

# 薄型高効率HIT太陽電池の性能改善

Improvement of High-Performance HIT Solar Cells with Thin Si Wafers

藤 嶋 大 介  
Daisuke Fujishima

矢 野 歩  
Ayumu Yano

木 下 敏 宏  
Toshihiro Kinoshita

田 口 幹 朗  
Mikio Taguchi

丸 山 英 治  
Eiji Maruyama

田 中 誠  
Makoto Tanaka

## 要 旨

安全でクリーンなエネルギー源として太陽電池が注目されている。筆者らは、シリコンウェハの厚みが98  $\mu\text{m}$ の実用サイズ薄型HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) 太陽電池にて、世界トップレベルのエネルギー変換効率23.7% (R&Dレベル) を達成した。将来の低コスト化を目指し、製造コストの約半分を占めるシリコンウェハの厚みを100  $\mu\text{m}$ 以下の条件下でHIT太陽電池の出力損失試算をもとに改善指針を明確化した。その結果、各種新規要素技術の開発により、短絡電流、開放電圧、曲線因子のすべてのI-Vパラメータを同時に改善した。

## Abstract

Solar cells have been regarded as a safe and clean energy source. We have achieved the world's top-level energy conversion efficiency of 23.7% for a practical-size HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) solar cell with 98- $\mu\text{m}$ -thick Si wafer at the R&D level. Under the condition that the thickness of Si wafers, for which approximately half of their cost is occupied by production costs, is less than 100  $\mu\text{m}$  for future cost reductions, we made clear the guiding principles for improving the conversion efficiency and developed high-efficiency technologies for HIT solar cells based on loss analysis of conventional HIT solar cells. As a result, we've improved all of the I-V parameters, short-circuit current, open-circuit voltage, and fill factor, at the same time due to development of various novel elemental technologies.

## 1. はじめに

現在、地球温暖化対策としての世界全体で大幅なCO<sub>2</sub>排出量削減が唱えられており、再生可能エネルギーに注目が集まっている。また、直近では安全面や燃料廃棄に問題のある原子力発電が見直されているなか、安全かつクリーンなエネルギー源として太陽電池は非常に注目を浴びている。近年の太陽電池市場は世界的に急激な需要増加があり、年率20%以上のペースで拡大している。2010年度の世界全体の生産量は23.9 GWであり、今後も順調な市場拡大が予測されている。このような市場環境のなか、三洋電機は2015年までにHIT<sup>(注1)</sup> (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) 太陽電池の生産量を2010年度の600 MWから1.5 GWまで増加させる計画を立てている。

しかしながら、太陽電池市場の急激な拡大は、同時に急激な価格下落を引き起こしており、製造コストを下げるのが急務になっている。また、火力発電や原子力発電など現行エネルギーと比較して、太陽電池の発電コストは依然数倍であり、今後の基幹エネルギーとして発展していくためには、現状の製造コストからの大幅な削減が必要不可欠である。

現状の結晶シリコン (c-Si) 系の太陽電池モジュール

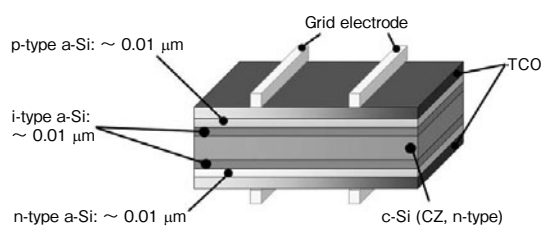
全体のコスト割合の中で、Siウェハが占める割合は非常に大きい。使用するSiウェハの厚みを減らすことは、コスト削減のために非常に有効な手段となる。そのため、筆者らは2009年当時に実用サイズ100.4  $\text{cm}^2$ で世界最高の23.0%の変換効率を達成し、さらに98  $\mu\text{m}$ の薄型Siウェハを用いたHIT太陽電池で22.8%の変換効率の実現に成功した[1]。今回、この22.8%を達成したセルにおける特性損失の詳細な見積もりとともに、各要素技術の改善幅を評価および解析し、そのうえで必要な要素技術を導入することで、98  $\mu\text{m}$ の薄型HIT太陽電池の変換効率を23.7%まで更新することができた。

