

レーザードーピング技術によるホモ / ヘテロ接合 太陽電池の低温形成

篠原 亘

パナソニック株式会社 (〒570-8501 大阪府守口市八雲中町 3-1-1)
Shinohara.wataru001@jp.panasonic.com

The Low-Temperature Formation of Solar Cells with Homo/Hetero-Junctions by a Laser Doping Technique

SHINOHARA Wataru

(Received October 25, 2013)

A solar cell that combines homo and hetero junctions offers entirely new characteristics. The purpose of this study is to demonstrate the potential of such a homo-/hetero-junction solar cell and to prove the possibility of using a laser doping technique for its production. Solar cells having an n⁺BSF layer that was doped with various laser fluence values were prepared and estimated. And the sheet resistance measurement of the doped layer, the depth profile analysis of the dopant, and the carrier lifetime evaluation of the cells were carried out. As a result, it was found that a solar cell with a homo-/hetero-junction can obtain a higher fill factor than a solar cell with a double-sided hetero-junction. And it was shown that a laser doping technique is effective for the formation of the n⁺BSF layer.

Key words : solar cell, silicon, junction, homo, hetero, laser, doping

1. 緒 言

地球環境問題や資源・エネルギー問題に対する再生可能エネルギーの重要性は今日広く認められている。しかし、再生可能エネルギーの有力候補のひとつである太陽光発電に関しては、日本における同発電量の割合が2012年度でも2%以下であり、一層の普及拡大に向けて下記の均等化発電原価(Levelized cost of energy, LCOE)の削減に取り組む必要がある。

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Total Life Cycle Cost}}{\text{Total Lifetime Energy Production}}$$

上記のLCOEの分母であるトータル発電量を増やすことは極めて重要であるが、太陽電池の市場において、これまで主流を担ってきた結晶Si系太陽電池の変換効率は、近年その理論効率とされる28~29%に近づきつつある¹⁾。そのため、大幅な変換効率の向上のためには、革新的なデバイス構造、あるいは光電変換材料を創造する必要がある。革新的なデバイス構造については、HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)構造¹⁾、SE(Selective Emitter)、IBC(Interdigitated Back Contact)、BSF(Back Surface Field)、PERL(Passivated emitter, rear locally-diffused)²⁾等の微細構造、あるいは積層構造を有するデバイスが提案されている。

しかし、このような微細構造等を有するデバイスの作製において、フォトリソグラフィや熱拡散法等の集積回路、電子デバイス由来の技術を用いれば、高い変換効率を得ら

れる反面、太陽電池の製造プロセスとしては比較的高コストとなるマスクプロセスや、長時間の熱処理プロセスがLCOEの分子であるトータルコストを増大させることとなる。一方、上記の太陽電池に求められる微細構造は、現在の集積回路に必要とされるデザインルール(数10nm)より遥かに大きい数10 μm サイズであるため、必ずしも高精度なマスクプロセスを必要としない。このため、マスクレスで数10 μm サイズの局所的ドーピングが可能であり、高温の熱処理を要しないレーザードーピング技術は、LCOE削減のキーテクノロジーとなる可能性がある。

レーザードーピングを用いた結晶Si太陽電池では、受光面全面にn型ドーパントであるリン(P)をレーザードーピングした小面積の太陽電池で18.9%の変換効率が報告されている³⁾。また、全面にp型ドーパントであるボロン(B)をレーザードーピングしたのもでも変換効率16.7%が得られている⁴⁾。

一方、グリッド電極下のみにレーザードーピングを行ったSE構造では、レーザードーピングのないものに対し、23.7%短絡電流(I_{sc}, Short circuit current)が向上することが報告されている⁵⁾。

他にも、PERL構造の背面へのBSF構造の形成や、IBC構造の形成にレーザードーピングを用いたものが提案され、それぞれ22.4%⁶⁾、19.2%⁷⁾の変換効率が得られている。

しかし、受光面側にレーザードーピングを用いる場合、ドーパ層による太陽光の吸収ロスを考えれば、深いドーピングは好ましくない。また、高濃度のドーピングは、キャリア

の再結合速度を増大させることになる。そのため、受光面側は、非常に薄い(50 nm 以下)構造で、表面へのパッシベーション効果のある真性非晶質半導体層(多くの場合、i 型 a-Si)と結晶系半導体材料とのヘテロ接合が有利であると考えられる。一方、吸収ロスの影響が小さい非受光面(背面)側に高濃度のドーピングを行ったホモ接合を形成すれば、ヘテロ接合の課題である真性非晶質半導体層による直列抵抗成分(R_s , Series resistance)の抑制が期待できる。すなわち、このようなホモ/ヘテロ構造の太陽電池は、ホモ接合とヘテロ接合の両方の優位性を合わせ持つ太陽電池となる可能性を有している。

