

高効率シリコン裏面電極型太陽電池

High Efficiency Back Contact Si Solar Cell

中村 京太郎* ¹ Kyotaro Nakamura	伊坂 隆行* ² Takayuki Isaka	船越 康志* ² Yasushi Funakoshi
殿村 嘉章* ² Yoshifumi Tonomura	町田 智弘* ² Tomohiro Machida	岡本 浩二* ¹ Koji Okamoto

要 旨

受光面に電極のない、いわゆる裏面電極型、またはバックコンタクトと呼ばれるタイプの新規構造高効率シリコン太陽電池の開発を行った。高品位の表面パッシベーションを得るために、受光面には2層シリコン窒化膜が適しており、裏面のパッシベーションにはシリコン窒化膜よりも酸化膜が適していることを見出した。さらにスクリーン印刷法に適したデザインルールについて検討を行い、ピッチに対する p^+ 拡散領域の割合、すなわち接合面積率をおよそ70%に固定すべきであることを見出した。これらの結果に加え、焼成プロセスと銀ペーストを最適化することによって、従来の太陽電池と同等のコストで高効率太陽電池を量産する目処を得ることができた。

We have investigated a newly designed high efficiency Si solar cell. It is called back-contact type or rear-contact type of the solar cell, because it has no electrode on the front surface. To get better surface passivation property, we applied the double layer SiNx (DLSiN) to the front surface. On the other hand, it was found that SiO₂ layer was more suitable than SiNx layer for the rear surface passivation. Furthermore, we studied the design rules suitable for the screen-printing method, and found that the ratio of the p^+ diffusion region width to the pitch, i.e. the junction ratio should be fixed to roughly 70%. In addition to these results, optimizing the firing process and the Ag paste, we obtained the prospect of the mass-production of high efficiency solar cell with comparable cost to the conventional solar cell.

まえがき

太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する太陽電池は、近年、特に地球環境問題の観点から次世代のエネルギー源としての期待が急激に高まっている。太陽電池としては、化合物半導体または有機材料を使ったものなど、様々な種類があるが、現在主流となっているのは、シリコン結晶を用いたものである。現在最も多く生産・販売されている太陽電池では、太陽光を受ける受光面には n 電極が、裏面には p 電極が設けられている。受光面側に設けられた n 電極は電流の取り出しのためには必要不可欠であるが、その電極の下の基板には太陽光が入射しないため、その部分では発電しない。したがって電極面積が大きいと変換効率が低

下する。この様に受光面側の電極による損失をシャドウロスという。受光面に電極がなく、 p 、 n 両電極を裏面に形成した太陽電池を裏面電極型太陽電池、またはバックコンタクトセルなどと言うが、このタイプの太陽電池は、電極によるシャドウロスがなく、入射してくる太陽光を100%太陽電池に取り込むことができるため、原理的に高効率を実現可能である¹⁾。しかしながら、全ての電極と拡散層をパターンニングして裏面に形成しなくてはならないため、このタイプの太陽電池の製造プロセスは、従来のものに比べてより複雑にならざるを得ない。製造プロセスの複雑化は必然的に製造コストを増加させるとともに量産性を低下させるので、商業用として大量生産することが難しくなる。従って高効率の商業用太陽電池を実現するためには低コストで量

*1 ソーラーシステム事業本部 ソーラーシステム開発センター

*2 ソーラーシステム事業本部 ソーラーシステム事業部 技術部

産性の高い製造プロセスの開発が不可欠である。同時に材料コストの低減も重要である。なかでも、シリコン基板の材料コストは太陽電池全体のコストにたいして大きな割合を占めるので、シリコン基板の選択が特に重要になる。よって我々は、低コストのCz基板を使うことを前提として、可能な限りシンプルで大量生産に適した製造プロセスで、高効率裏面電極型太陽電池を実現する技術の開発を行った。本論文では、低コストで量産性の高い高効率シリコン裏面電極型太陽電池およびその製造プロセスの開発について報告する。

