

# 大面積・高効率結晶薄膜太陽電池セルの開発と スーパーシースルーモジュールへの応用

Development of a Large-scale, High-efficiency Crystalline Thin Film Silicon Solar Cell and  
Its Application to Super See-through Module

野元克彦*	清水彰*	藤岡靖*	武田徹*
Katsuhiko Nomoto	Akira Shimizu	Yasushi Fujioka	Toru Takeda
辻井宏行*	岡西守*	棚村浩匡*	山下勝也*
Hiroyuki Tujii	Mamoru Okanishi	Hiromasa Tanamura	Katsuya Yamashita
三宮仁*	岸本克史**	立花伸介**	福岡裕介**
Hitoshi Sannomiya	Katsushi Kishimoto	Shinsuke Tachibana	Yusuke Fukuoka

## 要 旨

独自のショートパルスVHFプラズマCVD法<sup>1) 2) 3)</sup>により、メーター角サイズの大面積・高品質結晶薄膜成膜技術を確立し、光電変換効率(安定化効率)が約11%の薄膜シリコンセルが得られていることを報告すると共に、この高効率セル技術を用いたスーパーシースルーセル、モジュールについて紹介する。

Short Pulsed VHF Plasma CVD method<sup>1)2)3)</sup> was established for a growth of crystalline thin film silicon with high quality on a square meter size substrate. And a prototype large scale thin film solar module achieved a stabilized conversion efficiency of about 11%.

A new application of the technology to super see-through cells and modules is also presented.

## まえがき

シリコンウエハを用いた結晶シリコン太陽電池に比べて、100分の1の厚みで発電する薄膜シリコン太陽電池は、結晶太陽電池用シリコン材料が逼迫する状況下、新たな太陽電池技術として実用化に向けた開発が進められている。特に、太陽光の長波長光を光電変換する技術としてシリコンの結晶薄膜(微結晶シリコン、以下 $\mu$ c-Si:Hと略記)の研究開発が活発に進められている<sup>4) 5) 6) 7)</sup>。当部では、独自のショートパルスVHFプラズマCVD法により、メーター角サイズに亘って均一に結晶薄膜を成長させる技術を開発してきた<sup>1) 2)</sup>。本稿では、この成膜技術を用いて、光電変換効率(安定化効率)が約11%の大面積薄膜シリコン太陽電池が得られていることを報告すると共に、この結晶薄膜技術を用いた独自のスーパーシースルーモジュール：高効率シースルーモジュールについて紹介する。

## 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と高効率薄膜太陽電池セルの開発

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)システムで、原料ガスとしてSiH<sub>4</sub>、希釈ガスとしてH<sub>2</sub>を用いている。当部門が開発してきたショートパルスVHFプラズマCVD技術<sup>1)</sup>は(図1)、~100 $\mu$  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し、その後、プラズマ励起電源をOFFするというタイムシーケンスを繰り返して膜堆積を行う<sup>1)</sup>。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。図1はこのプラズマ励起方法の概念図である。

