

審査の結果の要旨

論文提出者 宮澤 俊之

情報処理やセキュア通信などにおいて革命的な進歩をもたらすと期待される量子情報処理技術において、その中核デバイスとなる単一光子発生器や量子ビットについてそのデバイス化を中心に盛んに研究されている。現在までの量子情報処理用のデバイスは主に原理実証を目的にしており、可視または近赤外波長域の量子ドット実現とその光制御技術の発展によって支えられたといえる。それに対し、単一光子発生器および励起子量子ビットを組み合わせた量子ネットワークへの展開を図るには、それらのデバイスの光通信波長帯での実現や電子デバイス化は必須技術であり、基礎的な機能実現と合わせて研究することが望まれる。本論文は「Study on Telecommunication-Band Quantum Dot Devices for Single-Photon Emission and Quantum Bit Operation (単一光子発生と量子ビット操作に向けた通信波長帯量子ドット素子に関する研究)」と題し、通信波長帯量子ドットを利用した単一光子発生器および励起子量子ビットについて論じており、全10章から構成され英文で書かれている。

第1章は「General Introduction」と題し、本博士論文の背景および構成について述べ、特に量子情報技術において重要でありかつ本博士論文に関係が深い、単一光子発生器と励起子を用いた量子ビット操作について数式的取り扱いを中心にそれらの動作原理について述べられている。

第2章は「Telecommunication-Band Quantum Dots for Quantum Applications」と題し、通信波長帯の単一光子発生器および励起子量子ビットを実現するために利用した量子ドットについて、材料・成長手法・形状を中心に述べられている。

第3章は「Single-Photon Emitter with Non-Resonant Photo-Excitation」と題し、通信波長帯における単一光子発生器実現を目的として、二段階キャップ法により成長された InAs/InP 量子ドットを光取り出し効率を高めたメサ型素子に加工し、InP のバンドギャップ以上のエネルギーで光励起を実施することで、世界に先駆けて実証した 1.55 μm 帯で単一光子発生について述べている。

第4章は「Identification of Resonantly Excited Levels in Single-Photon Emitter」と題し、前章の量子ドットを用いた単一光子発生器の特性改善のために用いた準共鳴励起法について解析し、8 バンド $k \cdot p$ 摂動法によって求められた電子・正孔の波動関数をもとに励起子エネルギーを見積もった結果、準共鳴によって単一光子性が改善される準位は電子と正孔の s-p, p-p シェルであると述べている。

第5章は「Fabrication and Basic Characterization of Single-Photon Emitting Diode」と題し、単一光子デバイスの集積化に向けた取り組みとして、通信波長帯の InAs 量子ドットを含んだ p-i-n デバイスを作成し、電場中での励起子エネルギーと発光寿命を測定することで、作成したデバイスが理想的な電氣的・光学的特性を実現していることを示している。一方、InP 系の材料系についても電極材料や層

構造の最適化を行い、1.55 μm 帯の電流注入型単一光子発生器実現に向けた層構造についても述べている。

第6章は「1.55 μm Operation of Single-Photon Emitting Diode」と題し、前章で確立した層構造中に InAs 量子ドットを成長し、光取り出しを考慮したメサ構造および電極構造を作成し、80 ps 幅の高速電気パルスを用いた結果、波長 1.552 μm において世界で初めて電流注入による単一光子発生を実証している。一方で、二つの電気パルスを用いた単一光子発生器の高速応答についても述べている。

第7章は「Proposal of Single-Photon Emitting Diode using Charged Exciton State」と題し、電流注入型単一光子発生器の高効率化・高性能化に向けて、荷電励起子による単一光子発生効率の向上とクーロンブロッケードによる単一光子性改善を積極的に利用した量子ドットデバイスについて、量子ドットの波動関数を元にしたクーロンエネルギーの評価やトンネルレートの評価を通して、性能改善の可能性やデバイス構造について述べている。

第8章は「Anisotropic Rabi Oscillation using Telecom-Band Exciton」と題し、量子ビット実現に向けた通信波長帯量子ドット中の励起子のコヒーレントな状態操作について述べている。量子ドットの二つの直交する励起子微細構造について、励起光の偏光方向を変えることで、それぞれを独立に操作可能であることを示している。

第9章は「Coherent Control of Telecom-Band Excitonic and Biexcitonic States」と題し、前章で用いた通信波長帯量子ドットを用いて、励起子量子ビットの任意の始状態設定などで重要な量子操作である二光子吸収による励起子分子ラビ振動について述べている。励起子分子ラビ振動の詳細解析から 40 ps 程度の比較的長い制御光パルスを用いてもコヒーレンスを保った量子操作が可能であることを示している。

第10章は「Conclusion」と題し、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、通信波長帯単一量子ドットを用いた量子情報素子技術の確立に向けて、光励起による 1.55 μm 帯単一光子発生を実現し、さらに電流注入型単一光子発生素子の作製とその動作を実証するとともに、励起子量子ビットの実現に必須な励起子・励起子分子ラビ振動の 1.3 μm 帯における観測を論じたものであり、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。