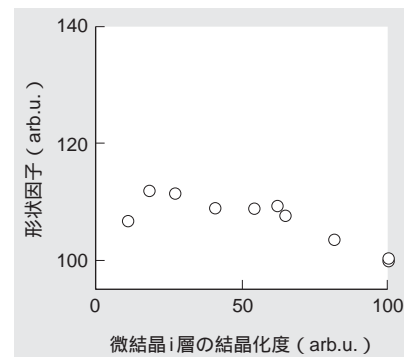


図4 微結晶Siシングルセル形状因子FFのi層結晶化度依存性

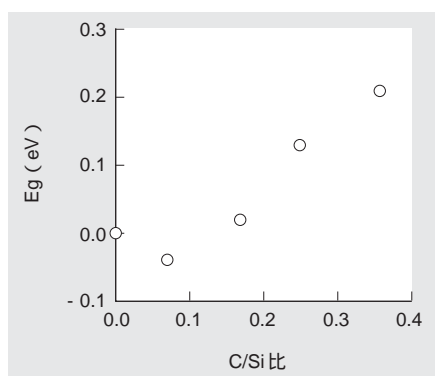


図5 微結晶SiCバンドギャップ変化分のC/Si比依存性

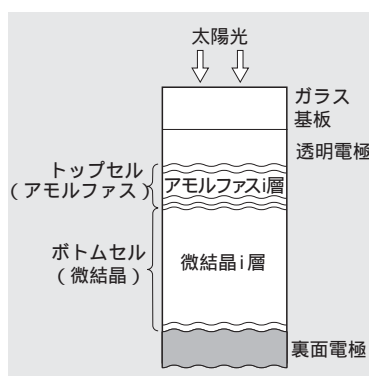


図6 タンデムセルの構造

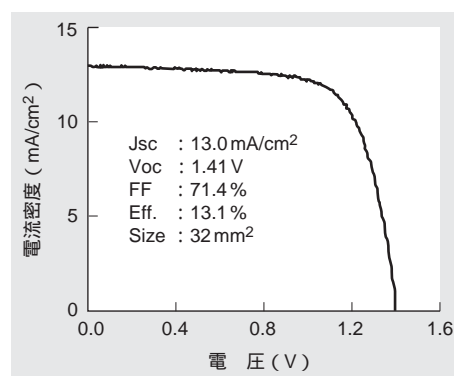


図7 タンデムセルの初期発電特性

どにより、安定化後効率12%を目指すと共に、微結晶Si製膜用の新電極を用いた製膜条件の適正化により、1 m級サイズで2.0 nm/s以上の大面積高速製膜技術を開発し、低コスト化技術を確立していく予定である。

## 2. アモルファスSi / 微結晶Si タンデム型セル製膜技術の開発

当社はアモルファスSi / 微結晶Si タンデム型太陽電池高効率化を、5 cm角基板用の小型VHFプラズマCVD装置で実施し以下の結果を得た。

- (1) 結晶化度の適正化による微結晶i層高品質化技術  
水素希釈率と微結晶i層の結晶化度の関係を図2に、結晶化度と開放電圧Voc及び形状因子FFとの関係をそれぞれ図3、図4に示す<sup>(5)</sup>。図2から水素希釈率の増加と共に、結晶化度が上がることが分かる。また開放電圧Vocと形状因子FFは結晶化度の低下と共に増加する。したがって結晶化度には適正値が存在し、これらのデータを基に変換効率が最大となる微結晶i層高品質化条件を決めた。
- (2) 微結晶Si-p層用微結晶SiCの開発  
微結晶Siセルの開放電圧Vocを向上させるため、p層用に微結晶SiCを開発した<sup>(5)</sup>。開発した微結晶

SiCは、ラマンスペクトルとX線回折像から、微結晶SiとアモルファスSiCから構成されていることが分かった。その微結晶SiCのバンドギャップはC/Si比によって変化するが、その様子を図5に示す。C/Si比が増えると最初バンドギャップは狭くなり、更にC/Si比を上げるとバンドギャップも広くなる。これらのデータを基にC/Si比を制御することにより微結晶SiCのp層を適正化し、微結晶Siセルの開放電圧Vocを0.517Vから0.573Vに約10%改善した。

上記(1)(2)の技術に加え、スパッタ法による裏面電極製膜プロセスの適正化、及びトップセルn層の微結晶化によるトップn層とボトムp層との界面損傷抑制技術を開発した。その結果、タンデムセル初期効率として13.1%<sup>(5)</sup>を得た。試作したタンデムセル構造を図6に、初期発電特性を図7に示す。

