

変換効率24.7%のHIT[®]太陽電池の開発

Development of HIT[®] Solar Cell with Conversion Efficiency of 24.7%

矢野 歩

Ayumu Yano

田口 幹朗

Mikio Taguchi

東方田 悟司

Satoshi Tohoda

丸山 英治

Eiji Maruyama

嶋田 聡

Satoru Shimada

要 旨

「HIT[®]太陽電池」は、太陽電池モジュールの変換効率向上を可能にし、BOS（バランス・オブ・システムズ）コストの低減を可能にする太陽電池である。HIT[®]太陽電池の光電変換における損失で多くを占めるのは、キャリアの再結合による損失および抵抗による損失である。キャリアの再結合を引き起こす主因は接合界面に存在する欠陥であり、これらを集中的に不活性化（パシベーション）する新プロセスにより、25%以上の界面再結合速度の低減が可能である。また、低抵抗化を可能にする新プロセスにより、25%以上の抵抗損失の低減が可能である。これらの技術の組み合わせにより、研究開発レベルにおいて24.7%の変換効率を得ている。これは、実用サイズ（100cm²以上）の結晶シリコン系太陽電池において世界最高（2013年2月時点）となる変換効率である。

Abstract

High efficiency HIT[®] solar cells have been developed to improve the conversion efficiency of solar modules and reduce the Balance Of Systems (BOS) cost. Carrier recombination loss and resistive loss account for a large part of the total loss in the HIT[®] solar cell. Defects in the heterosurface are the main factor for recombination, and new processes to passivate these defects enable a reduction of more than 25% in the surface recombination velocity. Other new processes enable a reduction of more than 25% in the resistive loss. Combining these processes enables a conversion efficiency of 24.7% in the research and development stage. That conversion efficiency has been confirmed to be the world's highest (as at February 2013) for a practical-sized (over 100 cm²) silicon solar cell.

1. はじめに

持続可能な社会の実現には、再生可能エネルギーによる発電コストが、既存の電力のコストと同等かそれよりも安価になること（グリッドパリティ）が必須である。近年の太陽電池モジュールの価格下落により、建築、架台、パワーコンディショナや地代など太陽光発電システムにおける太陽電池モジュール以外のコスト（BOSコスト）がシステム全体に占める割合が大きくなりつつある。よって太陽電池モジュールには低価格であると同時に、高い変換効率が求められる。これは、太陽電池モジュールの変換効率が高いほど、同じ出力をより小さな設置面積で得られ、BOSコストを削減することができるからである。

また、太陽電池の出力は、発電時の太陽電池モジュール内温度上昇により低下する。この低下は30度の温度上昇で10%近くにも及ぶ。より高い実発電量を実現するためには、高温時の出力低下の抑制が求められる。

HIT[®]（注1）太陽電池の基本構造は、一般的な結晶シリコン系太陽電池よりも高い変換効率を実現可能な構造とし

て1990年に提案された[1]。その後三洋電機（株）（当時）は、用いるシリコン基板の厚みを100 μm以下に半減するなどのコスト低減に取り組みながらも、2011年に23.7%の変換効率を得るなど[2]世界最高レベルの結果を達成し続けてきた。今回筆者らは、この23.7%を達成したHIT[®]太陽電池における損失解析を行うとともに、各損失を低減する取り組みを行った。その結果2013年に、実用サイズの結晶シリコン系太陽電池において世界最高（注2）の変換効率となる24.7%を達成できた[3]。また、HIT[®]太陽電池の温度特性は一般的な結晶シリコン系太陽電池に比べ良好であり、上述の要求をよく満たす。