1. 実験

1.1 デバイス・シミュレーション

裏面電極型のような新規構造の太陽電池の開発を効率的に推進するために、まずはじめに、デバイス・シミュレーションを行って、開発の方向性や具体的な物性の目標値を決定した。裏面電極型太陽電池の場合、太陽電池の内部を水平方向に流れる少数キャリアの動きが非常に重要¹⁾であるため、2次元のデバイス・シミュレーションを行う必要がある。我々はIntegrated Systems Engineering, Inc.製のISE TCADデバイスシミュレーションパッケージを使用し、**図1**に模式的に示した太陽電池構造モデルを使って、デバイス・シミュレーションを行った。**表1**にはデバイス・シミュレーションに用いた主要なパラメータを示している。

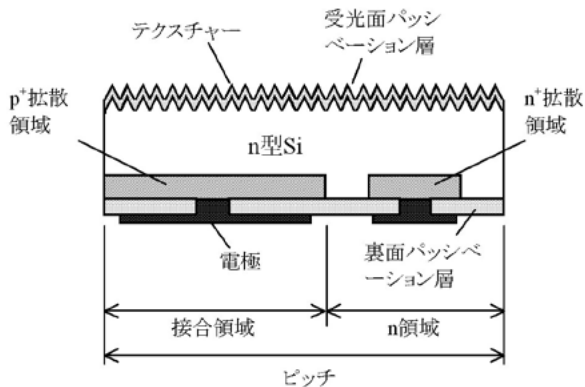


図1 太陽電池構造

Fig. 1 Schematic configuration of Si solar cell.

表1 デバイス・シミュレーション主要パラメータ

Table 1 Main parameters used for the device simulation.

項目	設定値
基板	n型単結晶 Si
基板不純物	P, $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$
基板厚	280 μm
光照射条件	AM1.5G, 100 mW/cm ²

1.2 ライフタイム評価

よく知られているように、光の入射により基板内で生成する少数キャリアの寿命、すなわちバルクライフタイム (τ_{bulk}) と表面再結合速度 (SRV) は太陽電池にとってきわめて重要なパラメータである。そこで、高品位な表面パッシベーション法を確立するために、我々は多種のライフタイム評価用テストウェーハを作製し、実効ライフタイムを測定することによってそのパッシベーション性を評価した。Czウェーハの表面ダメージ層をエッチング除去した後、パッシベーション層をウェーハ表面に形成して、その実効ライフタイム (τ_{eff}) を測定した。パッシベーション層としてシリコン窒化膜を用いる場合にはプラズマCVD (PECVD) により形成し、さらに製膜時に SiH_4/NH_3 の流量比を調整することにより屈折率を制御した。パッシベーション層としてシリコン酸化膜を用いる場合には熱酸化、および常圧CVD (APCVD) により形成した。シリコン酸化膜を形成した後フォーミングガスアニールを行った。これらのサンプルの τ_{eff} は μ -PCD法によって測定した。

1.3 太陽電池作製

我々はまた、太陽電池サンプルも作製して評価を行った。Czウェーハ表面からダメージ層を除去した後、パターンニングした p^+ および n^+ 拡散層を裏面に形成し、受光面および裏面にパッシベーション層を形成して保護したのちに、裏面のパッシベーション層に電極とのコンタクトを取るためのコンタクトホールを形成した。続いて、 p および n 電極をフォトリソグラフィと蒸着により形成し、標準照射条件 (A.M. 1.5G, 100 mW/cm², 25°C) 下で太陽電池特性を測定した。さらに、蒸着電極に代わって、スクリーン印刷法による電極形成についても検討した。その場合はコンタクトホール上に銀ペーストをスクリーン印刷した後、太陽電池をベルト炉にて焼成することによって電極を形成した。

2. 結果と考察

2.1 表面パッシベーション

図2に示したのは2次元シミュレーションの結果であり、受光面の表面再結合速度 (S_f) および裏面の表面再結合速度 (S_r) と太陽電池の変換効率 (η) との相関関係を示している。あきらかに、変換効率は表面再結合速度に依存しており、特に受光面側表面再結合速度は変換効率に極めて大きな影響を及ぼしていることがわかる。他方、裏面側表面再結合速度も変換効率に影響を及ぼしているが、その影響は受光面よりも小さい。いずれにしてもこれらの結果は、高効率を達成するた

