

審査の結果の要旨

氏名 吉田 勝尚

本論文は、「Numerical Study on Intermediate Band Solar Cells based on Drift-Diffusion Method and its Application to Multi-Stacked Quantum Dot Structure (ドリフト拡散法に基づいた中間バンド型太陽電池の数値解析と多重積層量子ドット構造への応用)」と題し、多重積層量子ドットを用いた中間バンド型太陽電池の高効率化を実現するために必要とされるデバイスシミュレータの構築及びこれを用いた中間バンド型太陽電池の特性解析に関して述べたものであり、全7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を解説している。再生可能エネルギーとして太陽光発電の重要性を述べるとともに、太陽電池の高効率化の必要性を論じている。本論文では高効率太陽電池として中間バンド型太陽電池を取り上げている。中間バンド型太陽電池は、半導体のバンドギャップ内に光吸収可能なエネルギー準位を設けることで、この準位を介したキャリア生成を行うことにより従来は利用できなかったバンドギャップ以下のフォトンを利用することで高効率動作が実現される。本論文では、多重積層量子ドットを用いた中間バンド型太陽電池の高効率化を実現するためのデバイスシミュレータの構築と特性解析を目的としている。

第2章では、詳細平衡モデルに基づく単接合太陽電池の変換効率の物理を述べ、次に中間バンド型太陽電池の動作原理、及び近年の報告例を基に現状と課題を紹介している。

第3章では、本論文で構築したデバイスシミュレータの基本となるドリフト拡散モデル、及び中間バンドを介した電流生成メカニズムのモデルについて述べている。

第4章では、デバイスシミュレーションによる中間バンド型太陽電池の特性解析結果に関して詳細に述べられている。中間バンドを占有する電子は、伝導帯また価電子帯との間での励起・再結合過程の平衡を満たしながら太陽電池の動作特性に強く影響し、この電子濃度に依存する形で静電ポテンシャルが決定される。中間バンドの電子占有率が中間バンドを介したキャリア生成割合に大きく影響するため、中間バンドの占有率をコントロールすることが高効率動作を実現するために重要な鍵となることを明らかにした。次に占有率の制御法として、中間バンドを導入した領域に対して不純物ドーピングを行うことにより、大幅な電流増加が実現されることを示した。この結果は、実際にドーピングを施した量子ドット型太陽電池で得られた電流増加の結果と定性的に一致する。他方、入射太陽光を集光して光強度を増大することで中間バンドの占有率が増加し、中間バンドを介したキャリア生成を最大化するように決定されることも明らかにした。以上で得られた結果は、本手法の特徴であるデバイス構造全体を考慮して太陽電池特性

を求めることができる点と自己無撞着な中間バンド電子の取り扱いを行えるようにしたことによって初めて明らかにされた。

第5章は、本論文の主題である多重積層量子ドットを有する中間バンド型太陽電池の1次元シミュレーション結果について述べている。10 nmの中間バンド導入領域と、導入を行わない領域の組み合わせを単位構造とし、この構造を繰り返すことにより多重積層構造の取り扱いを行った。この結果、非集光下において実際の多重積層量子ドット太陽電池における積層数依存性の実験結果で観測されるような、積層数増加に伴う短絡電流の増加、また開放電圧の低下並びにダイオード特性の劣化が説明できることを示した。また、集光倍率に対する依存性を調べることにより、集光倍率に対する短絡電流の非線形的な増加や開放電圧、ダイオード特性の改善の様子を説明した。高倍集光下で高効率を実現するためには、非集光下では特性劣化の原因となるものの中間バンド層の層数をできるだけ多くすることが高効率動作実現に向けて必要である。

第6章では、前章で構築したデバイスシミュレータの3次元系への拡張を行っている。局所した中間バンド電子により伝導方向に垂直な面内でのポテンシャル形状が中間バンド電子濃度に依存する形で影響を受ける様子を明らかにし、このポテンシャルへの影響により、空間的に電子電流と正孔電流が支配的に流れる領域が分離されること、また電子、正孔自身も空間的に分離されることを示した。さらに本章では、非常に早いエネルギー緩和過程として Auger cooling による影響についても検討している。

第7章は結論であって、本研究で得られた成果を総括するとともに、将来展望について述べている。

本論文は、中間バンド型太陽電池に対するドリフト拡散法に基づいた自己無撞着デバイスシミュレーション法を実現し、中間バンド太陽電池のデバイス特性並びに構造依存性を明らかにしたオリジナリティーの高い研究である。本論文の特筆すべき研究成果として、中間バンドの電子占有率が中間バンドを介したキャリア生成割合に大きく影響し、中間バンドの占有率をコントロールすることが高効率動作を実現するために重要な鍵となることを明らかにしたこと、またキャリア占有率の制御法として、中間バンドへの不純物ドーピングあるいは集光動作が有効であることを示したこと、などが挙げられる。本論文の研究成果は、今後の高密度量子ドットを用いた太陽電池技術、また光エレクトロニクスデバイス応用に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。