

# 薄膜太陽電池のデバイス設計

## Device Design of Thin Film Solar Cells

野元克彦\*  
Katsuhiko Nomoto

谷口浩\*  
Hiroshi Taniguchi

三宮仁\*  
Hitoshi Sannomiya

早川尚志\*  
Takashi Hayakawa

### 要 旨

地球環境保全の観点から太陽光発電の本格普及が期待されている。薄膜太陽電池は、現在主流であるバルク型結晶 Si 太陽電池の次世代として、本格普及に不可欠な要素である低コスト化を目指し活発な開発が行われている。本稿では、薄膜太陽電池、特に当部で開発を進めているアモルファス薄膜太陽電池の概要について技術解説を行うと共に、発電性能、価格競争力向上という観点でのデバイス設計について述べる。

Concern for global environment is drawing greater attention to solar power generation. Thin film solar cells are expected to be the successor of the bulk crystalline Si solar cells that are the mainstream of the PV (photovoltaic) market today. And the R&D efforts are intensifying, aiming for lower cost, which is essential for wider use and market expansion. This article discusses device design of amorphous Si solar cells that we are developing now from the standpoint of maximizing power output and cost-competitiveness. A technological review of amorphous Si solar cells is also given.

### まえがき

結晶でない非晶質(アモルファス)シリコンがいわゆる半導体材料として認知されるようになったのは、英国・ダンディ大学の Spear と Le Comber が初めて水素化アモルファスシリコン(通常 a-Si:H と略記される)の p 型, n 型不純物制御に成功した 1975 年に遡る<sup>1)</sup>。

その後、1976 年に RCA グループがこの a-Si:H を用いた太陽電池を試作<sup>2)</sup>、1979 年には a-Si:H を用いた TFT が最初に報告された<sup>3)</sup>。a-Si:H TFT は液晶ディスプレイ駆動素子として実用化され、すでに大きな市場に成長しているのは広く知られているが、アモルファ

ス薄膜太陽電池についても、当時変換効率は 2.4% であったものが、研究レベルでは 10% を超えるものが報告され<sup>4)</sup> 大きな市場が期待される電力用として今まさに離陸しようとしている。このようないわゆるジャイアント・マイクロエレクトロニクスとして広く応用が進んだのは、この材料の持つ下記のような特長による。すなわち

大面積にわたり均一の半導体膜が比較的容易に形成できる。

結晶系に比べ低温プロセスで膜堆積される(通常 300 以下)。

材料自体に毒性がない。

さらに、a-Si:H 膜を太陽電池へ応用する際、結晶系と決定的に異なってくるのは、間接遷移型のバルク結晶 Si と違って、a-Si:H 膜が直接遷移型の材料である点である。そのために、可視光に対する光の吸収係数が約 2 桁高く、

光電変換に必要な厚みが 1  $\mu\text{m}$  以下(結晶系太陽電池の 1/300 以下)で済む。

上記のと は製造プロセス面で、は材料面から製造コストを低く抑えることが期待できる。さらには環境問題が大きくクローズアップされる中、今後ますます重要になるものと思われる。

ここでは、このような特長を持つアモルファス太陽電池について、電気的特性の観点から 1. 基本構造と動作原理について触れ、光学的な観点から 2. 光閉じ込め技術、又、実使用下での高性能化に関して 3. 構造設計による高安定化、4. 発電性能とデバイス設計について述べる。

### 1. 基本構造と動作原理(電気的特性)

アモルファス薄膜太陽電池の基本構造は pin 構造である(図 1)。c-Si に比べ品質面で劣る a-Si:H ではノンドープの i 型(真性, intrinsic)層をドープ層間に挿入し、i 層を空乏層化して高電界をかけ、この電界により光生成キャリアを電極へ輸送するキャリアドリフト型デバイスである。ドープ層はこの i 層に内蔵電界(内蔵電位, built-in ポテンシャル)を形成する役目を

