Fabrication of Electrode Groove on Silicon Solar Cell using High-Pressure Surface Discharge

Toshiyuki Hamada Student Member (University of Miyazaki, hamada@epl.opt.miyazaki-u.ac.jp)

Shunichi Arakawa Non-member (University of Miyazaki, arakawa@epl.opt.miyazaki-u.ac.jp)

Masahisa Otsubo Member (University of Miyazaki, otsubo@cc.miyazaki-u.ac.jp)

Tatsuya Sakoda Member (University of Miyazaki, sakoda@cc.miyazaki-u.ac.jp)

Keywords : silicon nitride film, surface discharge, single crystalline silicon solar cell, back electrode length, electrode groove, front contact

1. Introduction

On typical surfaces of solar cells, antireflection films for a further reduction in light reflection intensity from the solar cell surfaces with randomly distributed pyramid-like structures are formed on n^+ layers. For the fabrication of front contacts on solar cells, it is desired that the parts of an antireflection film where the electrodes are formed are removed, because the film functions as barrier in obtaining electric power. Therefore, we proposed a low-cost plasma process technique to fabricate narrower front electrode grooves on a single crystalline silicon solar cell, in which the surface discharge operated at high-pressure etched the silicon nitride film of 150 nm thickness on a silicon layer.

2. Experiments

Figure 1 shows discharge images taken from the vertical direction with respect to a side face of a convex part of a dielectric electrode at the discharge voltage (V_d) = 4.5 kV and back electrode lengths (l) of 2 mm and 4 mm. Ar and CF_4 flow rates were 700 sccm and 300 sccm, respectively. The surface discharge initiated at the triple junction line where the quartz glass layer, gas space and the cut substrate surface, and the entire side faces of the convex part were covered with innumerable surface streamers. From Figure 1, the length of the surface streamers correspond to the length of the back electrode.

Figure 2 shows images of treated substrates at pressure in chamber (p) of 101 kPa and 152 kPa. In this case, V_d , Ar flow rate, CF_4 flow rate, and t_e were 4.8 kV, 700 sccm, 300 sccm, and 10s, respectively. The uniform grooves are obtained by etching of silicon nitride, which is due to a large number of surface streamers formed on the lateral faces of dielectric electrodes. Additionally, the groove width for $p = 152$ kPa is obviously narrower than that

Fig. 1. Discharge images at $V_d = 4.5$ kV and $p = 152$ kPa for the cases of (c) $l = 2$ and (d) 4 mm

Fig. 2. Images of treated substrates at $V_d = 4.8$ kV and $t_e = 10$ s for the cases of (a) $p = 101$ kPa and (b) $p = 152$ kPa

Fig. 3. Pressure dependence on groove width at $V_d = 5.0$ kV for the cases of (a) $l = 2$ mm and (b) $l = 4$ mm

for $p = 101$ kPa.

Figure 3 shows pressure (p) dependence on the groove width at $V_d = 5$ kV for the cases of (a) $l = 2$ and (b) $l = 4$ mm. The groove widths for $p = 152$ kPa are narrower than these for $p = 101$ kPa. From Fig. 3, it was found that the height of the back electrode and p played essential roles in reduction of the width of the electrode groove. In other words, the shorter the height of the back electrode and higher p at each V_d , the narrower the width of the electrode groove becomes.

3. Summary

In order to investigate an optimum surface discharge condition for preparing narrow electrode grooves, fabrications were carried out for various p and l . The width of the groove became narrow with the increase of the p , and the a short l was effective to fabricate the narrow electrode groove.