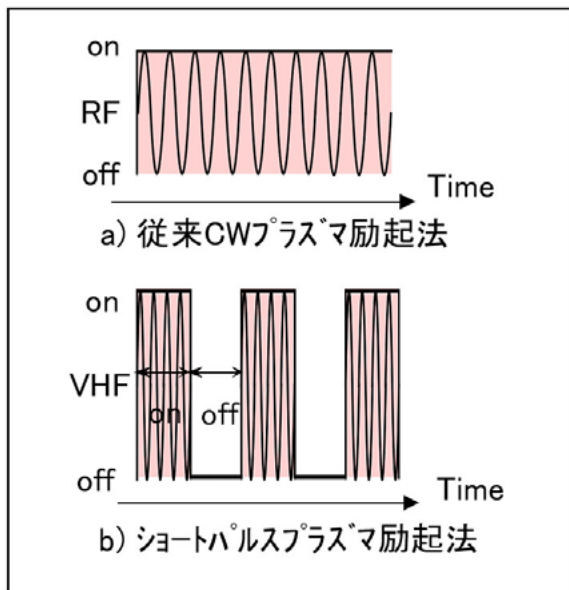


図1 従来連続プラズマ (CW) と比較したショートパルス VHF プラズマ励起の概念図

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プの  $\mu$  c-Si:H 膜の結晶性は、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るために、メーター各サイズに亘って、結晶化率の均一性が向上することが分かっている(ラマン散乱スペクトルから計算した結晶化率の分布は1/2以下に、分散値で1桁近く低減される)<sup>2) 3)</sup>。

図2には、この成膜技術を用いて作製した薄膜シリコン太陽電池の素子構造を示した。短波長の高エネルギー光は、アモルファスシリコンPIN素子のワイドギャップ材料(～1.75eV)で、長波長光は結晶薄膜PIN素子のナローバンドギャップ材料(～1.1eV)で吸収するタンデム構造としている。このショートパルスVHFプラズマCVD法により、結晶薄膜のシングル素子で9.3%、アモルファス/結晶薄膜シリコンのタンデム素子で13.2%の光電変換効率のものが得られている(表1)。

代表的なアモルファス/結晶薄膜シリコンタンデム素子の連続光照射加速試験によるIV特性パラメータの変化を図3に示した。AM1.5, 1kW/m<sup>2</sup>の連続光照射で、100時間照射程度でJsc, Voc, F.F.の各特性パラメータの劣化はほぼ安定化する。図から、1000時間の連続照射後で光電変換効率(Eff.)は、初期値の90%程度を維持することが分かる。

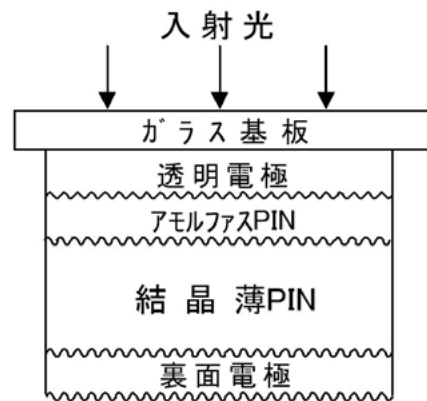


図2 アモルファス/結晶薄膜シリコンタンデム素子構造図  
Fig. 2 Amorphous/crystalline thin film tandem type cell structure.

表1 結晶薄膜シングル素子 ( $\mu$  c-Si:H) とアモルファス (a-Si:H) / 結晶薄膜 ( $\mu$  c-Si:H) タンデム素子の IV 特性

Table 1 IV characteristics of crystalline thin film silicon single junction solar cell and amorphous/crystalline thin film tandem junction solar cell.

(セルサイズ1cm<sup>2</sup>)

セル構造	初期効率 (%)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	F.F.
$\mu$ c-Si:H シングル	9.3	24.8	0.531	0.709
a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H タンデム	13.2	12.8	1.379	0.746

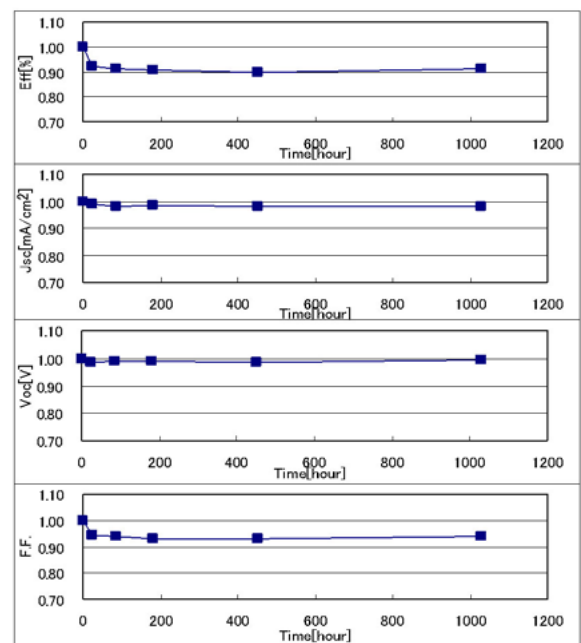


図3 アモルファス/結晶薄膜シリコンタンデム素子の連続光照射加速試験によるIV特性各パラメータの変化(初期値に対して規格化した値)