本研究の第一の目的は、太陽電池のデバイス構造として、上記のホモ/ヘテロ接合構造が、両面ヘテロ接合構造を超える可能性を検証することである。さらに、このようなデバイス構造の形成に対するレーザドーピング技術の有効性の検証を第二の目的としている。

2. 実験方法

本研究で行ったレーザドーピング実験の概要を Fig. 1 に示す。レーザビームは波長 532 nm の Nd³⁺: YAG レーザの 2 倍高調波である。レーザビームスポットは、600 μm×300 μm の長方形であり、スポット内の強度プロファイルは、ほぼトップフラット(トップハット)である。スポットの走査は長手方向、短手方向ともにオーバーラップ率が 0% (レーザビームは重複も隙間もない全面照射)となるように、6,000 mm/s の速度で走査されている。実験に用いたレーザ照射条件を Table 1, Table 2 に示す。

レーザドーピング実験の試料には面方位(100)、抵抗率 8.0~20.0 Ωcm、厚さ 625 μm の CZ-N(Czochralski 法による n 型)ウェハを用い、同ウェハ上にホモ接合のための n 型ドーパント源として、PECVD 法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)を用いて、成膜温度 100°C で形成した膜厚 200 nm の n 型非晶質 Si(以下、n-a-Si)を成膜した。

レーザドーピング後の試料に対し、光学顕微鏡観察、ドーパ層の四端子法によるシート抵抗測定、および SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)によるドーパントであるリン(P)の濃度分布解析を行った。

次に、ホモ/ヘテロ接合を有する太陽電池を試作した。

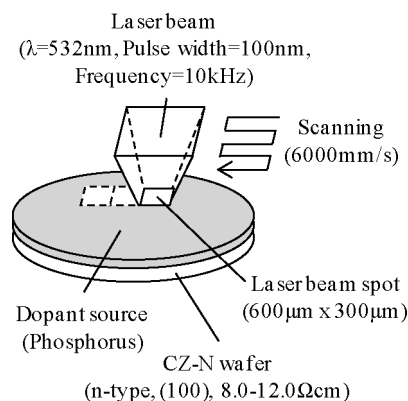


Fig. 1 Overview of laser doping experiments.

Table 1 Common conditions of laser doping experiments

Laser model	ROFIN-BAASEL lasertech Power Line L100 SHG
Wavelength	532 nm
Pulse frequency	10 kHz
Pulse width	100 ns
Beam delivery	Fiber optics and scanner head (Scanner lens f=255 mm)
Scan speed	6,000 mm/s
Beam quality	Multimode
Beam profile	Top flat
Spot size	600 μm×300 μm
Line pitch	300 μm (Overlap 0%)

Table 2 Parameters of laser doping experiments (Including prototype solar cells with the three conditions indicated by *)

LD condition No.	Diode current (%)	Output power (W)	Pulse energy (mJ)	Laser fluence (J/cm ²)
1*	58.0	9.0	0.90	0.50
2*	68.3	18.0	1.80	1.00
3*	81.5	36.0	3.60	2.00
4*	85.0	54.0	5.40	3.00
5*	90.5	72.0	7.20	4.00

LD : Laser doping

上記と同質の CZ-N ウェハを厚さが 170 μm になるまで両面テクスチャエッチングしたものを用い、得られた太陽電池の外部量子効率、キャリアライフタイム、光照射強度と開放電圧との関係、および基準太陽光である AM-1.5、100 mW/cm² 下での出力特性を評価した。

Fig. 2 にレーザドーピングを用いたホモ/ヘテロ接合太陽電池の試作方法を示す。まず CZ-N ウェハ上に PECVD 法を用いて膜厚 5 nm の i 型非晶質 Si(以下、i-a-Si)と、膜厚 10 nm の p 型非晶質 Si(以下、p-a-Si)とから成るヘテロ接合を形成した。同図において i-a-Si を形成する主な目的は、(i) CZ-N ウェハ表面のパッシベーション、(ii) p-a-Si から CZ-N ウェハ方向への不純物拡散を防止するため、および(iii) 高抵抗の i-a-Si の挿入による発電電流の逆流防止(逆飽和電流の抑制)等の効果を得るためである。結果として、i-a-Si による太陽光のわずかな吸収ロス(I_{sc} の減少)は生じるが、上記の効果による開放電圧(V_{oc} , Open circuit voltage)や曲線因子(F.F., Fill factor)の向上分が上回り、i-a-Si を挟まない構造に比べ、高い最大電力(P_{max})が得られることとなる。