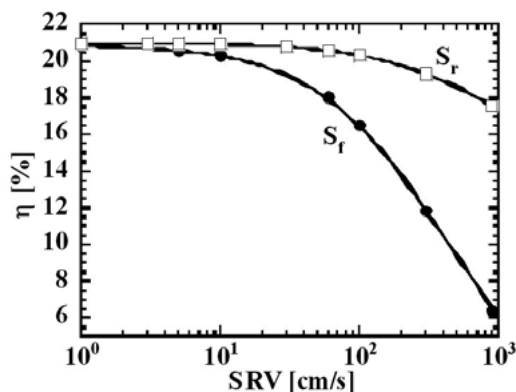


図2 表面再結合速度と太陽電池変換効率の計算結果

Fig. 2 Calculated conversion efficiency of solar cell as a function of SRV.

めにはきわめて低い表面再結合速度，すなわちきわめて高品位の表面パッシベーションが必要であることを示している。よって，我々はいかにすればそのような高品位パッシベーションが得られるか，について検討した。

高効率太陽電池のための表面パッシベーションとしては，高温での熱酸化によるシリコン酸化膜がよく用いられる。しかしながら，たとえばCzウェーハのような低コストウェーハの場合，高温での熱酸化プロセスは τ_{bulk} の低下を招くことになる。我々の実験においても，熱酸化膜によってパッシベーションしたサンプルではきわめて低い τ_{eff} しかえられなかった。しかしながら，我々は熱酸化膜の上にAPCVDによるシリコン酸化膜を積層した2層酸化膜(DLSiO₂)では良好な表面パッシベーションが得られることを見出した。一方で，シリコン窒化膜による表面パッシベーションについて何人かの研究者はプラズマCVDシリコン窒化膜の屈折率(n)とパッシベーション性との関係を指摘しており，屈折率の高いシリコン窒化膜ほど高い τ_{eff} が得られることを報告している²⁾。我々の実験においても，シリコン窒化膜の屈折率と τ_{eff} の間には相関関係が認められ，シリコン窒化膜の屈折率を増加させるのに伴って τ_{eff} が向上し，屈折率3以上の高屈折率シリコン窒化膜ではきわめて良好な表面パッシベーションが得られることが確認できた。図3には2層酸化膜，屈折率nの異なる単層窒化膜(SLSiN)および熱酸化膜とプラズマ窒化膜の積層膜(ML)によってパッシベーションしたCzウェーハのライフタイム測定結果を示している。2層酸化膜の τ_{eff} は比較的高く，高屈折率シリコン窒化膜の τ_{eff} が最も高い。また，他の研究者は表面パッシベーションとしてのシリコン酸化膜と窒化膜の積層膜について良好な結果を報告している³⁾が，今回の検討結果ではシリコン窒化膜のパッシベーションが積層

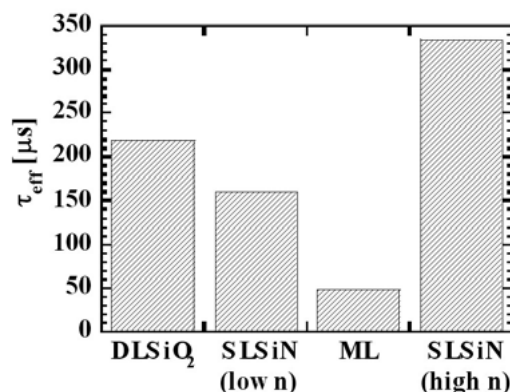


図3 2層酸化膜，低屈折率窒化膜，積層膜，および高屈折率窒化膜で表面パッシベーションしたCzウェーハのライフタイム測定結果

Fig. 3 Lifetime measurements of Cz wafers passivated with DLSiO₂, SLSiN (low n), ML and SLSiN (high n).

