

氏名	Junyi Chen
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第9323号
学位授与年月日	令和元年11月30日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Silicon Nanostructures and their Application in Radial Junction Solar Cells
(シリコンナノ構造を利用した太陽電池応用)

主査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	深田 直樹
副査	筑波大学教授	博士(理学)	関口 隆史
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(理学)	唐 捷
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(理学)	森 孝雄

論文の要旨

審査対象論文は、太陽電池の高効率化と新機能発現に関する課題に対して、シリコン(Si)のナノ構造体による新構造の構築および機能化を目的とした、新構造太陽電池セルの開発に関するものである。本論文で対象とした Si ナノ構造体は、1次元構造を有する Si ナノワイヤであり、その直径方向内部に pn 接合が構築された特殊な構造となっている。pn 接合は太陽光のエネルギーの吸収により半導体内部に発生したキャリア(電子-正孔)の再結合を抑制し、電気として取り出すために必要な仕組みである。Si ナノワイヤの直径方向内部に pn 接合を形成すると、平面構造の従来太陽電池と比べて圧倒的に pn 接合面積を増大させることができ、キャリアの再結合を抑制し、結果的に短絡電流を増大させることができる。さらに、本論文で形成された Si ナノワイヤは基板から垂直方向に形成されている構造的な特徴から太陽光の反射を 10%以下に低減できる利点も有している。

本論文では、①硝酸銀とフッ酸の混合溶液を利用した無電解エッチング、②ナノインプリント法と反応性イオンエッチングを組み合わせた手法および③シリカビーズによるパターニングと反応性イオンエッチングを利用した 3 種類の手法により、n 型 Si ナノワイヤの形成を行っている。一方、p 型となる Si シェル層の形成は、化学気相堆積(CVD)法により行われている。エネルギー変換効率を向上させるための電極形成法等のプロセス、構造最適化および新原理の適用について系統的な実験が行われ、以下の結果を明らかにしている。Si ナノワイヤの上面への電極形成には、通常一般的に利用されている楕円形電極をマイクログリッド構造に改善することで、電流値の増大および変換効率を増大させることができている。Si ナノワイヤ形成後の湿式化学エッチングによる表面ラフネス軽減効果、ナノワイヤ長軸方向の長さの最適化および Si 基板厚についても調べ、それぞれの最適値を導き出している。ナノワイヤの先端の形状は、太

陽光の反射低減において重要な因子であり、先端が平坦ではなく、先端になるほど先鋭化した方が屈折率をより連続的に変化できることから、大きな反射低減効果が得られることを実証している。さらに、0次元構造の Si ナノ結晶からの無輻射エネルギー移動機構を利用することで、高エネルギー領域のエネルギー変換効率を改善し、更なる変換効率の向上を達成している。Si ナノ結晶からの無輻射エネルギー移動を効率良く実現させるためには、Si ナノ結晶表面を完全に分子終端する必要がある。さらに、無輻射エネルギー移動の効率は、Si ナノ結晶と太陽電池活性層 (Si ナノワイヤ領域) の距離が重要であり、Si ナノ結晶表面を終端する分子長に強く依存する。本論文では、長さの異なる 1-オクタデセン、1-ドデセンおよび 1-オクテンについて効果を検証し、分子長が 0.75nm と短い 1-オクテンで無輻射エネルギー移動効率が最も向上することを明らかにしている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

審査対象論文に記載されている Si ナノ構造太陽電池の利点、Si ナノ構造の形成法、光応答特性、太陽電池セルの形成プロセスの最適化、太陽電池特性と構造との関係性を中心に質疑応答を行った。審査対象論文では、化学的手法を利用した低コスト・簡便な手法から、ナノワイヤ構造の配列制御を行った手法に対して、系統的な光応答特性および太陽電池特性が示されていると評価された。

0次元構造の Si ナノ結晶を利用したエネルギー移動という新しい現象は、著者のグループにて以前に初めて実証された結果であった。審査対象論文において著者は、Si ナノ結晶表面の配位分子の分子長を系統的に変えた実験を行い、変換効率を更に向上させるとともに、変換効率向上の指針を与える重要な結果を得ており、配位分子の分子長と太陽電池の変換効率の関係を実験で詳細に示した初めての成果といえる。

以上の成果は、Si ナノ構造体を利用した次世代太陽電池実現のための重要な知見になると高く評価された。

〔最終試験結果〕

2019年11月1日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。