高気圧沿面放電による太陽電池用電極溝の作製

学生員 濱田 俊之*

非会員 荒川 純一**

正 員 大坪 昌久***

正 員 迫田 達也***

Fabrication of Electrode Groove on Silicon Solar Cell using High-Pressure Surface Discharge

Toshiyuki Hamada*, Student Member, Shunichi Arakawa**, Non-member, Masahisa Otsubo***, Member,

Tatsuya Sakoda***, Member

We proposed a low-cost plasma process technique to fabricate narrower front electrode grooves on a single crystalline silicon solar cell, in which the surface discharge operated at high-pressure etched the silicon nitride film of 150 nm thickness on a silicon layer. The results showed that the surface discharge could effectively etch the silicon nitride film in a short time and that a high etching rate more than 3000 nm/min was obtained. The narrow and uniform grooves with the width of less than 70 μm were obtained when the pressure in a chamber, the back electrode length and the etching time were 152 kPa, 2 mm and 10 s, respectively. The narrower electrode groove could be obtained when the back electrode length was short and the pressure was high.

キーワード : 窒化シリコン膜, 沿面放電, 単結晶シリコン太陽電池, 背後電極長, 電極溝, 受光面電極

Keywords : silicon nitride film, surface discharge, single crystalline silicon solar cell, back electrode length, electrode groove, front contact

1. はじめに

結晶シリコン系太陽電池に受光面電極を形成する際、電極パターンの形状に合わせて反射防止膜を除去した電極溝を作製することが太陽電池の高効率化には有効であり、太陽電池回路内の直列抵抗を低減化できる。また、作製した電極溝表面の n 型層に高濃度のリン拡散、または電極ペースト自体にリンやボロン等を高濃度に含有させて電極を形成することで、 n^{++} 拡散層を設けた選択エミッタ構造にすることができる。この選択エミッタ構造によって、受光面電極近傍でのキャリア再結合を抑制することが可能となり、太陽電池の高性能化を図ることができる⁽¹⁾。

ところで、現在の主な電極作製法としては、スクリーン印刷法や鍍金法等が挙げられる。スクリーン印刷法は非常に生産性に富み、自動化も容易であり、かつ材料の使用収

率にも優れるという特徴があるが、電極パターンの微細度がスクリーン印刷の精度に制限されるため、現在の量産可能な電極パターン幅は 100 μm 程度である。鍍金法は印刷法に比べてコストは高くなるものの、より微細な電極を形成することが可能であり、電極の影による損失（シャドーロス）が低減でき、高性能な太陽電池の作製が可能である⁽²⁾。いずれの電極形成法を用いる場合においても、選択エミッタ構造を導入する前処理として電極パターンに合わせた電極溝を作製することは太陽電池の曲線因子 (F.F. : Fill factor) を改善するのに有効である。また、電極溝は数 μm -数十 μm の深さで掘削することで電極と半導体との接触面積を増加させるとともに、シャドーロスの少ない埋め込み型電極とするのも有効である⁽³⁾。このような電極溝作製手法としては、レーザアブレーションによる手法、ダイシング装置などによる機械的加工手法、ホトリソグラフィとエッチングを用いる手法がある。しかし、レーザによる手法は処理面が粗く、受光面電極の交差する領域での 2 度掘りにより、十分なオーム接触を得られない問題がある。ダイシング装置の場合は、ダイヤモンドブレードによる基板表面へのダメージが大きく、これを除去するために電極溝内を酸性またはアルカリ溶液によるエッチング工程を要する⁽⁴⁾。ホトリソグラフィとエッチングを併用する場合は、レジスト材料の塗布、露光、エッチング、レジスト剥離という工程があり、プロセスが非常に複雑となる⁽⁵⁾。

* 宮崎大学大学院農学工学総合研究科
〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering,
University of Miyazaki

** 宮崎大学大学院工学研究科
〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
Graduate School of Engineering, University of Miyazaki
1-1, GakuenKibanadai-Nishi, Miyazaki 889-2192

*** 宮崎大学工学部電気電子工学科
〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
Department of Electrical and Electronic Engineering, University of
Miyazaki
1-1, GakuenKibanadai-Nishi, Miyazaki 889-2192

