

太陽光発電システム —セル製造技術の高度化—

石原 隆*
森川浩昭**

Photovoltaic Power Generation System—Advanced Technologies in Production of Solar Cells

Takashi Ishihara, Hiroaki Morikawa

要 旨

1970年代の石油ショックの経験から開発・普及を期待され、開発が続けられてきた太陽光発電システムは、30年を経て21世紀に入り、世界的な環境意識の高まりとともに急速に普及してきている。

システムのキーデバイスである太陽電池は、半導体の中で太陽の光を直接電気に変換するため、運転時にCO₂など排出物を全く出さないクリーンなエネルギー源である。しかしながら、製造時にはエネルギーを消費し、寿命全う時には廃棄物として処理されなければならない。このため、少ない投入エネルギーで大きな発電量を得るよう、光-電気の変換効率の高いデバイスの開発にしのぎが削られてい

る。また廃棄時の環境負荷まで考えた材料の選定も、クリーンエネルギーを標榜(ひょうぼう)する太陽電池には重要となる。

三菱電機では、材料として枯渇の心配がなく、廃棄時の環境負荷も低いシリコンを選び量産技術を開発し、量産規模の拡張を推進してきている。一方で、更なる高性能化を目指した開発も量産につなげるために進めている。

本稿では、現在量産を行っている結晶シリコン太陽電池製造技術の高度化について現状をまとめ、今後の方向について述べる。



当社の太陽電池工場(第二棟)完成予想図

当社では、増大する需要と要求される高効率太陽電池の製造に対応するため、380MW/年の生産規模を持つ太陽電池工場第二棟を、従来の第一棟に隣接して建設中である。

*中津川製作所(工博) **同製作所

1. ま え が き

太陽電池の総生産量を材料の種類別に分類すると、単結晶シリコン太陽電池、多結晶シリコン太陽電池を合わせたシリコン結晶系太陽電池の生産量が全生産量の約9割を占め、中でも多結晶シリコン太陽電池は6割を占めている。

このように多結晶シリコンが太陽電池で最も多く用いられているのは、最も簡略化された製造工程を適用しながら、高効率で低コストな太陽電池の製造が可能だからである。多結晶シリコン太陽電池の高効率化手法は20年以上前から研究が行われている。例えばゲッターリング、ドライ・テクスチャ、セレクトティブ・エミッターや水素パッシベーションといったものが挙げられるが、これら高効率化の手法がすべて量産に適用できるのではなく、実際に量産に用いられているのは生産性や装置コストの観点から最適化されたものである。

図1に示すように、現在量産工場で適用している製造工程は6工程でセルが完成する⁽¹⁾。いずれの工程もシリコン結晶系の太陽電池の製造には不可欠な工程であるが、とりわけ多結晶シリコンを材料とした場合のセル高効率化に必要な不可欠である水素パッシベーションにかかわる技術を中心に、水素パッシベーションの効果を左右する製造工程である反射防止膜形成、電極の焼成について述べる。

2. 太陽電池セル高効率化技術

2.1 反射防止膜とパッシベーション効果

熱プロセスはいずれも、多結晶シリコンウェーハの品質を評価する指標となる少数キャリア拡散長(以下“拡散長”という。)に影響を与える。このため、拡散長の熱プロセス依存性の理解は高効率化にとって重要である。図1のプロセス・フローでは、リン拡散、プラズマCVD (Chemical Vapor Deposition)、電極焼成の三つの加熱を伴うプロセスが拡散長に影響を与える。そこで各熱工程を経たあとの、製造メーカーが異なる3種類のウェーハについて拡散長を評価した。拡散長の評価は次の4つの状態、①初期状態(プロセス投入前)、②リン拡散後、③反射防止膜形成(PECVD)

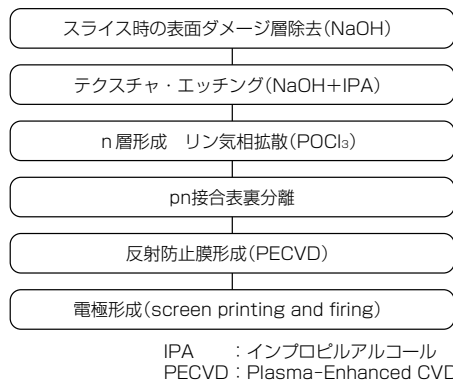


図1. セル製造プロセスフロー

後、④電極焼成後、のウェーハ表面をエッチングしSPV (Surface Photovoltage)法によって行った。図2は各プロセスと拡散長の関係である。拡散長はすべての製造メーカーのウェーハで最初の熱工程であるリン拡散で低下し、反射防止膜形成でやや改善し、更に電極焼成工程によって大きく改善する。反射防止膜にはプラズマCVD法によってシランガスとアンモニアガスを分解してできるSiN膜を採用しており、この膜中に含まれる水素原子がパッシベーション効果に大きな影響を与えることが知られている。

