

論文

大面積・高効率薄膜シリコンソーラーセル

A Large-Scale, High-Efficiency Thin Film Silicon Solar Cell

野元 克彦*
Katsuhiko Nomoto藤岡 靖*
Yasushi Fujioka清水 彰*
Akira Shimizu福田 浩幸*
Hiroyuki Fukuda大内田 敬*
Takashi Oouchida立花 伸介*
Shinsuke Tachibana棚村 浩匡*
Hiromasa Tanamura安部 正美*
Masami Abe

要旨

当社独自のショートパルスVHFプラズマCVD法¹⁾により、シリコン結晶薄膜（微結晶シリコン薄膜）をメータ角サイズの大面積に亘って均一に成長させる技術を開発した。この薄膜技術を用いて、光電変換効率（安定化効率）が10%を超える大面積薄膜シリコン太陽電池が得られたことを報告する。

A novel growth technology of microcrystalline silicon (μ c-Si:H) thin films has been developing using short-pulsed-VHF plasma CVD method, which has reduced crystalline inhomogeneity in a film over square meter in size. By this novel fabrication technology, we have realized a large-scaled thin-film silicon solar cell with over 10% stabilized conversion-efficiency.

まえがき

現在太陽光発電システム市場で主流となっているデバイスには、シリコンウェハを用いたバルク結晶シリコン太陽電池であるが、薄膜シリコン太陽電池はその次世代太陽電池として、国内外で活発に研究開発が進められている。これは薄膜シリコン太陽電池がバルク結晶シリコン太陽電池と比較して、(1) 100分の1以下の厚みで発電する、(2) 300℃以下の低温プロセスで製造される、(3) 大面積に亘るセル形成が比較的容易でモジュール化プロセスが簡略化できる、などの特長を持っているために²⁾³⁾、量産時の低コスト化が期待されるからである。しかしながら、従来のアモルファスシリコン薄膜をベースとした薄膜シリコン太陽電池では、研究レベルの小面積セルで光電変換効率が10%を超える研究報告はなされているが⁴⁾、大面積の量産レベルでは7-8%程度にとどまっておらず、本格的な市場獲得には至っていない。本稿では、現状技術のブレイクスルーとして近年開発が活発化しているシリコン結晶薄膜（微結晶シリコン、以下 μ c-Si:Hと略記）について^{5~8)}、メータ角サイズに亘って均一に結晶性薄膜を成長させる技術として、励起プラズマのショ-

ートパルス化が有効であることを示す。又、この技術を用いた大面積の実用サイズセルで変換効率が10%（安定化効率）を超える薄膜シリコン太陽電池が得られたことを報告する。

1. ショートパルスVHFプラズマCVD法によるシリコン結晶薄膜の大面積成膜技術

薄膜シリコンの成膜には、低温プラズマにより原料ガスを分解し基板上に膜堆積させるプラズマCVD（以下p-CVDと略記）装置で、原料ガスとして SiH_4 、希釈ガスとして H_2 を用いた。当部が開発してきたショートパルスVHFプラズマCVD技術¹⁾は（図1）、 $\sim 100 \mu\text{sec}$ 以下という非常に短い時間内に高密度プラズマを生成し、原料ガス、希釈ガスを効率的に分解すると共に、その後、プラズマが存在しない（荷電粒子の加速電界がない）時間を設け、荷電粒子によるイオンダメージが消失する状態での膜堆積を可能とするものである。但し、パルス化により成膜速度が低下しないようプラズマ励起中に効率的に活性種を生成させる。