そこで我々は、シリコン太陽電池表面の電極溝作製に沿面放電プラズマを適用することを提案した⁽⁶⁾。本手法においては、直角の角を持つガラス誘電体により、金属電極の一方を被覆することで、ガラス誘電体側面に局所化した沿面放電プラズマを一樣に生成することに成功した。なお、ここでは太陽電池の受光面を広く確保するため、幅の細い電極溝を低コスト且つ、高速で作製することを目的としている。著者等は、これまでに Ar, CF₄, O₂ 混合ガスを用いて大気圧下で沿面放電プラズマを生成し、太陽電池用単結晶シリコン基板表面に反射防止膜として形成された窒化シリコン(Si₃N₄)膜を選択的にエッチングした電極溝をマスクレスで作製可能であることを報告した⁽⁶⁾。なお、前述したマスクレスとは、ガラス誘電体側面のみで発生する沿面放電プラズマで線状にエッチングを行うため、レジストマスク等を用いる必要がないことを意味する。作製した電極溝の幅は放電維持電圧(V_d)、処理時間(t_e)、ガス流量に依存し、溝幅約 150 μm の電極溝の作製に成功している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、受光面電極であるフィンガー電極幅は約 100 μm 以下であり、電極溝の更なる細線化が望まれている。本研究では、新しく立方体型のガラス誘電体電極を作製し、これを用いて大気圧以上の高気圧下で沿面放電プラズマを生成し、より細い幅の電極溝の作製を試みた。なお、CF₄ 混合比を調整することにより選択的なエッチングを行うことも可能⁽⁶⁾であるが、ここでは細い電極溝を作製することに着目し、エッチングが Si に及ぶものも含めた。

2. 実験方法

電極溝作製装置の概略を図 1 に示す。誘電体には 30×30×30 mm (公差 0.1 mm, $c = 0.1$ mm)、厚み 1 mm (公差 0.1 mm) の立方体型構造の石英ガラスを用いた。沿面放電が発生するガラス誘電体側面の内側には、沿面放電を生成させるための背後電極として働く銅薄膜を貼り付けた。なお、銅薄膜は四面ある誘電体ガラス側面のうち、沿面放電を発生させる 2 面のみ背後電極として貼り付けている。この銅薄膜は直径 10 mm の支柱付きの SUS 製下部電極と接触させた。また、ガラス誘電体と銅薄膜との接触部における放電の発生を抑制するため、ガラス電極内部はシール材で絶縁した。単結晶シリコン基板 (厚み 0.27 mm, オリジナルサイズ 125×125 mm) は、40×25 mm の小片サイズに切り出して直径 70 mm の SUS 製上部電極と石英ガラス電極の上面との間に挿入した。因みに、本研究で取り扱う単結晶シリコン基板 (B. P. SOLAR 製, 抵抗率 2-4 Ωcm) は表面に膜厚約 150 nm の SiN 膜 (屈折率約 2.4) が低気圧プラズマ化学気相成長 (LP-CVD) 法で形成されている。エッチングガスは Ar, CF₄ 混合ガスをマスフローコントローラにて制御し、それぞれ 700 sccm, 300 sccm を沿面放電領域に供給した。電圧源には 30 kHz の擬似正弦波 (パルス幅約 10 μs) を出力可能なインバータ電源を用いた。放電維持電圧(V_d)、及び電流値は高電圧プローブ、ロゴスキーによって観測した。背後電極長(l)は 2 mm, 4 mm とし、放電管内圧力(p)は 101 kPa,

図 1 エッチングシステムの概容

Fig. 1. Schematic diagram of etching system.

132 kPa, 152 kPa とし沿面放電を生成し、単結晶シリコン基板表面のエッチング処理を行った。作製した電極溝の幅は倍率 50 倍で観測可能なマイクロスコープ (SCALAR 製)、及び同スコープの計測専用ソフト (USB Digital Scale) で溝幅を計測し、エッチング状況については集束イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) 加工装置により、エッチング領域の断面加工を行い、走査イオン顕微鏡 (SIM: Scanning Ion Microscope) を用いて窒化シリコンのエッチング状況を観測した。

