

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	Si/CaF ₂ ヘテロ構造を用いた近赤外量子カスケードレーザの基礎研究
Title(English)	Fundamental study of near infrared quantum cascade lasers using Si/CaF ₂ heterostructures
著者(和文)	鄭源宰
Author(English)	Gensai Tei
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12375号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:渡辺 正裕,筒井 一生,植之原 裕行,西山 伸彦,鈴木 左文,安田 浩朗
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12375号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	鄭源宰	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	渡辺 正裕	准教授	鈴木 左文	准教授
	審査員	筒井 一生	教授	安田 浩朗	情報通信研究 機構
		植之原 裕行	教授		
西山 伸彦		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Si/CaF₂ ヘテロ構造を用いた近赤外量子カスケードレーザの基礎研究」と題し、和文6章から構成されている。

第1章「序論」では、近年、中赤外からテラヘルツ波長帯で動作可能な小型かつ高出力な半導体光源として重要性を増している量子カスケードレーザ(QCL)について、研究の歴史及び内外の研究動向について概観している。本研究では、電子集積回路技術と親和性が高く、安価で高品質なシリコン(Si)基板上にエピタキシャル積層構造が形成可能なシリコン/フッ化カルシウム(CaF₂)ヘテロ構造に着目し、Si/CaF₂ヘテロ構造を量子井戸の基本構成材料とするQCLを提案したと述べている。ヘテロ接合界面に形成される大きなエネルギーバンド不連続が、中赤外から近赤外に至る広い波長領域に対応可能かつ室温動作可能なQCLの設計に適していることを指摘し、提案する素子構造と動作原理について概略を説明している。特に本論文の主題となる、近赤外波長帯 Si/CaF₂ QCL の実現に向けた量子井戸及び導波路構造の設計上の課題を指摘し、これまで未実証であった Si/CaF₂ 量子井戸におけるサブバンド間遷移発光の実証に向けたデバイス作製プロセスの概要とその課題について総括している。

第2章「Si/CaF₂ 量子カスケードレーザの理論解析」では、QCL 量子井戸内の波動関数、擬エネルギー準位(サブバンド)および、共鳴トンネルを主な伝導機構とする電流の計算手法について説明した後、近赤外波長帯の発光遷移が期待される量子井戸活性層を複数設計し、閾値電流密度の解析を行ったと述べている。特に、発光波長 2 μm 以下の量子井戸設計においては、遷移層上位準位への電子注入のための注入層の設計が困難とされていたが、注入層を多段の量子井戸で構成することで、一周期当たりの電界強度が、CaF₂ の絶縁破壊電界である 1 MV/cm 以下となる条件をも満たしながら、遷移層上位準位へ 10 kA/cm² を超える電流を注入可能な活性層厚の設計値を見出した、と述べている。次に、導波路・共振器構造として、ファブリ・ペロー型、及び、分布帰還型を想定した素子構造の理論解析を行い、活性層積層周期数を 25 周期、導波路幅を 500 nm と仮定した際、波長 1.70 μm におけるレーザ発振に必要な閾値電流密度がそれぞれ 2.7 kA/cm², 1.4 kA/cm²であることを示し、Si 量子井戸膜厚及び準位の設計により、レーザ発振に必要な電流密度を確保する構造設計が成立し得ると結論付けている。

第3章「量子カスケード構造デバイスの作製プロセス」では、導波路構造及び電流注入機構を有する QCL 構造の作製プロセスに関して述べている。先行研究におけるウェットエッチングプロ

セスの課題を指摘し、課題解決に向けた素子作製プロセスを提案している。すなわち、導波路の SiO₂ クラッド形成及び電極用コンタクト形成に、異方性の高い反応性イオンエッチングを導入することで、活性層へのダメージを抑制しつつ、シングルモード動作に不可欠な導波路幅 1 μm 以下の導波路構造形成が可能であることを実験的に示し、更に活性層へ 10 kA/cm² を超える電流を注入可能であることを実証した、と結論付けている。

第 4 章「測定方法」では、フーリエ変換赤外分光光度計とロックインアンプを用いた電流注入による発光スペクトル測定を行うための測定システムについて、各装置の原理構造、接続図、測定条件等について記載している。

第 5 章「結果と考察」では、第 3 章で得た成果に基づき作製した QCL 構造素子の電流注入発光特性の結果及びその考察について述べている。主な成果として、第 2 章の活性層設計で示した波長 1.65 μm 及び 1.70 μm 設計素子に関して、レーザ発振電界強度における電流注入発光(EL)の観測に成功し、それぞれの測定スペクトルのピーク波長に関する考察から、遷移層 1 原子層分の膜厚揺らぎによる遷移波長の変化と、サブバンド内・サブバンド間の散乱時間、キャリア流出時間を用いて概算される半値幅広がりを考慮することで、理論予測と合理的にフィッティング可能であることを示した、と説明している。特に、積層周期数 25、計 300 層の活性層を有する波長 1.70 μm 設計素子に関して、半値幅 12 meV の EL スペクトルが観測され、キャリア流出抑制のためのブロック層の作用により、サブバンド間遷移が支配的であることが示唆される結果を得たと述べている。また、電流量増大に対する光強度増大や、電界強度変化に起因するシュタルクシフトが確認され、これらの事実を総合して、観察された EL 発光がサブバンド間遷移起源であることを示唆する結果を得た、と結論付けている。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた結論と今後の展望について述べている。

以上より、本論文は、近赤外波長 Si/CaF₂ ヘテロ構造 QCL 構造を提案し、本材料系に適した理論解析手法を用いてレーザ発振可能性を示すとともに、シングルモード導波路と電流注入機構を有する QCL 構造の作製プロセスを構築し、光の導波及びサブバンド間遷移由来の電流注入発光を初めて実証することにより、シリコン材料の新たな光機能素子応用に対する指針を示したもので、工学上および工業上寄与するところが大きい。よって我々は本論文が博士（工学）の学位論文として十分価値あるものと認める。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。