次に水素パッシベーションに不可欠なSiN膜について、変換効率を最大にする水素パッシベーションに必要な膜厚を明確にするために、IQE (Internal Quantum Efficiency: 内部量子効率)のSiN膜厚依存性を調べた。図3はSiN膜の厚さとIQE及び反射率(R)との関係を示したものである。

まず400nm未満の短波長領域では、IQEを最大にするSiN膜の膜厚は35nmとなった。これまでの基礎検討結果

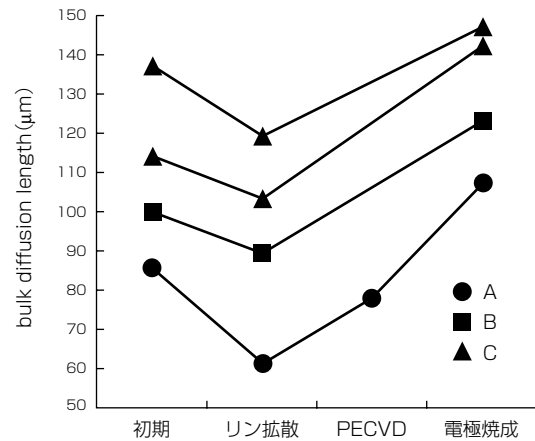


図2. 製造を経るごとの基板拡散長の変化

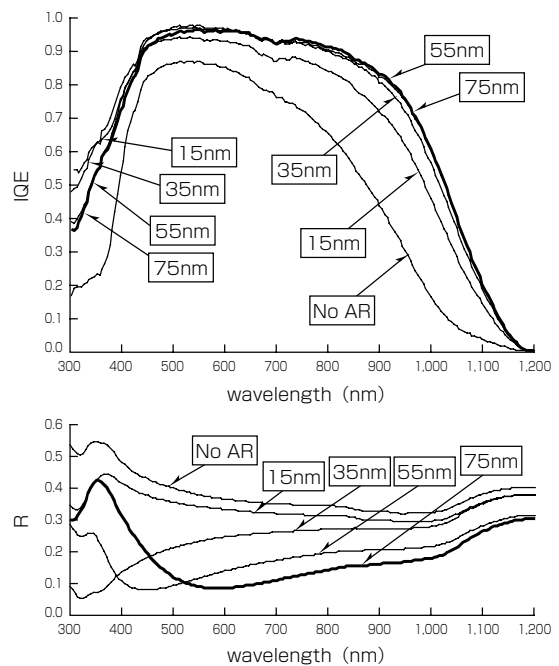


図3. 反射防止膜の膜厚に対する内部量子効率と反射率の関係

から、屈折率 $n=2.2$ のSiN膜で、35nmより膜厚が厚い場合、SiN膜の吸収によってIQEが低下することが明らかとなっている。一方800nmより長波長領域では、IQEは55nmでほぼ最大となっている。これらの結果から水素パッシベーションの効果を最大化するには、55nmあれば十分であることが分かる。一方、太陽電池にとって表面での光反射を抑制し、セル内へ入射する光量を最大にする最適なSiN膜厚は75nm程度である。これらの結果では、光学的な最適膜厚(75nm)と水素パッシベーションの効果を最大にする膜厚(55nm)は一致しない。しかしモジュール構造まで含めて考えると、400nm未満の波長領域の光は、モジュールの封止材料であるEVA(エチレン酢酸ビニル共重合樹脂)及び強化ガラスの吸収によってセル内部にはほとんど入射せず、モジュール出力にはほとんど影響しない。したがって、最適なSiN膜の厚さは、水素パッシベーションの効果が最大となり、かつ光学的にも高効率を得られる反射率が最も低くなる75nm程度となることが実験で明らかとなった。

2.2 電極焼成条件とセル特性

図2に示したように、電極の焼成プロセスを経て大きく拡散長が改善される。そこで、電極焼成プロセスについて詳細に理解するために、拡散長の改善をもたらすプラズマCVDと電極焼成プロセスによる拡散長の変化を、次の4仕様の太陽電池のIQEを調べることによって評価した。図4は各仕様に対するIQEとRの変化を示したものである。

- ① 反射防止膜はなく、電極には印刷ペーストを用い800℃以上で焼成したもの(図中のシンボルA)
- ② 反射防止膜はなく、電極にはスパッタで形成した電極を用い300℃でシンターしたもの(図中のシンボルB)
- ③ 反射防止膜を形成し、電極にはスパッタで形成した電