Fig. 3 IV parameters changes of amorphous/crystalline thin film silicon tandem cell against continuous light-soaking experiment (irradiated light: AM1.5,1000kW/m<sup>2</sup>).

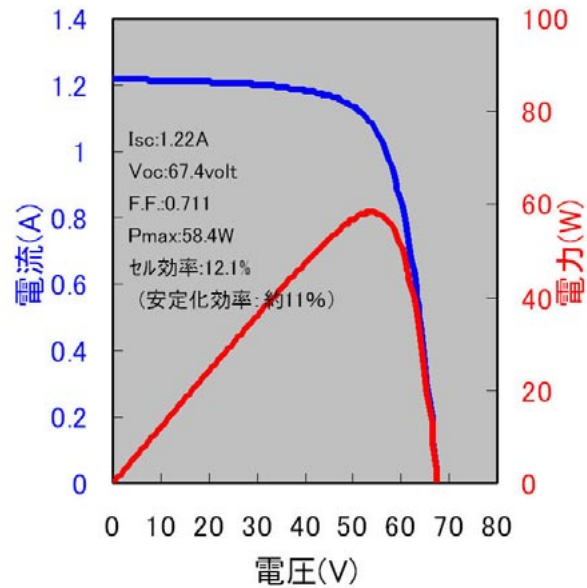


図4 大面積薄膜シリコン太陽電池モジュールの外観写真とI-V, P-V 特性 (初期値)

Fig. 4 Photograph of a large-scale thin film silicon solar module and I-V, P-V characteristics.

このタンデム素子を用いて、レーザーパターニング技術により素子を集積化し、大面積モジュールを試作・評価した。セル基板サイズは560mm×925mmである。I-V特性を図4に示す。初期特性で最大出力58.4W、セル初期効率12.1%のものが得られている。これは、上述の光劣化特性より、安定化後の変換効率は約11%に相当する。

## 2. 大面積・高効率薄膜シリコンセルのシースルーモジュールへの応用

### --- スーパーシースルーモジュールの紹介

上述した大面積高効率の結晶薄膜セルを用いた太陽電池は、電力用太陽電池として用いることができるが、ここでは、薄膜シリコン太陽電池の新しいアプリケーションとして、当社で商品化しているスーパーシースルー型モジュールについて紹介する。

薄膜シリコン太陽電池は、光電変換に用いる膜厚が結晶型の1/100以下と薄く、レーザースクライブ技術により、100μm程度のスリットをセル面全体に多数入れ、モジュール面全面に光を透過させるシースルー型太陽電池モジュールを作ることができる。従来のアモルファス薄膜シリコン太陽電池で、このようなシースルー型の太陽電池を作ると、変換効率は5%程度となり、結晶のウエハを用いた採光型太陽電池モジュール(ウエハを間隔をあけて配置することにより採光したモジュール)に比べて出力面で大きく劣っており商品

化の障害となっていた(表2)。上述した大面積で高効率の結晶薄膜のタンデムセルに、レーザースクライブによりシースルー加工したシースルー型シリコン結晶薄膜太陽電池：スーパーシースルーモジュールでは、表2から分かるように、従来のアモルファスのシースルー型太陽電池に比べて約1.5倍の出力が得られ、結晶の採光型とほぼ同等の光電変換効率のものが得られる。比較している結晶採光型は、ウエハの配置間隔で採光を確保しており、シースルー型のような均一な光透過でないため、ここでは便宜的にシースルー型と同様な印象を与える開口率と比較している。

表2 シースルー型PVモジュール、結晶採光型モジュールの代表的な仕様例

Table 2 Typical specifications of see-through type and crystal silicon light-through type module.