3. 実験結果

〈3・1〉 放電電圧・電流波形 図 2 に背後電極長(l): 2, 4 mm, 放電管内圧力(p): 152 kPa, 駆動周波数: 30 kHz, 放電維持電圧(V_d): 5.0 kV における放電電圧・電流波形を示す。放電電圧は立ち上がり半値幅約 6 μs の比較的急峻な波形である。放電電流は誘電体材料の変位電流成分に沿面放電によるパルス時間数 ns のパルス成分が重畳している。

〈3・2〉 放電原理と放電写真 放電管内圧力(p) = 152 kPa, $V_d = 4.5$ kV, 背後電極長(l)がそれぞれ 2 mm, 4 mm における沿面放電の写真を図 3 に示す。なお、図 3(a)の放電写真は沿面放電プラズマ発生領域を斜めから撮影した写真で

図2 放電電圧・電流波形

Fig. 2. Waveforms of discharge voltage and discharge current.

ある。ならびに、図3(b), (c)は沿面放電プラズマ領域を正面から撮影した放電写真である。沿面放電は図3(a)における点線部のような上部電極（シリコン基板下面）、ガス空間、ガラス誘電体との3重点におけるパッシェンの極小点を満たす位置より開始される。また、 V_d の増加に伴い、沿面放電はガラス誘電体側面を伸展する⁽⁷⁾。なお、沿面放電は沿面ストリーマと呼ばれる非常に電離の盛んな先端の電子雪崩領域とその後方にあるプラズマ状態の幹から構成される。図3から分かるように、沿面ストリーマの長さは背後電極である銅薄膜が存在する位置まで伸展することが明らかとなった。なお、ストリーマの平均直径は約200 μm 程度で、最も広い領域で約250 μm であった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

〈3・3〉電極溝幅の制御 圧力(p)=101, 152 kPa, V_d =4.8 kV, t_e =10 sでエッチング処理を行った際の基板表面写真を図4に示す。図3で示した沿面放電写真から明らかに沿面ストリーマはガラス誘電体側面を沿って生成されるため、図4に示すような直線状のエッチング痕（電極溝）が作製される。なお、前述したように沿面放電は背後電極が存在する領域において生成される。本装置の場合、背後電極が存在する誘電体ガラスの2つの側面で背後電極の幅約28 mmに亘って沿面放電が生成される。従って、1回のエッチング処理により2本の電極溝が作製される。な

(a) Diagonal direction with $l = 2$ mm (b) $l = 2$ mm (c) $l = 4$ mm

図3 沿面放電写真

Fig. 3. Discharge images at $V_d = 4.5$ kV and $p = 152$ kPa for the cases of (c) $l = 2$ and (d) 4 mm.

(a) $p = 152$ kPa(b) $p = 101$ kPa

図4 エッチング後のシリコン基板表面写真

Fig. 4. Images of treated substrates at $V_d = 4.8$ kV and $t_e = 10$ s for the cases of (a) $p = 101$ kPa and (b) $p = 152$ kPa.

お、図4において、ガラス誘電体の上面が接触した領域には、基板表面に何ら変化は確認されない。すなわち、エッチングの役割を果たす放電は発生せず、誘電体ガラスの上面は物理的なマスク材料としての役割を果たす。一方、エッチングはガラス誘電体が密着している領域から外側へ約200 μm 程度まで進行する。これは、誘電体ガラス側面で生成される沿面ストリーマの平均直径とほぼ一致しており、放電は誘電体を離れた領域においては全く発生していないことを示している。従って、エッチング幅は生成される沿面ストリーマの直径に大きく依存する。

図5に、背後電極長(l)が2 mm, 4 mmにおける電極溝幅の圧力(p)依存性を示す。このときの放電維持電圧(V_d)は5.0 kV, エッチング時間(t_e)は5秒である。同図より、 p の上昇に伴い、幅の細い電極溝が作製できることがわかる。また、 l が短いと作製される電極溝幅は狭い。従って、細い幅の電極溝の作製には、高い p , かつ l を短く設定した状態で沿面

図 5 背後電極長 $l = 2$ mm, 4 mm における電極溝幅の管内圧力(p)依存性

Fig. 5. Pressure dependence on groove width at $V_d = 5.0$ kV for the cases of (a) $l = 2$ and (b) $l = 4$ mm.