次にヘテロ接合の反対面(背面)にレーザドーピングによる n⁺BSF 層を形成した。ドーパント源は、前記の n-a-Si と同じであり、この成膜温度であれば、先に形成されているヘテロ接合に熱的ダメージを与えることはない。

レーザドーピング後の n-a-Si 残渣は、NF₃ プラズマエッチングにより除去した。その後、受光面であるヘテロ接合

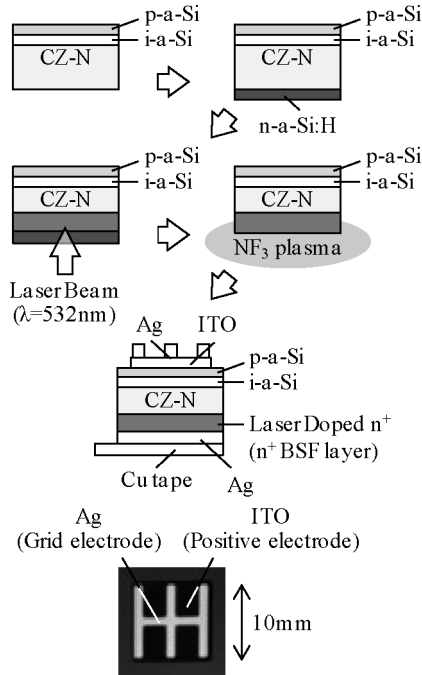


Fig. 2 Fabrication method for the solar cell having the n⁺BSF structure with laser doping.

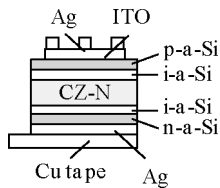


Fig. 3 Overview of reference (Double-sided hetero-junction) solar cell

面上に、10 mm 角サイズの ITO (Indium Tin Oxide) 電極と、Fig. 2 下図に示すように銀のグリッド電極をスパッタリング法で形成した。背面である n⁺BSF 層下には、全面に銀電極を形成した後、銅の導電性テープを貼付して取り出し電極とした。

またリファレンスとして、Fig. 3 に示すように、同質の CZ-N ウエハー (両面テクスチャー化) の両面にヘテロ接合を形成し、Fig. 2 と同じサイズ、構造の電極を設けた両面ヘテロ接合太陽電池を準備した。

3. 実験結果および考察

CZ-N ウエハーにレーザドーピングした試料の外観、および光学顕微鏡像をそれぞれ、Fig. 4, Fig. 5 に示す。レーザフルエンス 0.50 J/cm² では、ドーパント源である n-a-Si に目視で判別できる変化は見られなかった。レーザフルエンスを大きくすると、n-a-Si が結晶化し可視光透過率が增加するため、n-a-Si の透明度が高くなり、2.00 J/cm² のとき最も透明となった。さらに、3.00 J/cm² 以上にフルエンスを大きくすると、表面が黒色化した。これは、レーザ照射による加熱のために n-a-Si から水素が放出され、試料表面の面粗さが増大し、可視光が乱反射したためと考えら

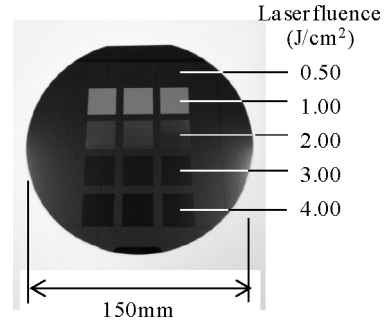


Fig. 4 Appearance of the laser doped CZ-N substrate.

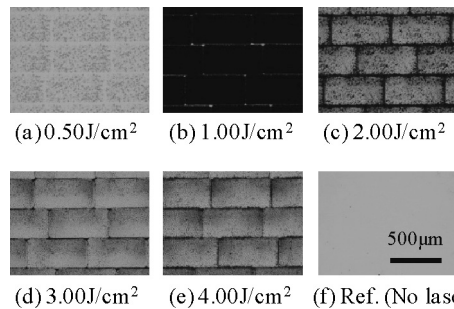


Fig. 5 Surfaces of the laser doped CZ-N substrates (Prior to removal of the dopant layer).