本論文では、薄型高効率HIT太陽電池セルを実現するために用いたデバイス構造と、高性能化への各要素技術とそのアプローチについて紹介する。

## 2. HIT太陽電池のデバイス構造

第1図は、HIT太陽電池の構造を示す。アルカリ溶液による異方性エッチング法を用いてn型チヨクラルスキー (CZ) のc-Siウェハ表面に周期的なテクスチャー構造を形成した後、基板上に真性な(i型)アモルファスシリコン (a-Si) 層とp型のa-Si層を堆積することでp/nヘテロ接合を形成し、p/nヘテロ接合の反対側には、i型とn型のa-Si層を堆積し、BSF (Back Surface Field) 構造

(注1) 三洋電機 (株) の登録商標



第1図 HIT太陽電池の構造  
Fig. 1 Structure of HIT solar cell

を形成する。ドーピングされたa-Si層の両側には、透明導電酸化物（Transparent Conductive Oxide: TCO）層と金属グリッド電極を形成することで表裏対称構造を有するHIT太陽電池セルが形成できる。各プロセスは、200℃以下の低温で形成され、セル製造に必要なエネルギーも小さい。

HIT太陽電池最大の特長はc-Siウエハとドーピングされたa-Si層の間に高品質なi型a-Si層を挿入することによって、c-Si表面における良好なパッシベーション性能が得られることである[2]。この良好なパッシベーション性能は、太陽電池特性を低下させるc-Si表面の欠陥による再結合を抑制し、高い開放電圧（open-circuit voltage:  $V_{oc}$ ）を得ることができる。一方、約900℃の熱拡散によって形成される一般的なc-Si太陽電池は、金属電極と半導体界面での再結合速度が速いため、高い $V_{oc}$ を得ることができない。そのため、両者を比較すると、HIT太陽電池は高い変換効率を有する。また、この高い $V_{oc}$ は変換効率改善だけでなく、良好な温度係数をもたらす[3]。

加えて、HIT太陽電池の対称構造には2つの利点がある。1点目は両面発電が可能なことである。セルの一方面からの光入射による発電だけでなく、反対面側からの光入射に対しても発電が可能であり、地表面からの反射などを利用することによって、発電効率を1割以上向上できる。2点目として、表裏対称構造により熱や機械的なストレスを緩和できることである。

このように、一般的なc-Si太陽電池に対して発電特性においても構造的特徴においても優れたHIT太陽電池セルは、三洋電機独自の技術である。上記の特徴から、近年、欧米やアジアでHIT太陽電池構造の研究が活発であり、他研究機関でも100 cm<sup>2</sup>以上の大面積で19%以上の効率が報告されている[4][5]。

### 3. 薄型化への課題と解決

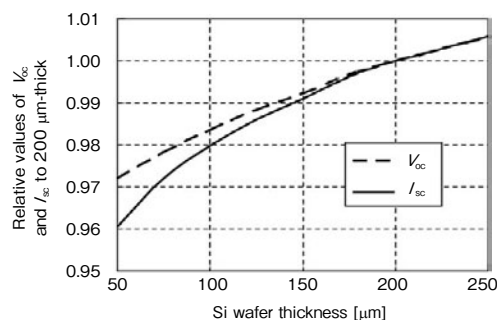
#### 3.1 薄型化への課題

太陽電池の製造コストを低減するには、Siウエハの厚みを削減することが非常に効果的だが、ウエハ厚が薄く

なることによって、いくつかの課題が生じる。1点目の課題は、機械的な強度が弱まっていくことである。薄いSiウエハは、割れやすくなるだけでなく、熱や機械的なストレスの影響を受けやすく、反りが発生する。セルの反りは太陽電池セル同士を直列につなげて作製するモジュール化工程において、深刻な歩留まり低下を引き起こす。

2点目の課題は、光電流の減少である。Siのバンドギャップである1.1 eVに近い領域（1100 nm付近の近赤外光領域）では、Siの光吸収係数が低いため、Si内部で吸収されない光子数がウエハ厚減少とともに増加し、短絡電流（short-circuit current:  $I_{sc}$ ）の減少を引き起こす。