\* 電子部品事業本部 ソーラーシステム事業部  
CV18002 プロジェクトチーム

果たしているが、ドープ層で生成されたキャリアは再結合して光電流としては取り出せない、いわゆる dead layer であるため、光入射側に用いられる p 型窓層は、できるだけ吸収係数の小さなワイドギャップ材料が望まれる。

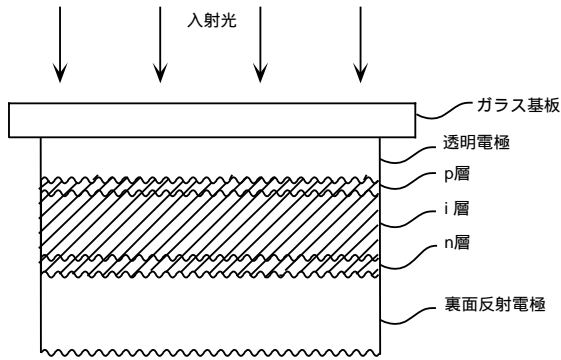


図1. アモルファス薄膜太陽電池構造概略図  
Fig.1 Schematic structure of the thin film solar cells.

良く用いられるワイドギャップ材料である p 型 a-SiC:H を例としてアモルファス薄膜太陽電池素子のバンドダイアグラムを図2に示す。この場合光電変換を行う i 層中には 1.12V の内蔵電位が組み込まれ、このポテンシャル分布による内蔵電界が光生成した電子と正孔をそれぞれの電極へ導く。従って、この内蔵電界が素子性能に大きな影響を及ぼすことになるが、図から明らかのように p 型窓層のフェルミレベルをより価電子帯側に近付け、内蔵電位を大きくできる余地が多分に残

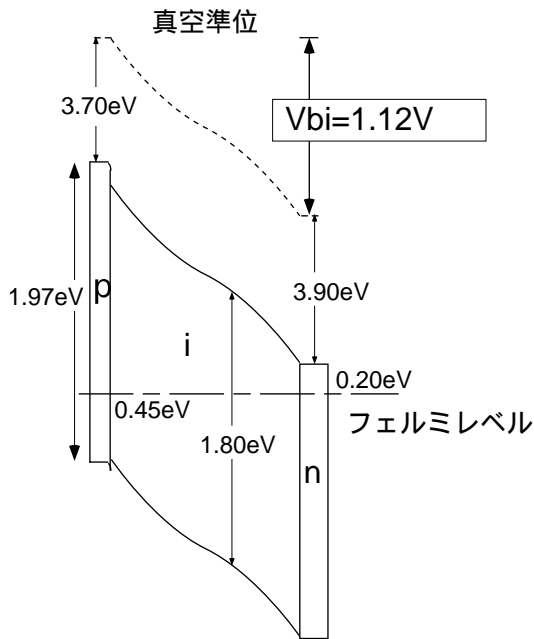


図2. アモルファス薄膜太陽電池のバンドダイアグラム  
Fig.2 Bandgap diagrams of thin film solar cells.

されていることが分かる。ここでは、この点に着目し、当部が行った様々な i 型層 (a-SiC:H, a-Si:H, a-SiGe:H) への p 型微結晶 Si 膜 ( $\mu$ c-Si:H) の適用が素子の開放電圧向上に有効であることを指摘しておく<sup>5)6)</sup>。

## 2. 光閉じ込め技術 (光学的設計)

結晶系太陽電池において光入射光量を増大させる目的で入射面をテクスチャ構造にし、表面での光反射率を低減、光電流を向上させることが一般的に知られている。アモルファス薄膜太陽電池でも同様に光入射面をテクスチャ化し光を閉じ込める技術は高電流化設計の重要技術と位置づけられる。

アモルファス薄膜太陽電池では、薄膜であるが故にこの光閉じ込め技術はさらに重要であって、入射面のテクスチャ化は表面での反射率低減効果と同時に、入射光の光路長を実効的に増大させるよう構造設計 (光拡散長の増大) することがポイントである。簡単な幾何学的考察から明らかなように、この効果はテクスチャ化のスケールが光電変換層の厚みと同程度 (0.数ミクロン) の大きさとなったときに有効となる (図3)。