* ソーラーシステム事業本部 ソーラーシステム開発センター 第2開発部

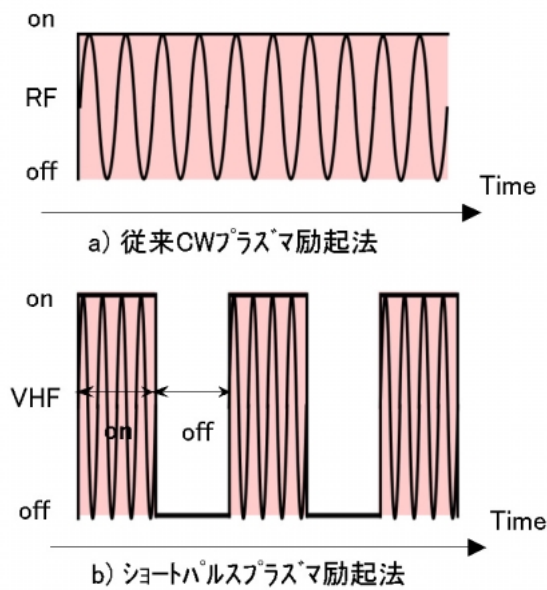


図1 従来連続プラズマ (CW) と比較したショートパルス VHF プラズマ励起の概念図

Fig. 1 Schematic diagram of the short-pulsed VHF plasma compared with a conventional CW method.

この方法により成膜したノンドーパの μ c-Si:H 膜の結晶性を、従来の連続プラズマ (CW 法) で成膜した場合と比較して表 1 に示す。表 1 中の膜の結晶化率は、ラマン散乱スペクトルで 520cm^{-1} の結晶 Si ピークと 480cm^{-1} のアモルファス Si ピークの比 (Ic/Ia) で評価している。用いた p-CVD 装置はメータ角サイズへの成膜が可能で、今回評価したものは単位サイズ $560\text{mm} \times 925\text{mm}$ のガラス基板を用い、メータ角サイズからみた対称的なポジションを取り上げ測定点とした。この測定点を A から O の記号で表している (図 2)。表 1 より、ショートパルスプラズマにより、 $560\text{mm} \times 925\text{mm}$ サイズに亘る結晶化率の均一性が向上し、分布値は 1/2 以下に、分散値で 1 桁近く低減されていることが分かる。これは、プラズマ ON 時の印加電界の空間的な不均一性が、励起プラズマのパルス化により緩和される結果、膜成長に関する活性種 (シリコン関連活性種、希釈水素活性種) の空間的分布が低減されたためと考えられる。

表 1 の μ c-Si:H 膜を、ガラス/TCO/PIN/裏面電極のシングル素子構造の真性層として用い、薄膜太陽電池のデバイス特性として評価した結果を表 2、及び図 3 に示した。従来 CW 法に比べ効率の Max. は 8.5% で変わらないものの、平均効率は 7.4% から 7.8% に向上している。特に Jsc の分布は 1/2 以下になり、効率の分布も 1/2 以下に低減されている。励起プラズマのショ-

表 1 μ c-Si:H 膜の結晶性の比較

Table 1 Comparison of the crystallinity between CW and pulsed plasma non-doped μ c-Si:H films.

| | CW膜 | ショートパルス膜 |
|------|--------------|--------------|
| 測定位置 | 結晶化率Ic/Ia | |
| A | 5.6 | 4.5 |
| C | 4.1 | 4.5 |
| H | 8.9 | 6.2 |
| M | 3.7 | 5.7 |
| O | 5.1 | 5.0 |
| 平均値 | 5.5 | 5.2 |
| 分布値 | $\pm 41.3\%$ | $\pm 15.9\%$ |
| 分散値 | 3.4 | 0.46 |

分布値: $(\text{Max}-\text{Min})/(\text{Max}+\text{Min})$

分散値: $\Sigma(\text{測定値}-\text{平均値})^2/\text{平均値}$

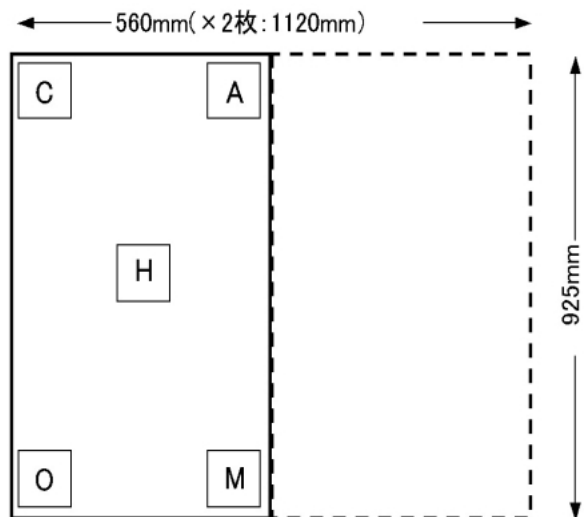


図2 μ c-Si:H 膜 (ノンドーパ) の膜構造評価ポジション

Fig. 2 Characterization positions of the non-doped μ c-Si:H films.

