

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	Si/CaF <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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)	論文要旨
Type(English)	Summary

(  
(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	鄭 源宰		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	渡辺 正裕
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)	

要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

中赤外波長帯～テラヘルツ帯で動作可能な小型かつ高出力な半導体光源として近年注目を集める量子カスケードレーザ(QCL)は、量子井戸中のサブバンド間遷移を基本原理とするその特徴的な誘導放出・光増幅機構から、間接遷移型半導体であり発光効率が極めて低いシリコン(Si)を量子井戸材料に用いた場合でも光増幅の可能性を有し、Si 集積回路技術を用いてモノシリックに高密度集積可能な Si 材料系レーザ光源の候補として期待されている。本論文では、「Si/CaF<sub>2</sub>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、環境ガスの吸収帯や光通信波長帯を含む近赤外波長帯で光増幅可能な活性層設計及びレーザ発振可能性を理論的に明らかにするとともに、導波路及び電流注入機構を有する QC 構造デバイスの作製プロセスの研究・素子作製を行い、電流注入に起因する近赤外波長帯サブバンド間遷移エレクトロルミネッセンス(EL)を実験的に示した。本文は全 6 章で構成され、和文で記されている。

第一章「序論」では、QCL について、その動作原理を説明し、これまでの研究の歴史や近年の研究動向を紹介した。次に、本研究で Si 量子井戸の障壁材料として用いるフッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub>)について、その物性やデバイス応用を見据えた先行研究について述べた。そして、近赤外波長帯 Si/CaF<sub>2</sub> QCL の実現に向けた設計課題、サブバンド間光学遷移の実証に向けた QC 構造デバイス作製におけるプロセス課題についてまとめ、各章の概略を説明し、最後に本論文構成を示した。

第二章「Si/CaF<sub>2</sub>量子カスケードレーザの理論解析」では、波動関数・量子準位・共鳴トンネル電流の計算法について説明した後、近赤外波長帯における活性層を複数例設計し、解析を行った。特に、 $\lambda < 2 \mu\text{m}$  設計においては、遷移層上位準位へのキャリア注入のための注入層の設計が困難とされていたが、注入層を複数量子井戸で構成することで、一周期当たりの電界強度  $< 1 \text{ MV/cm}$  を達成しながら遷移層上位準位へ  $> 10 \text{ kA/cm}^2$  オーダーでキャリア注入可能な活性層設計を達成した。次に、導波路・共振器構造として、ファブリ・ペロー(FB)型、単一モードレーザ発振可能な分布帰還(DBF)型を想定した解析を行い、活性層積層周期数  $N = 25$ 、導波路幅  $W = 500 \text{ nm}$  とした際、 $\lambda = 1.70 \mu\text{m}$  設計におけるレーザ発振に必要な閾値電流密度をそれぞれ  $2.68 \text{ kA/cm}^2$ ,  $1.35 \text{ kA/cm}^2$  と見積もった。数原子層厚の Si 量子井戸膜厚設計及び準位設計により、レーザ発振に必要な電流密度を確保するサブバンド設計の可能性を示した。

第三章「量子カスケード構造デバイスの作製プロセス」では、Si/CaF<sub>2</sub>量子井戸のサブバンド内・間の散乱ダイナミクス及びサブバンド間光学遷移の実験的な解明に向けた、導波路構造及び電流注入機構を有する QC 構造デバイスの作製プロセスに関して述べた。はじめに、素子作製に必要

となる実験方法や実験装置について述べた後、先行研究におけるウェットエッチングプロセスの課題点について記述し、課題解決に向けた素子作製プロセスを提案した。本研究では特に、導波路の SiO<sub>2</sub> クラッド形成及び電流注入のための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(RIE)の導入を行うことで、活性層破壊を抑制しながら、設計寸法に近い素子作製が可能であるプロセスを提案し、その詳細について詳しく記載した。

第四章「測定方法」では、フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)とロックインアンプを用いた光学測定系について、接続図や各装置の原理、測定条件等について記載した。

第五章「結果と考察」では、本研究で作製した量子カスケード構造デバイスに関する評価を行った。SEM 像観察から、本研究で提案し導入したドライエッチングプロセスに関して、素子破壊や導波路形状改善等の優位性を示し、Si/CaF<sub>2</sub> 活性層へ >10 kA/cm<sup>2</sup> オーダーで電流注入が可能かつスラブ型導波路構造を有する素子作製プロセスであることを示した。また、得られた EL スペクトルに対して、膜厚揺らぎによるピーク波長変化、散乱時間、サブバンド間緩和時間等の理論解析結果を対応付けながら、EL スペクトルがサブバンド間遷移に起因する可能性を定量的に示した。更に、素子間のスペクトル評価から、ブロック層のキャリア流出によるスペクトルへの影響を評価した。本研究で示された通り、ブロック層のキャリア流出を抑制した光学遷移が実現可能であることが明らかになったことから、少なくとも Si 量子井戸内部では反転分布や誘導放出が生じていることが強い根拠をもって推定される。

第六章「結論」では、本研究で得られた主要な成果についてまとめ、今後のレーザ発振に向けた方針について詳細に述べた。

今後、共振器の作製により、レーザ発振が期待される。さらに、意図した波長でレーザ発振を実現するには、膜厚揺らぎの抑制と結晶性の向上を両立可能な結晶成長プロセスの開発が重要となる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子系 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	( 工学 )
学生氏名： Student's Name	鄭 源宰		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	渡辺 正裕	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Quantum cascade lasers (QCLs), in which the basic principle of optical amplification is based on intersubband transitions in quantum wells, have the potential for optical amplification even when silicon (Si), an indirect transition semiconductor, is used as the active layer material, and are expected to become candidates for Si-based lasers. Under the title of "Fundamental study of near infrared quantum cascade lasers using Si/CaF<sub>2</sub> heterostructures," the main results are as follows.

- 1) The possibility of designing subbands that ensure the current density necessary for laser oscillation in the near-infrared wavelength was demonstrated through the design of quantum well thickness and subband levels by combining Si quantum wells of several atomic layers thickness. ( $\lambda = 1.70 \mu\text{m}, 1.65 \mu\text{m}$ )
- 2) In the fabrication of quantum cascade devices for the demonstration of intersubband optical transition by current injection, it was shown that it is possible to fabricate single transverse mode waveguide structures and to achieve current injection larger than  $10 \text{ kA/cm}^2$  into the active layer by introducing reactive ion etching technology.
- 3) Electroluminescence (EL) was observed in the vicinity of the laser oscillation field intensity. Then, the possibility that EL is caused by intersubband transition was quantitatively evaluated by fitting the results of theoretical analysis such as transition wavelength change for one atomic layer variation of transition layer thickness, intra- and inter-subband scattering time. Furthermore, the effect of carrier escape in the blocking layer on the spectrum is also evaluated, and it is inferred with strong evidence that optical transitions with suppressed carrier escape in the blocking layer are feasible and that at least population inversion and stimulated emission are occurring. In order to realize laser oscillation at the desired wavelength, it is important to develop a crystal growth process that can both suppress thickness fluctuations and improve crystallinity, in addition to fabricating resonators.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、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。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).