

次世代高効率単結晶シリコン太陽電池セルの開発

Development of Next-Generation High Efficiency Crystalline Si Solar Cells

中村 淳一* 浅野 直城* 稗田 健* 岡本 親扶* 片山 博之*

Junichi Nakamura Naoki Asano Takeshi Hieda Chikao Okamoto Hiroyuki Katayama

既に商品化している太陽電池モジュール「BLACKSOLAR」の開発・量産において培ってきたバックコンタクト構造の技術、並びに、薄膜太陽電池の開発・量産を通じて蓄積してきたアモルファスシリコンの成膜技術を融合して、ヘテロ接合バックコンタクト構造の太陽電池セルの開発に取り組んだ。ヘテロ接合バックコンタクト構造の太陽電池セルでは、①受光面に電極を持たないバックコンタクト構造により、高い短絡電流が得られると共に、②アモルファスシリコンと結晶シリコンを接合したヘテロ接合の優れたパッシベーション効果により高い開放電圧が得られる。シャープがこれまで太陽電池の開発・事業で業界をリードしてきた長い歴史の中で培った技術を応用し、ヘテロ接合バックコンタクト構造の太陽電池セルの開発を進めた結果、25.1%の高いセル変換効率を達成した。

Heterojunction back contact (HBC) structure solar cells have been developed utilizing the technology of back contact structure solar cell 'BLACKSOLAR' which has already been on the market, and that of the amorphous silicon film deposition which has been built up through the development and commercialization of thin film solar cells. HBC structure solar cells enable a high conversion efficiency with a high short circuit current because of no shadowing of light by front surface electrodes, and also a high open circuit voltage by applying the heterojunction between crystalline silicon and amorphous silicon, which makes an excellent passivation. Sharp developed HBC solar cells applying its accumulated leading technologies in the development and commercialization history of solar cells, and as a result, the high conversion efficiency of 25.1% was achieved.

まえがき

太陽光発電による発電コストが電力会社の電力料金と等価になる、いわゆる「グリッドパリティ」を達成するためには、太陽光発電システムのコストを、セル、モジュールを含めて下げる必要がある。しかし、実際にはセル、モジュールのコストが太陽光発電システムのコストの中で占める割合は必ずしも多くない。従って、システム全体の発電コストを下げる為には、太陽光発電システムが生み出せる電力量を増やす、つまり発電効率を高めることが重要である。

高い変換効率を実現する為には、これまで単結晶シリコン系のセルでは、HIT^(注)構造¹⁾やバックコンタクト構造²⁾といった幾つかの設計コンセプトが提案されてきた。これらの構造により、24.7%¹⁾、24.6%²⁾といった高い変換効率が達成されてきたが、グリッドパリティを目指した発電コストの低減の為には、25%を超えるさらなる変換効率の向上が求められる。

ヘテロ接合バックコンタクト (Heterojunction Back

Contact : HBC) 構造の太陽電池セルは、結晶シリコンをベースにした太陽電池セルにおいて最も高い変換効率を得られるセル構造として期待されている。なぜなら、図1に示すように、HBC構造は、高い短絡電流 (J_{sc}) が得られるバックコンタクト構造 (裏面電極構造) の利点と、高い開放電圧 (V_{oc}) が得られるヘテロ接合技術の

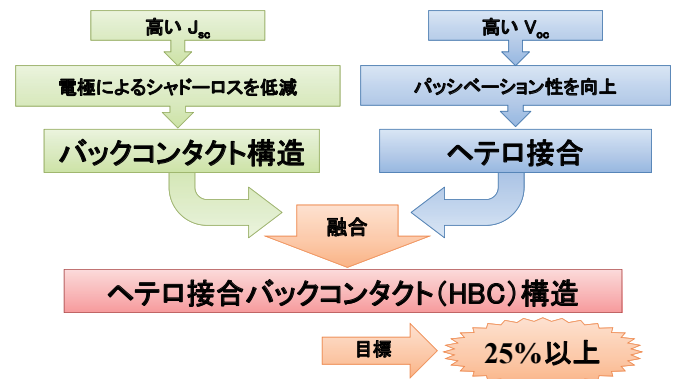


図1 ヘテロ接合バックコンタクト構造セルの設計コンセプト
Fig.1 Design concept of Heterojunction Back Contact structure cells.