膜よりも良好である事を示している。

高屈折率のシリコン窒化膜はきわめて良好な表面パッシベーション性を示すが，高屈折率窒化膜は短波長領域で光を吸収してしまうため，受光面パッシベーションに使うと，吸収ロスにより効率が低下する。吸収ロスを最小にしつつ，パッシベーション性を最大にするために，我々は深さ方向の窒化膜の組成分布を最適化した。すなわち，Si表面近傍の窒化膜は，表面再結合を低減するように高屈折率にするとともに，表面側の窒化膜は吸収および反射ロスが最小になるように組成を調整して，2層構造のシリコン窒化膜とした。

さらに，太陽電池の裏面パッシベーションとして2層酸化膜と高屈折率単層窒化膜を検討し，結果として高屈折率単層窒化膜よりも2層酸化膜が裏面パッシベーションに適していることを見出した⁴⁾。この理由は窒化膜中の固定電荷によるものと考えられる。p⁺表面に対して窒化膜パッシベーションが悪影響を及ぼすことについては他の研究者も報告している⁵⁾。これは，窒化膜中の固定電荷の作用によってp⁺表面の再結合を促進させられるためであると考えられる。このp⁺表面の再結合の増大によって太陽電池特性の低下が引き起こされるのである。我々は上記の結果に加えて更なる検討を行い，図4に示したようにCzウェーハを使った95mm角の検討用太陽電池において19.85%の効率(A.M. 1.5G, 100 mW/cm², 28°C)を達成した。上記の結果から，我々の太陽電池が20%の効率に達するのに十分なポテンシャルを持っていることを確認することができたが，この太陽電池作製においてはフォトリソグラフィと蒸着電極を用いていた。しかしながら，フォトリソグラフィや蒸着電極はプロセスが複雑すぎて大量生産に適さないので，できるだけシンプルなプロセスにする必要がある。すなわち，低コスト量産プロセ

ス確立するためにはフォトリソグラフィと蒸着を廃し、大量生産に適したスクリーン印刷法でそれらを代替する必要があるのである。

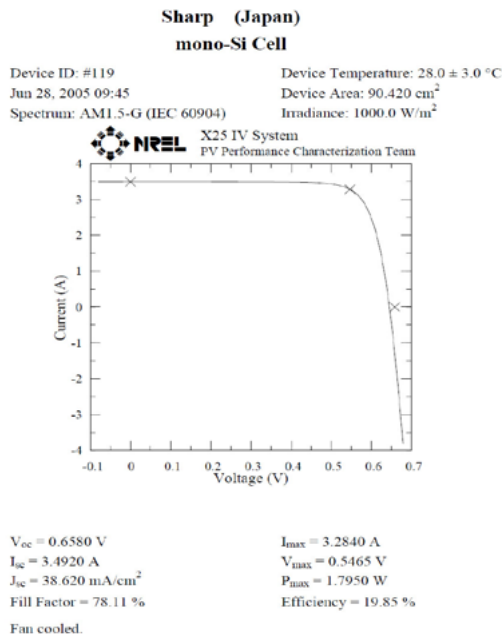


図4 評価用セルの太陽電池特性。作製においてはフォトリソグラフィと蒸着電極を用いた。

Fig. 4 Illuminated I-V characteristic of the experimental 95mm x 95mm solar cell with Cz wafer, fabricated by photolithography method and evaporated electrodes.

2.2 デザインルール

スクリーン印刷は低コスト量産プロセスに適しているが、フォトリソグラフィと比べて精度は格段に低くならざるを得ず、パターン幅やパターンの位置にある程度の公差を見込んで設計する必要が生じる。そのような公差を見込んでパターンを設計する場合において高い太陽電池特性を得るためにはどのようなデザインルールで設計を行えばよいのか、という問題についてはこれまでは明らかにされていなかった。そこで、この問題について再び2次元シミュレーションを使って検討を行った。まず変換効率と拡散層のピッチの関係について検討した。図5にはピッチと変換効率の相関関係を示している。この場合にはピッチに対する p^+ 拡散層の割合、すなわち接合面積率を64%に固定している。ピッチが増加するとそれに比例して変換効率が低下することがわかる。この理由は、 n^+ 層近傍で発生した光生成キャリアはpn接合に到達するまでに長い距離を移動しなくてはならず、その途中で再結合して消滅してしまう確率が高くなるためであると考えられる。しかしながら、スクリーン印刷法では、寸法精度が低いいため、ある程度以上にピッチを低減することは困

