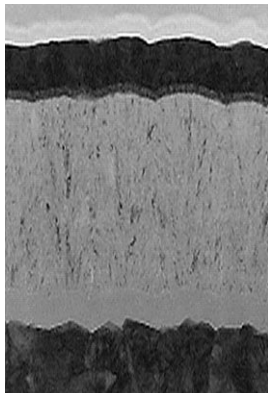


微結晶タンデム太陽電池の開発

Development of a-Si/Microcrystalline-Si Tandem-type Photovoltaic Solar Cell



山内 康弘*¹
Yasuhiro Yamauchi

高塚 汎*²
Hiromu Takatsuka

川村 啓介*³
Keisuke Kawamura

山下 信樹*⁴
Nobuki Yamashita

深川 雅幸*⁵
Masayuki Fukagawa

竹内 良昭*⁶
Yoshiaki Takeuchi

当社では、クリーンエネルギー源の開発・実用化の一環として、薄膜型太陽光発電の開発を行ってきた。当社は、低コスト化のために超高周波（VHF）を用いた大面積高速製膜プラズマCVD（Chemical Vapor Deposition；化学的気相堆積法）の技術開発に取り組んできた。その成果として発電効率8%の世界最大サイズのアモルファスSi太陽電池（1.4 m × 1.1 m）を既に実用化し、主に海外市場で販売を行っている。この技術を基に、国内市場を狙った高効率型の発電効率12%のアモルファスSi / 微結晶Si タンデム型薄膜型太陽電池を開発中である。基礎試験にて、小面積セル（32 mm²）で初期発電効率13.1%（安定化発電効率12%）を、中面積モジュール（50 cm × 40 cm）で変換効率11%を達成しており、上記VHFプラズマ技術と組み合わせて実用サイズ1 m角以上の大面積基板で発電効率12%を目指した開発を実施中である。（写真は微結晶タンデム太陽電池の断面透過電子顕微鏡写真）

1. はじめに

2005年2月の京都議定書の発効により、地球温暖化防止に対する取り組みは、政府の指導のもと急速に加速され始め、太陽光発電や風力発電などのクリーンエネルギーは、今まで以上に注目されている。太陽光発電に関しては、わが国では（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（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⁽¹⁾。特に薄膜シリコン太陽電池は、原料の制約がなく、生産量増大によるスケールメリットが大きいなどの理由から、低コスト化に最も有利と考えられ、NEDOでも現在主流の結晶系Si太陽電池の次を担う太陽電池として技術開発支援が行われてきた。

低コストを実現するためには、変換効率の向上と生産性の向上が必要不可欠である。特に生産性では薄膜Si太陽電池の製造プロセスの中核を担うプラズマCVDの大面積高速製膜技術開発が重要となる。当社では高速製膜技術として、超高周波（Very High Frequency：VHF）プラズマCVDが有利と考え、いち早くその実用化に取り組んできた⁽²⁾。VHFプラズマCVDはプラズマを生成する電力の周波数を従来の13 MHzに代えて数十～百数十MHzと高い周波数を用いることで、ガスの分解率を高める方法であり、イ

オンダメージが少ないため高速・高品質製膜が可能である⁽³⁾。しかしながら供給電力の波長が短くなるため、大面積化が困難とされてきた。当社ではその対策として、独自の梯子型電極とその電極へ給電するVHF電力の位相を制御する方法（位相変調法）を開発し（図1）、VHFプラズマの大面積化に成功した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この結果を用いることで世界最大サイズの1.4 m × 1.1 mアモルファスSi太陽電池の生産を行っている。

一方、タンデム型太陽電池の開発に対してもVHFプラズマCVDの特性を活用した高効率化技術開発を行い、社内の5 cm角ガラス基板を用いた基礎試験結果として、初期効率13.1%を達成している。この基礎技術をベースにNEDOの委託研究を受けて大面積