利点を併せ持つからである。バックコンタクト構造では受光面に電極が無く電極の陰によるロス(シャドーロス)が無いことによって高い J_{sc} が得られ³⁾、また、ヘテロ接合技術では、アモルファスシリコンと結晶シリコンのヘテロ接合界面が界面でのキャリア再結合を低減できるため、高い不活性化(パッシベーション)性能が得られ、その結果高い V_{oc} が得られる。このように、HBC構造のセルでは、ヘテロ接合の技術とバックコンタクト構造の技術を融合することで、高い変換効率を得ることが可能である。シャープではこれまで、バックコンタクト構造セルを用いたモジュール「BLACKSOLAR」の開発、商品化を通じて、バックコンタクト構造の技術を有している。さらには、シリコン系薄膜太陽電池の開発、商品化を行ってきた中で、ヘテロ接合技術に必須であるアモルファスシリコンの成膜技術を持っている。我々は、これらの技術を有効に活用することにより、世界最高レベルのセル変換効率25%以上を目標として太陽電池セルの開発に取り組んだ。

注) HITはパナソニックグループの登録商標である。

1. 開発

1.1 ヘテロ接合技術の開発

HBC構造セルの開発は以下のような手順を踏んで行った。上述したように、シャープはアモルファスシリコンの成膜技術とバックコンタクト構造セルの技術を太陽電池事業の歴史の中で取り組み、技術の強みとしてきた。しかし、ヘテロ接合の技術、即ち、アモルファスシリコンを結晶シリコン上に成膜した構造により、結晶シリコン表面の再結合準位を減らしてキャリアの再結合を抑制する、いわゆるパッシベーションの技術についてはこれまで開発してこなかった。HBC構造のセルにおいて高い V_{oc} を実現するためには、ヘテロ接合技術を確立して結晶シリコンの表面を高いレベルでパッシベーションすることが必須である。

従って、開発の初期の段階では、ヘテロ接合の技術開発に注力した。ヘテロ接合によるパッシベーション性能を評価する為に、単純なヘテロ接合構造を作製、 μ PCD (microwave photoconductive decay) 法による測定を用いてパッシベーション性能の指標となる少数キャリアライフタイムを測定して、これを高める検討を行った。さらに、両面電極構造のヘテロ接合構造を試作し、I-V特性の測定を行うことにより V_{oc} の評価を行った。パッシベーション性能を高め、高い V_{oc} を得るために、アモルファスシリコンを成膜するプロセス条件や、成膜前の洗浄方法などについて詳細に検討した。

1.2 パターニングプロセスの開発

一方、従来のバックコンタクト構造セルではヘテロ接合を持たないため、ヘテロ接合構造でありながら裏面電極構造を構築するための構造形成技術、即ち、結晶シリコン上のアモルファスシリコンをパターニングする技術を有していなかった。パターニング技術の開発はHBC構造セルの開発において極めて重要である。なぜなら、パターニングのプロセスの良否は、ヘテロ接合を用いたバックコンタクト構造の設計を正確に実現できるかどうかだけではなく、結晶シリコンとアモルファスシリコンとの界面のパッシベーション性能を大きく左右するからである。このことを含め、以下のような点が必要と考え、パターニングプロセスを開発した。

- A) 意図した構造を正確に構築できること
- B) パターニングプロセスによる結晶シリコン/アモルファスシリコン界面のパッシベーション性能の低下が無いこと
- C) パターニングプロセスにより光学特性(光吸収、光閉じ込め特性)に悪影響を及ぼさないこと
- D) セルの直列抵抗が増加しないこと
- E) ショット電流(リーク電流)が増加しないこと

様々なプロセスを試みた中で最適なものを選択し、さらに、詳細にプロセス条件の最適化を行った。

2. 実験

2.1 HBCセルの構造

図2に、試作したHBC構造セルの概略図を示す。受光面、裏面共にアモルファスシリコンを成膜しており、セルの全ての表面で高いパッシベーション性が確保できる構造とした。裏面側にp型アモルファスシリコンとn型アモルファスシリコンの両方が有り、それぞれに電極を設け、バックコンタクト構造とした。従って受光面側には電極は無い。受光面側は光が効率よく取り込める

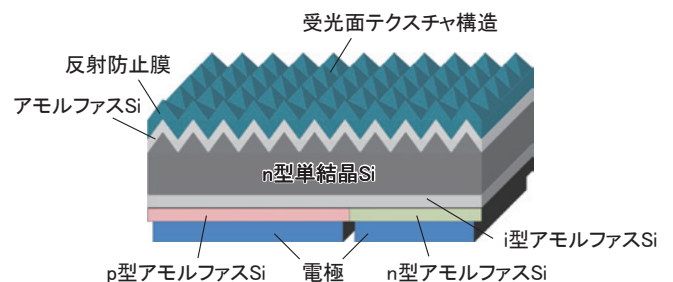


図2 ヘテロ接合バックコンタクト構造セルの構造

Fig.2 Structure of Heterojunction Back Contact structure cells.