本論文では、これらの損失解析と損失低減の取り組み、およびHIT[®]太陽電池の良好な温度特性について紹介する。

2. HIT[®]太陽電池の構造と特長

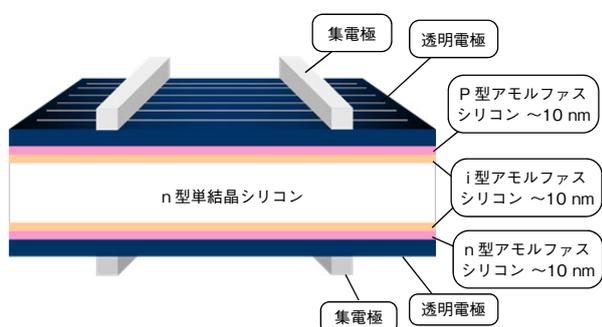
はじめに、HIT[®]太陽電池の構造と、その特長および課題を述べる。

（注1）当社グループの登録商標

（注2）2013年2月時点

2.1 HIT[®]太陽電池の構造

第1図に、HIT[®]太陽電池の構造概略図を示す。チョコレート法によって製造されたn型の単結晶シリコンを基板に用い、この両面に異方性エッチングによってテクスチャ構造を形成する。得られた基板の両面に真性(i型)のアモルファスシリコンを成膜し、片方の面にp型のアモルファスシリコンを成膜することでpn接合を、反対側の面にn型のアモルファスシリコンを成膜することで裏面電界構造[4]を形成する。さらに外側に、反射防止機能と集電補助機能を担う透明電極を形成する。最後に、スクリーン印刷によって金属集電極を両面に形成する。



第1図 HIT[®]構造の概略図

Fig. 1 Schematic illustration of HIT[®] structure

2.2 HIT[®]太陽電池の特長と課題

HIT[®]太陽電池の構造の最大の特長は、その名が Heterojunction with Intrinsic Thin layerの略に由来しているように、基板の両面に成膜される極薄のi型アモルファスシリコン層にある。これらのアモルファスシリコン層は欠陥が少なく、p型、n型のアモルファスシリコン層を基板上に直接成膜した場合に比べ、結晶シリコンとアモルファスシリコンのヘテロ界面の欠陥を大幅に低減することができる[5]。この効果により、結晶シリコン中で光子から変換されたキャリア（自由電子と正孔）が、欠陥において再結合して消滅する確率を大きく低減できる。この結果HIT[®]太陽電池は光子由来のキャリア（過剰キャリア）をウェハ内部に多くためることができ、高い電圧を実現できる。

HIT[®]太陽電池にはこれらの特長がある一方で、いくつかの課題が存在する。1つの課題は、アモルファスシリコンによる抵抗損失である。i型のアモルファスシリコンはドーパントを含まないがゆえに高抵抗であるし、p型、n型のアモルファスシリコンについても、一般的な太陽電池で用いられる、熱拡散で形成されたp型、n型結晶シリコンに比べるとやはり高抵抗である。別の課題として、

受光面における集電極の存在が挙げられる。これらの集電極は遮光損失を生み出す一方で、細線化、大ピッチ化を進めた場合は透明電極と集電極による抵抗損失を増大させてしまう。これらの抵抗損失もまた、全体の抵抗損失に対して多くの割合を占めている。

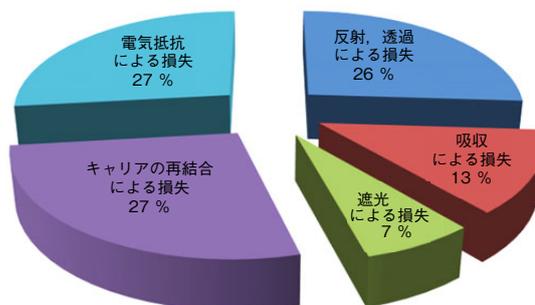
HIT[®]太陽電池において高出力化を進めるためには、これらの特長を伸ばしながら、いかに課題を解決するかが重要となる。

3. HIT[®]太陽電池の特性改善

HIT[®]太陽電池の特性改善へ向け、まず変換効率23.7%のHIT[®]太陽電池における特性損失の内訳を解析した。その後、比率の大きい損失について集中的に改善の取り組みを行い、得られた技術の組み合わせによって、世界最高^(注2)となる変換効率24.7%を達成できた。

3.1 損失の内訳

シリコン系太陽電池の変換効率の理論限界はおおよそ30%であり、変換効率23.7%のHIT[®]太陽電池には6ポイント強の損失が存在する。この損失を、5つの要素に分解した内訳を、第2図に示す。最も大きい損失は、キャリアの再結合による損失、太陽電池の内部抵抗による損失で、どちらも全体のおよそ27%を占める。その次に多いのが、太陽電池表面で反射する光と太陽電池を透過して裏面から出ていく光の損失で、およそ26%を占める。これらに続いて、アモルファスシリコンや透明電極などによる吸収損失が13%、集電極による遮光損失が7%となっている。以上より、HIT[®]太陽電池の変換効率を大きく改善するためには、再結合損失、抵抗損失の低減が不可欠である。