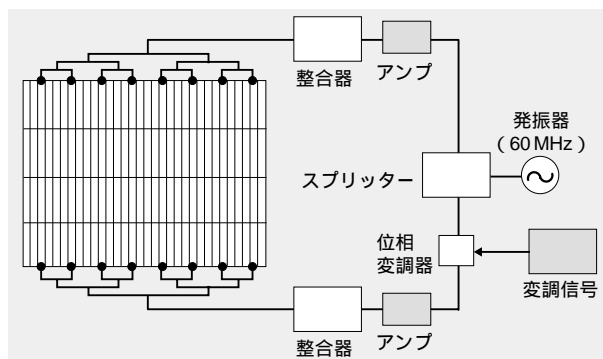


図1 梯子型電極と位相変調法の原理図

*¹ 長崎造船所太陽電池事業室製造グループ主席

*² 長崎造船所太陽電池事業室長 工博

*³ 技術本部長崎研究所応用物理研究室

*⁴ 技術本部先進技術研究センター先進材料グループ主席

*⁵ 技術本部長崎研究所火力プラント研究推進室主席 工博

*⁶ 技術本部長崎研究所応用物理研究室主席 理博

化技術開発に取り組んでいる。これまでに 40 cm × 50 cm サイズのモジュールにて変換効率 11 % を得ている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。現在 1 m 級以上の実用化サイズにて 2.0 nm/s 以上の製膜速度で発電効率 12 % を達成すべく、大面積・高速製膜技術開発を行っており、その状況について報告する。

2. 微結晶タンデム開発の目的

タンデム型太陽電池の断面構造と太陽光の利用波長域を図 2、図 3 にそれぞれ示す。タンデム型はアモルファス Si セルと微結晶 Si セルを 2 段に重ねた構造をしており、短波長光をアモルファス Si トップセルで、長波長光を微結晶 Si ボトムセルでそれぞれ吸収することでアモルファス Si セル単層より広い範囲の波長域を発電に利用することができる。当社ではこの構造で発電効率 12 % を狙った開発を行っている。この開発により、設置面積が大きいというアモルファス型の弱点を改善でき、今まで設置面積の制約から結晶系よりも不利であった国内市場でも結晶系と同等の面積で設置が可能となる。また、当社独自の大面積高速製膜技術にて結晶系より安い価格で供給できる。さらに、屋外での年間実発電量も結晶型より 5 ~ 10 % 多いので、システムメーカーにとって競争力のある商品となる。

3. 微結晶 i 層製膜技術の開発・高効率化技術

微結晶 Si 膜はアモルファスより広範囲の波長を吸収できるものの、光吸収係数はアモルファスよりも小さい。このため図 2 に示すように、タンデム太陽電池のボトムセルを構成する微結晶太陽電池セルの i 層の膜厚は、アモルファス i 層の 5 倍以上の膜厚が必要となる。このため、アモルファスと同じ生産性を出すた

めには 5 倍の製膜速度が必要となる。

通常製膜速度を上げると性能低下を招く。この対策として、当社の共同研究先である産業技術総合研究所は、従来よりも製膜圧力を高く（数百 Pa）して、かつ放電用の電極と基板の間隔を 10 mm 以下に狭くするプラズマ生成方法を開発し、2.0 ~ 3.0 nm/s という従来の 5 倍以上の製膜速度にて、微結晶単体セルにて 9 % 以上の効率を達成した⁽⁸⁾。一方、製膜圧力が高くなるとプラズマの局在化が顕著になるため、大面積での均一製膜が一層困難となる。当社は上記結果を実用サイズの大面積化技術に展開すべく高圧力・狭電極間隔に対応した新型電極を開発した。この電極は従来梯子型電極の電極棒間隔を狭くし、電極棒の断面形状を改善したものである。

微結晶製膜は VHF 電力量の増加に対応するように給電方法と電極構成も新規に開発した。従来は図 1 に示したように 1 つの大面積梯子型電極を用い、2 台の電源から電力を分岐して電極の周囲にある複数の給電点に給電を行っていた。微結晶 Si 用では電極を分割して全体を 8 並列で構成し、独立した複数台の VHF 電源から各々の電極に電力を供給するようにした（図 4）。このような構成とすることで個々の電極を独立に制御でき、入力電力や位相制御を細やかに行えるようになり制御性を向上させた。

アモルファスの数倍の製膜速度を達成するためには、アモルファスの数倍の電力投入が必要となる。このため、アモルファスでは問題にならなかった VHF 電源から電極に至る給電回路での電力損失が無視できなくなる。このため低損失型の同軸直管給電構造を新たに設計し、給電部の電力損失を従来の 10 % から 3 % に低減した。

