

# 結晶系太陽電池

## Crystalline Silicon Solar Cell

松谷 壽信\*

Toshinobu Matsutani

### 要 旨

現在の太陽電池の主要な部分を占めるシリコン結晶系太陽電池に関し、当社における変換効率の改善について概説する。

This article illustrates Sharp's endeavor to improve conversion efficiency of crystalline silicon solar cells, which are majority of current photovoltaic products.

### まえがき

太陽電池の発明の基礎になる光起電力効果 (Photovoltaic Effect) 即ち、ものに光を照射した時に照射されたものが電気を発生するという現象が、Becquerel により発見されたのは、150年以上も前の1839年のことである。さらに100年以上を経て1949年にトランジスターの発明で有名となった Shockley により pn 接合の理論が確立されて半導体デバイスの開発が促進され、1954年ベル電話研究所にて Pearson, Fuller, Chapin の三人によりシリコン太陽電池が発明されるに至った。

その後、アメリカにおいて電話回線などに使われたが、宇宙時代の幕開けを迎え1958年にバンガード I に太陽電池が搭載され、6年以上にわたって電波を発信し続け太陽電池の電源としての効力を、認識させるきっかけとなった。

シリコンに限らず、太陽電池の重要な技術課題の一つに変換効率の改善がある。結晶系太陽電池は他の太陽電池に比べると高い効率が見られるため、特に高効率化が技術開発の中心となっている。以下にシリコンを中心に結晶系太陽電池の変換効率の改良について概説する。

### 1. 太陽電池の材料

太陽電池に使われている結晶系の半導体材料には表1のようなものがあるが、実用に供されているものはほとんどシリコンである。GaAs系化合物半導体の太陽電池は、その特徴を生かせる宇宙用の分野で広く使われている。しかし、地上用として低コストで大量の普及を目標とする場合には、資源としての存在量や物質としての安全性等を考えるとシリコンが非常に優れている。

表1 太陽電池の材料

Table 1 Material of solar cell.

太陽電池	結晶シリコン	単結晶
		多結晶
	非晶質シリコン	アモルファスシリコン
	化合物	単結晶 (GaAs, InP)
多結晶 (CdTe, CuInSe <sub>2</sub> )		

### 2. シリコン太陽電池の動作原理

高効率化の説明を進めていくにあたり、太陽電池の動作原理や損失の発生原因について理解を深めておくことが大切である。図1に太陽電池の動作原理を示す。

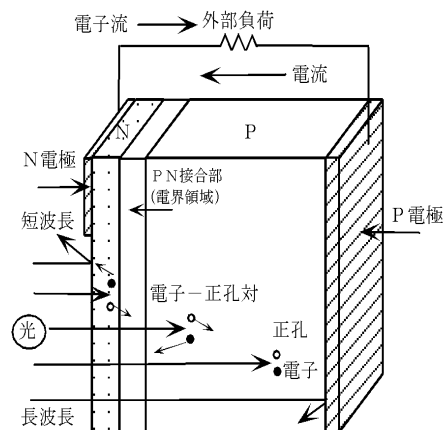


図1 太陽電池の動作原理

Fig. 1 Operating principle of solar cell.

\* 電子部品事業本部 ソーラーシステム事業部 第1技術部

太陽電池は、その材料として用いている半導体に形成されているpn接合の光起電力効果により、太陽光を電気に変換する。pn接合には熱力学平衡状態において、n型領域が正にp型領域が負に電位が形成されている。即ちn型領域の電子がp型領域に、p型領域の正孔がn型領域に移動するのを遮る方向の電位である。この状態にバンドギャップ ( $E_g$ ) 以上のエネルギーを持つ光を照射すると、シリコン中に電子 - 正孔対(キャリア)が形成される。電子および正孔はシリコン中を拡散してpn接合部に達し、pn接合の電界により電子はn型領域に、正孔はp型領域に分離される。この過程によりn型領域に过剩の電子が集まり負に、p型領域は正に帯電する。即ちp型領域の電極からn型領域の電極へと電気が流れる。これが太陽電池の基本的な動作原理である。

### 3. 変換効率改善の方策

上記の動作原理から 変換効率を損ねる損失として次のようなものがあげられる。入射光に対する損失過程を図2に示す。

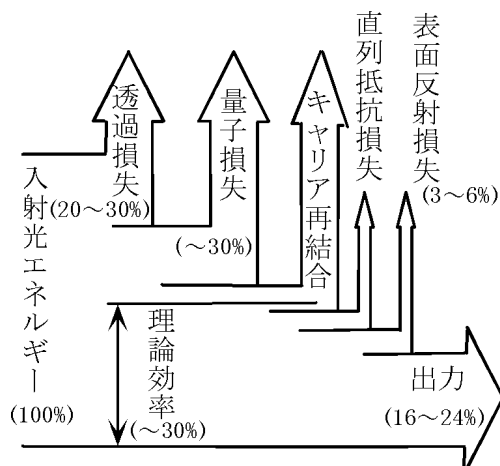


図2 入射光エネルギーの損失過程  
Fig. 2 Loss of incident light energy.