れる。

Fig. 5 に示す光学顕微鏡像では、レーザフルエンス 0.50 J/cm² の条件でも試料表面に黒点状の n-a-Si が結晶化した微小領域が現れている。この結晶領域の深さに関し、n-a-Si に対する波長 532 nm のレーザビームの吸収係数が $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 程度であるため、レーザビームは n-a-Si の膜厚相当の深さ (200 nm) まで侵入したと考えられる。このことから、深さ方向にはドーパント膜全体が一度溶融し、結晶領域は CZ-N/n-a-Si 界面の深さまで達すると推察される。

一般的にレーザドーピングのメカニズムは、試料表面が溶融することによるドーパント原子の液相拡散と、結晶化した後の余熱による固相拡散との両方が存在すると考えられており⁸⁾、0.50 J/cm² でも試料表面内において斑点状ではあるが、n-a-Si を膜厚方向に貫く結晶化が起きていることから、局所的なドーピングが生じた可能性はあり得る。しかし、1.00 J/cm² では、結晶化した領域がレーザ照射した全面に及んでおり、均一なドーピングのためには、これ以上のレーザフルエンスが必要であると考えられる。さらに、2.00 J/cm² 以上にレーザフルエンスを上げると、結晶化による黒点状領域が減少しているが、これは n-a-Si からの水素放出とともに、レーザ照射によってドーパント源である n-a-Si がアブレーション除去された結果と考えられる。前記のように、試料表面が溶融することによるドーパント原子の液相拡散がドーパント注入のドライビングフォースであるとするれば、アブレーション除去により、溶融表面の体積が減少し、しかも大気中へのドーパント分子の飛散にレーザビームのエネルギーが消費される状態は、レーザドーピング条件としては効率が低いと考えられる。

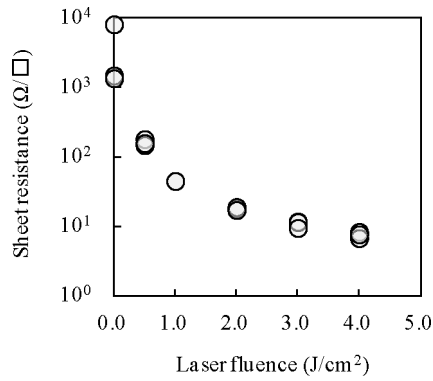


Fig. 6 Sheet resistance of the doped layer as a function of the laser fluence.

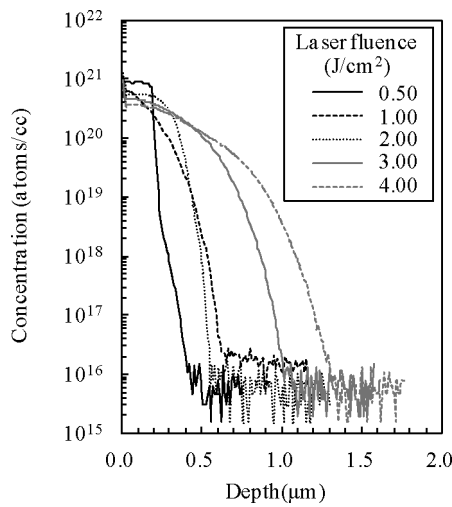
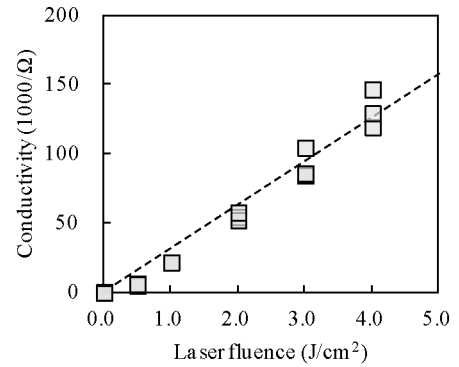


Fig. 7 Depth profile of the dopant atom (P).

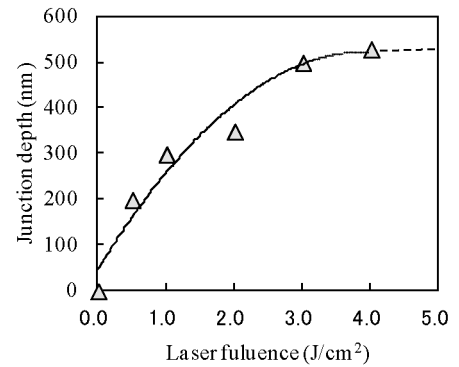
レーザフルエンスに対する n^+ ドープ層のシート抵抗値を Fig. 6 に示す。これよりレーザフルエンスを $0.50 \sim 4.00 \text{ J/cm}^2$ まで変えることによって、レーザドーピングされた n^+ ドープ層のシート抵抗値を $6.8 \sim 1.8 \times 10^2 \text{ Ω/□}$ の範囲で制御できることがわかった。このうち、 $3.0 \sim 4.0 \text{ J/cm}^2$ の高フルエンス条件で得られたシート抵抗値は、一般的な熱拡散法によるドープ層のシート抵抗値とほぼ同等であり、レーザドーピング法により熱拡散法と同等の導電率を有するドープ層は容易に得ることが可能である。

