特 集 論 文



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 | 高塚 汎 *² | <u>川 村 啓 介</u> *³ |
|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Yasuhiro Yamauchi | Hiromu Takatsuka | Keisuke Kawamura |
| 山 下 信 樹*⁴ | <mark>深 川 雅 幸</mark> *⁵ | 竹内良昭 *6 |
| Nobuki Yamashita | Masayuki Fukagawa | 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1m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…. 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

*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

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◎.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



** 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

^{*1} 長崎造船所太陽電池事業室製造グループ主席

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10mm以下に狭くす るプラズマ生成方法を開発し,2.0~3.0mm/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^(®).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 アンチム入防電池の構造 協調部1 層はアモルファス1層の5倍以上の膜厚 が必要である. タノテ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.

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)[®].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 イビ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14m × 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.



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,1m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



三菱重工技報 Vol.42 No.3 (2005-10)