ようにテクスチャ構造とすると共に、反射防止膜（ARC膜）を形成した。

2.2 HBCセルの試作プロセス

本HBC構造セルの試作プロセスの概略を図3に示す。

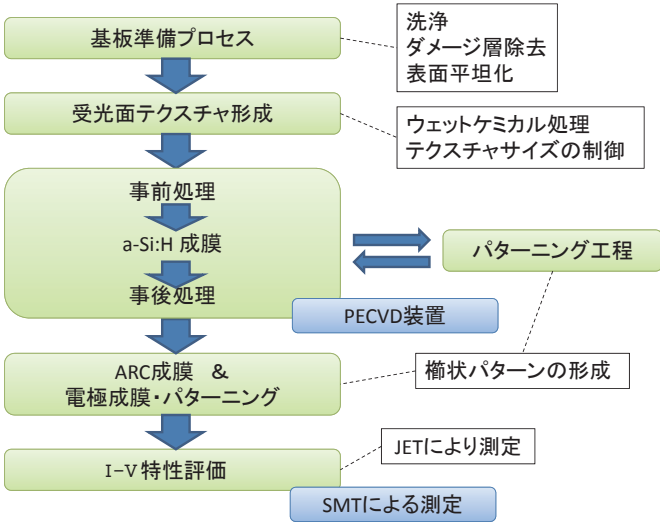


図3 ヘテロ接合バックコンタクト構造セルの作製プロセス概要
Fig.3 Fabrication process of Heterojunction Back Contact structure cells.

ウェハには、Cz法による単結晶基板（n型、結晶方位〈100〉）を用いた。スライスしたウェハを洗浄した後、スライスダメージを除去する為、及び、表面を平坦化する為にマクロエッチを行い、ウェハの受光面側をアルカリ系のエッチングにより適切なサイズのテクスチャ形状に加工した。さらに、表面のクリーニング工程と事前処理工程を経て、アモルファスシリコンをPECVD（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition）法により、ウェハの各面に成膜した。裏面のアモルファスシリコン層については、p型のアモルファスシリコン、n型のアモルファスシリコンを、前述したパターンニングプロセスを繰り返しながら成膜して楕状の形状に加工した。受光面側のアモルファスシリコンの上には反射防止膜を成膜した。裏面のアモルファスシリコン上にはコンタクト電極を形成し、これもアモルファスシリコンと同様に楕状に加工した。これらの作製プロセスや形状の設計には、シャープが過去に蓄積してきたバックコンタクト構造セルの技術を適宜利用し、形状の設計、理論的な考察に活用した。

2.3 HBCセルのI-V特性測定

試作したセルに対して、I-V特性の測定を行った。I-V測定についてもさらに、バックコンタクト構造セルの開発、商品化で蓄積された技術を活用した。バックコンタクト構造のセルを用いた市販モジュール「BLACKSOLAR」

では、SMT（Surface Mount Technology）と呼ばれる表面実装技術が用いられている⁴⁾。本開発におけるHBC構造セルの評価でも、このSMTの技術を用いて測定を行った。この技術では、図4に示すように、セルはフレキシブルのプリント配線シートに直接実装され、セルの電極は直接シートの配線に接続される。SMTの技術を用いると以下のような利点がある。

- ・セルの全面をインターコネクション（セルと配線との接続）の領域として利用できるため、セルと配線との間のストレスが分散され、その結果セルにかかるストレスを軽減できる。
- ・インターコネクションの面積が大きくなるので接触抵抗を低減でき、I-V特性における曲線因子（F.F.）を高くできる。
- ・セルにインターコネクションの為の特別な領域（インターコネクションパッド）を設ける必要が無く、インターコネクションパッドにより生じるダークスペースロス（インターコネクションパッドの領域で発電効率が低下する現象）を低減できる。