第2図 変換効率23.7%のHIT[®]太陽電池の損失内訳

Fig. 2 Loss analysis of 23.7% efficiency HIT[®] solar cell

3.2 再結合損失の低減

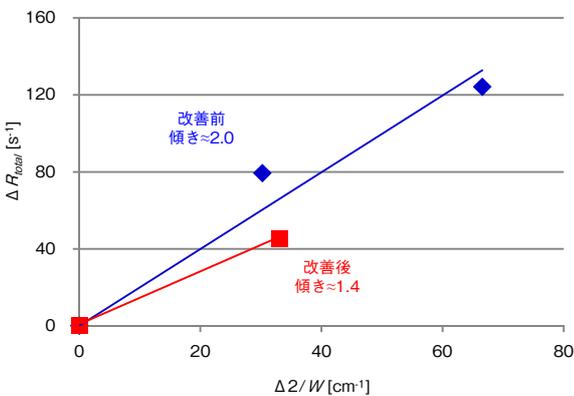
キャリアの再結合速度が理想状態よりも大きい場合、太陽電池はウェハ内部に過剰キャリアをためることができず、その結果高い電圧が達成できなくなってしまう。再結合速度を増加させる主因には、基板バルク中の欠陥を介しての再結合と、ヘテロ界面の欠陥を介しての界面再結合が存在するが、シリコン基板が100 μmと薄い場合は特に界面再結合の影響が顕著である。そこで筆者らは、ヘテロ界面での欠陥を低減し、界面再結合速度を小さくするために次のような技術を開発した。

- ・ 欠陥の少ないアモルファスシリコンの成長を容易にするテクスチャ構造の形成
- ・ シリコン基板表面の汚染物の低減
- ・ プラズマ気相成長時の基板へのダメージ抑制
- ・ 欠陥の少ないアモルファスシリコン層の形成

ところで、HIT[®]太陽電池のヘテロ界面での界面再結合速度は次の式(1)の関係がある[6]。

$$R_{total} = R_{bulk} + \frac{2}{W} S \dots\dots\dots (1)$$

R_{total} はHIT[®]太陽電池の単位体積あたりの再結合速度[7]、 R_{bulk} は材料となるシリコン基板自体の単位体積あたりの再結合速度、 S はシリコン基板とアモルファスシリコンの界面における単位面積あたりの界面再結合速度、 W はシリコン基板の厚みを示す。この式から、基板の厚みを変えたときの R_{total} の W の逆数に対する傾きから、界面再結合速度 S を求めることができる。第3図に、この結果を示す。改善前の界面再結合速度は傾きからおよそ2.0 cm/sと求められ、これは以前の筆者らの報告と一致する[8]。これに対し改善後の界面再結合速度は傾きからおよそ1.4 cm/sとなり、改善前に比べて25%以上低減されている。この効果により、さらに高い電圧の実現が可能と



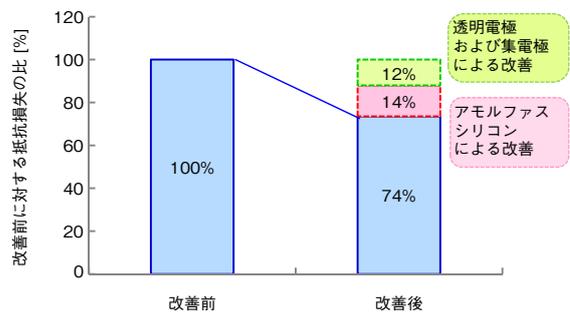
第3図 表面再結合速度の改善
Fig. 3 Improvement of surface recombination velocity

なった。

3.3 抵抗損失の低減

2.2節で述べたように、HIT[®]太陽電池においてアモルファスシリコン層の抵抗は、抵抗損失の多くを占めている。抵抗という観点からはアモルファスシリコンは薄ければ薄いほど良いが、その一方で界面の品質を保つためには、ある程度の膜厚が必要である。筆者らは3.2節で述べたアモルファスシリコンの膜質改善に基づき、再度膜厚設計の見直しを行った。この効果により、これまでの全体の抵抗損失のうち、およそ14%を低減できた。