放電を発生させ、エッチングを行うことが有効であるといえる。

次に、各圧力下における電極溝幅の V_d 依存性を図 6 に示す。本実験では $t_e = 10$ s, $p = 152$ kPa, 101 kPa とし, l は 2, 4 mm において沿面放電を生成した。図 6 の結果より、溝幅は V_d の上昇に伴い、広がっていくことが分かる。また、図 5 の結果と同様に p が高く, l が短い方が幅の細い電極溝を作製可能であることが明らかとなった。なお、本条件における沿面放電の放電開始電圧(V_s)は p が 101 kPa 時において 3.4 kV, 152 kPa 時では 4.4 kV であり, p の上昇に伴い V_s は上昇する。また、得られた最も細い電極溝は p が 152 kPa で $l = 4$ mm の場合, $V_d = 4.0$ kV 時において 68 μm であった。 $l = 2$ mm の場合は, $V_d = 4.6$ kV 印加時において 73 μm であった。

各背後電極長(l)における電極溝幅のエッチング時間(t_e)依存性を図 7 に示す。この時の p 及び V_d はそれぞれ 152 kPa, 5.0 kV である。図 7 より、溝幅は t_e に比例して広がる。また、電極溝幅の拡がりには約 200 μm 程度で飽和する傾向にある。従って、短時間でエッチング処理することが、細い電極溝を作製するのに有効であることが明らかとなった。

〈3・4〉 エッチング状況の観察

〈3・3〉節では、電極溝の幅に関することのみ言及したが、本節ではエッチングによる基板表面の形状と、SiN 膜のエッチングを確認した結果について述べる。まず、FIB 装置により電極溝の中心領域及びエッジ領域を加工幅約 20 μm でエッチング面の断面加工を行った後、SIM による断面観察を行った。

圧力(p) = 152 kPa, $V_d = 4.8$ kV, $t_e = 10$ s でエッチング処理を行った際の基板断面 SIM 像を図 8 に示す。図中のタングステンコートは、加工の際に FIB 装置より照射されるガリウムイオンの照射からシリコン基板表面を保護するために加工領域付近に蒸着した。なお、太陽電池用単結晶シリコン基板表面には、基板表面の光反射を低減させるためのピラミッド状テクスチャ構造(頂角 70.5 度, 表面粗さ約 10 μm)

図 6 電極溝幅の放電維持電圧(V_d)依存性

Fig. 6. Discharge voltage dependence on groove width for the cases of $p = 101$ kPa and 152 kPa.

図 7 背後電極長 $l = 2$ mm, 4 mm における電極溝幅の処理時間依存性

Fig. 7. Etching time dependence on groove width. V_d and p were 5.0 kV and 152 kPa, respectively.

が湿式処理により形成されており、そのテクスチャ面上に膜厚約 150nm の SiN 膜が形成されている。図 8 より、プラズマ未処理領域においては、反射防止膜である SiN 膜が確認できるが、沿面放電によりエッチングされた領域では、SiN 膜が完全にエッチングされていることがわかる。しかし、電極溝領域の幅方向において、エッジから約 20 μm にわたる領域では、SiN の残膜が確認され、この残膜は電極溝のエッジに向かうにつれて増加してゆく。

以上のように、本手法においては電極溝の幅方向のみならず深さ方向にもエッチングは進展する。なお, $p = 152$ kPa, $V_d = 5.0$ kV の場合, $t_e = 3$ s で図 8 の結果とほぼ同様な結果が得られた。従って、膜厚 150 nm の SiN 膜を 3 s でエッチ

図 8 電極溝断面 SIM 像

Fig. 8. SIM images of (a) No treatment, (b) Plasma etched area, and (c) Groove edge area.