3点目の課題は、 $V_{oc}$ の低下である。Si表面での少数キャリアの再結合確率がSiバルク中の再結合確率よりはるかに大きいときに、Siウエハ厚が減少するのにしたがって、Si表面におけるキャリア再結合の比率は増加する。この場合、 $V_{oc}$ は減少する。第2図は、一般的なc-Si太陽電池において $1 \times 10^5$  cm/sの裏面再結合速度とSiバルク寿命を2000 μsと仮定した場合のPC1D<sup>(注2)</sup>シミュレーションによる $V_{oc}$ と $I_{sc}$ のSiウエハ厚依存性のグラフで、200 μmのセルで規格化した場合の相対値を示している。この計算結果は、薄いSiウエハを使用することで、太陽電池特性のうち $V_{oc}$ および $I_{sc}$ が低下していく様子を表している。



第2図 一般的なc-Si太陽電池において $1 \times 10^5$  cm/sの裏面再結合速度とバルク寿命を2000 μsと仮定した場合のPC1Dシミュレーションによる $V_{oc}$ と $I_{sc}$ のSiウエハ厚依存性

Fig. 2 Relative values of  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$  with wafer thickness dependence in conventional Si-based solar cell with back surface recombination velocity of  $1 \times 10^5$  cm/s and bulk lifetime of 2000 μs by PC1D simulation

(注2) 一次元半導体デバイスシミュレータ。1982年から開発され、太陽電池産業の業界標準シミュレータと広く考えられている。ニューサウスウェールズ大学のホームページで無料配布されている。

### 3.2 HIT太陽電池の特長による解決

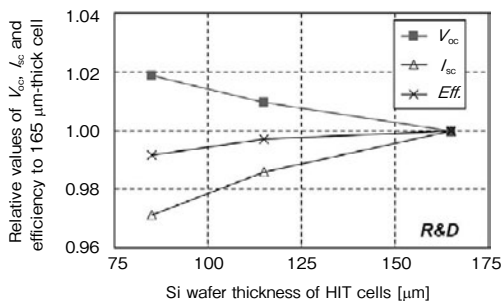
3.1節の課題をHIT太陽電池のいくつかの特長が解決してくれる。最初の特長はHIT太陽電池が表裏対称構造であることと、各プロセス温度が200℃以下であることである。第3図は、厚さ58μmのc-Siウエハを用いたHIT太陽電池セルの写真で、反りが無いことがわかる[6]。この表裏対称構造と低温製造プロセスは、a-Si、TCO、および金属グリッド電極形成時に反りを抑制する。つまり、



第3図 厚さ58μmのc-SiウエハのHIT太陽電池セルの写真  
Fig. 3 Photograph of HIT solar cell with 58-μm-thick c-Si wafer

HIT太陽電池の構造が、より薄いc-Siウエハを使用するのに適していることを示す。

2番目の特長はHIT太陽電池のi型a-Si層の良好なパッシベーション特性である。第4図は、厚さ165μmのHIT太陽電池セルで規格化された $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、変換効率のセル厚み依存性である。 $V_{oc}$ の傾向が第2図とは逆になっている。良好なパッシベーション性能によって、a-Si/c-Si界面における表面再結合速度が小さい場合、Siウエハ厚が減少するにしたがって、バルク中で再結合する少数キャリアの割合が減少するため、結果として、 $V_{oc}$ が増加する。これが $I_{sc}$ の減少を補完することで、薄いSiウエハの使用による変換効率の低下を抑制できる。



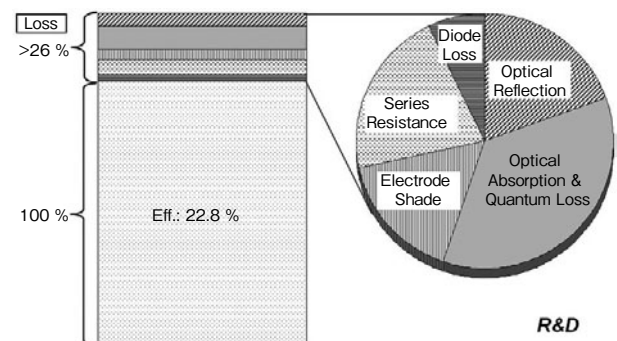
第4図 厚さ165μmのHIT太陽電池セルで規格化された $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 変換効率のセル厚み依存性