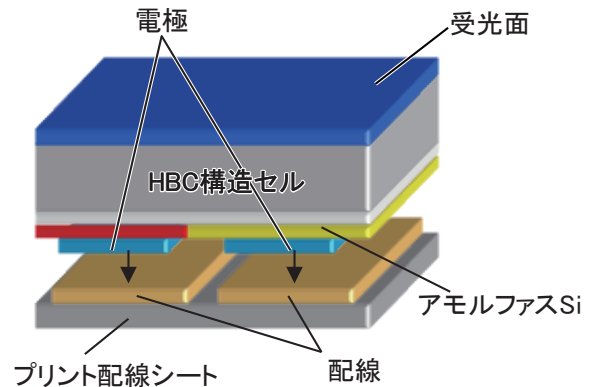


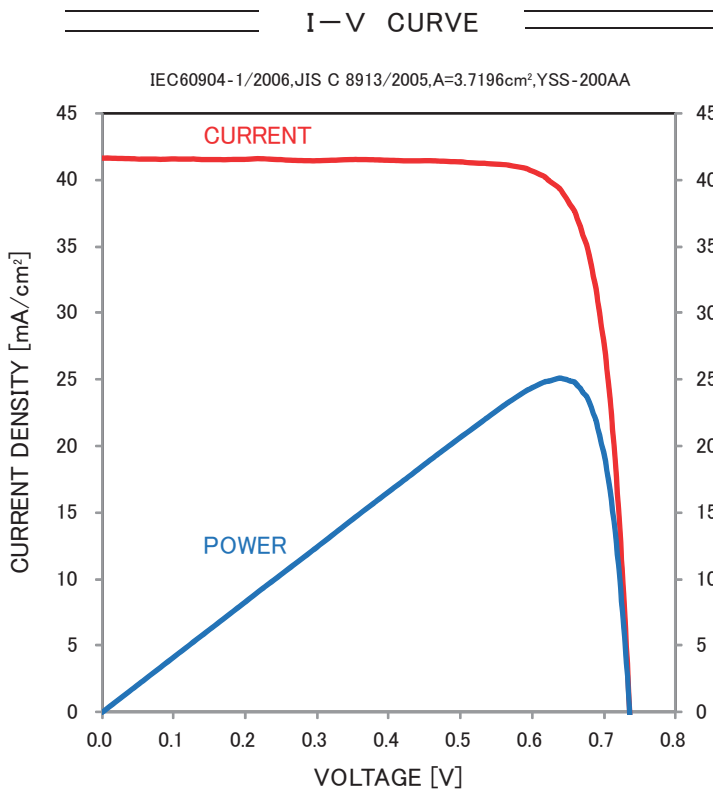
図4 SMTを用いた測定の概略図
Fig.4 Schematic configuration of SMT concept.

I-V特性の測定については、社内での測定を行った後、第三者評価機関である、JET（Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories：一般財団法人電気安全環境研究所）に測定を委託した。

3. 実験結果と考察

3.1 HBC構造の特徴が生きた特性を実現

図5に、本開発により得られたHBC構造セルのI-V特性を示す。セル変換効率は25.1%であり、目標であった25%を超える高い変換効率を達成した。表1に、代表的な2つのセルのI-V特性から得られた各パラメータを示す。



Date: 2014/3/14

Type: SH-BSS-1402

Sample No.: BSS36-547-16-BA

Repeat Times: 3

Isc: 155.1 [mA]

Voc: 0.736 [V]

Pmax: 93.4 [mW]

I_{pmax}: 146.2 [mA]

V_{pmax}: 0.639 [V]

F.F.: 81.9 [%]

Eff: 25.1 [%]

Jsc: 41.7 [mA/cm²]

M. Temp: 25.0 [°C]

Irr.: 1000 [W/m²]

Ref. Device No.: JETp-C01W

Cal. Val. Of Ref.: 122.91 [mA at 1000W/m²]

Scan Mode: Isc to Voc

図5 作製したHBC構造セルのI-V特性
Fig.5 I-V characteristics of HBC cell.

図5, 表1から分かるように, 730mVを超える高いV_{oc}を得ることができている。これは各界面で良好なパッシベーション性能が得られていることを示し, ヘテロ接合の利点を活かした結果が得られている。また, 高いV_{oc}は裏面アモルファスシリコンの構造を形成するパターンニングのプロセスや, 受光面の反射防止膜の形成, 電極の形成工程などの一連の作製プロセスが, 各界面のパッシベーション性能に大きな悪影響を及ぼしていないことを示唆している。また, J_{sc}も高く, 受光面に電極が無いバックコンタクト構造の利点が活かしていることに加えて, パターンニングプロセスが光学的な特性にも大きな悪影響を及ぼしていないことを示している。F.F.についても良好な値が得られており, アモルファスシリコンのパターンニングプロセスがセルの直列抵抗やシャント電流に大きな悪影響を及ぼしていないことが分かる。また, F.F.についてはHBC構造が基板内で横方向に電流を流さなければならないことによる直列抵抗に対する不利な点, さらには, p層とn層が隣接していることによるシャント電流のリスクが有るにも関わらず0.82という高い値が得られており, これらHBC構造による大きな懸念がないことが実証された。