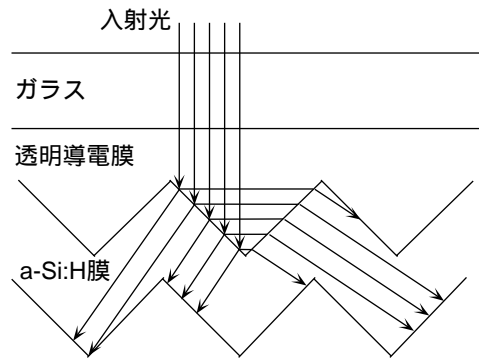


図3. 太陽電池内部における光の屈折  
Fig.3 Light refraction in the thin film solar cells.

これまでこのような入射表面のテクスチャ化には表面電極を兼ねた熱 CVD 法による透明導電膜 SnO<sub>2</sub> の膜結晶構造により形成されていた。しかしながら、この SnO<sub>2</sub> 膜は 500 以上の高温プロセスで作製されるため、製造設備が長大で低コスト化には向いていない。

当部では、簡便で室温形成可能なサンドブラスト法でガラス表面のテクスチャ化を調べ、この方法によるテクスチャ面がフラットなガラス面に比べ光電流が約 50% 向上すること、又、従来の SnO<sub>2</sub> 膜にくらべても約 90% の光電流が得られることを示した (図4)。その中で光拡散長の増大にはうねりの短周期化と表面の起伏を表わすフラクタル次元の高次元化が重要であることを明らかにした<sup>7)</sup>。今後このような物理量の制御

性を高め、光拡散性を増大させる低コストプロセス確立が重要である。

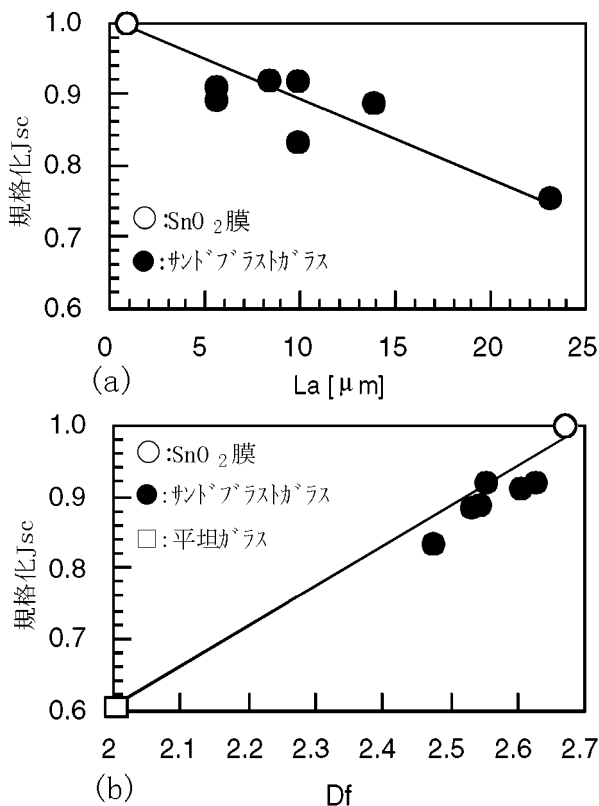


図4 .(a) 短絡電流の凸凹周期に対する依存性  
(b) 短絡電流のフラクタル次元に対する依存性  
Fig.4 (a) Short circuit current as a function of characteristics wavelength.  
(b) Short circuit current as a function of fractal dimension.

