

## 審査の結果の要旨

論文提出者 野澤 朋宏

中間バンド型量子ドット太陽電池は、量子ドットにより母体材料中に形成された中間準位(バンド)を介した光学遷移を利用した太陽電池である。形成された中間バンドにより、従来の単接合太陽電池では吸収できなかった赤外光領域の太陽光を吸収できるようになるため、理論的に高い変換効率が予測されている。しかし、従来は1中間バンド型(1つの中間バンドを有する)量子ドット太陽電池が主に研究されてきたが、複数中間バンド型量子ドット太陽電池を構成すれば更なる変換効率の向上が期待できる。また、いずれの中間バンド太陽電池においても高効率化に向けて効率的な2段階光吸収遷移、特に中間バンドから伝導帯へのイントラバンド遷移、が不可欠である。本論文では、「Theoretical Analysis and Characterization of Quantum-Dot Solar Cells with Multiple-Intermediate Bands (複数中間バンド型量子ドット太陽電池の理論解析とその特性評価に関する研究)」と題して、複数中間バンド型量子ドット太陽電池の熱力学限界効率、実デバイス構造を考慮した変換効率、光学遷移に関する理論解析と単一量子ドットを用いた2段階光吸収の基礎特性評価について論じており、全9章から構成され、英文で書かれている。

第1章では、「Introduction」と題して、エネルギー資源の現状と課題および太陽電池の研究分野の発展と現状の研究情勢について論じ、本論文の目的と構成を示している。

第2章では、「Basis for solar energy conversion and photovoltaic cell」と題して、太陽光のエネルギー変換、量子ドットの一般的な物理特性および量子ドット太陽電池の特徴を概説している。

第3章では、「Simulation methods for quantum dot solar cell with multiple intermediate bands」と題して、本論文において複数中間バンド型量子ドット太陽電池の理論解析に用いた詳細平衡モデルとドリフト拡散モデルについて概説している。

第4章では、「Simulation based on detailed balance limit model」と題して、詳細平衡モデルに基づいて算出された複数中間バンド型量子ドット太陽電池の熱力学的理論限界効率について論じている。4つの中間バンドを有する中間バンド太陽電池の理論限界効率は74.6%となり、1中間バンド太陽電池の63.2%に比べて大幅に効率が上昇することを明らかにしている。また、4中間バンド太陽電池の最適な母体半導体のバンドギャップは1中間バンド太陽電池に対して大きな差は見られないことから、1中間バンド太陽電池と同様の母体半導体材料を用いて4中間バンド太陽電池を実現可能である事を示している。

第5章では、「Simulation based on drift diffusion model」と題して、ドリフト拡散モデルに基づき、実デバイス構造を考慮して算出された複数中間バンド型量子ドット太陽電池の理論変換効率について論じている。4中間バンド太陽電池において、ドーピング濃度が変換効率に与える影響が1中間バンド太陽電池に比べて大きい事を示している。一方で、適切なドーピング濃度設計を行う事で4中間バンド太陽電池の変換効率は1中間バンド太陽電池より十分大きくなり得る事を明らかにしている。

これらの結果は、複数中間バンド型量子ドット太陽電池におけるドーピング濃度制御の重要性を示している。

第6章では、「Theoretical analysis of intraband transition in quantum dot-intermediate band solar cell」と題して、量子ドット中の量子準位（中間バンド）から伝導帯へのイントラバンド遷移の光学遷移強度について論じている。光学遷移強度が量子ドットの存在により1～2桁程度低減することを理論的に明らかにしている。この結果は、量子構造のエンジニアリングにより光学遷移の始状態・終状態の波動関数の空間的なオーバーラップを増やし、遷移強度を増大させる事が量子ドット太陽電池を実現する上で重要である事を示している。

第7章では、「Fabrication and characterization techniques of a single quantum dot device」と題して、本論文において単一量子ドットの基礎特性評価に用いたデバイス作製と、光学・電気的评价について概説している。

第8章では、「Optical and electrical characterization of a single QD」と題して、単一量子ドット中における2段階光吸収特性評価について論じている。単一量子ドットを用いて2段階光吸収による電流増大を実証しており、キャリア取り出し過程を明確にした上で2段階光吸収遷移過程を観測した初めての成果である。2段階光吸収による電流増大が55 Kまで観測された事や2段階目の光学遷移の波長依存性についての議論が述べられている。また、2段階光吸収による光電流増大量から算出したイントラバンド遷移の吸収係数が、理論解析結果と良い一致を示すことが述べられている。実験的に得られた吸収係数パラメータをドリフト拡散モデルに組み込み算出された変換効率は、限界効率に対して低い事が示されており、量子ドットサイズ・材料の最適化や量子構造のエンジニアリングの重要性について言及している。

第9章では、「Conclusions and future prospects」と題して、各章の主要な成果をまとめて総括し、本論文の結論、及び将来展望について述べている。

以上これを要するに、本論文は、複数中間バンド型太陽電池の熱力学理論限界効率を理論的に示すと共に、単一量子ドットにおいて2段階光吸収による光電流増大を初めて実証し、量子ドット太陽電池の基礎物性を明らかにしたものであり、電子工学に貢献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。