3.2 さらなる特性向上の可能性

V_{oc}に関しては, HITセルの値 (750mV¹⁾) に比べて低く, 改善の余地が有ると言える。今後, アモルファスシリコンの成膜条件の改善などにより, 界面のキャリア再結合中心を減らすことで改善が可能であると考えている。

また, 試料のNo.1とNo.2を比較すると, 両サンプルとも同等の変換効率であるが, J_{sc}, V_{oc}にはばらつきが見られ, 改善の余地が有ることを示している。V_{oc}とJ_{sc}が相互にトレードオフであるとは考えておらず, 高いV_{oc}と高いJ_{sc}を安定して両立することができればさらに高い変換効率を得られると考えている。

4. まとめ

結晶シリコン系太陽電池セルにおいてヘテロ接合バックコンタクト構造を開発した。本開発ではシャープがこれまでに培ってきたバックコンタクト構造の技術とアモルファスシリコンの成膜技術が有効に活用された。さらにアモルファスシリコンをパターンニングする優れたプロセス技術を開発することによりパターンニングプロセスによる悪影響を最小限に抑制することが

表1 作製したHBC構造セルのI-V特性の各パラメータ
Table 1 I-V parameters of the HBC structure cell.

No.	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	F.F.	Efficiency (%)
1	41.7	736	0.819	25.1
2	42.0	729	0.820	25.1

Note. Aperture area: 19.3mm x 19.3mm (3.72cm²).
Measured at AM1.5, 1000W/m², 25°C by JET

できた。これらの結果として、HBC構造の持つポテンシャルを十分に示しつつ、25.1%の極めて高いセル変換効率を達成することができた。I-V特性の各パラメータは J_{sc} : 41.7mA/cm², V_{oc} : 736mV, F.F.: 0.819であり、高い J_{sc} と高い V_{oc} はそれぞれ、バックコンタクト構造による利点とヘテロ接合の利点がHBC構造において同時に実現できたことを示している。さらに、高いF.F.を含めた良好な特性は、特に本開発で重要であった裏面アモルファスシリコンのパターニングプロセスにより、各特性が大きく損なわれることなくHBCの構造を適切に構築できたことを示している。また同時に、高いF.F.によりHBC構造による横方向の電気伝導やシャント電流の懸念も大きくないことが分かった。 V_{oc} にはまだ改善の余地が有ること、 V_{oc} と J_{sc} についても高い数値を両立できる可能性があり、さらに高いセル変換効率が狙えると考えている。

本成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「極限シリコン結晶太陽電池の研

究開発」プロジェクトの一環として取り組んだ結果得られたものである。また、本プロジェクトではコンソーシアムの形態で開発が進められており、その中で豊田工業大学の山口真史特任教授、林豊先生、大下祥雄教授、明治大学の小椋厚志教授、中村京太郎特任教授にご協力頂いた。

参考文献

- 1) Mikio Taguchi, Ayumu Yano, Satoshi Tohoda, Kenta Matsuyama, Yuya Nakamura, "24.7% Record efficiency HIT® solar cell on thin silicon wafer", 39th IEEE-PVSC #884 (2013).
- 2) David D. Smith, Peter J. Cousins, Asnat Masad, Staffan Westerberg, Michael Defensor, Reynold Ilaw, Tim Dennis, Rhea Daquin, Neil Bergstrom, Arjelene Leygo, Xi Zhu, Bennet Meyers, Ben Bourne, Mark Shields, Doug Rose "SunPower's Maxeon Gen III solar cell: High Efficiency and Energy Yield" 39th IEEE PVSC (2013).
- 3) Kyotaro Nakamura, Masatsugu Kohira, Yoshiya Abiko, Takayuki Isaka, Yasushi Funakoshi, and Tomohiro Machida, "Development of back contact Si solar cell and module in pilot production line", 23rd EUPVSEC 2AO.1.5, (2008).
- 4) Kyotaro Nakamura, Masatsugu Kohira, Yoshiya Abiko, Takayuki Isaka, Yasushi Funakoshi, and Tomohiro Machida, "Update on development of back contact Si solar cell in pilot production line", 19th PVSEC 6O-M5-04 (2007).