表 2 μ c-Si:H シングル素子特性の比較

Table 2 Comparison of the single cell characteristics using the CW intrinsic layer and the pulsed-plasma intrinsic.

| I層条件 | | Effi.[%] | Jsc[mA/cm ²] | Voc[volt] | F.F |
|---------|------|--------------|--------------------------|-------------|-------------|
| CW | 平均特性 | 7.42 | 21.6 | 0.492 | 0.696 |
| | 分布 | $\pm 16.8\%$ | $\pm 10.0\%$ | $\pm 7.1\%$ | $\pm 5.6\%$ |
| ショートパルス | 平均特性 | 7.77 | 23.0 | 0.490 | 0.688 |
| | 分布 | $\pm 8.0\%$ | $\pm 4.1\%$ | $\pm 4.2\%$ | $\pm 2.7\%$ |

トパルス化により、 μ c-Si:H 膜の構造均一性が向上し、デバイス特性の平均特性向上、特性分布の低減に寄与していることが分かる。

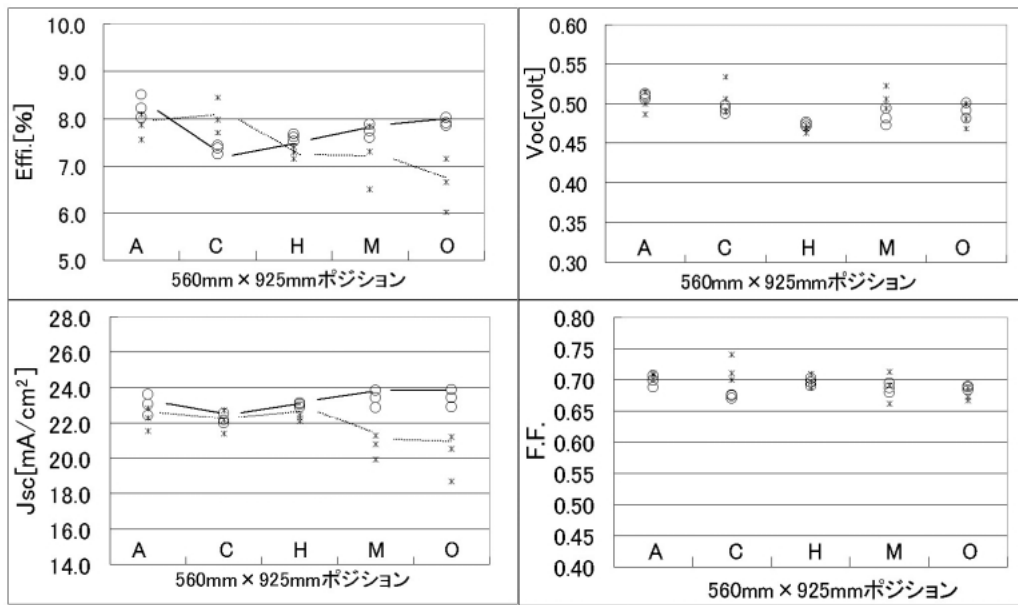


図3 μ c-Si:H シングル素子IV 特性パラメータ (各ポジションで Max 値, Min 値, 平均値をプロット)
○ : I層ショートパルスプラズマ * : I層 CW プラズマ

Fig. 3 μ c-Si:H single cell characteristics (Maximum, minimum, average values are plotted at each position)
○ : intrinsic layer by short-pulsed plasma * : intrinsic layer by CW plasma

2. 大面積・高効率薄膜シリコンソーラーセル

薄膜シリコン太陽電池の高効率化には、太陽光を広いスペクトル範囲で吸収し効率よくエネルギー変換することが重要である²⁾。そこで、1.項で述べたμ c-Si:H素子のナローバンドギャップセル (~1.1eV) で長波長光を吸収し、短波長の高エネルギー光は、a-Si:H素子のワイドギャップセル (~1.75eV) で吸収するタンデム素子構造を採用した。これらのI層は、いずれもショートパルスVHFプラズマCVD法により堆積したものである。素子の分光感度特性を図4に示す。従