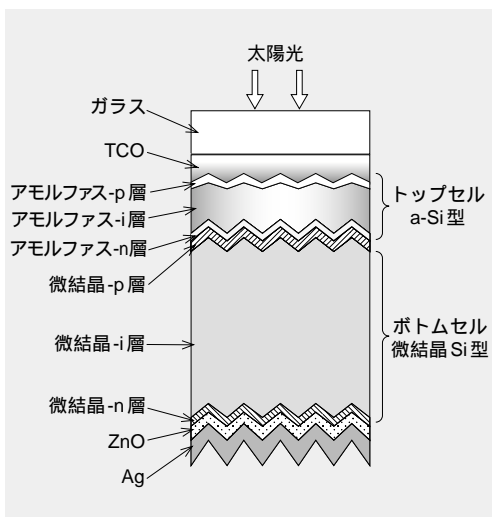


図 2 タンデム太陽電池の構造 微結晶 i 層はアモルファス i 層の 5 倍以上の膜厚が必要である。

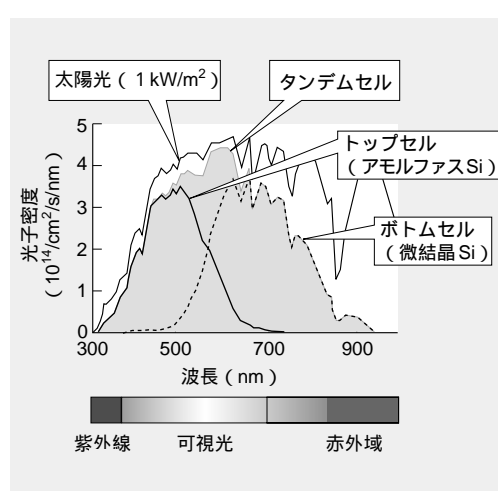


図 3 タンデム太陽電池の利用波長域 a-Si トップセルと微結晶 Si ボトムセルを積層し、利用波長域を 300 nm ~ 1 μm に拡大することで発電効率を向上させている。

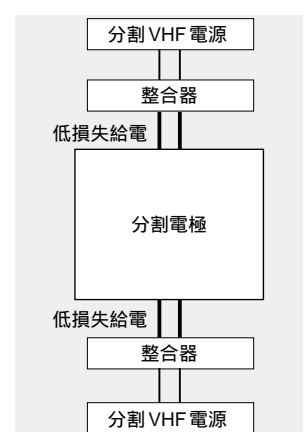


図 4 微結晶 Si 製膜用大面積プラズマ CVD 装置の電極構造図 分割型電極 + マルチ給電方法により制御性を向上している。

更に大電力を入力した場合にはプラズマから基板への入熱が問題となる．すなわち投入したVHF電力は最終的に熱に変化するため，その入熱に対応して熱を除去しないと基板温度の制御ができず，所望の性能が出せなくなる．最悪の場合基板のそり変形や熱割れが発生する．また電極等の構造物の熱変形により，電極間隔が均等に保てなくなる．この熱的問題の解決のため，熱・強度連成解析による基板変形予測及びその結果に基づく装置の熱設計を行った．この結果，電極に冷媒を流して発生する熱を電極より除去する構造を採用することで基板の変形・割れを抑制することが可能となった．図5に解析結果を示すが，電極冷却がない

場合は製膜中に基板の温度が40℃以上上昇し，かつ基板表裏や面内温度差により基板割れが1000枚に1枚の割合で発生することが予測された．これに対して電極冷却を行うことで製膜中の基板温度上昇は10℃以下に抑制され，かつ基板が割れる確率も10万枚に1枚程度に抑制できる．

これらの結果により，微結晶高速製膜に必要な大電力を投入した条件にて安定した製膜が可能となり，1.4 m × 1.1 m 基板にて1.6 nm/sの製膜速度にて±15% (図6)を，2.0 nm/sでも±20%の大面積高速均一製膜を確認している．現在更なる高速化・均一性向上に向けた開発を行っている．

