

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19206033

研究課題名 (和文) InAs 量子カスケードレーザの次元性の制御とその効果

研究課題名 (英文) Control of carrier dimensionality in InAs quantum cascade lasers and its effect on laser characteristics

研究代表者

大野 英男 (Ohno Hideo)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：00152215

研究成果の概要 (和文)：

InAs 中赤外量子カスケードレーザ(QCL)の磁場によるキャリアの閉じ込め効果を調べるために、量子井戸の面内に平行方向、及び垂直方向に磁場を印加し、特性を評価した。磁場を面内垂直方向に印加すると、ランダウ準位形成により閾値電流密度が減少した。一方で面内平行方向では閾値電流密度は変化せず、スロープ効率のみが増加するという特異な振る舞いを観測した。又テラヘルツ(THz)帯においても磁場の効果を調べるため、GaAs THz QCL を開発した。加えて THz 帯で高性能化が期待できる ZnO 量子井戸においてサブバンド間遷移を初めて観測した。

研究成果の概要 (英文)：

To investigate the effect of carrier dimensionality on the laser characteristics of InAs quantum cascade lasers (QCLs), we applied the magnetic field in the direction parallel and perpendicular to quantum wells (QWs) layers and measured the emission properties. When the magnetic field in the direction perpendicular to QWs was increased, the threshold current density (J_{th}) was decreased most probably due to the formation of the Landau levels. On the other hand, when the magnetic field parallel to QWs was increased, the enhancement of the slope efficiency was observed whereas J_{th} remained unchanged. Also to study its effect on the characteristics of terahertz (THz) QCLs, we fabricated the GaAs THz QCLs. In addition, we observed the intersubband transitions in ZnO QWs which is expected to improve the temperature characteristics of THz QCLs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	17,000,000	5,100,000	22,100,000
2008 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	26,200,000	7,860,000	34,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：量子井戸、MBE・エピタキシャル、高性能レーザー、テラヘルツ赤外材料・素子、サブバンド

1. 研究開始当初の背景

量子カスケードレーザは、半導体量子井戸構造のサブバンド間光学遷移を用いた半導体レーザで、中赤外からテラヘルツ帯の小型高機能光源として応用が期待されている。このレーザは量子井戸の構造によりレーザ遷移の双極子モーメントや発振波長などを制御できるという特徴を有するため、現在構造の設計を中心に世界各国で精力的に研究が進められている。

一方で磁場や電場、圧力などの外場を半導体量子井戸に印加するとバンド構造が変化することが知られている。中でも磁場の効果は特徴的であり、量子井戸中の電子の運動をローレンツ力により変化させる。磁場を量子井戸構造の面内垂直方向に印加すると電子はサイクロトロン運動により0次元状態のランダウ準位を形成し、電子の散乱時間などが大きな影響を受ける。又磁場を量子井戸構造の面内方向に印加すると、電子の軌道はローレンツ力を受けて曲げられ、電子の面内波数が増える。以上のように磁場は構造の設計だけでは制御が難しいキャリアダイナミクスに変化を与えるため、レーザの高性能化に向けて動作機構などの新しい知見が得られる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究課題ではこれまでに高性能化を進めてきた中赤外 InAs 量子カスケードレーザを用い、発振特性の磁場依存性を調べることを目的として研究を進めた。又磁場の効果をテラヘルツ帯において検討するために、GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザを開発した。加えてテラヘルツ帯において温度特性などの面で高性能化が期待できる ZnO 量子井戸構造に関する研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 磁場中における中赤外 InAs/AlSb 量子カスケードレーザの発振特性

中赤外 InAs/AlSb 量子カスケードレーザは *n*-InAs 基板上に分子線エピタキシ(MBE)法により作製した。活性領域は20周期の発光層及び注入層から成り、発光層は InAs/AlSb 結合量子井戸構造、注入層は InAs/AlSb 超格子構造で構成される。MBE 成長後、リッジレーザ構造を作製し、室温でレーザ特性の評価を行った。観測されたレーザ発振波長は 6 μm 、閾値電流密度は 5 kA/cm^2 、最高動作温度は 370 K であった。その後超電導マグネット付きク

ライオスタットを用い、温度 2 K、最大印加磁場 7 T の状態で電圧-電流、及び電流-光出力特性の評価を行った。

(2) テラヘルツ GaAs 量子カスケードレーザの作製と評価

テラヘルツ量子カスケードレーザ用の材料として残留キャリア密度の少ない GaAs を利用した。活性領域は縦光学フォノン(LO)散乱キャリア引き抜き構造を用いて設計した。LO フォノン散乱キャリア引き抜き構造は基底サブバンドから高速にキャリアを引き抜くことが可能であるため高温動作化と低閾値電流密度化が期待できる。又導波路として single surface plasmon 導波路構造と金属・金属導波路構造を採用した。試料構造は MBE により作製した。MBE 成長後リッジレーザ構造に加工し、レーザ発振特性の評価を行った。