来のa-Si:Hシングル素子に比べ、a-Si:H/μ c-SiHタンデム素子では波長1μmを越えた領域でも素子感度を有していることが分かる。

このタンデム素子を用いて、レーザパターンニング技術により集積化し、基板サイズ560mm×925mmの大面積集積セルを試作・評価した。I-V特性を図5に示す。初期特性で最大出力54.1W、セル初期効率11.3%のものが得られている。これまで、該構造セルへの連続光照射による加速劣化試験から、1,000時間の連続光照射 (1kW/m², 50℃ : NREL 試験条件⁹⁾ で光源はAM1.5のソーラーシミュレータを用いた) で特性はほ

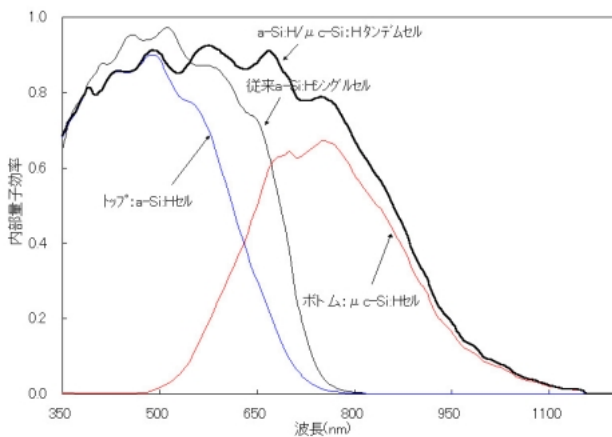


図4 素子分光感度特性
Fig. 4 Spectral quantum efficiencies of the a-Si:H single cell and a-Si:H/μ c-Si:H tandem cell.

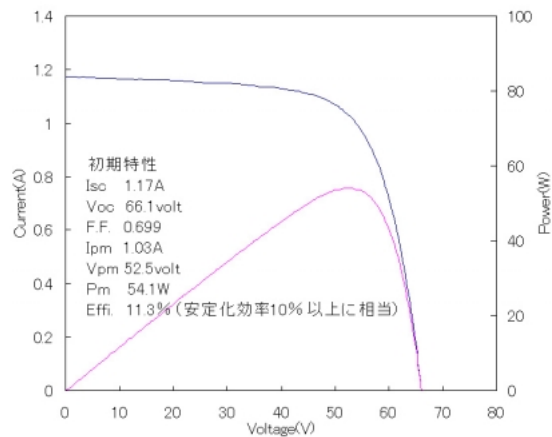


図5 大面積集積セルのI-V特性 (初期値)
Fig. 5 IV characteristics of a large-scale integrated solar cell with the cell structure of a-Si:H/μ c-Si:H tandem.

ば安定化し、その安定化因子は約90%であることが分かっている。従って、図5の特性は、大面積セルの変換効率(安定化効率)が10%を超えるものに相当している。

太陽電池モジュールの実際の屋外使用時には、モジュール温度が60℃～80℃に上昇する。この温度上昇のために太陽電池の開放電圧が低下し変換効率低下を招く。これは半導体物性を反映したものであり、バンドギャップが狭い材料ほど低下の割合が顕著になる。従って、太陽電池性能の温度特性は発電性能の観点から重要な指標である。表3と図6にa-Si:H/ μ c-Si:Hタンデム集積セルの温度特性を調べた結果は掲げた。表3に示されているように、出力係数は-0.24%/℃となっており、結晶シリコン太陽電池の0.45～0.50%/℃と比べて、約半分まで改善されることが分かる。これは、薄膜シリコン太陽電池が瓦一体型や建材一体型等のモジュール温度が上昇しやすいアプリケーションに有利であることを示している。

表3 薄膜シリコン太陽電池(a-Si:H/ μ c-Si:Hタンデム集積セル)性能の温度係数

Table 3 Temperature coefficients of the IV parameters of a large-scale integrated solar cell with the cell structure of a-Si:H/ μ c-Si:H tandem.