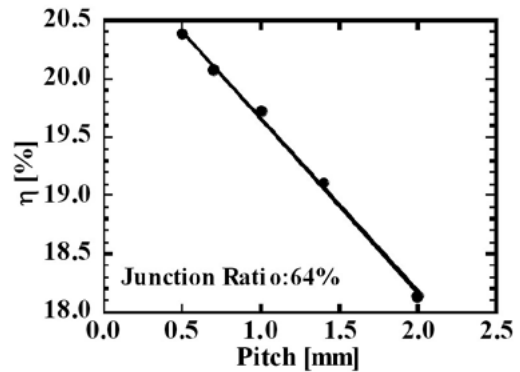


図5 拡散層のピッチと変換効率の相関関係。接合面積率は64%に固定している。

Fig. 5 Calculated conversion efficiency of solar cell as a function of pitch of diffusion regions under the condition that the junction ratio, which is the ratio of the p^+ diffusion width to the pitch, is fixed to 64%.

難である。そこで次にピッチを一定にしたときの変換効率と接合面積率の関係について検討した。その結果は図6に示したように、接合面積率の増加に伴って変換効率が増加することがわかった。接合面積率が増加することによって少数キャリアが移動しなくてはならない距離が低減され、再結合損失が減少するのである。これらの結果をまとめると、高い変換効率のためにはピッチを低減し、接合面積率を増加させることが必要ということがわかる。これらを両立させるためには、接合以外の領域、すなわち n 領域をできる限り狭くする必要があるのである。 n 領域の幅はパターンング方法の寸法精度によって制限される。では、可能な限り n 領域の幅を小さくした場合に、 p^+ 層幅、 p^+ 層面積率、およびピッチはどう設計すべきだろうか。 n 領域幅を固定した場合には、接合領域の幅とピッチを増加させることによって接合面積率を増加させなくてはならな

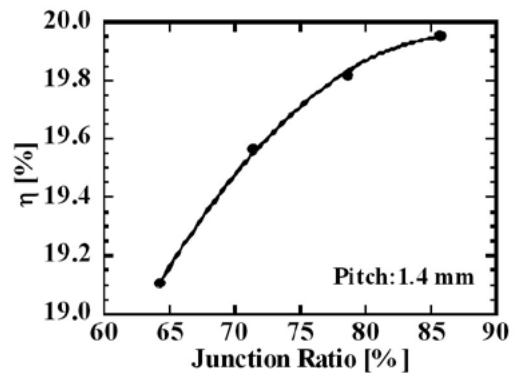


図6 pn接合面積率と変換効率の相関関係。ピッチは1.4mmに固定している。

Fig. 6 Calculated conversion efficiency of solar cell as a function of pn junction region ratio under the condition that the pitch is fixed to 1.4mm.

い。我々はn領域幅を限定した上で、ピッチと接合面積率を最適化するためのシミュレーションを行った。図7は変換効率と接合面積率との相関関係を示したものである。接合面積率の増加に伴って、変換効率は極大値に達する。しかし、さらに接合面積率を増加させると変換効率は急速に低下していく。ここではn領域幅は0.14mmから0.3mmに変えているが、いずれの場合も接合面積率の最適値はおおよそ70%である。以上のシミュレーションにより結論として、高い変換効率を達成するためには、n領域幅をできる限り狭くしたうえで、接合面積率をおよそ70%となるように拡散領域を設計すべきである、ということが判明した。