(3) ZnO 量子井戸構造サブバンド間遷移の観測

テラヘルツ帯において最高動作温度などの温度特性を向上させるためには、熱励起型 LO フォノン散乱を減少させることが必要であり、それを実現する手法として大きな LO フォノンエネルギーを持つ材料を用いる方法が提案されている。我々は GaAs よりもおおよそ 2 倍程度 LO フォノンエネルギーが大きい ZnO 量子井戸に注目した。ZnO 量子井戸のサブバンド間遷移に関する研究はこれまで全く報告されてない。ZnO 量子井戸では ZnO 自身の吸収を赤外領域に持つため 4 nm 以下の狭い量子井戸構造が必要である。又自発分極により量子井戸内部に MV/cm オーダーの電界が発生するためサブバンド間遷移における吸収係数が小さいという問題点がある。我々はこれらを解決するために MBE により良質な量子井戸構造の形成が可能である O 極性 ZnO 基板を使用した。又内部電界を小さくするため、MgZnO 障壁の組成を 23% に下げると同時に厚さ 3nm 程度まで薄くした構造を用いた。サブバンド間光学遷移は低温光電流測定により検出した。

4. 研究成果

(1) 磁場中における中赤外 InAs/AlSb 量子カスケードレーザの発振特性

波長 6 μm で発振する InAs/AlSb 中赤外量子カスケードレーザに面内平行、及び面内垂直方向に磁場を印加し、レーザ発振特性を測定した。まず面内磁場を印加すると磁場 3 T 以上でターンオン電圧が増大するのが観測され (図1)、閾値電流密度が増加した (図2)。タ

オン電圧の増大は励起サブバンドへ注入されるキャリアの面内波数が大きくなったことを示しており、それに伴い励起サブバンドの寿命が短くなり閾値電流密度が増大したと解釈できる。又磁場3 T以下では閾値電流密度は変化しないが、電流密度・光出力のスロープ効率が增加するという特異な振る舞いが観測された(図2)。現在この原因を解析中であるが、レート方程式を用いたモデルでは基底サブバンドからのキャリアの引き抜き効率が面内磁場により増大したことを示している。一方面内垂直方向に磁場を印加すると、面内平行方向に磁場を印加した場合と異なり、磁場0-7 Tの範囲で閾値電流密度の減少が観測された。これはランダウ準位形成により励起サブバンドの寿命が長くなったことに起因すると考えている。

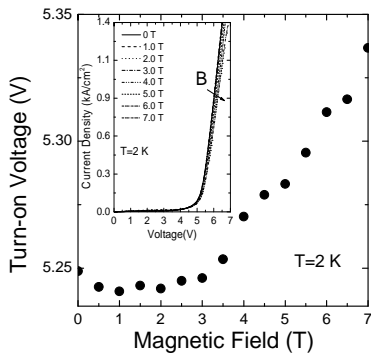


図1 温度2 Kにおけるターンオン電圧の面内磁場依存性

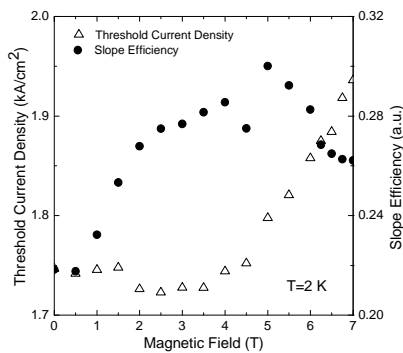


図2 温度2 Kにおける閾値電流密度、及びスロープ効率の面内磁場依存性

(2) テラヘルツ GaAs 量子カスケードレーザの作製と評価

テラヘルツ量子カスケードレーザではサブバンド間のエネルギーが小さいため、構造を作製する際、量子井戸の厚さとその化学組成比を高い精度で制御しなければならない。

我々は反射高エネルギー電子線回折の強度振動を用い、膜厚誤差 1%以内という高い精度でレーザ構造を作製することに成功した。製作したレーザは 3.8 THz で発振し、最大動作温度は 103 K であった(図3)。又励起型縦光学フォノン散乱がレーザ遷移における上位準位の寿命時間を決定しているとするモデルに基づき、閾値電流密度の温度依存性について実験と計算結果の比較を行ったところ、このモデルにより上位準位の寿命時間の温度依存性が高い精度で評価できることがわかった(図4)。次に低閾値電流密度化が期待できる金属導波路構造 GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザを作製した。Au 導波路 GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザで観測された閾値電流密度は 0.8 kA/cm²、最高動作温度は 146 K であった。又種々の金属を用いた金属導波路の導波路損失を計算して、Cu が最も低損失であることを見出し、これを実験的に実証した。