| 特性項目 | 単位記号 | 温度係数 |
|------|------|-------|
| 電圧 | %/℃ | -0.30 |
| 電流 | %/℃ | 0.070 |
| 出力 | %/℃ | -0.24 |

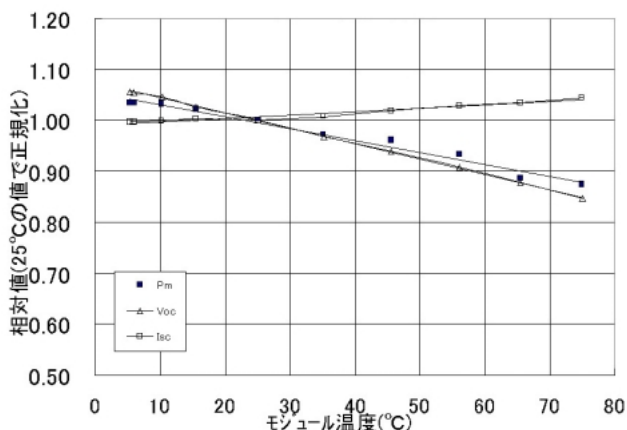


図6 薄膜シリコン太陽電池(a-Si:H/ μ c-Si:Hタンデム)性能の温度特性

Fig. 6 Temperature dependence of the IV parameters of a large-scale integrated solar cell with the cell structure of a-Si:H/ μ c-Si:H tandem.

むすび

薄膜シリコン太陽電池の実用化、大量普及には、更なる高効率化が不可欠である。実用レベルの大面積薄膜シリコン太陽電池で光電変換効率12～13%の早期実現に向け、国内外研究機関とも連携し、素子の研究開発、大面積デバイス開発、高スループット製造技術の開発を推進していく。

謝辞

本稿の開発にあたって、シリコン結晶薄膜素子について連携して開発戴いた技術本部エコロジー技術開発センター関係各位のご協力に対し感謝申し上げます。又、本稿の成果は当部薄膜PVグループメンバー全員の日頃の活発な討論の賜であり、各位の真摯な努力に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Nomoto et al., "SHORT-PULSE VHF PLASMA-ENHANCED CVD OF HIGH-DEPOSITION-RATE a-Si:H FILMS", Proc.14th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp.1226-1230 (Barcelona, June.1997).
- 2) 野元,谷口,三宮,早川,“薄膜太陽電池のデバイス設計”,シャープ技報,70,pp.40-43(1998).
- 3) M. Kaneiwa and K. Nomoto, "Manufacturing Technology for Terrestrial PV Systems: High Efficiency Crystalline Si through Amorphous Si", Prog. Photovolt: RES. Appl., 10, pp.77-84 (2002).
- 4) K. Nomoto et al., "a-Si Alloy Three-Stacked Solar Cells with High Stabilized Efficiency", Technical Digest of the International PVESEC-7, pp.275-276 (Nagoya, Nov. 1993).
- 5) A. Matsuda, "FORMATION KINETICS AND CONTROL OF MICROCRYSTALLITE IN μ c-Si:H FROM GLOW DISCHARGE PLASMA", J. Non-cryst Solids 59&60, pp767-774 (1983).
- 6) K. Nomoto et al., "Role of Hydrogen Atoms in the Formation Process of Hydrogenated Microcrystalline Silicon", Jpn. J. Appl. Phys. pp.L1372-L1375 (1990).
- 7) J. Meier et.al., "Complete microcrystalline p-i-n solar cell-Crystalline or amor- phous cell behavior?", Appl.Phys.Lett. 65, pp860-862 (1994).
- 8) K. Yamamoto et.al., "HIGH EFFICIENCY THIN FILM SILICON SOLAR CELL AND MODULE", Proc. 29th IEEE PVSC, pp1110-1114 (2002).
- 9) W. Luft et al., "SECOND CONTROLLED LIGHT-SOKING EXPERIMENT FOR AMORPHOUS SILICON MODULES", Proc. 23rd IEEE PVSC, pp860-866 (1993).

(2003年5月27日受理)