

論文内容の要旨

博士論文題目

非晶質/結晶系シリコンヘテロ接合太陽電池における
界面キャリア輸送に関する研究

氏 名 田 口 幹 朗

(論文内容の要旨)

結晶系シリコン太陽電池の高効率化に関して開発された技術の多くは、材料および製造コストの問題から実際の工業製品へ採用されず、実用化素子の光電変換効率は高々17%程度に留まっている。筆者が開発したHIT(Heterojunction with Intrinsic Thin layer)構造は、簡単なプロセスにもかかわらず変換効率20%の太陽電池を工業的に生産することを可能にした(研究レベルでは22.0%)。HIT構造とはドーブされた非晶質シリコン(a-Si:H)と結晶系シリコン(c-Si)とのヘテロ接合において、界面にi型(ノンドーブ)a-Si:H層を配置した構造をいう。本論文では、HIT構造における接合特性の改善についてバンド構造を用いた解析を行い、p型a-Si:H/n型c-Siヘテロ接合ではドーピング層が有する多数の局在準位により、c-Siとのヘテロ界面近傍での再結合中心を増加させ、その結果再結合電流や漏れ電流を増大させていたのに対して、HIT構造では界面にギャップ内準位の少ないi型a-Si:H層を配置しドーブ層を分離することで、ヘテロ界面近傍における再結合を効果的に抑制できることを明らかにした。

次にHIT構造太陽電池における順方向電圧バイアス下でのキャリア伝導について、過去の報告とHIT構造太陽電池とを比較検討し、HIT構造太陽電池では通常のc-Siのp/nホモ接合と同様、ベースであるc-Si内の拡散電流で支配されることを示した。一方、0.4V以下での領域ではトンネル電流が支配的であるが、太陽電池特性に影響を与えない程度に十分低く抑制されており、ヘテロ界面での準位密度の低減と、高品質なi型a-Si:H層におけるギャップ内準位密度の低減により、良好な接合特性が得られていることを示した。なお、トンネル電流の伝導機構に関しては a-Si:H内の局在準位を介した multi tunneling capture-emission モデルと、価電子帯側のポテンシャルバリア内の局在準位を介した multi tunneling の両方が共存していると考えている。

HIT構造による界面再結合の抑制効果について、太陽電池の裏面側から光を入射させて内部量子効率を測定して評価し、30~50cm/s以下という非常に良好な界面特

性が得られること、さらに、ケミカルパシベーション法とa-Si:H膜によるパシベーション法とを反射マイクロ波光導電減衰法により比較を行い、HIT構造によるパシベーション効果が非常に優れたものであることを明らかにした。

HIT太陽電池が高温側での動作特性に優れ、実使用状態でより多く発電する太陽電池であることを示した。温度特性を決定している要因について、i型a-Si:H層の膜厚を変化させた試料を用いて評価し、HIT太陽電池の温度依存性を特徴付けているのは開放電圧と曲線因子(F.F.)の温度依存性であって、①開放電圧の温度依存性は、ベースであるc-Siのバルク特性と界面再結合速度の抑制の度合いによって決まり、HIT構造太陽電池のような高い開放電圧を得られる太陽電池ほど優れたものになること、②i型a-Si:H層の導電率に温度依存性があり、高温側での導電率の向上により直列抵抗が小さくなる結果、F.F.の低下率がp/nホモ接合太陽電池に比べて小さいこと、の2点であることを明らかにした。

HIT太陽電池のさらなる高効率化に向け、今後の課題を示した。透明電極層とa-Si:H層の吸収損失と抵抗損失の低減を目指して、a-Si:H層をさらに薄くするための技術開発が必要である。ドーパ層の分離や界面パシベーションの完成にはある程度の膜厚のi型a-Si:H層が必要であるが、プラズマ放電初期のa-Si:H層には低密度の領域が存在し、膜中欠陥が多いことがわかっている。そのような低密度領域をいかに少なくして、界面のパシベーションに必要な膜厚を得るかが課題である。さらに、a-Si:H層の形成条件によっては、c-Si基板の情報を受けてエピタキシャル成長をして、太陽電池特性を低下させる懸念もあり、a-Si:H膜の構造緩和能力を利用しつつ、極く薄いa-Si:H膜を高品質で作成することが今後の目標である。具体的には、界面に存在する不純物を積極的に利用して結晶化を抑制しつつ、高密度なシリコン層を作成する方策など、プラズマ以外の製膜法の利用も視野に入れて、取り組む必要がある。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、結晶系シリコン太陽電池の高効率化に関して、筆者が新規に開発したHIT(Heterojunction with Intrinsic Thin layer)構造の特長に関して明らかにしたものである。HIT構造太陽電池は、簡単なプロセスにもかかわらず変換効率20%の太陽電池を工業的に生産することを可能にした(研究レベルでは22.0%)。HIT構造とはドーパされた非晶質シリコン(a-Si:H)層と結晶系シリコン(c-Si)とのヘテロ接合において、界面にi型(ノンドープ)a-Si:H層を配置した構造をいう。