	スーパーシースルー	アモルファスシースルー	多結晶採光型
開口率(%)	10	10	43
セル構造	a-Si:H/μc-Si:H	a-Si:H	多結晶シリコンセル
サイズ(mm)	560×925	650×910	1500×2000
出力(W)	33~38	26.6	218
効率(%)	6.8~8	4.8	7.3

このスーパーシースルーセルの外観写真とIV, PV特性を図5に掲げた。外観は“薄膜ブラック”の落ち着いた色調であり、建材等へのアプリケーションに違和感なく応用できる。又、開口率10%のスーパーシースルーセルで、現在、初期効率約10%のものが得られている<sup>8)</sup>。

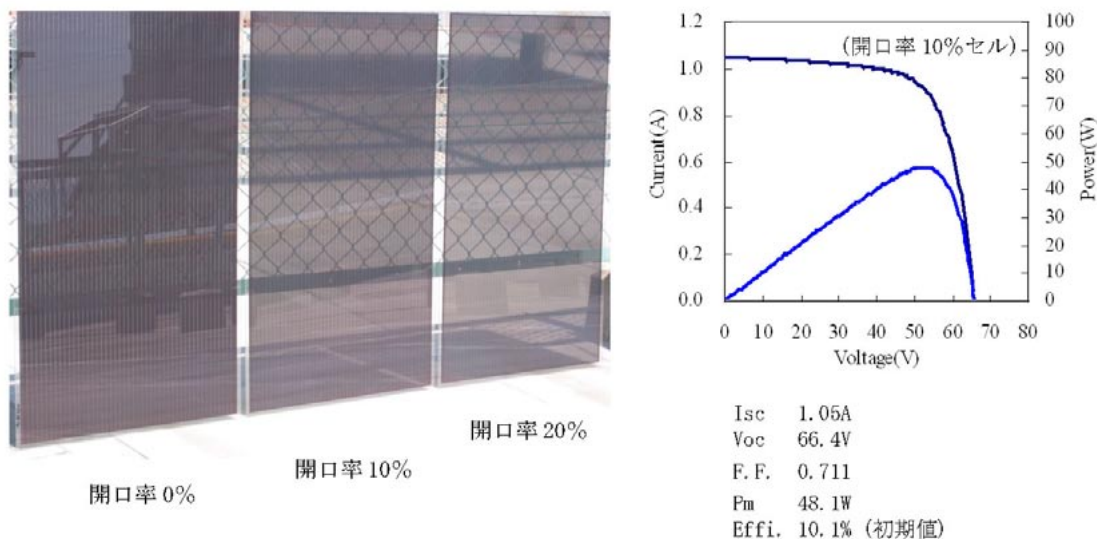


図5 スーパーシースルーセルの外観写真と IV, PV 特性  
 Fig. 5 Photograph of super see-through solar cell and I-V, P-V characteristics (super see-through cell of see-through aperture ratio 10%).

このスーパーシースルーセルを用いたモジュールの構造例を図6に示す。この例ではスーパーシースルーセル2枚直列に接続し、表面カバーガラス/スーパーシースルーセル/裏面ガラスの合わせガラス構造としている。このような基本構造のモジュール設計とすることにより、1セルモジュール、2セルモジュール、3セルモジュールといった組み合わせでより大きなサイズへの対応が可能なこと、又、カバーガラスの大きさにより、サイズそのものの自由度も大きくなることから、建築物への一体化設計に自由度を与えるメリットがある。