次に、各レーザフルエンスにおける P のデプスプロファイルを図 7 に示す。低フルエンスの方が最表面の P 濃度が高く、また太陽電池の n^+ BSF 層として望ましい階段形に近いプロファイルを示している。高フルエンスになる程、深くドープメントが拡散するが、逆に最表面の P 濃度が低下している。しかし、全般的に n^+ BSF 層として必要な拡散深さ ($\sim 50 \text{ nm}$) より深く、 4.0 J/cm^2 のレーザフルエンスの場合、深さ 1 μm の位置でも 10^{19} atoms/cc の高濃度となった。この深過ぎる拡散に対しては、背面へのテクスチャー形成を兼ねたエッチングにより、ホモ接合の界面深さを調整すればよい。

ここで、Fig. 6 の縦軸の逆数をとって導電率とし、Fig. 7 の縦軸である P 濃度が、 10^{20} atoms/cc となる深さをホモ接



(a) Relationship between the laser fluence and conductivity



(b) Relationship between the laser fluence and junction depth

Fig. 8 Conductivity of the doped layer and junction depth with respect to the laser fluence.

合の界面深さの目安として、両図をレーザフルエンスに対する導電率と界面深さに変換したものを Fig. 8 に示す。その結果、導電率はレーザフルエンスの増加に対し直線的に増加し、ホモ接合の界面深さはレーザフルエンスに対し放物線に近い曲線で増加することがわかった。レーザビーム照射直後の CZ-N ウェハ内の温度分布は、レーザビーム直下の位置を最高温度とし、距離の二乗に反比例する分布に近いと考えられる。従って、もしホモ接合界面の形成に必要な最低温度 T を仮定した場合、レーザフルエンスの増加に伴い、最低温度 T が得られる深さは放物線的に増加すると考えられる。その結果、Fig. 8(b) に示すようなホモ接合界面深さのレーザフルエンス依存性が生じると考えられる。

次に、受光面に $i\text{-a-Si/p-a-Si}$ から成るヘテロ接合、背面にレーザドーピングによる n^+ BSF 層を有するホモ/ヘテロ接合構造の太陽電池(以下、セル)を試作した。受光面のサイズは 10 mm 角である。なお、本実験で試作した小面積セルには、セル表面への反射防止コート、およびパッシベーション層の形成等を行っていない。Table 3 に試作したセルの出力特性をリファレンスセル(両面ヘテロ接合、Fig. 3)の出力特性で規格化した値を示す。ホモ/ヘテロ接合で主に期待されるのは、両面ヘテロ接合に対する R_s の低減であるため、 R_s の影響が顕著に現れる I_{sc} と F.F. 特性に注目すると、レーザフルエンスには最適値が存在し、 2.0 J/cm^2

Table 3 Normalized output characteristics of solar cells having the n⁺BSF structure by laser doping

Laser fluence	Voc	Isc	F.F.	Pmax
0.50 J/cm ²	0.764	0.546	0.643	0.294
2.00 J/cm ²	0.786	0.624	0.957	0.471
4.00 J/cm ²	0.789	0.595	0.880	0.412
Ref.	1.000	1.000	1.000	1.000

で Isc, F.F. がともに最大となることがわかった. このレーザーフルエンスの値はドーパント源である n-a-Si が最も透明化したフルエンスであり, n-a-Si をドーパント源とするレーザードーピングの場合, このような状態を得ることが最も変換効率の高いセルを得る条件であると考えられる.

これよりも低フルエンス側 (0.5 J/cm²) では Voc が低く, n⁺BSF 層による十分な内蔵電界が形成されていないと推察される. この点に関し, Fig. 7 に示す P のデプスプロファイルでは, 表面の P 濃度は 10²¹ atoms/cc と最大であり, 拡散深さも 200 nm 程度と n⁺BSF 層の深さとしては十分であるにも係わらず低 Voc であることは, CZ-N ウエハー中におけるドーパントの活性化率が低い可能性を示している.

一方, 高フルエンス側 (4.0 J/cm²) でも Isc と F.F. 特性が低下した. これは, Fig. 7 に示すように, P 原子が深くまで拡散し過ぎたことにより吸収ロスが生じたため, あるいは表面の P 濃度が低下した結果, 電流取り出しの妨げとなる Rs が増大したためと考えられる.

しかし, Table 3 中の最適条件であった 2.00 J/cm² でも Isc, F.F. 特性はリファレンスセルに及ばず, Voc には大きな隔たりが認められた.