Fig. 4 Relative values of  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  and efficiency of HIT solar cells normalized by those of 165-μm-thick cell as function of cell thickness

## 4. HIT太陽電池セルの性能改善

### 4.1 22.8% HITセルの損失計算の内訳

第5図は、22.8%薄型HIT太陽電池セルの特性損失を示す。光学的な損失が大部分を占めており、それ以外では抵抗損失やダイオード特性などによる電氣的損失がある。光学的な損失をさらに細分化すると、表面形状と反射防止効果で低減しきれない反射損失とc-Si以外の層による吸収損失、さらに金属グリッド電極によるシャドウロスとなる。また、抵抗損失には、TCOと金属グリッド電極による集電の抵抗損失、a-Si膜の抵抗損失、およびa-Si/TCO界面やTCO/金属グリッド電極間の接触抵抗損失が存在する。ダイオード特性損失は、主にa-Si/c-Si界面での再結合確率による損失となる。22.8%薄型HIT太陽電池セルを基準として100%とした場合、これらの損失を合計すると約26%の改善の余地が存在し、すべての損失を無くすことで29%弱の理論変換効率となる。この値はc-Si系太陽電池の理論変換効率と一致する。ただし、26%の損失の中で不可避な損失も存在することから、各損失を50%程度減少させることができれば、25%超の変換効率がHIT太陽電池セルで実現できる可能性がある。



第5図 22.8%薄型HIT太陽電池セルの特性損失  
Fig. 5 Losses of 22.8%-HIT solar cell

### 4.2 光学損失減少のアプローチ

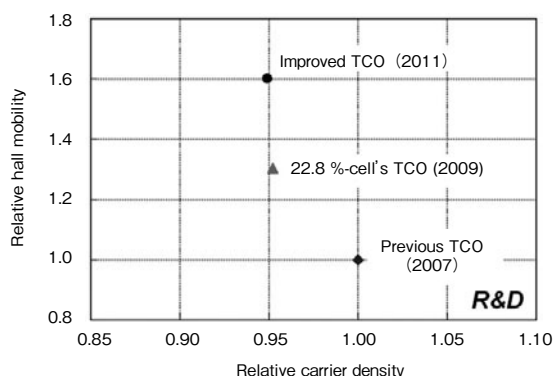
Siウエハ厚を薄型化することで $I_{sc}$ が減少することは第4図で示しており、また、第5図の損失計算より、光学損失の割合が最も大きいことを示した。そこで、光学損失を低減するために3つのアプローチを行った。

まず、表面反射損失を低減するために、c-Si表面のテクスチャー構造の最適化を検討した。ウェットプロセスによるSiテクスチャーは、構造的な角度が58°と決まっているため、同じサイズのテクスチャーの一様性が重要となる。筆者らは、異方性エッチング速度をコントロー

ルすることで、これを実現した。

次に、a-Si層とTCO層における吸収損失の低減を検討した。a-Si層の厚みは約0.01 μmと非常に薄いものの、300 nm ~ 700 nmの波長領域における光吸収係数が大きい。そのため、わずかな厚みで大きくa-Si層での吸収量が増加する。ただし、a-Si層を薄くするとc-Si表面のパッシベーション性能が悪化して、結果的に特性を低下させるトレードオフの関係がある。そのため、いかに良質なa-Si膜を得るかが重要である。筆者らは、所望の膜質が得られるように条件を制御することで、一様で良質なa-Si膜を得ることに成功した。

さらに、TCO層の吸収も低減するために、膜質の改善を検証した。具体的には、成膜条件の変更と材料の最適化により、第6図のようにTCO膜のキャリア密度を減少させ、移動度を向上させた。キャリア密度は、プラズマ振動による900 nm以上の長波長光領域の吸収と大きく相関があり、移動度においても同様に有効質量の変化によるプラズマ振動数に相関があるため、キャリア密度減少と移動度向上によって、長波長側の光吸収を減少させることが可能となる。