- (1)透過損失 ( $E_g$ 以下のエネルギーを持つ光子(フォトン)は透過する)
- (2)量子損失 ( $E_g$ 以上のエネルギーを持つ光子で生成された電子 - 正孔対は、 $E_g$ 分だけのエネルギーを保持して、残りは熱エネルギーに変わる)
- (3)電子 - 正孔対の再結合損失(シリコン表面や内部での再結合ロス)
- (4)pn接合の不完全性による損失
- (5)太陽電池表面の反射損失
- (6)電流電圧特性に起因する損失 (pn接合本来の電流電圧曲線に起因するロス、太陽電池の抵抗に起因するロス)

変換効率の改善は、これらの損失が太陽電池のどの部分において起こっているのかに注目し、太陽電池の構造設計とプロセス改善により低減していくことによって進められている。

基本的な太陽電池の構造を基にして、比較的簡単な構造を付加することにより順次高効率を実現してきた。図3にこれら太陽電池の構造を示す。

CONV.	BSF	BSR	BSFR	TEXTURE
1 反射防止膜	1 反射防止膜	1 反射防止膜	1 反射防止膜	1 反射防止膜
2 N電極	2 N電極	2 N電極	2 N電極	2 N電極
3 N <sup>+</sup> 拡散層	3 N <sup>+</sup> 拡散層	3 N <sup>+</sup> 拡散層	3 N <sup>+</sup> 拡散層	3 N <sup>+</sup> 拡散層
4 P型シリコン	4 P型シリコン	4 P型シリコン	4 P型シリコン	4 P型シリコン
		5 P <sup>+</sup> 拡散層 (BSF)		
		6 BSR		
		7 P電極		

図3 シリコン太陽電池の構造  
Fig. 3 Structure of silicon solar cell.

- (1)CONV.型：太陽電池としての基本的な構造でキャリアの再結合ロスが大きい。
- (2)BSF型：裏面に電界層を設けキャリアの再結合ロスを低減させている。
- (3)BSR型： $E_g$ 以下のエネルギーの光はキャリアを生成せず裏面まで到達し熱となる。このような光を反射し動作温度を下げる。
- (4)BSFR型：BSRとBSF組み合わせた構造で両者の特徴を持つ。
- (5)TEXTURE型：ウエハの表面に微細なピラミッドを形成し入射光のロスを低減する。

図3から分かるように、高効率化を達成するには太陽電池の構造としては複雑なものが必要となってくる。つまり太陽電池の製造プロセスのコストは高くなるので、得られる効率の改善量と必要となるコストとのトレードオフにより太陽電池の構造が決められなければならない。

### 4. 地上用太陽電池の高効率化技術

現在の当社製の地上用単結晶太陽電池は、(5)の構造から地上用太陽電池としては効果の少ないBSRを省いたTEXTURE + BSF型を採用している。単結晶太陽電池の変換効率は17%(地上光:AM1.5,セル温度:25)を量産レベルとして達成している。

一方、多結晶は、単結晶と比較して半導体材料としてのウエハの結晶品質が基本的に劣っている。したがって多結晶太陽電池においては、実用として単結晶

の効率に近い高効率を得るために、結晶品位をプロセス処理により改善することが必要である。通常は、上記の高効率化技術とともに、プラズマCVD法による原子状水素処理により、結晶品質の向上を図り、多結晶セルの効率改善を実現している。当社における地上用の多結晶太陽電池の効率は、単結晶と同様のTEXTURE + BSF型により14%を達成している。

今後、地上用太陽電池の更なる高効率化においては、多量生産に適したコストパフォーマンスのよい技術を採用しなければならない。このような条件を満たすため、多数のウェハをまとめて処理できる技術の採用と、太陽電池として備えなければならない電極や反射防止膜などの基本構造に最新の技術を適用することにより高効率化を図る計画である。

具体的には、酸化膜パッシベーションや2層反射防止膜の新規技術に加え、ウェハ規格の見直し、電極材料の開発、電極形状の最適化等により、単結晶太陽電池で17.5%、多結晶太陽電池で15%を達成する計画である。なお、単結晶および多結晶とも変換効率は、モジュール化された状態でのセルの効率を示している。

## 5. 宇宙用太陽電池の高効率化技術

初期段階の高効率化技術として当社において実用化されてきたものは、比較的単純なプロセスによる加工で効果が得られるものであった。しかし、太陽電池にとっては高効率化は継続して要求される開発テーマであり、宇宙用太陽電池では、さらに進んだ高効率化技術として次のようなものを量産プロセスに採用し、17%（宇宙光：AM0，セル温度：28℃）の効率を達成している。なお、参考までにこの太陽電池は地上用の測定条件では、ほぼ19%の効率を示す。

### (1) 太陽電池表面の反射損失の改善

表面反射損失の改善策として、TEXTURE面を使用することを述べたが、表面加工の不均一性に

より微細ピラミッドが形成されない部分ができる。これを改善するためにフォトエッチ技術により、安定した加工のできるインバーテッドピラミッド形状を採用している。

### (2) 電子 - 正孔対の損失の改善

表面での再結合損失を防ぐために酸化膜をシリコン表面に付け、表面を不活性化するパッシベーションを行っている。また、シリコンと電極の接触面積を制限し、この界面における再結合損失を低減している。

### (3) 電流電圧特性の改善

この特性は、太陽電池のいろいろの特性パラメータの影響を受けるが、電極の抵抗損失についての改善を述べる。太陽電池の表面に形成される表電極の抵抗損失を小さくするためには、電極を密に形成すれば良いが、電極による影ができ入射光を遮ることになる。したがって、影の面積を少なくするために微細パターンの電極が必要となる。効率を追求する場合には、フォトエッチ技術を用いた微細電極を採用している。

## むすび

高効率化のための技術は、技術開発の進歩につれ種々の提案がなされ実用化されてきた。しかし、商品化を前提としてこれら高効率化技術を開発し採用を判断する時には、効率改善による商品の付加価値が高効率化に必要なコストを上回らなければならない。シリコン太陽電池の結晶原料については、世界的な需要の拡大から半導体産業からの良質な原料の供給が不足している。その結果、特に地上用太陽電池に関しては、低品位の原料を用いながらその性能の向上を図らねばならず、高効率化技術の役割はますます重要となっている。

(1998年2月13日受理)