第1章で研究の背景と目的について、従来構造とHIT構造の差異に注目して述べている。

第2章では、HIT構造における接合特性の改善についてバンド構造を用いた解析を行い、p型a-Si:H/n型c-Siヘテロ接合ではドーピング層が有する多数の局在準位により、c-Siとのヘテロ界面近傍での再結合中心を増加させ、その結果再結合電流や漏れ電流を増大させていたのに対して、HIT構造では界面にギャップ内準位の少ないi型a-Si:H層を配置しドーパ層を分離することで、ヘテロ界面近傍における再結合を効果的に抑制できることを明らかにした。

第3章では、HIT構造太陽電池における順方向電圧バイアス下でのキャリア伝導について、過去の報告とHIT構造太陽電池とを比較検討し、HIT構造太陽電池では通常のc-Siのp/nホモ接合と同様、ベースであるc-Si内の拡散電流で支配されることを示した。一方、0.4V以下の領域ではトンネル電流が支配的であるが、太陽電池特性に影響を与えない程度に十分低く抑制されており、ヘテロ界面での準位密度の低減と、高品質なi型a-Si:H層におけるギャップ内準位密度の低減により、良好な接合特性が得られていることを示した。なお、トンネル電流の伝導機構に関してはa-Si:H内の局在準位を介したmulti tunneling capture-emissionモデルと、価電子帯側のポテンシャルバリア内の局在準位を介したmulti tunnelingの両方が共存していると考えている。

第4章では、HIT構造による界面再結合の抑制効果について、太陽電池の裏面側から光を入射させて内部量子効率を測定して評価し、30~50cm/s以下と非

常に良好な界面特性が得られること、さらに、ケミカルパシベーション法とa-Si:H膜によるパシベーション法とを反射マイクロ波光導電減衰法により比較を行い、HIT構造によるパシベーション効果が非常に優れたものであることを明らかにした。

第5章では、HIT太陽電池が高温側での動作特性に優れ、実使用状態でより多く発電する太陽電池であることを示した。温度特性を決定している要因について、i型a-Si:H層の膜厚を変化させた試料を用いて評価し、HIT太陽電池の温度依存性を特徴付けているのは開放電圧と曲線因子(F.F.)の温度依存性であって、①開放電圧の温度依存性は、ベースであるc-Siのバルク特性と界面再結合速度の抑制の度合いによって決まり、HIT構造太陽電池のような高い開放電圧を得られる太陽電池ほど優れたものになること、②i型a-Si:H層の導電率に温度依存性があり、高温側での導電率の向上により直列抵抗が小さくなる結果、F.F.の低下率がp/nホモ接合太陽電池に比べて小さいこと、の2点であることを明らかにした。

第6章では、論文のまとめと、HIT太陽電池のさらなる高効率化に向けた今後の課題を示した。透明電極層とa-Si:H層の吸収損失と抵抗損失の低減を目指して、a-Si:H層をさらに薄くするための技術開発が必要である。極薄a-Si:H層に存在する低密度領域を少なくして、かつ、界面のパシベーションに必要な膜厚を得て、さらには、a-Si:H膜の構造緩和能力を利用した高品質a-Si:H膜の作成することが今後の目標である。

以上のように、本論文は新規に開発した非晶質/結晶系シリコンヘテロ接合におけるキャリア輸送機構を解析し、高効率光電変換機能を実現する基盤となっている物性を明らかにした点で、学術的に新しい知見を見出している。さらに、工学上実用的に広く使用可能な技術となっている背景にある物性を明らかにした点においても、大変有意義である。よって、審査委員一同は、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、審査ならびに最終試験に合格したと判定した。