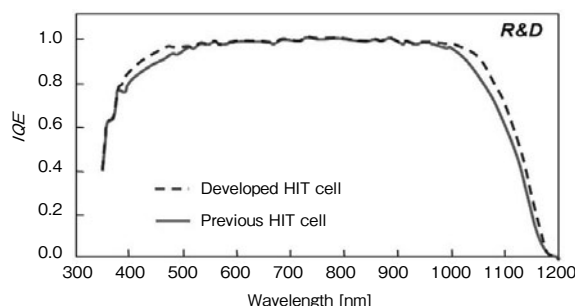


第6図 改善前のTCOで規格化したホール移動度-キャリア密度特性

Fig. 6 Hall mobility vs. carrier density characteristics normalized by average previous TCO's status

第7図で示すように、a-Si膜質改善による短波長領域で内部量子効率（Internal Quantum Efficiency: IQE）の増加と、TCO膜質改善による長波長領域のIQEの増加に成功した。

最後は、金属グリッド電極によるシャドウロスの改善である。金属グリッド電極直下は無効領域となるため、金属グリッド電極の細線化が重要である。ただし、金属グリッド電極を単に細くするだけでは、体積抵抗が増大するため、抵抗損失を大幅に悪化させてしまう。そこで、細線化と同時にアスペクト比率（電極高さ／電極幅）の



第7図 HIT太陽電池セルの内部量子効率

Fig. 7 Internal quantum efficiencies of HIT solar cells

改善が必要となる。筆者らは、金属グリッド電極の形成条件を細かく管理することで、細線かつ高アスペクトな電極を実現し、無効領域の削減を実現した。

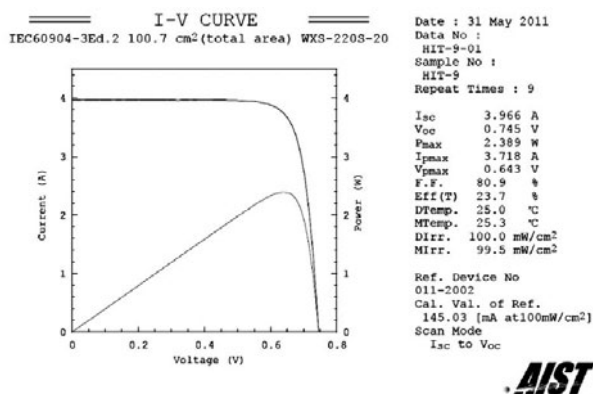
### 4.3 電気特性損失低減のアプローチ

電気特性損失の低減は、主に抵抗損失を低減することであり、太陽電池特性の中の曲線因子（Fill Factor:  $F.F.$ ）の改善につながる。HIT太陽電池の抵抗損失低減として最も効果的なものは、TCO膜と金属グリッド電極による集電抵抗損失を最小化する金属グリッド電極の形状と本数の最適化である。TCO膜は、第6図で示したように、キャリア密度の低減以上の移動度向上を実現することで、横方向のシート抵抗減少に成功した。また、金属グリッド電極も高アスペクト化によって体積抵抗の減少を実現した。この両者の抵抗値を用いて、最適なグリッド本数を計算することで、無効領域の削減と、集電による抵抗損失の減少の両立を実現できた。

このように抵抗損失は各要素技術による改善のみならず、デバイス全体を考えたうえで最適な解を見出すことが非常に重要となる。

### 4.4 性能改善の結果

各種損失低減を行った98 μm厚のSiウエハを用いたHIT太陽電池セルの特性結果を、第8図に示す。この測定は太陽電池特性の公的な測定機関であるAIST（産業技術総合研究所）で行った。今回の測定から、研究所レベルにおける100 μm以下のSiウエハを用いたHIT太陽電池セルの変換効率を22.8 %（2009年7月）から23.7 %に大幅に更新する結果が得られた。この値は、従来(200 μm以上)厚のSiウエハを用いたHIT太陽電池セルの公式記録である23.0 %をSiウエハ厚み半分以下で大幅に更新したことを意味する。



第8図 研究所の98  $\mu\text{m}$ 厚のSiウエハを用いたHIT太陽電池セル特性のAISTによる公式測定結果 (2011年)