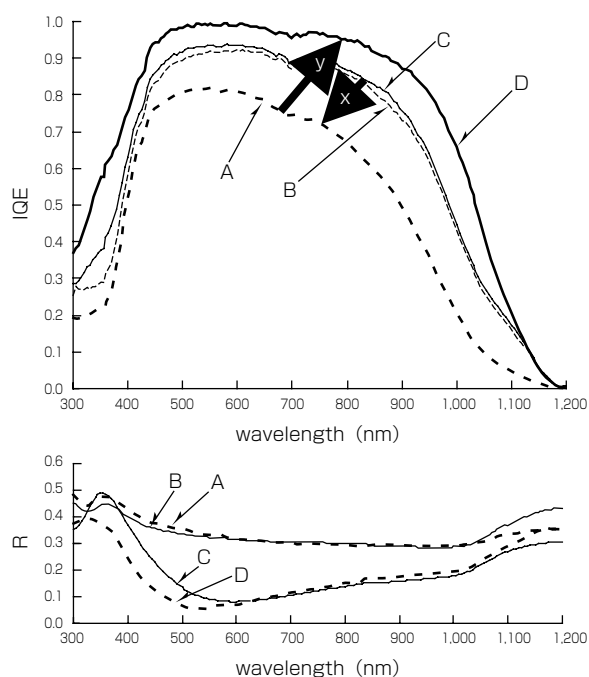


図4. 電極形成プロセスの拡散長への影響

- ④ 反射防止膜を形成し、電極には印刷ペーストを用い800℃以上で焼成したもの(図中のシンボルD)

反射防止膜を形成しない場合、B仕様のIQEはA仕様のIQEより大きい。すなわち、反射防止膜がない状態では、印刷電極の800℃を超える温度は大きなIQEの減少(gap x)を引き起こしている。

一方、反射防止膜を形成している場合、D仕様の800℃を超える焼成温度で、IQEはC仕様の300℃の熱処理によるIQEより大きくなっている。先の反射防止膜を形成しない場合の結果を考慮すると、反射防止膜がなければ熱の影響によってA仕様の状態にあるものが、反射防止膜の存在、すなわち水素パッシベーションの作用によってAからD(gap y)に改善されたと考えられることができる。これらの関係を説明する一つの解釈として、電極焼成プロセスで熱による劣化(gap x)と、反射防止膜に存在する水素による水素パッシベーションによる改善(gap y)が同時に生じていると考えることができる。現時点では推察にすぎないが、gap xをもたらす劣化とgap yをもたらすものが異なるのであれば、例えばgap xが結晶粒界に偏析している重金属の電極焼成温度による再拡散に起因するとすれば、この熱による劣化を抑え込めれば更に拡散長を高める可能性が出てくる。そこで水素パッシベーションの効果を最大限に引き出す可能性を持つ高速焼成に取り組んできた。

図5は、従来の焼成プロファイルと高速焼成プロファイルと比較したものである。実験に用いた高速焼成条件は、焼成温度のピーク時間を数秒未満と短くし、昇降温度速度30℃/秒以上としたものである。

図6には、高速焼成と従来焼成における短絡電流密度(J_{sc})と開放電圧(V_{oc})の関係を示した。高速焼成と従来焼成の比較には異なる3社から供給されたシスターウェーハ(多結晶で拡散長などの電気的な特性がほぼ一致するように、できる限りインゴットの近接した場所から切り出したウェーハ)を用いた。図中の点線は、異なる比抵抗ごとに拡散長のみ変化パラメータとした場合の、短絡電流密度と開放電圧の関係をPC-1D(太陽電池セルの一次元デバ