また筆者らは、透明電極のシート抵抗を低減するために、透明電極中でのキャリア移動度が高くなるよう開発を行い、得られた透明電極のシート抵抗を元に集電極パターンを再設計を行った。さらにスクリーン印刷時のパラメータ、乾燥方法の検討によって、集電極の高アスペクト化を実現することができた。これらにより、全体の抵抗損失のうち、およそ12%を低減できた。第4図に、得られた抵抗損失の改善を示す。

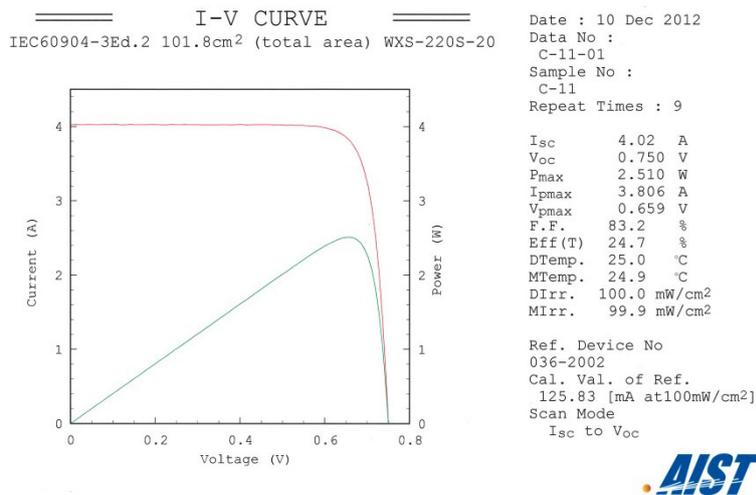


第4図 抵抗損失の改善
Fig. 4 Improvement of resistivity

3.4 98 μm厚ウェハを用いたHIT[®]太陽電池での24.7%変換効率達成

筆者らはこれらのキャリア再結合損失の低減技術、抵抗損失の低減技術、その他の小さな改善技術を組み合わせた結果、98 μm厚のシリコン基板を用いたHIT[®]太陽電池において、24.7%の変換効率を達成できた。第5図に、(独)産業総合技術研究所(AIST)によって認証された変換効率24.7%のHIT[®]太陽電池のI-V曲線を示す。

また、第1表に、変換効率23.7%のHIT[®]太陽電池との特性の比較を示す。キャリア再結合損失の低減効果により開放電圧は0.7%改善し、750 mVに到達した。曲線因子についてはさらに大きな改善が見られ、2.8%の改善により、83.2%となった。これは、曲線因子にはキャリア



第5図 AISTによるHIT[®]太陽電池の測定結果
Fig. 5 I-V curve of HIT[®] solar cell confirmed by AIST

第1表 I-V特性の比較

Table 1 Comparison of I-V characteristics

	2011年	2013年	変化
開放電圧 [mA]	745	750	+0.7 %
短絡電流 [mA/cm ²]	39.4	39.5	+0.3 %
曲線因子 [%]	80.9	83.2	+2.8 %
変換効率 [%]	23.7	24.7	+3.8 %

再結合損失の低減と、抵抗損失の低減の両方の効果があるためである。短絡電流密度についても、集電極パターンの再設計による遮光損失の低減が功を奏し、0.3%とわずかではあるが改善されている。これらの合計により変換効率を3.8%改善し、24.7%を達成できた。これは、実用サイズのシリコン系太陽電池において、世界最高^(注2)となる変換効率である。

4. HIT[®]太陽電池の温度特性

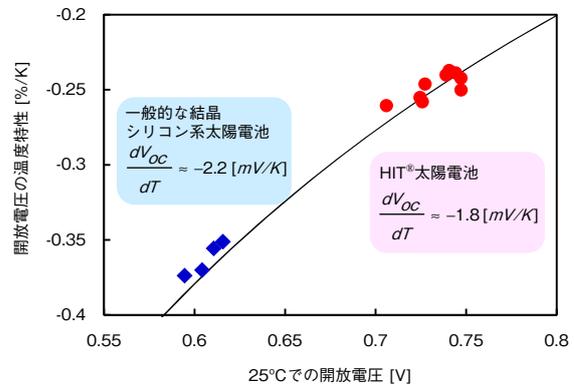
第1章で述べたように、太陽電池の特性は一般的に温度上昇とともに低下する。これは主に、開放電圧の低下に起因している。温度上昇時のシリコン系太陽電池の開放電圧低下は式(2)で表される[9]。