リファレンスセルとの出力特性の隔たりの内, Voc の差は n⁺BSF 層表面が未パッシベーションのためである可能性が高い. この点を明らかにするため, レーザーフルエンスを変えてドーピングした試料のキャリアライフタイムを測定した. Fig. 9 に示すように, リファレンスである両面ヘテロ接合のキャリアライフタイムが 498.4 μs であるのに対し (同図(e)), ヘテロ接合によるパッシベーション効果のないセルが 0.586 μs のキャリアライフタイムとなっており (同図(a)), これが Voc の差のひとつの要因であることは明らかである. しかし, レーザードーピングしたセルは, フルエンス 0.50 J/cm² で 1.438 μs, 4.00 J/cm² では 0.005 μs と大きくキャリアライフタイムが低下していることがわかった. また, レーザーフルエンスが高く, 接合が深い程キャリアライフタイムが小さくなっており, レーザードーピングにより, セル表面に欠陥が導入され, キャリアの再結合中心が増加するメカニズムが存在すると考えられる. この結果より, ホモ/ヘテロ接合構造の Voc については, n⁺BSF 層表面のパッシベーション, あるいは熱処理による結晶構造上の欠陥回復が必要であろうと思われる.

一方の Isc について, Fig. 10 に試作したセルの外部量子効率を示す. 背面へのレーザードーピングにより n⁺BSF 層を形成したセルでは, 800 nm 以下の短波長光に対する量

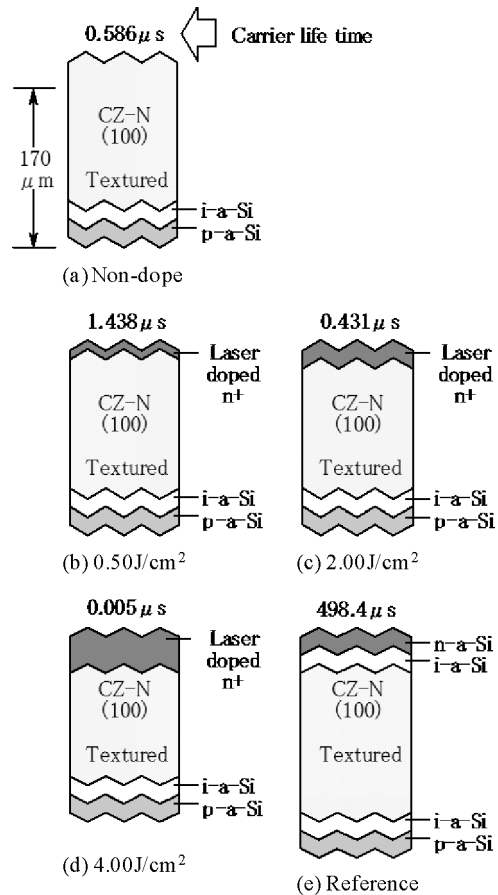


Fig. 9 Carrier lifetime of the laser doped CZ-N substrates (textured).

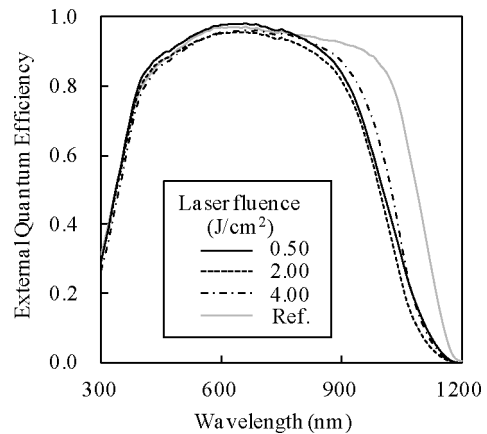


Fig. 10 External quantum efficiency of solar cells with the n⁺BSF structure (corresponding to Table 3).

子効率についてはリファレンスセルと一致しているが, 800~1,200 nm の長波長成分に対する量子効率が低いことがわかった. この結果はセル内へより深く侵入する長波光によって, 深い領域で発生したキャリアが十分に外部に取り出せていないことを示している. すなわち, n⁺BSF 層によって形成される内蔵電界の強度が不十分であると考えられる.