Fig. 8 Characteristics of HIT solar cell with 98  $\mu\text{m}$ -Si wafer at R&D level in 2011 confirmed by AIST

第1表に、2009年と2011年の98  $\mu\text{m}$ 厚のSiウエハを用いたHIT太陽電池特性の比較を示す。各種光学損失の改善によって、 $I_{sc}$ を1.8%向上させることができた。また、電気特性損失の改善によって、2.3%の $F.F.$ を改善することができた。 $V_{oc}$ も0.3%と微増することができ、合計で4.0%の変換効率向上が達成できた。今回の改善によって、第5図中の特性損失の残りは約22%となる。この値は、まだ改善の余地が十分に残っていることを示す。

第1表 2009年と2011年の98  $\mu\text{m}$ 薄型HIT太陽電池特性の比較

Table 1 Comparison of HIT solar cells with 98  $\mu\text{m}$ -Si wafer in 2009 and 2011

	2009年	2011年	増加率
$I_{sc}$ [A]	3.896	3.966	+1.8%
$V_{oc}$ [V]	0.743	0.745	+0.3%
$P_{max}$ [W]	2.290	2.389	+4.3%
$F.F.$	79.1	80.9	+2.3%
Eff. (Total)	22.8%	23.7%	+4.0%
Size [ $\text{cm}^2$ ]	100.4	100.7	+0.3%

筆者らは、薄いSiウエハを用いたHIT太陽電池セルで、さらなる損失低減を行うことで、製造コストの低減と高効率化を両立したc-Si系太陽電池の中で発電コストパフォーマンスNo.1を目指す。

## 5. まとめ

筆者らは、薄型化による特性低下をさらに上回る変換効率改善に成功した結果、98  $\mu\text{m}$ のSiウエハを用いたHIT太陽電池セルで世界トップレベルの変換効率23.7%を実現した。この実現のために、2009年の22.8%の薄型HIT太陽電池の損失を計算し、それを改善するために各

要素技術とデバイスの再設計を中心に行い、 $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $F.F.$ すべてのパラメータを改善することに成功した。

今後は、23.7%の変換効率が得られた薄型HIT太陽電池の損失を同様の手法で解析し、各種損失の低減の余地を吟味したうえで、さらなる損失低減を計画・実行し、HIT太陽電池の発電コストパフォーマンスのさらなる改善を目指す。

## 参考文献

- [1] M. Taguchi et al., "High efficiency HIT solar cell on thin (<100  $\mu\text{m}$ ) silicon wafer," 24th EUPVSC Proc., pp.1690-1693, 2009.
- [2] M. Tanaka et al., "Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)," Jpn. J. Appl. Phys. 31, pp.3518-3522, 1992.
- [3] S. Taira et al., "Temperature properties of High-Voc HIT Cells," Renewable energy, pp.115-118, 2006.
- [4] D. Muñoz et al., "Towards high efficiency on full wafer a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells: 19.6% on 148 $\text{cm}^2$ ," 35th IEEE PVSC, pp.39-43, 2010.
- [5] B. Strahm et al., "Progress in silicon on hetero-junction solar cell development and scaling for large scale mass production use," 25th EUPVSC Proc., pp.1286-1289, 2010.
- [6] H. Inoue et al., "Improving the conversion efficiency and decreasing the thickness of the HIT cell," Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1210, Q07-01, 2010.

## 執筆者紹介



藤嶋大介 Daisuke Fujishima  
パナソニックグループ エナジー社  
Energy Company of Panasonic Group



矢野 歩 Ayumu Yano  
パナソニックグループ エナジー社  
Energy Company of Panasonic Group



木下敏宏 Toshihiro Kinoshita  
パナソニックグループ エナジー社  
Energy Company of Panasonic Group



田口幹朗 Mikio Taguchi  
パナソニックグループ エナジー社  
Energy Company of Panasonic Group  
博士（工学）



丸山英治 Eiji Maruyama  
パナソニックグループ エナジー社  
Energy Company of Panasonic Group  
博士（工学）



田中 誠 Makoto Tanaka  
次世代エナジーデバイス開発センター  
Next-Generation Energy Device Development  
Center  
博士（工学）