### 3. 構造設計による高安定化

アモルファスシリコン系材料の特長の1つに、シリコン (Si) にカーボン (C) を加えていけばワイドバンドギャップの a-SiC:H,ゲルマニウム(Ge)を合金化すればナローバンドギャップの a-SiGe:H というふうに様々なバンドギャップの材料を比較的容易に作製できる点が挙げられる(図5)。このような材料を用いて、短波長の光はワイドバンドギャップ材料で、長波長光はナローギャップ材料の a-SiGe:H で光エネルギーを電気エネルギーに変換することによりエネルギー変換効率が高くなる。そのため、これらの合金材料を光電変換層に用い pin 構造単位を積層して、pin/pin(2層積層型: タンデム構造), pin/pin/pin(3層積層型: トリプル構造) 構造が提案されている。

一方、アモルファスシリコン系材料(アモルファス半導体)のもつ課題として、この材料が非平衡材料で

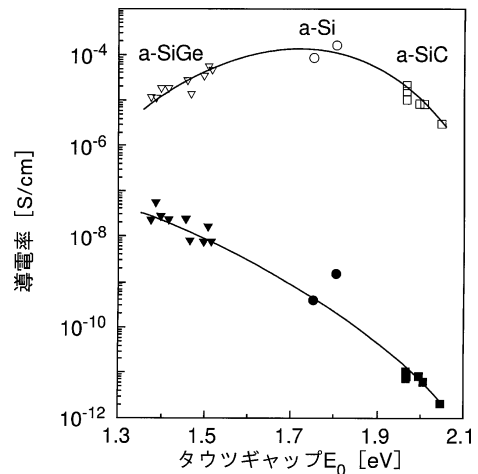


図5 .アモルファスシリコン系材料の光・暗導電率とバンドギャップの関係  
Fig.5 Photo and dark conductivity as a function of optical bandgap of amorphous Si alloy material.

あるために、光照射という外部刺激によって微視的構造が変化する(Staebler-Wronski効果)ことが知られている<sup>8)</sup>。様々な観点でのこの信頼性に関するデータの蓄積、加速試験、理論解析などにより、光照射による膜中の構造欠陥はあるレベルで飽和することが明らかにされ<sup>9)</sup>、また、これによる太陽電池の変換効率低下も初期の特性低下後は、安定化する(安定化効率)ことが知られている。従って、屋外での実使用を想定する場合はこの安定化効率が性能指標として重要となるが、この初期の特性低下を抑え安定化効率向上を図る上でも光を分割吸収するタンデムあるいはトリプル構造は有効である。図6には各構造の違いによる素子特性の連続光照射(光強度 1 kW/m<sup>2</sup>)による加速試験データを掲げたが、このような条件下では概ねシングルで25%、タンデムで15%、トリプルで12%程度の初期特性低下後安定化することが分かる。

### 4. 発電性能とデバイス設計

上述の安定化時の性能向上で留意すべき点は、太陽電池モジュール温度が屋外実使用状態で 60 ~ 80 まで温度上昇することである。この温度上昇のために太陽電池の開放電圧が低下し特性低下を招く。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特性低下は顕著になる。図7は、効率向上のために下部セルにナローギャップ材料の a-SiGe:H を用いたトリプルセルと a-Si:H だけを光電変換層に用いたシングル及びタンデムセルの温度特性を調べたものである。屋外での実使用温度(50 ~ 70)では、a-SiGe:Hを用いたトリプルセルが a-Si:H のセルに比べ

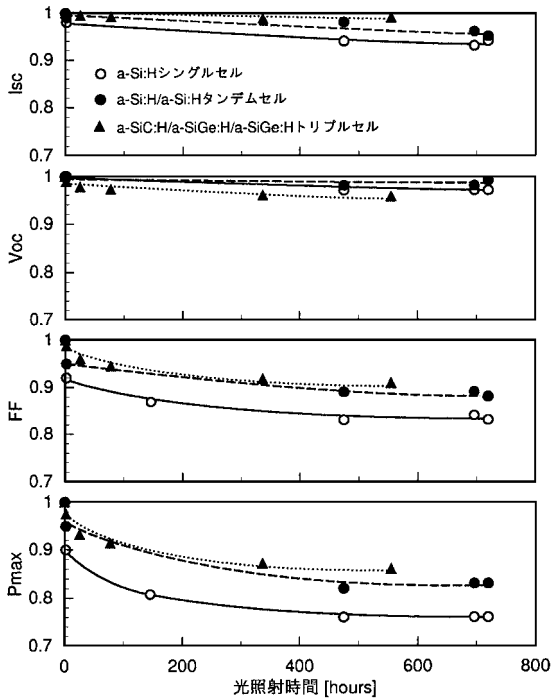


図6 . 素子特性の連続光照射 (光強度 1 kW/m<sup>2</sup>) による加速試験データ  
 Fig. 6 Accelerated test of the cell characteristics against light exposure (light-intensity:1kW/m<sup>2</sup>).