## 3. タンデムモジュール化技術開発

小面積VHFプラズマCVD装置で確立したタンデムセル高効率化技術を、40cm×50cm基板用VHFプラズマCVD装置に反映した。

- (1) 微結晶Si用大面積VHFプラズマ均一化技術の開発

微結晶Si製膜は、製膜圧力をアモルファスSi製膜に比べて数倍以上に高くする必要があり、VHFプラズマの場合、特に圧力が高くなるとプラズマは局在化し、大面積製膜が難しい。そこで、シランプラズマの可視化装置を製作し、プラズマ均一化技術を開発した。図8にプラズマ可視化装置の概念図<sup>6)</sup>を示す。ラダー電極サイズは1.2 m × 0.37 mで、対向したアース電極は可視化のため多孔金属板を用いた。VHFケーブルはラダー電極の短辺側に繋ぎ、電力を供給した。

このプラズマ可視化装置により、圧力が高くなるとラダー電極への給電点近傍で異常放電が生ずること、及び電極棒間のプラズマ発光強度が弱くなることが明らかになった。その対策として、電極棒間隔を狭くし、ラダー電極と対向電極間距離を短くすると共に、VHFケーブルとラダー電極との接続構造を改良した。その結果、図9に示すように、圧力133 Pa、プラズマ励起周波数60 ~ 100 MHzにて、プラズマ電極中央部の電極棒に垂直な方向に均一に発生させることができた。電極上定在波の電圧分布のためラダー電極の両サイドのプラズマ発光強度は

弱く、大面積アモルファスSi製膜用に開発した位相変調を適用し、図10に示すようにラダー電極全体にプラズマ発光強度分布を均一にすることができた。

(2) 40 cm × 50 cm サイズのタンデムモジュール化技術の開発

以上述べた、タンデムセル高効率化技術と、微結晶Si製膜用大面積VHFプラズマ均一化技術を統合することで、40 cm × 50 cm サイズの高品質タンデムモジュールを開発した。図11に試作したタンデムモジュールの初期I-V特性を示す。40 cm × 50 cm サイズのタンデムモジュールで、初期効率11.2 %<sup>6)</sup>を得ることができた。小面積タンデムセルの劣化率からの推定で安定化後効率は9.8 %となる。

4. 微結晶Si高速高品質製膜技術の開発

タンデム型太陽電池を構成する微結晶Siセルのi層は吸収係数が低いいため、膜厚をアモルファスSi-i層の5倍以上に厚くする必要があり、アモルファスより高速で製膜する必要がある。従来の製膜圧力で高速製膜

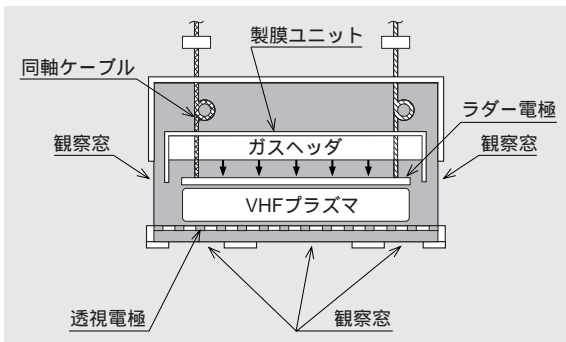


図8 VHFプラズマ可視化装置の概念

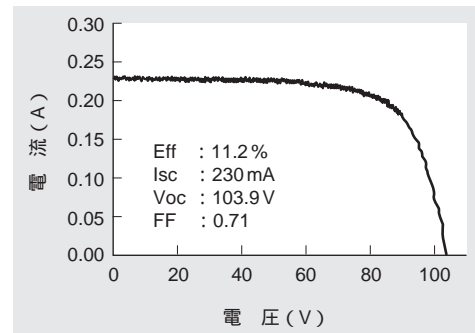


図11 40 cm × 50 cm タンデムモジュールの初期発電特性

	周波数 (60 MHz)	周波数 (80 MHz)	周波数 (100 MHz)
圧力 133 Pa (1 Torr)			

図9 SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>プラズマ発光分布のプラズマ周波数特性

	周波数 (60 MHz)	周波数 (80 MHz)	周波数 (100 MHz)
圧力 133 Pa (1 Torr)			

