

|          |   |
|----------|---|
| 氏名       | David M. Mulati   |
| 学位(専攻分野) | 博士 (工学)   |
| 学位記番号    | 工博第1853号  |
| 学位授与の日付  | 平成11年5月24日  |
| 学位授与の要件  | 学位規則第4条第1項該当  |
| 研究科・専攻   | 工学研究科電子物性工学専攻   |
| 学位論文題目   | Electrical Characterization of Multi-crystalline Silicon Solar Cells for High Efficiency<br>(多結晶シリコン太陽電池高効率化へ向けての電氣的評価) |

論文調査委員 (主査) 教授 松波弘之 教授 藤田茂夫 教授 松重和美

### 論文内容の要旨

エネルギー枯渇問題や地球環境問題を解決する新しいエネルギー源として太陽光発電が脚光を浴びており、多結晶シリコン太陽電池が電力発生用の有力候補として実用化されている。本論文は、多結晶シリコン太陽電池の更なる高効率化を目指して、面内の局所的な電氣的特性の測定結果を統計的に処理して短絡現象を明確にするとともに、エネルギー変換効率に大きな影響を与える少数キャリア寿命を正確に測定し、ホール効果や電子線誘起電流像の解析法に検討を加えて太陽電池の性能と関連させる研究結果をまとめたもので、6章からなる。

第1章は序論で、太陽光発電の重要性と太陽電池用材料としての多結晶シリコンの位置づけを論じ、本研究の背景と問題点を明確にしている。

第2章では、多結晶シリコン太陽電池の電氣的特性に見られる局所的な短絡現象を詳しく解析している。多結晶シリコンの $n^+p$ 接合に、ホトリソグラフィと化学エッチングによって直径0.2～1.2 mmの大きさの異なるメサ(台形)構造太陽電池を70個以上作製して、それぞれの電流-電圧特性を光照射をしない(暗時)状態で測定し、開放電圧、曲線因子、逆方向電流などの太陽電池特性の面内分布を求めている。開放電圧の小さなものは並列抵抗が小さくて再結合電流が大きく、それらが太陽電池内で分布して全体が局所的に電流短絡をしていることを明らかにしている。メサ構造太陽電池の性能が逆方向電流密度 $10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>を境界として、良好、不良の二つに分類でき、良好なものでは逆方向電流密度が小さくて開放電圧が0.5 V以上であるが、不良なものでは逆方向電流密度が大きくて開放電圧が0.25 V以下であることを示している。統計的な分布を調べ、エネルギー変換効率が13%を越える高効率の多結晶シリコン太陽電池では、良好なもの割合が全体の63%を越えることを見出している。

第3章では、メサ構造を用いて、太陽電池用多結晶シリコンの少数キャリア寿命を決定する方法を確立し、エネルギー変換効率と関連づけている。まず、暗時の順方向における再結合電流値をメサ構造の[周辺長/面積]比の関数として描き、外挿法によってメサ構造の大きさに依存しない値を決定して、少数キャリア寿命を推定する静的方法を提案している。ついで、暗時のスイッチング時間の測定結果を、[周辺長/面積]比の関数として描き、同様に外挿法によって少数キャリア寿命を決める動的法を、初めて多結晶シリコン太陽電池に適用している。少数キャリア寿命にはメサ構造の周辺部が大きな影響を与えるが、[周辺長/面積]を変えることによってその効果が除去でき、厳密な数値が求められることを示している。単結晶シリコン太陽電池では約105  $\mu$ sであるが、多結晶シリコンでは高効率(13.4%)の太陽電池で約85  $\mu$ s、低効率(5.2%)の太陽電池では約20  $\mu$ sであり、効率と大きく関係していることを明らかにしている。この方法では太陽電池が製作された後に少数キャリア寿命が測定できるので、太陽電池の効率と関連させることができ、性能評価に大いに役立つ。

第4章では、ベースとして用いているp型多結晶シリコン、および、エミッタである $n^+$ 層のホール効果の測定結果から不純物の種類を推測するとともに、多結晶シリコン内の多数キャリアの輸送現象を精密に解析している。温度依存性から約

50 meV のイオン化エネルギーをもつアクセプタの存在を指摘し、さらに詳細な解析結果からこれよりも大きなイオン化エネルギーをもつ複数のアクセプタの存在を推測している。正孔移動度の温度依存性から、音響型格子振動が多数キャリアの散乱機構として重要であることを示している。二次イオン質量分析結果からはベースの p 層よりもエミッタの n<sup>+</sup> 層に鉄 (Fe) が多く含まれていることを見だし、n<sup>+</sup> 層形成時の不純物ゲッターリング (収集) であろうと推測している。

第 5 章では、電子線誘起電流測定法を多結晶シリコン太陽電池の性能評価、特に、再結合過程の解析、に用いる際に注意すべき点を指摘している。太陽電池の表面形状によって生じる電子線誘起電流の強度比分布 (contrast) が、少数キャリアの再結合による強度比分布と相反することを示している。表面形状によって生じる強度比分布は、反射電子線強度の違いによることを明らかにし、太陽電池の高効率化のために施される表面の織地模様 (texture) の端部や先端では反射電子線の強度が大きくなるために、半導体内で生成される電子-正孔対の数が少なくなり、電子線誘起電流値が小さくなるとしている。したがって、電子線誘起電流が少ないことを再結合過程の増加と説明すべきでないとは指摘している。

第 6 章は結論で、本研究で得られた成果のまとめと今後の課題を提示している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、多結晶シリコン太陽電池の高効率化を目指して、面内での局所的な電気的特性を測定し、結果を統計的に処理するとともに、多結晶シリコンにおける少数キャリアの寿命をスイッチ特性から正確に決定して効率との関係を明確にする研究をまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 多結晶シリコン太陽電池に直径の異なる多数の微細メサ (台形) 構造を作製して、それぞれの太陽電池特性の良・不良を判定し、特性の面内分布を統計的に処理するとともに、特性と結晶粒界との関係を明らかにした。

2. 効率を支配するシリコン内の少数キャリア寿命の測定のために、暗時の順方向再結合電流の解析からの静的方法、スイッチ特性の解析からの動的方法を提案し、後者が正確な値を与えることを明らかにした。直径の異なる多数のメサ構造に適用して、端部における再結合の影響を排除し、製作後の多結晶シリコン太陽電池の効率と少数キャリア寿命の関係を初めて見いだした。

3. 多結晶シリコンのホール効果の測定から、ベースとなる層のキャリア密度、移動度など半導体特性を決定する多数キャリアの挙動を明らかにした。

4. 光起電力特性を評価するための電子線誘起電流像と反射電子線像との相関関係を詳細に調べ、太陽電池の特性評価をするための測定条件を提案した。

以上要するに、本論文は、多結晶シリコンの結晶粒界と太陽電池特性の関係を明らかにし、効率を支配する少数キャリア寿命を測定する方法を確立するなどして、太陽電池を高効率化するための新しい電気的評価法を提言したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の論文として価値あるものと認める。また、平成 11 年 3 月 3 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。