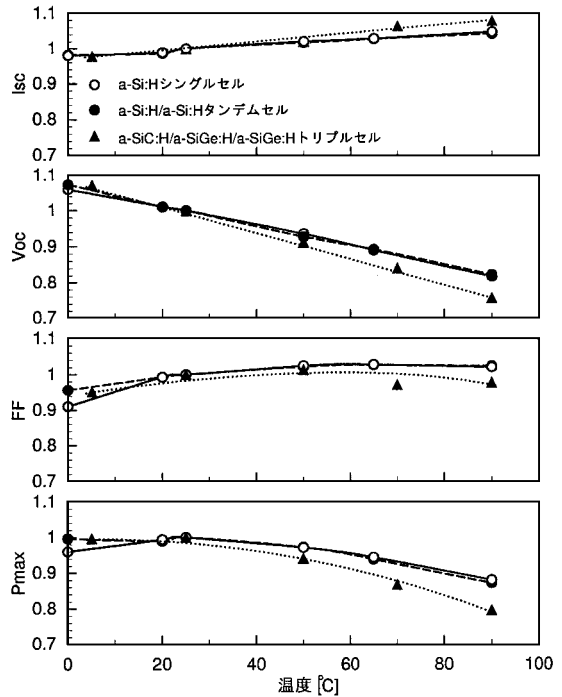


図7 . 素子特性の温度依存性  
 Fig. 7 Cell characteristics as a function of temperature.

5% ~ 8%特性が低下する。従って、発電性能向上には上記の安定化効率向上とともにこのような温度特性を考慮した構造設計、デバイス設計が必要である。

むすび

アモルファス薄膜太陽電池が電力用として離陸するためには、上記のような性能指標 (安定化効率)、発電性能向上を、いかに低コストのプロセス、材料で実現できるかにかかっている。即ち、アモルファス半導体薄膜、電極膜形成用真空装置をいかにコンパクト設計できるか、スループットの向上を図れるか、また材料面でも屋外実使用時の発電性能として高い性能を確保できるかどうか厳しい選択が必要である。これらをデバイス設計の段階で“創り込む”ことが重要と考えられる。

謝辞

本解説のデータは、一部、新エネルギー・産業技術総合開発機構から当時の委託研究の一環として行われたものであり関係各位に感謝致します。又、本稿を執筆にあたりプロジェクトメンバーの日頃の活発な討議に感謝致します。

参考文献

- 1) W.E.Spear and P.G.LeComber, Solid State Communication, 17,1193 (1975).
- 2) D.E.Carson and C.R.Wronski, Appl.Phys.Lett., 28,671 (1976).
- 3) P.G.LeComber, W.E.Spear and A.Gaith, Electron.Lett., 15,179 (1979).
- 4) K.Nomoto, H.Saitoh, A.Chida, H. Sannomiya, M.Itoh and Y.Yamamoto, 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nagoya, Japan, p275 (1993), Solar Energy Materials, 34,339 (1994).
- 5) H.Sannomiya, K.Nomoto, A.Chida, Y.Nakata and Y.Yamamoto, 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, p405 (1994).
- 6) 野元, “第21回アモルファス物質の物性と応用セミナー”, p98 (1994)
- 7) H.Taniguchi, H. Sannomiya, K.Kajiwara, K.Nomoto, Y.Yamamoto, K.Hiyoshi, H.Kumada, M.Murakami, T.Tomita, Solar Energy Materials and Solar Cells, 49, 101 (1997).
- 8) D.L. Staebler and C.R. Wronski, J.Appl.Phys., 51, 3262 (1980).
- 9) N.Hata, G.Gangly, S.Wagner and A.Matsuda, Appl. Phys.Lett., 61, 1817 (1992).

(1998年2月18日受理)