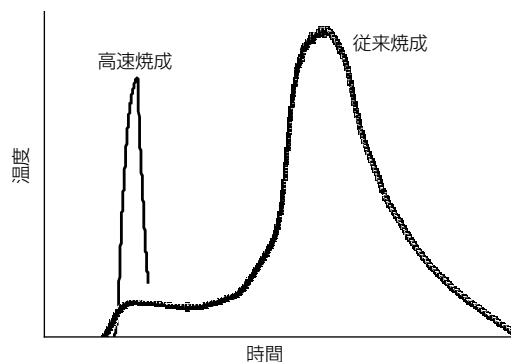


図5. 電極焼成プロファイルの比較

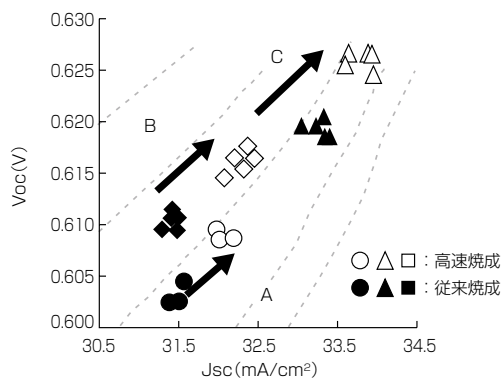


図 6. Voc, Jsc, 高速焼成, 従来焼成の比較

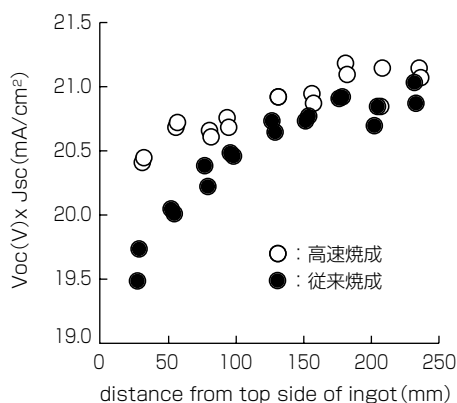


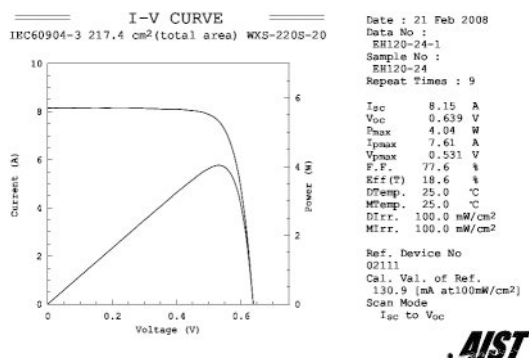
図 7. Voc x Jsc のインゴット位置依存性

イスシミュレータ)で調べたものである。拡散長が向上すると、短絡電流密度と開放電圧は同時に向上する。異なるウェーハ・メーカーのシスターウェーハであるA, B, Cのいずれの仕様でも、従来焼成から高速焼成にすることによって短絡電流密度並びに開放電圧が向上し、その傾向はPC-1Dの計算の傾向と一致した。これらの関係から高速焼成によって拡散長が向上することが確認された。

一方図7は、インゴットのトップ側からボトム側にかけての位置と、短絡電流密度と開放電圧の積の関係を示したものである。

こちらにもシスターウェーハを用い、従来焼成と高速焼成を比較した。インゴットのトップ側での改善効果が著しいことから、インゴットのトップ側に偏析する重金属の再拡散抑制に、高速焼成が有効であることが推察される。

このような高速焼成の新規な焼成条件に対し高効率化、高信頼性を確立するために、表電極(Agペースト)の最適化も同時に進めてきた。高効率化に関して、入射光量の増大に直接効果のあるグリッド電極の細線化は、スクリーン印刷時におけるパラメータとなるメッシュ径、メッシュ番手、乳剤厚等のスクリーンマスク、印圧やマスクとウェーハのギャップ等の印刷条件、及び粘度やレオロジーといっ



Jsc (mA/cm²)	Voc (V)	F.F.	Eff (%)
37.51	0.639	0.776	18.6

図 8. 高効率多結晶シリコンセルのI-V特性

た金属ペーストなどの最適化と多重印刷を適用することによって、グリッド幅として60μm幅を実現した。

一方、このプロセス・フローで信頼性を高めるには、表電極に用いるAgペーストと焼成条件の最適化が不可欠であることは三菱電機技報2003年5月号⁽²⁾で詳細に述べた。今回の高速焼成仕様についても、信頼性の観点から最適化を重ね、従来仕様よりも更に信頼性を向上させることが可能になった。

先に述べた水素パッシベーション、高速焼成、表面電極細線化など、太陽電池セルの高度化技術とともに、ハニカムテクスチャ、エミッター層高シート抵抗化などの多結晶シリコン太陽電池の高度化技術を適用することによって、図8に示すように実用的な150mm角の多結晶シリコンで18.6%の変換効率が得られた。

3. む す び

結晶系太陽電池の高効率化技術について述べた。今後さらに単結晶や小面積のセルで実証されている裏面側の絶縁膜によるパッシベーション構造、裏面反射の活用やウェーハの比抵抗最適化によって、表側にバスやグリッドが形成された量産に適した通常構造セルにおいても更なる効率改善ができるものと確信している。

参 考 文 献

- (1) Arimoto, S., et. al : SIMPLIFIED MASS-PRODUCTION PROCESS FOR 16% EFFICIENCY MULTI-CRYSTALLINE Si SOLAR CELLS, Proceeding of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, 188~193 (2000)
- (2) 森川浩昭, ほか: 太陽電池セル・モジュール鉛フリー化, 三菱電機技報, 77, No.5, 310~312 (2003)