以上の結果から, 出力特性の向上のためには, (i) ヘテロ接合側に影響を与えない範囲で熱処理(アニール)を行

Table 4 Change in normalized output characteristics by work-up of solar cells having the n⁺BSF structure

	Voc	Isc	F.F.	Pmax
Initial	0.797	0.581	0.940	0.474
Anneal	0.824	0.744	1.167	0.684
Anneal & Thick Ag	0.823	0.767	1.174	0.684
Ref.	1.000	1.000	1.000	1.000

Anneal : 150°C-2 h, Thick Ag : 100 → 300 nm

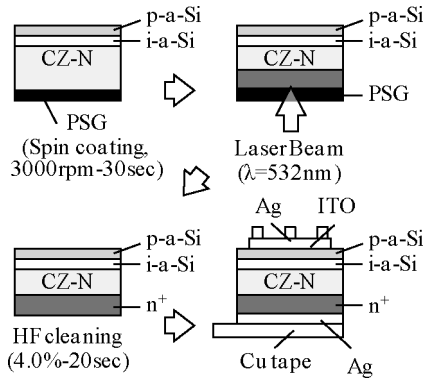


Fig. 11 Preparation method of solar cells with the n⁺BSF structure by PSG dopant source.

い、結晶構造上の欠陥を回復する、(ii) セル背面側の銀電極膜厚を厚くし、長波長成分の反射率を稼ぐ(光閉じ込め)、あるいは (iii) n⁺BSF 層の内蔵電界強度を高めるため、高濃度のドーパント源を用いる等の対策が考えられる。そこで、ホモ/ヘテロ接合形成後のセルに対する 150°C-2h の熱処理、背面銀電極の厚膜化(100 → 300 nm)、および高濃度ドーパント源として PSG(Phosphorus Silicon Glass) を検討した。

その結果、Table 4 に示すように 150°C-2h の熱処理で大きく Isc と F.F. 特性が向上し、Voc もわずかに向上することがわかった。また、熱処理後に形成した厚い背面銀電極のセルでは、Isc のわずかな向上が見られたが、その他に有意な変化は見られなかった。この熱処理条件に関し、集積回路等の半導体プロセスでは、150°C-2h 程度の熱処理は結晶バルク中に存在する構造欠陥(積層欠陥、空孔等)の回復には不十分であると考えられるため、レーザドーピングによって導入された欠陥は、結晶バルク中の構造欠陥ではなく、CZ-N/n⁺BSF 層界面に存在する局在準位が主であり、比較的低エネルギーで回復できる不安定な欠陥であろうと考えられる。

次に、ドーパント源の高濃度化を試みた。Fig. 11 に示すように、CZ-N ウエハー上に PSG をスピニングした後、150°C-3 min の条件で焼成し、膜厚 180~300 nm の PSG 膜を得た。その後、PSG 上からレーザービームを照射して、リン(P)のレーザドーピングを行った。また、レーザドーピング後に表面に残留した余剰の PSG は、フッ酸溶液(4.0%-20sec-室温)により洗浄除去した。

Table 5 Example of tables

	Voc	Isc	F.F.	Pmax
PSG	0.786	0.624	0.957	0.471
PSG & Anneal	0.864	1.000	1.075	0.941
Ref.	1.000	1.000	1.000	1.000

Anneal : 150°C-2 h

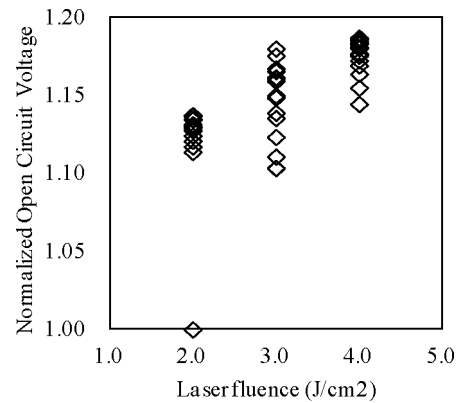


Fig. 12 Relationship between normalized Voc and laser fluence in solar cells with the n⁺BSF structure by PSG dopant source.

PSG をドーパント源に用いた小面積セルの規格化出力特性を Table 5 に示す。PECVD 法で形成した n-a-Si に比べ、Isc と F.F. 特性が大きく向上し、同様の熱処理を行ったセルでは、リファレンスセルと同等の Isc と、リファレンスセルに対し 7.5% 高い F.F. 特性が得られた。リファレンスセルの背面構造に用いた i-a-Si/n-a-Si では、i-a-Si によるわずかな吸収ロスが生じるはずであり、n⁺BSF 層を有するセルの方が高い Isc となる可能性があるが、本実験では Isc の向上は見られなかった。これは、i-a-Si による吸収ロスの発生(マイナス要因)と、発電電流の逆流防止効果(プラス要因)とが相殺したためと考えられる。Voc の差は前記のように n⁺BSF 層表面におけるキャリア再結合が主要因であると考えられ、この点をパッシベーション技術等で改善すれば、ホモ/ヘテロ接合構造で両面ヘテロ接合の出力特性を超える可能性もあると考えられる。

