

# 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐々木 敏明

本論文は「プラズマCVD法による太陽電池用高品質アモルファスシリコン系膜堆積の研究」と題し、プラズマCVD法による太陽電池用の高品質なアモルファスシリコン(a-Si)系膜の作製を目的とし、製膜機構の解明を通じてボトムセルi層用ナローギャップ膜の高品質化、窓層用p型膜の高品質化、および高品質a-Si系膜のフィルム基板太陽電池への適用の研究をとりまとめたもので、8章より構成される。

第1章は「序論」であり、a-Si系膜およびそれを用いた太陽電池の特徴を説明し、本論文で作製を行う太陽電池用高品質a-Si系膜に必要な特性を明確化している。また、これまで行われているRFグロー放電プラズマCVD法およびプラズマ状態の測定について説明し、高品質a-Si系膜の製膜機構の解明のために必要な研究課題を明らかにしている。

第2章では「ナローギャップ a-SiGe:H 膜特性とプラズマ特性」と題し、ナローギャップ材料である水素化アモルファスシリコンゲルマニウム (a-SiGe:H) 膜について、容量結合型の RF (13.56MHz) プラズマ CVD 法を用いて高品質化を行なっている。バンドギャップ( $E_g$ )の減少とともに指数的に光感度( $\sigma_{ph} / \sigma_d$ )が減少して a-SiGe:H の膜質が低下する影響を取り除くために、 $E_g=1.6\text{eV}$  一定の膜を作製して、外部放電制御パラメータが a-SiGe:H 膜およびプラズマ状態に与える効果を調べている。その結果、基板温度が膜質に最も大きな影響を及ぼし、170~190 °Cで  $\sigma_{ph} / \sigma_d$  が最大になること、電子温度が低いときに膜質が向上することを明らかにし、 $E_g=1.6\text{eV}$  において世界でトップレベルの特性である  $\sigma_{ph} / \sigma_d=3.0 \times 10^5$  の a-SiGe:H 膜を得ている。

第3章では「パルス放電 CVD 法による a-SiGe:H 膜特性」と題し、新しい製膜方法であるパルス放電 CVD 法(PD-CVD)を用いて、a-SiGe:H 膜の高品質化を行っている。PD-CVD は印加電圧として小さいデューティー比 (0.5~2%) で負の高電圧 (-1~-2kV) の矩形波パルスを用いることを特徴とする。放電観察、シングルプローブ測定、発光分光測定から、PD-CVD では、膜へのイオン衝撃の影響が少ないこと、基板の置かれた製膜領域はラジカル発生領域から空間的にも時間的にも分離されていることを本論文で初めて明らかにしている。PD-CVD による a-SiGe:H 膜は、電極間隔の減少や原料ガスの水素希釈で  $\sigma_{ph} / \sigma_d$  が向上する一方、Ar 希釈では  $\sigma_{ph} / \sigma_d$  が低下することを明らかにしている。ラジカル密度分布のシミュレーションを元にした本論文で初めて提案する「クラスターモデル」により上記の現象を統一的に説明できることが示されている。上記の検討の結果、PD-CVD を用いて、 $E_g=1.42\text{eV}$  において世界のトップレベルである  $\sigma_{ph} / \sigma_d = 3.1 \times 10^4$  の a-SiGe:H が得られた。

第4章では「ガス加熱プラズマ CVD 法による a-Si:H のナローギャップ化」と題し、高品質ナ

ローギャップ材料の開発のもう一つのアプローチとして、水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)のナローギャップ化を行っている。新しい製膜方法として、原料ガスをあらかじめ加熱してからプラズマに導入するプラズマ CVD 法(ガス加熱プラズマ CVD 法)を開発している。ガスヒータを500°Cまで加熱することにより、250°C以下の低い基板温度を保ったまま、a-Si:H 膜を  $E_g=1.65\text{eV}$  までナローギャップ化することに成功し、世界でトップレベルの a-SiGe:H 膜の  $\sigma_{ph} / \sigma_d$  を凌駕する  $\sigma_{ph} / \sigma_d=4.2 \times 10^6$  の a-Si:H 膜を得ている。

第5章では「イオンエネルギー制御型プラズマ CVD 法によるイオン衝撃と a-Si:H 膜特性」と題し、第2、3章において電子温度が低く、膜へのイオン衝撃が小さいときに a-Si 系膜の膜質が良くなることに着目し、基板に入射するイオンエネルギー( $V_s$ )が a-Si:H 膜特性に与える影響を定量的に調べている。ダブルプローブの原理を応用して  $V_s$  をプラズマ状態と独立に制御可能な新しい製膜方法であるイオンエネルギー制御型プラズマ CVD を開発している。 $V_s$  の増加に対して a-Si:H 膜中の欠陥密度が指数的に増加して膜質が低下することを明らかにしている。

第6章では「窓層用 p 型微結晶シリコンの高品質化」と題し、太陽電池の窓層である p 層の高品質化を行っている。その際、新しい p 層材料である p 型微結晶シリコン( $\mu\text{c-Si(p)}$ )を導入し、RF プラズマ CVD による製膜条件に対する結晶性およびセル特性の関係を調べている。 $\mu\text{c-Si(p)}$  製膜時の基板温度  $T_s=85^\circ\text{C}$  において、結晶性、セル特性ともに最適温度となり、開放電圧( $V_{oc}$ )、短絡電流密度、変換効率が最大となることを本論文で初めて明らかにしている。従来の a-SiO(p)あるいは a-SiC(p)を p 層に用いたシングルセルの  $V_{oc}$  が 0.88~0.90V であるのに対して、 $\mu\text{c-Si(p)}$  を用いたセルの  $V_{oc}$  は最大 0.975V の非常に高い値を示すことを明らかにしている。

第7章では「フィルム基板太陽電池」と題し、大面積太陽電池の実用形態として開発しているフィルム基板太陽電池に高品質 a-Si 系膜の適用を行っている。フィルム基板太陽電池に、第2章で明らかにした最適条件を設計指針としてボトムセル i 層に a-SiGe:H を適用し、第6章で高品質化を図った窓層用  $\mu\text{c-Si(p)}$  膜を適用することによって、安定化効率が 9.0%まで向上することを明らかにしている。これは、プラスチックフィルム基板を用いた 30cm 角 (1フィート角) 以上の大面積 a-Si 系太陽電池としては、世界最高効率である。

第8章は「結論」であり、本論文の成果をまとめるとともに、将来展望を示している。

以上これを要するに、本論文は、微結晶シリコン窓層を有するアモルファスシリコン系太陽電池を対象として、RF プラズマ CVD による製膜機構の解明を通じ高品質化を図ることにより、大面積フィルム基板太陽電池の変換効率を 9%まで向上するとともに、次世代の製膜方法としてパルス放電 CVD 法、ガス加熱プラズマ CVD 法を開発し、高品質ナローギャップ膜が作製可能なことを明らかにしている点で、電気工学、特にプラズマ工学および半導体工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。