図10 位相変調を用いた場合のSiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>プラズマ発光の分布



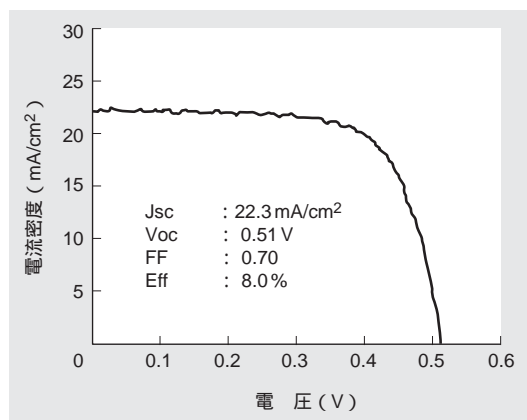


図12 VHFプラズマで高速製膜した微結晶Siシングルセルの発電特性

化すると、長波長感度が低下するため太陽電池の効率が大幅に低下していた。

この点に関し、当社との共同研究を行なっている(独)産業技術総合研究所は、VHFプラズマCVDによる高速高品質製膜では、製膜圧力の高圧化が重要であることを見出した<sup>7)</sup>。この結果を受けて当社で従来圧力の数倍に製膜圧力を上げ、均一な製膜が可能な新電極を開発した。この新電極は、従来ラダー電極の電極棒間隔を狭くし、電極棒断面形状を改良した。その結果、図12に示すように60 MHzのVHFプラズマで、製膜速度2.1 nm/s、微結晶Siシングルセル効率8.0%を得た。更に、裏面電極製膜プロセスを適正化し、光閉じ込めを強化することにより、9%台の変換効率が得られた。

現在、大面積VHFプラズマCVDで高速高品質製膜技術を開発中である。小面積試験での知見を40 cm × 50 cm基板製膜用CVD装置に適用することで、1.3 nm/sの製膜速度で約11%のタンデムモジュール初期効率を得ている。また1 m級の大面積均一製膜では1.6 nm/sの製膜速度が得られた。今後更に研究を進め、2.0 nm/s以上の製膜速度で変換効率12%のタンデムモジュールの開発を行っていく。

## 5. ま と め

当社はVHFプラズマCVDの有する高速・高品質製膜性に着目し、VHFプラズマCVDによる薄膜太陽電池の開発を行っている。その第一ステップとしてアモルファスSi製膜用に、高生産性を目指したVHFプラズマCVDを開発し、1.1 m × 1.4 mサイズのアモルファスSi太陽電池モジュールを生産している。

太陽電池の低コスト化には高効率化が不可欠であり、第二ステップとして、アモルファスSi / 微結晶Siタンデム型太陽電池の開発を行い、現在までに1.3 nm/sの製膜速度で微結晶Si-i層を製膜した40 cm

× 50 cmサイズのタンデムモジュールにおいて、初期効率約11%が得られた。

小面積の微結晶Siシングルセルでは2.0 nm/s以上の製膜速度で、変換効率9%以上が得られる高速高品質製膜技術を既に開発した。今後、1 m級サイズで2.0 nm/s以上の大面積高速製膜技術を開発すると共に、更なる膜質改善、光閉じ込め技術の高度化などにより、目標の変換効率12%を達成し、低コスト化技術を確立していく予定である。

ここで報告した成果の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて得られたものであり、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) S. Oda, J. Noda and M. Matsumura : Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) 1889.
- (2) W. Schwarzenbach, A. A. Howling, M. Fivaz, S. Brunner and Ch. Hollenstein : J. Vac. Sci. & Technol. A 14 (1996) 132.
- (3) M. Murata, Y. Takeuchi, E. Sasagawa and K. Hamamoto : Rev. Sci. Instrum. 67, 1542 (1996)
- (4) Y. Takeuchi, Y. Nawata, K. Ogawa, A. Serizawa, Y. Yamauchi and M. Murata: Thin Solid Films 386 (2001) 133.
- (5) S. Goya, Y. Nakano, N. Yamashita, et al., "Development of amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells", Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, 2003) p.1548
- (6) M. Noda, T. Nishimiya, K. Yamaguchi, et al., "Large area thin film Si tandem module production using VHF plasma with ladder-shaped electrode", Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, 2003) p.1849
- (7) T. Matsui, M. Kondo and A. Matsuda, "Microcrystalline silicon solar cells grown at 20-30 /s by high pressure silane-depletion plasma", Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, 2003) p.1570



山内康弘



高塚 汎



米倉義道



野田松平



竹内良昭



山下信樹