さらに、これらのセルにおけるレーザフルエンスと最小の Voc 値で規格化した Voc との関係を示す Fig. 12 に示す。PSG をドーパント源に用いた実験では、レーザフルエンスを n-a-Si で最大の Isc を得た 2.0 J/cm² としたが、PSG に対しては、フルエンスの最適値が異なると思われる。Fig. 12 に示すように、PSG を用いたセルでは、2.0~4.0 J/cm² のフルエンスの範囲において、Voc が大きく右肩上がりの傾向を示しており、本実験装置の制約上実験はできなかったが、最適値はより高フルエンス側に存在する可能性が高く、レーザフルエンスの最適化を図ることにより、さらなる出力特性の向上が期待できる。

4. 結 論

以上の結果より、レーザドーピング技術を用いたホモ/ヘテロ構造の太陽電池では、両面ヘテロ接合構造に比べて低い Voc となる傾向がある反面、高い F.F. 特性が得られており、レーザドーピング領域におけるキャリアの再結合を抑制する表面パッシベーション技術等が実現できれば、両面ヘテロ接合を超える可能性もあると考えられる。また、n⁺BSF 構造の形成に有効と言えるレーザドーピング技術に関する基礎実験を行い下記の結論を得た。

- (1) レーザフルエンスを 0.5~4.0 J/cm² まで変えることにより、レーザドーピングされた n⁺BSF 層のシート抵抗値を 6.8~1.8×10² Ω/□、P 原子の拡散深さを 200~1,400 nm の範囲で制御することが可能である。
- (2) レーザドーピングによる n⁺BSF 層の形成では、最適なレーザフルエンスが存在し、PECVD 法で形成した n-a-Si をドーパント源とするレーザドーピングでは、2.00 J/cm² のフルエンスで最大の出力特性が得られた。
- (3) 高濃度ドーパント源である PSG を用いると、n-a-Si に比べ大きく Isc、F.F. 特性が向上するとともに、n⁺BSF 層形成後の熱処理(150°C-2h)も出力特性向上の効果があることがわかった。

5. 参 考 文 献

- 1) Panasonic News Portal : Panasonic HIT[®] Solar Cell Achieves World's Highest Conversion Efficiency of 24.7% at Research Level ([http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.](http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2013/02/en130212-7/en130212-7.html)

[dir/2013/02/en130212-7/en130212-7.html](http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2013/02/en130212-7/en130212-7.html)).

- 2) Zhao, J., Wang, A. and Green, M.A. : 24.5% Efficiency Silicon PERT Cells on MCZ Substrates and 24.7% Efficiency PERL Cells on FZ Substrates, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS : RESEARCH AND APPLICATIONS, Vol. 7, pp. 471-474, 1999.
- 3) Eisele, S.J., Röder, Tobias C., Köhler, Jürgen R. and Werner, Jürgen H. : 18.9% efficient full area laser doped silicon solar cell, Applied Physics Letters. Vol. 95, pp. 133501-133501-3, Sept. 2009.
- 4) Dahlinger, M., Eisele, S.J., Lill, P.C., Kohler, J.R. and Werner, J.H. : Full Area Laser Doped Boron Emitter Silicon Solar Cells, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 38th IEEE, pp. 001029-001031, 2012.
- 5) Hirata, K., Saitoh, T., Ogane, A., Sugimura, E. and Fuyuki, T. : Selective Emitter Formation by Laser Doping for Phosphorous-Doped n-Type Silicon Solar Cells, Applied Physics Express, Vol. 5, pp. 016501, 2012.
- 6) Suwito, D., Jäger, U., Benick, J., Janz, S., Hermle, M. and Glunz, S.W. : Industrially Feasible Rear Passivation and Contacting Scheme for High-Efficiency n-Type Solar Cells Yielding a Voc of 700 mV, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 57, NO. 8, AUGUST 2010.
- 7) Castano, F.J., Morecroft, D., Cascant, M., Yuste, H., Lamers, M.W.P.E., Mewe, A.A., Romijn, I.G., Bende, E.E., Komatsu, Y., Weeber, A.W. and Cesar, I. : INDUSTRIALLY FEASIBLE >19% EFFICIENCY IBC CELLS FOR PILOT LINE PROCESSING, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE, pp. 001038-001042, 2011.
- 8) 冬木 隆, 大鐘章義 : 結晶系シリコン太陽電池製造プロセスにおけるレーザドーピング技術の展開, 第 71 回レーザー加工学会講演論文集, Vol. 12, 2008.