論　文　内　容　の　要　旨

博士論文題目
高効率薄膜シリコンタンデム太陽電池に向けた活性層材料の構造制御に関する研究

氏　　名　菱田　光起

（論文内容の要旨）

エネルギー供給問題と環境問題解決のため、結晶シリコン系太陽電池に比べて材料及び製造コストが安くなり、グリッドパリティ達成が期待される「薄膜シリコンタンデム太陽電池」を用いた高効率化となる研究を進めた。

薄膜シリコンタンデム太陽電池のボトム層に使用される微結晶シリコン(μc-Si:H)は、製膜される下地の形状や μc-Si:H 自体の膜厚によって結晶化率(X_c)が変化し、正確な膜質評価が出来ていない問題がある。本章では、実際のセルを斜めに研磨を行い、水平方向に μc-Si:H 膜を露出させる事により、膜深さ方向の X_c を得ることに成功した。さらに、μc-Si:H の X_c を制御するため、結晶化率調製膜を用い、任意の X_c プロファイリングを作成し、太陽電池結果との相関を見出した。更に、高効率となる X_c プロファイリングを実験結果より示し、実際の太陽電池の特性評価では、*Eff*: 1.8 % (0.21 points), V_{oc}: 0.017 V, *FF*: 0.21 向上結果が得られた。

薄膜シリコンタンデム太陽電池で用いる μc-Si:H 膜は、光閉じ込め効果のために施された下地のテクスチャー形状の法面より成長し、成長した μc-Si:H 膜同士が衝突して低密度の μc-Si:H 膜が発生する問題がある。この低密度 μc-Si:H 膜低減のため、PECVD 製膜中の放電を停止するだけの低コストになる新規プロセス手法を提案し、太陽電池の変換効率向上とそのメカニズムについて示した。放電停止中にチャンバーからの脱ガス (N_2, O_2) が μc-Si:H 中に取り込まれ、μc-Si:H 膜の X_c が低下しアモルファス相が製膜され、μc-Si:H 粒による製膜ガス種のシャードー効果を抑制され、低密度 μc-Si:H 膜の発生を抑えられた事によって高効率太陽電池を形成されるメカニズムを示した。実際のセル作製実験でも、通常条件セルと比べ 1.3% (0.14 points)、V_{oc} では 0.011 V、I_{sc} では 0.0021 mA、*FF* では 0.002 改善しその有効性を示した。

更なる高効率化のため、短波長領域を有効活用する目的で、薄膜シリコンタンデム太陽電池用の Top 層太陽電池として、SiH_4, H_2 ガスの他に CO_2 ガスを用い a-SiO:H を形成したシングルセルの開発を進めた。バンドオフセット技術として、拡散電位($\boldsymbol{V_{bi} = [\chi_p + E_{opt}(p) - E_a(p)] - [\chi_n + E_a(n)]}$.) に着目し、p 層開発では、高い $E_{opt}(p)$と低い活性化エネルギー$E_a(p)$を、また n 層開発では、低い活性化エネルギー$E_a(n)$となる膜を目指し高効率化を進めた。Top 層シングルセル作製実験では、世界最高開放レベルの開放電圧 V_{oc}: 1.06 V を達成した。

これら高効率のための研究要素と、その他光閉じ込め効果等の開発技術を適用し、薄膜シリコンタンデム太陽電池では、世界最高レベル変換効率 *Eff*: 12.2 % (V_{oc}: 1.41 V、J_{sc}: 12.7 mA/cm^2、 *FF*: 0.754)を達成した。更に、Top 層シングルセル開発で示した、V_{oc}:1.06 V を薄膜シリコンタンデム太陽電池に適用させた場合、変換効率: *Eff*: 13.4 % (V_{oc}: 1.55 V) となる高変換効率化の可能性をシミュレーションで示した。

氏　名	菱田　光起

（論文審査結果の要旨）

本論文は、結晶シリコン系太陽電池に比べて材料費が安く、グリッドパリティ達成が期待され、エネルギー供給問題を解決可能な薄膜シリコンタンデム太陽電池の高効率化を目的とした研究内容である。

本論文は 5 つの章から構成されており、第 2 章では、微結晶シリコン(μc-Si:H)の結晶化率制御による太陽電池高効率化について述べた。本章では、実際のセルを斜め約 1.4°になだらかな研磨を行い、水平方向にμc-Si:H 膜を露出させる事により、膜深さ方向の X_c プロファイリングを得ることに成功した。さらに、μc-Si:H の X_c を制御するため、結晶化率調製膜（X_c-adjustment film）を用い、任意の X_c プロファイリングを作成し、太陽電池結果との相関を見出した。太陽電池の特性評価では、*Eff*: 1.8 % (0.21 points), V_{oc}: 0.017 (V), *FF*: 0.21 向上を実証した。

第 3 章では、μc-Si:H 膜中の欠陥を低減可能な新規プロセス手法とそのメカニズム解明のため、PECVD 製膜中の放電を停止するだけの新規プロセス手法「*SEG* 」を提案し、実際に薄膜シリコンタンデム太陽電池を用いて変換効率向上の結果を示した。実際のセル作製実験では、通常条件セルと比べ 1.3% (0.14 points)改善し、*SEG* によってセルの変換効率が向上した結果を示した。*SEG* では放電停止中にチャンバーからの脱ガス（N_2、O_2）がμc-Si:H 中に取り込まれ、μc-Si:H 膜の X_c が低下によりアモルファス相が増加し、それによりμc-Si:H 粒による製膜ガス種のシャードー効果を低減させ、低密度μc-Si:H 膜の発生を抑え、変換効率が向上するメカニズムを説明した。

第 4 章では、拡散電位 $(V_{bi} = [\chi_p + E_{opt}(p) - E_a(p)] - [\chi_n + E_a(n)].)$ の向上に着目し、Top 層開発を進めた。Top 層シングル太陽電池特性としては、世界最高開放レベルの開放電圧 V_{oc} : 1.06 (V) を達成した。第 2 章、第 3 章の改善と、その他光閉じ込め効果等の開発技術により、世界最高レベル変換効率 *Eff*: 12.2 (%)　(V_{oc}:1.41 (V)、J_{sc}: 12.7 (mA/cm^2)、 *FF*: 0.754)を達成し、更に、第 4 章で示した開放電圧 V_{oc} : 1.06 (V)を、薄膜シリコンタンデム太陽電池に適用させた場合、変換効率: *Eff*: 13.4 (%)　(V_{oc}: 1.55 V) と高変換効率化の可能性を実証した。

以上のように本論文は、薄膜シリコンタンデム太陽電池を用い、高効率化に向けて、新しい手法を考案し、それが有効であることを変換効率値で実証しており、学術的に意義深い。よって審査員一同は本論文が博士（工学）の学位論文として価値あるものと認めた。