ングが可能であることから、1 分間当たりのエッチングレートに換算すると、約 3000 nm/min となる。

4. 考 察

実験結果より、より細い電極溝の作製には、 p を高く保ち、 l を短く設定することが重要であることが明らかとなった。 p が高くなると、放電領域において粒子間衝突が非常に活発となるため、電子との衝突距離である平均自由行程が短くなる。従って、生成される沿面ストリーマが収縮・局在化するためである。また、本報告において、最も細い電極溝が得られたのは、 $p = 152$ kPa、 $l = 4$ mm、 $V_d = 4.4$ kV 印加時に 10 s のエッチング処理を行った場合であり、溝幅は 68 μ m であった。しかし、図 5、図 6、図 7 のいずれの結果においても、等しい放電維持電圧印加時において、 l は 2 mm と短い方が細い溝幅の電極溝が得られた。この理由として l の変化に伴い、放電中で生成される CF_3 や F_2 等のラジカル活性種の生成量の変化が考えられる。

図 2 に示した $V_d = 5.0$ kV 印加時における放電電流波形を 100 MHz の高周波帯域デジタルフィルタ処理により、変位電流成分を除去した電流波形を図 9 に示す。〈3・1〉節で述べたように、放電電流波形には、微小な放電ギャップと誘電体材料の静電容量による変位電流成分に加え、沿面スト

図 9 100 MHz 高周波帯域フィルタ処理後の電流波形

Fig. 9. Waveforms of 100MHz digital-high-pass-filtered discharge current.

リーマ発生時に観測される ns オーダのパルス電流が重畳している。従って、高周波帯域デジタルフィルタ処理により、変位電流成分を除去し、沿面ストリーマ生成時に発生するパルス電流のみ取り出した。図 9 より、 $l = 2$ mm、4 mm を比較した場合、背後電極長が長い $l = 4$ mm の場合において大きなパルス電流が観測される。即ち、 l が長い場合、沿面ストリーマ長が伸展し、パルス電流の値は高くなるため、電流密度も増加する。これにより、SiN 膜のエッチングに寄与する CF_3 や F_2 等のラジカル活性種の生成量が増加するため、幅方向へのラジカルエッチングが活発となる。また、等しい放電維持電圧下において p が上昇した場合、観測されたパルス電流の値は僅かにではあるが小さかった。これは、 p が上昇すると、放電開始電圧(V_0)が上昇するためである。なお、観測されるパルス電流の大きさは V_d に依存する

ことに加えて、放電管内の気体粒子数が増加することにより、電子やイオン、中性粒子間の衝突が非常に活発となる。その結果、 p が高くなると、パルス電流は小さくなるため、ラジカルの生成量は少なくなるだけでなく、放電は収縮・局在化するため、細い電極溝の作製が可能となる。

また、電極溝は V_d の上昇、及び t_e の経過に伴い、幅方向へ広がっていくことが明らかとなった。これは、 V_d が上昇すると、放電領域内で生成された SiN のエッチングに重要な役割を果たす CF_3 や F 等の活性種の生成も活発となり、幅方向へのラジカルエッチングが進行するためである。また、 t_e の経過に伴い、活性種による幅方向へのエッチングが進行するためである。しかしながら、図 6、図 7 の結果より、 $p = 152 \text{ kPa}$ 時においては、 V_d がある程度上昇、或いは t_e が一定時間経過することで、電極溝幅は広がってゆき、約 $200 \mu\text{m}$ 程度で飽和する傾向にある。この理由として、電極溝の作製の役割を担う沿面ストリーマの直径は約 $200 \mu\text{m}$ であることから、ストリーマより離れた領域では、放電領域で生成された活性種の拡散により、エッチングは進行するため、電極溝幅の拡がりには約 $200 \mu\text{m}$ 付近から飽和していく傾向にある。

以上のことから、より細い電極溝を作製するためには、比較的高圧力下にて沿面放電プラズマ領域を局在化させたうえで、高い V_d を印加し、短時間でエッチングを行うことが有効であり、さらに、背後電極長(l)を短く設定することが有効であることが明らかとなった。なお、本研究において膜厚 150 nm の SiN 膜をエッチングした電極溝は最短で 3 s のエッチング時間で得られることが明らかとなった。