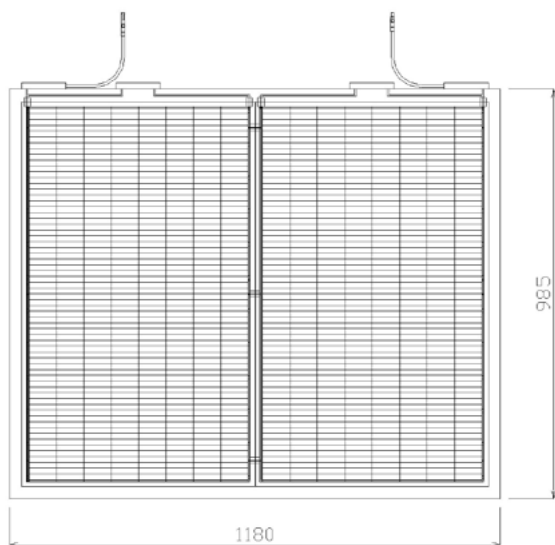


図6 スーパーシースルーモジュールの構造例  
 Fig. 6 Schematic diagram of a super see-through module.

図7は、このスーパーシースルーモジュールを公共建築物のエントランス部トップライト用に設置した30kWシステムの外観写真である。太陽光発電という‘環境先進性’とエントランス部への‘光あふれる空間’をアピールする建築設計がなされている。

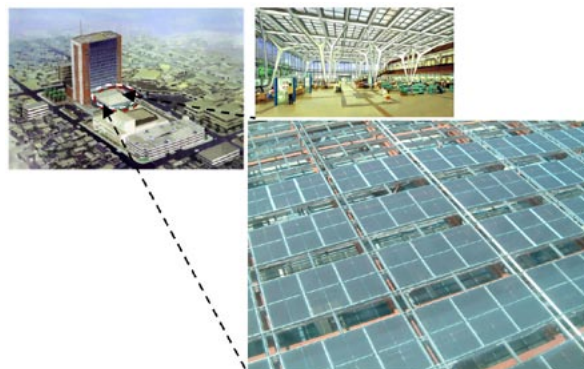


図7 公共建築物のエントランス部トップライト用に設置したスーパーシースルーモジュール 30kW システム外観写真

Fig. 7 Photograph of a super see-through module 30kW system installed on the top-light of the entrance of a public building.

むすび

薄膜シリコン太陽電池の大量普及には、更なる高効率化、低コスト化が不可欠である。関連部門とも連携し、高効率素子開発、大面積デバイス設計、高スループロット製造技術の開発を推進する。

## 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、本稿の成果は関連部門を含めたメンバー全員の日頃の活発な討議の賜であり、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) 野元他, "大面積・高効率薄膜シリコンソーラーセル", シヤープ技報, 86, pp.39-42 (2003)
- 3) Y. Fujioka et al., "Large scale, high-efficiency thin-film silicon solar cells fabricated by short-pulsed plasma CVD method", PVSEC14th (Bangkok, 2004 January)
- 4) A. Matsuda, "FORMATION KINETICS AND CONTROL OF MICROCRYSTALLITE IN  $\mu$ c-Si:H FROM GLOW DISCHARGE PLASMA", J. Non-cryst Solids 59 & 60, pp.767-774 (1983)
- 5) K. Nomoto et al., "Role of Hydrogen Atoms in the Formation Process of Hydrogenated Microcrystalline Silicon", Jpn. J. Appl. Phys. pp.L1372-L1375 (1990)
- 6) J. Meier et. al., "Complete microcrystalline p-i-n solar cell- Crystalline or amor-phous cell behavior?", Appl. Phys. Lett. 65, pp.860-862 (1994)
- 7) K. Yamamoto et.al., "HIGH EFFICIENCY THIN FILM SILICON SOLAR CELL AND MODULE", Proc. 29th IEEE PVSC, pp.1110-1114 (2002)
- 8) K. Kishimoto et. al., "Device Performances and Simulations for Several Kinds of Large-Scale Thin Film Silicon Solar Cell Modules- Introduction of Super See-Through Thin Film Solar Cell Module and Applications", 20<sup>th</sup> Euro PVSEC (Barcelona, 2005 June)

(2005年9月28日受理)