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -\frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma kT}{qT} \dots\dots\dots (2)$$

V_{oc} : 開放電圧, T : 絶対温度, V_{g0} , γ : 定数,
 q : 電荷素量, k : ボルツマン定数

この式から、温度上昇時の開放電圧低下は開放電圧そのものが大きいほど抑制されることがわかる。さらに温度特性は、25℃における値を分母に、温度上昇時の低下量を分子にとって表現されるため、分母となる開放電圧が

大きいほどさらに有利となる。第6図に、式で示される温度特性、HIT[®]太陽電池と他の結晶シリコン系太陽電池の実験的な温度特性を比較した図を示す。



第6図 HIT[®]太陽電池と一般的な結晶シリコン系太陽電池の温度特性

Fig. 6 Temperature coefficient of HIT[®] solar cells and other silicon-based solar cells

式と実験的な温度特性とはよく一致しており、HIT[®]太陽電池は開放電圧が大きいため、温度上昇による低下そのものも少なくなっている。HIT[®]太陽電池の開放電圧の温度特性は-0.25%/K程度であり、他の結晶シリコン系太陽電池の温度特性-0.36%/Kに比べて、3分の2程度に抑制されている。

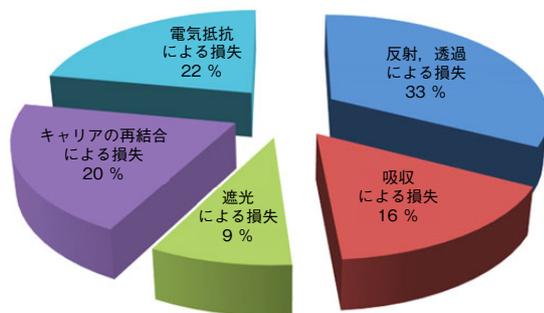
HIT[®]太陽電池の曲線因子の温度特性は、開放電圧と同様に、一般的な結晶シリコン太陽電池よりも良好である。これには2つの原因があると考えられる。1つは、動作電

圧が開放電圧と同様の振る舞いをするためである。もう1つは、アモルファスシリコン層抵抗が抵抗成分の多くを占めるためである。これらアモルファスシリコン層は半導体として振る舞うため、その抵抗は高温になるほど改善する傾向がある。これら2つの効果により、HIT[®]太陽電池の曲線因子は高温でも低下が少なくなっていると考えられる。

短絡電流密度に関しては、HIT[®]太陽電池と一般の結晶シリコン系太陽電池との間に差は見られない。これは、短絡電流密度が主に発電層である結晶シリコンのバンドギャップによって決定されることに起因する。

5. 今後の展開

第7図は、変換効率24.7%のHIT[®]太陽電池の損失を第3章と同様にして5つの要素に分解した内訳を示す。筆者らがキャリア再結合損失、抵抗損失の低減に成功したことにより、それぞれの比率は20%、22%まで低下している。それに応じて光学損失は、反射・透過損失が33%、吸収損失が16%、遮光損失が9%とそれぞれ比率を増している。そのため、今後の開発においてはこれらの光学損失をいかにして低減するかが重要である。



第7図 変換効率24.7%のHIT[®]太陽電池の損失内訳
Fig. 7 Loss analysis of 24.7% efficiency HIT[®] solar cell

反射・透過損失、遮光損失については、太陽電池を集積して1枚のモジュールにする際に、別の方法でアプローチすることができる。例えば反射損失については、受光面の充填剤やガラスの屈折率を、反射防止効果が最大になるように選ぶことで低減できる。透過損失についても、裏側の充填剤やバックシートの白色性を増すことで、低減できる。集電極による遮光損失についても、モジュール内部での光の多重反射を利用することで低減が可能である。