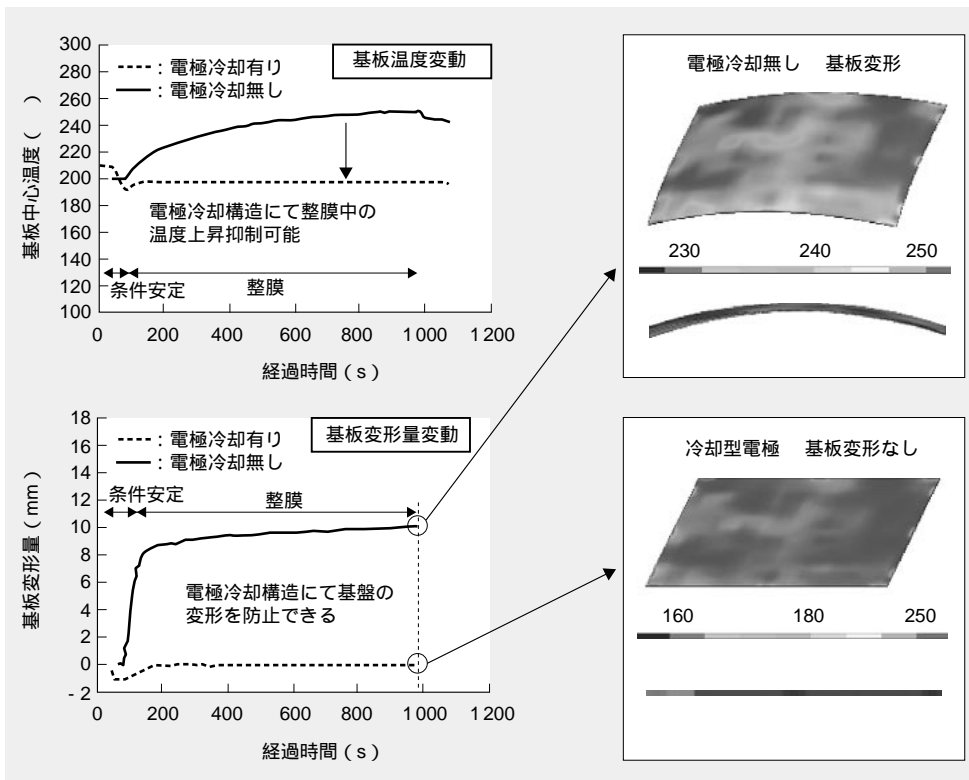


図5 熱強度連成解析による製膜中の基板温度変化と基板変形解析結果 電極冷却により基板面内温度分布・変形が抑制される．

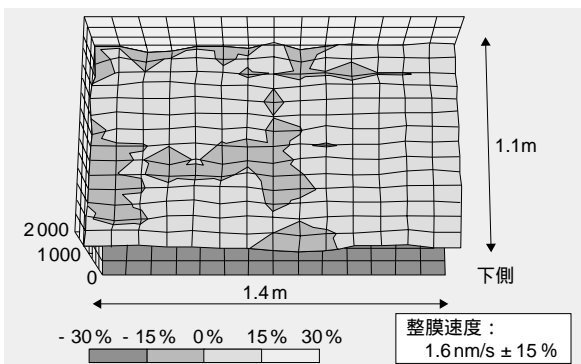


図6 1.4 m × 1.1 m 大面積基板への微結晶Si微結晶製膜結果 製膜速度分布を二次元グラフで表した．大面積基板に±15%の分布で製膜することが可能となった．

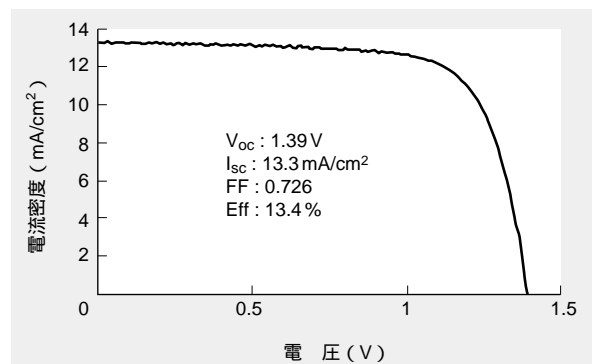


図7 小面積プラズマCVD装置で製作した小面積タンデム構造薄膜型太陽電池セルの発電特性曲線 発電効率13.1%の世界トップレベルの初期発電効率を達成している．

4. 微結晶タンデム太陽電池の開発

当社ではアモルファスSi/微結晶Siタンデム型太陽電池高効率化技術開発を5 cm角基板用の小型VHFプラズマCVD装置を用いて実施し、現在までに初期効率13.1%のタンデムセル初期効率を達成している(図7)⁹⁾。この小型装置で確立した高効率化技術を、40 cm × 50 cmの中型サイズ基板用のVHFプラズマCVD装置に反映し、前述の冷却式新型電極構造を適用した安定製膜とタンデム太陽電池用のレーザスクライピング技術の開発により、上記サイズのタンデムモジュールにて11%を超える変換効率を得て、タンデムモジュール化技術を確立した¹⁰⁾。