ところで、SIM 観察により電極溝領域の中心領域では SiN 膜は完全にエッチングされていたが、エッジ領域ではテクスチャ構造の底部において、SiN 残膜が確認された。これは、太陽電池用シリコン基板表面に作製されたピラミッド状テクスチャ上に LP-CVD により SiN 膜を蒸着するため、テクスチャの頂上よりも底部において、膜厚が厚くなり易いことが挙げられる⁽⁹⁾。さらに、沿面放電は誘電体側面に沿って生成されるため、プラズマ領域から離れるにつれて、エッチングに寄与するラジカルの供給が十分でなく、エッチングの進行はエッジに向かうにつれて遅い。また、ガラス誘電体に覆われていた側のエッジでは、ガラス誘電体の角の曲率により生じる僅かな微小空間で発生する誘電体バリア放電によりエッチングが行われるが、ガス粒子の供給が外側の領域に比べ不十分であるため、微小空隙により形成される電極溝のエッジ領域におけるエッチングの進行は電極溝中心領域に比べて遅い。従って、電極溝の作製にあたり、ガラス誘電体角の曲率は直角に近い程、不十分なエッジ領域を小さくすることが可能となる。また、エッチングにおいても、テクスチャ頂上は、電界が集中するため、沿面放電内部で生成されるイオンから受けるエネルギーがテクスチャ底部に比べて大きい。深さ方向のエッチングに関しては、文献(5)より、 180s 経過してもシリコンテクスチャ構造に変化はほとんどみられない。また、本研究では短時間か

つ細い幅の電極溝の作製を目的としており、SiN 膜のみエッチング可能な最短時間のエッチング処理を行っており、SiN 膜下地のシリコン層への影響はほとんどない。

さらに、本研究で取り扱う沿面放電は大気圧ないし、大気圧以上の高気圧下で非熱平衡プラズマを生成可能な放電生成システムであり、半導体製造工程として一般的に用いられている低気圧プラズマシステムに比べ、粒子間の衝突距離の平均である平均自由行程が非常に短く、基板表面へ到達するエネルギーは非常に小さい。そのため、半導体基板表面へのダメージも低気圧プラズマに比べて非常に小さく、高エネルギーのレーザアブレーションによる手法やダイシング装置による機械的なエッチングと比較してもラジカルやイオンによるイオンアシストエッチングである本手法は低ダメージな手法であると言える。加えて、沿面放電の生成に最も重要な役割を果たすガラス誘電体は、実験上の取り扱いに注意を要するが、沿面放電自体による誘電体ガラスへのダメージは小さい。

最後に、沿面放電による電極溝のエッチング形状については、文献(7)において SiN 膜のエッチング残膜の厚みを計測することで、エッチング断面のプロファイルに関する報告をしたが、本研究で取り扱う太陽電池用単結晶シリコン基板では表面粗さ約 $10 \mu\text{m}$ 程度のランダムなサイズのピラミッド状テクスチャ構造上に形成された膜厚約 150 nm の SiN 膜のエッチングを 10 s 以内の短時間で行っており、深さ数 μm に及ぶようなエッチングは行っていない。従って、本提案の沿面放電プラズマ源における正確な深さ方向のエッチング特性を論じる際には、平滑シリコン基板を用いてエッチング処理を行って評価する必要がある。なお、本研究では、テクスチャ処理の施された太陽電池用単結晶シリコン基板上に形成された SiN 膜をエッチングした電極溝を作製することを目的としているので、プラズマ源の深さ方向のエッチング特性を明らかにするための研究は別途行っているところである。

5. まとめ

本研究により、大気圧以上の高気圧沿面放電プラズマによるエッチングは、太陽電池用単結晶シリコン基板表面における受光面電極用電極溝の作製に有効であり、背後電極長が沿面ストリーマの伸展に影響を及ぼし、幅方向への SiN 膜のエッチングに重要な役割を担っていることが明らかとなった。また、幅の細い電極溝を作製するためには、高い放電維持電圧で短時間のエッチングが有効であった。加えて、背後電極長を短く設定し、活性種の拡散を抑制することが幅の細い電極溝の作製に有効であることが明らかとなった。