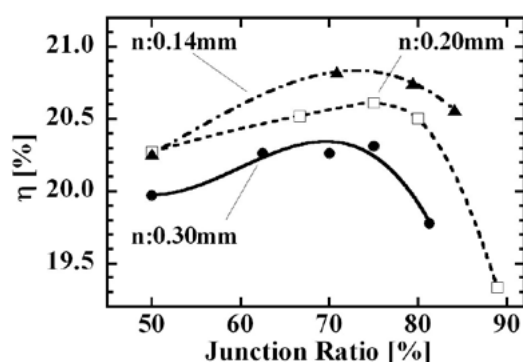


図7 n領域をそれぞれ0.14mm, 0.2mm, 0.3mmとした場合のpn接合面積率と変換効率の相関関係

Fig. 7 Calculated conversion efficiency of solar cell as a function of pn junction region ratio under the conditions that the n region widths are 0.14 mm, 0.2 mm and 0.3 mm, respectively.

2・3 スクリーン印刷電極

量産プロセスを確立する上で、最も重要な課題のひとつは、スクリーン印刷と焼成による電極形成法の確立である。一方で、太陽電池にとって τ_{eff} とSRVがきわめて重要であることも忘れてはならない。そこで、焼成プロセスが τ_{eff} とSRVにどのような影響を及ぼすかについて検討を行い、高温での焼成が τ_{eff} とSRVを大きく損なうこと、したがって低温での焼成が望ましいことを見出した⁴⁾。よって我々は焼成プロセスを最適化するとともに、低温での焼成に適した銀ペーストを開発した。表2に示したのは、電極をスクリーン印刷法によって作製した太陽電池の特性である。この結果によって、我々は高効率太陽電池を従来の太陽電池と同等のコストで量産することが可能であることを実証することができた。

むすび

受光面に電極を持たない裏面電極型高効率シリコン太陽電池の開発を行った。開発目的は低コストで量

表2 スクリーン印刷法により作製した太陽電池の特性

Table 2 Photovoltaic performances of solar cells, which are fabricated by screen-printing method.

パターンニング方法		Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	F.F.	η (%)
拡散層	電極				
Photo-lithography	Screen-printing	38.9	0.653	0.763	19.4
Screen-printing	Screen-printing	36.4	0.640	0.822	19.2

産性の高い製造プロセスを確立することである。高品質な表面パッシベーションを得るために、受光面の表面パッシベーションとして表面とSi近傍とで組成の異なる2層窒化膜を適用した。一方で、裏面のパッシベーションには窒化膜よりも酸化膜のほうが適していることを見出し、熱酸化膜とAPCVDによる2層酸化膜を適用し、フォトリソグラフィと蒸着電極を用いた太陽電池で19.85%の変換効率を達成した。

さらに、フォトリソグラフィに比較して精度の劣るスクリーン印刷法を使った場合でも高い効率を実現するためには拡散層をどのように設計すべきか、という課題にたいして2次元デバイス・シミュレーションを用いて検討を行い、pn接合面積率をおおよそ70%にすべきであることを示した。これらの結果に加え、焼成プロセスと銀ペーストの最適化により、高効率太陽電池を従来の太陽電池と同等のコストで量産が可能であることを実証した。

謝辞

Amonix社のDr.A.SladeとMr.V.Garbousianから、サンプル作製と評価に協力いただくとともに、開発の方向性について有益な助言をいただいた。この場を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) K. R. McIntosh, M. J. Cudzinovic, D. D. Smith, W. P. Mulligan, R. M., Swanson, Proceedings 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 40-D10-05.
- 2) A. Kenanoglu, D. Borchert, C. Ballif, S. Peters, T. Zerres, M. Rinio, D.M. Huljic, Proceedings 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 4LN-D-10.
- 3) Ji Youn Lee, Jochen Dicker, Stefan Rein and Stefan W. Glunz, Proceedings 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 4P-A8-63.
- 4) K. Nakamura, T. Isaka, Y. Funakoshi, Y. Tonomura, T. Machida and K. Okamoto, Proceedings 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2005, 2D02.4.
- 5) S. Dauwe, L. Mittelstadt, A. Metz, J. Schmidt, and R. Hezel, Proceedings 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 4P-C4-19.

(2005年9月28日受理)