一方、吸収損失についてはセル内部で発生する損失の

ため、セル構造の見直しによってしか改善することができない。HIT[®]太陽電池には大きく2種類の吸収損失がある。1つは、受光面のアモルファスシリコンのバンドギャップ吸収による吸収である。アモルファスシリコンのバンドギャップ吸収は700 nm以短の波長域に存在しており、吸収された光子は発電に寄与しない。この観点からは、受光面のアモルファスシリコン層は、薄く、さらにワイドギャップであることが好ましい。ただしこれらのパラメータはキャリアの再結合損失、抵抗損失にも影響を与えるため、注意深く設計する必要がある。もう1つは、透明電極による吸収損失である。透明電極はおよそ900 nm以長の領域にフリーキャリア吸収をもち、吸収された光子は発電に寄与しない。この吸収を抑制するためには、透明電極のキャリア密度はなるべく少ないことが望ましい。その一方で透明電極のキャリア密度や移動度はシート抵抗にも影響を与えるため、注意深い設計が必要である。

6. まとめ

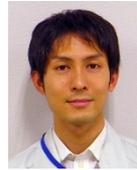
今回筆者らは変換効率23.7%のHIT[®]太陽電池について損失解析を行い、損失低減の取り組みによって研究レベルで新たに変換効率24.7%を得ることができた。これに対して現在当社が量産しているHIT[®]太陽電池の変換効率は22.0%であり、この間には2.7ポイントの開きがある。当社では生産装置でも今回開発した新規技術の一部を導入して試作を行っており、プロトタイプモジュールではあるが、セル変換効率23.4%、モジュール変換効率20.6%を達成している。今回開発した損失低減技術には、早期に生産装置への移管が可能な技術と、さらなるコストダウンおよび生産安定性の改善を必要とする技術があり、段階的に量産化を進めていく。筆者らは今後も高出力化、低コスト化、高信頼性化技術の開発に取り組み、世界一の発電コストパフォーマンスを目指す。

参考文献

- [1] M. Taguchi et al., "Improvement of the conversion efficiency of polycrystalline silicon thin film solar cell," Technical digest of the international PVSEC-5, pp.689-692, 1990.
- [2] T. Kinoshita et al., "The approaches for high efficient HITTM solar cell with very thin silicon wafer over 23%," Proceedings of the 26th EUPVSEC, pp.871-874, 2011.
- [3] A. Yano et al., "24.7% record efficiency HIT[®] solar cell on thin silicon wafer," Proceedings of the 28th EUPVSEC, pp.748-751, 2013.
- [4] H. J. Hovel, Semiconductors and semimetals volume II solar

- cells, R. K. Willardson, Ed., Academic Press Inc., Orlando, 1975
- [5] M. Tanaka et al., "Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction - Hetero-junction with Intrinsic Thin-layer)," Jpn. J. Appl. Phys., 31, pp.3518-3522, 1992.
- [6] D. K. Schroder, Semiconductor material and device characterization, Wiley-Interscience Publication, New York, 1990.
- [7] R. A. Sinton et al., "A quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization," Proceedings of the 16th EUPVSEC, pp.1152-1155, 2000.
- [8] A. Ogane et al., "Recent progress of HIT solar cells heading for world's top conversion efficiency," Technical digest of the 21st International PVSEC, 3A-10-01, 2011
- [9] Martin A. Green, Solar cells: Operating principles, technology and system applications, the University of New South Wales, New South Wales, 1998

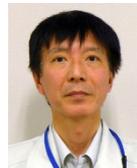
執筆者紹介



矢野 歩 Ayumu Yano
エコソリューションズ社
ソーラービジネスユニット
Solar Business Unit, Eco Solutions Company



東方田 悟司 Satoshi Tohoda
エコソリューションズ社
ソーラービジネスユニット
Solar Business Unit, Eco Solutions Company



嶋田 聡 Satoru Shimada
エコソリューションズ社
ソーラービジネスユニット
Solar Business Unit, Eco Solutions Company



田口 幹朗 Mikio Taguchi
エコソリューションズ社
ソーラービジネスユニット
Solar Business Unit, Eco Solutions Company
工学博士



丸山 英治 Eiji Maruyama
エコソリューションズ社
ソーラービジネスユニット
Solar Business Unit, Eco Solutions Company
工学博士