謝 辞

本研究の実施にあたり、宮崎大学の近藤龍治氏、六田朋美氏には実験の補助をして頂き感謝します。同様に崇城大学の松熊邦浩教授、宮崎大学の本田親久教授、九州工業大学の若山登博士、(株)エム・セテックの松井和夫氏、長澤和

男氏には貴重な助言と指導を賜り深く感謝致します。また、
(株)エム・セテックには、実験試料や器材の提供をして頂きました。ここに謝意を表します。

本研究は科学研究費補助金 若手研究(B)(課題番号：18740355)の補助を受けて行われた。

(平成20年1月8日受付，平成20年7月3日再受付)

文 献

- (1) J. Horzel, J. Szlufcik, J. Nijs, and R. Mertens : "A Simple Processing Sequence for Selective Emitters", Proc. of 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, pp.139-142 (1997)
- (2) 電気学会太陽電池調査専門委員会：太陽電池ハンドブック，コロナ社 (1985)
- (3) S. R. Wenham, C. B. Honsberg, and M. A. Green : "Buried Contact Silicon Solar Cells", *Sol. En. Mat. and Solar Cells*, Vol.34, pp.101-110 (1994)
- (4) P. Fath : "Processing, Characterization, and Simulation of Mechanically Textured Crystalline Silicon Solar Cells", PhD Thesis, University of Konstanz, ISBN3-930803-75-5 (1998)
- (5) 林 泉：プラズマ工学，朝倉書店 (2002)
- (6) T. Sakoda, T. Hamada, K. Matsukuma, H. Herai, K. Matsui, and K. Nagasawa : "Selective Etching of Silicon Nitride Film on Single Crystalline Silicon Solar Cell Using Intensive Surface Discharge", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, No.5A, pp.3992-3993 (2006)
- (7) T. Hamada, T. Sakoda, K. Matsukuma, H. Herai, K. Matsui, and K. Nagasawa : "Studies of Conditions Required for Formation of Electrode Grooves on Silicon Solar Cell Using Surface Discharge", Proc. of 13th Asian Conference on Electrical Discharge, No.O-14, p.19 (2006)
- (8) T. Hamada, T. Sakoda, M. Otsubo, K. Matsui, and K. Nagasawa : "Evaluation of Electrode Grooves Formed Using Surface Discharge Plasma", Proc. of 18th International Symposium on Plasma Chemistry, No.28P-74, CD-ROM (2006)
- (9) T. Hamada, S. Arakawa, T. Sakoda, M. Otsubo, K. Matsui, and K. Nagasawa : "Optimization of Convex Electrode Geometry for Surface Discharge Used for Fabrication of the Electrode Groove on Solar Cells", *Surface Coatings & Technology* : (2009) (in press)

濱 田 俊 之

(学生員) 1983年3月20日生。2007年3月崇城大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程に入学，現在に至る。主として，プラズマ表面処理，レーザ応用プラズマ計測に関する研究に従事。応用物理学会会員。

荒 川 純 一

(非会員) 1983年10月10日生。2008年3月宮崎大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月富士電機システムズ(株)に入社，現在に至る。

大 坪 昌 久

(正員) 1947年1月10日生。1970年3月宮崎大学工学専攻科電気工学専攻修了。同年4月宮崎大学工学部助手，現在同電気電子工学科教授。工学博士。放電と応用，電力工学に関する研究に従事。2002年第50回電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)受賞。応用物理学会，静電気学会，IEEE会員。

迫 田 達 也

(正員) 1970年8月10日生。1998年3月九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。同年4月熊本工業大学(現 崇城大学)に助手として採用され，2000年4月同講師，2005年4月同助教授を経て，2006年11月より宮崎大学准教授，現在に至る。高電圧プラズマ工学，レーザ応用プラズマ計測の研究に従事。博士(工学)。応用物理学会，放電学会会員。