これらの技術を統合して、実用化基板サイズの1.4 m × 1.1 mに製膜可能なVHFプラズマCVD装置を用いて微結晶Si太陽電池の生産性・性能実証試験を実施している。本装置を用いた微結晶シングルセルの性能は、2.0 nm/sの製膜速度で約8.5%と既に5 cm角基板用の小型装置と同等であることを確認している(図8)。今後、給電容量を増加し、2.5 nm/s以上の製膜速度でも上記性能を達成し、このサイズでのタンデムモジュール12%の実証を図る計画である。

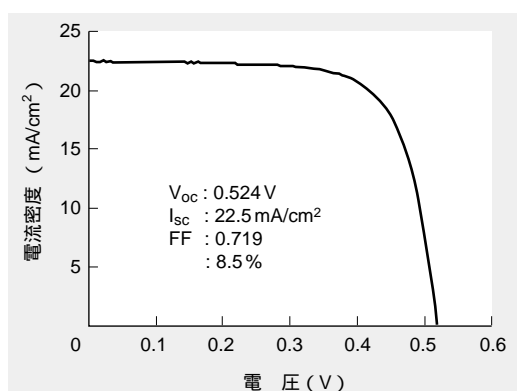


図8 大面積基板上の微結晶Siシングルセルの発電特性 小型プラズマCVD装置での要素試験結果と同等の性能が大面積装置でも再現できるようになっている。

5. ま と め

当社では薄膜Si太陽電池の低コスト化のために必要な高効率化技術開発として、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っている。5 cm角基板用小型装置の小面積セル試験で得られたタンデムセル初期変換効率13.1%の成果を受けて、微結晶Si製膜用の電極とVHF電力供給技術を新たに開発し、1 m角級サイズで2.5 nm/s以上の大面積高速製膜が実現可能な技術の目処を得た。また同装置で製作

した微結晶Siシングルセルは、小型装置で製作したものと遜色ない性能が得られることを確認した。今後更なる膜質・均一性の改善などにより、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。

ここで報告した微結晶Siタンデム型太陽電池の大面積高速製膜技術開発は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施しており、また大学及び研究機関の指導を受けていることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) <http://www.nedo.go.jp/taiyoshitsu/> (2003-7)
- (2) 竹内良昭ほか、低コストアモルファスシリコン太陽電池の開発、三菱重工技報 Vol.37 No.1(2000) p.26
- (3) H. Curtins, et al., Plasma Chem. Plasma Process. 7 (1987) 267.
- (4) 原動機事業本部太陽電池事業G、三菱重工の太陽光発電システム、三菱重工技報 Vol.39 No.3 (2002) p.172
- (5) Y. Takeuchi, et al., "Development of Large Area VHF Plasma CVD and its Application to Si Thin Film Solar Modules", Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2004) p.1378
- (6) 米倉義道ほか、高経済性太陽電池を構成する先進技術、三菱重工技報 Vol.40 No.6 (2003) p.320
- (7) 野田松平ほか、地球のために無限のエネルギーを産み出す太陽電池、三菱重工技報 Vol.42 No.1 (2005)
- (8) T. Matsui, et al., "Microcrystalline silicon solar cells grown at 20-30 /s by high pressure silane-depletion plasma", Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka,2003) p.1570
- (9) S. Goya, et al., "Development of amorphous silicon/ microcrystalline silicon tandem solar cells", Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka,2003) p.1849
- (10) H. Takatsuka, et al., Solar Energy, Vol.77 (2004) p.951



山内康弘



高塚汎



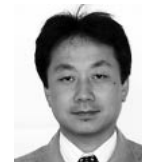
川村啓介



山下信樹



深川雅幸



竹内良昭