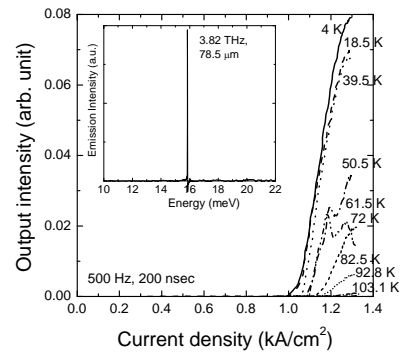


図3 作製した GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザの発振特性

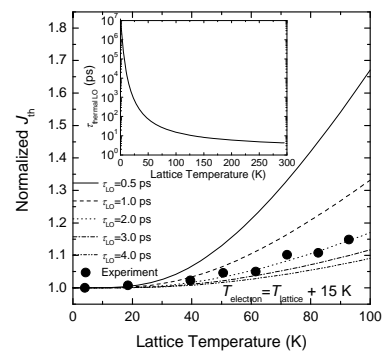


図4 閾値電流密度温度依存性に関するモデルと実験結果の比較

(3) ZnO 量子井戸構造サブバンド間遷移の観測

ZnO/Mg_{0.23}Zn_{0.77}O 量子井戸構造において低温中赤外光電流測定を行ったところ、300~

400 meV のエネルギー領域に光電流ピークが観測された。偏光分解測定の結果、光電流ピークは TM 偏光のみで観測され、サブバンド間光学遷移の選択則と一致した (図 5)。又 ZnO 井戸幅を 3.3 nm から 2.0 nm まで狭くすると、光電流ピークが高エネルギー側にシフトするのを観測した。k-p 摂動法によるサブバンド間エネルギーの計算結果から、観測された光電流ピークは第 1 サブバンドから第 3 サブバンドへの光学遷移によることがわかり (図 6)、サブバンド間光学遷移を観測することに成功した。

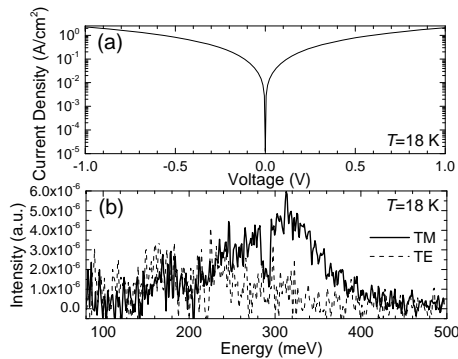


図 5 ZnO 量子井戸構造における (a) 電流電圧特性と (b) 偏光分解光電流スペクトル。

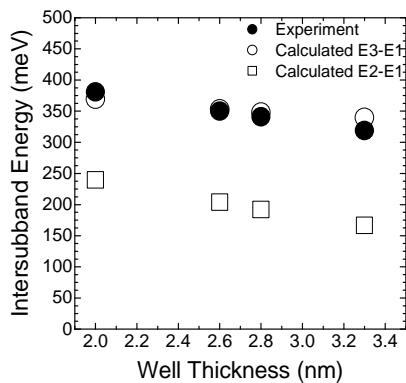


図 6 ZnO 量子井戸におけるサブバンド間エネルギーの計算結果と実験結果の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) K. Ohtani, M. Belmoubarik, and H. Ohno, "Intersubband optical transitions in ZnO-based quantum wells grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, 2176 (2009). (査読有)

(2) Tsung-Tse Lin, Keita Ohtani, and Hideo Ohno, "Thermally activated longitudinal optical phonon scattering of a 3.8 THz GaAs quantum cascade laser", *Applied Physics Express*, Vol. 2, 022102 (2009). (査読有)

(3) M. Belmoubarik, K. Ohtani, and H. Ohno, "Intersubband transitions in ZnO quantum wells", *Applied Physics Letters*, Vol. 92, 191906 (2008). (査読有)

(4) K. Ohtani, H. Ohnishi, and H. Ohno, "Simultaneous lasing of interband and intersubband transitions in InAs/AlSb quantum cascade laser structures", *Applied Physics Letters*, Vol. 92, 041102 (2008). (査読有)

[学会発表] (計 19 件)

(1) 大谷啓太、林宗澤、大野英男、"金属プラズモン導波路構造を有するテラヘルツ量子カスケードレーザ"、第 57 回応用物理学関係連合講演会、東海大学湘南キャンパス、2010 年 3 月 17-20 日

(2) 大谷啓太、林宗澤、大野英男、"金属導波路構造 GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザの発振特性"、応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティテラヘルツ応用システム時限研究会合同研究討論会、秋保リゾート・ホテルクレセント、仙台、2010 年 2 月 25-26 日

(3) K. Ohtani, M. Belmoubarik, and H. Ohno, "Intersubband transitions in ZnO quantum wells", SPIE Photonics West, San Francisco, California, USA, January 23-28, 2010.

(4) K. Ohtani, T. -T. Lin, and H. Ohno, "Terahertz GaAs quantum cascade lasers", 2nd Sweden - Japan Terahertz Symposium, Goteborg, Sweden, November 18-19, 2009.

(5) Tsung-Tse Lin, Keita Ohtani, and Hideo Ohno, "Fabrication of Cu-based metal-metal waveguide GaAs quantum cascade lasers", 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日

(6) K. Ohtani, M. Belmoubarik, and H. Ohno, "Conduction to valence band offset ratio of ZnO/MgZnO quantum wells", The 10th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells", Montreal, Canada, September 6-11, 2009.

(7) K. Ohtani, T. -T. Lin, and H. Ohno, "Fabrication of Copper metal-metal THz waveguide by radio-frequency sputtering method", The 10th International Conference on Intersubband Transitions in Quantum Wells", Montreal, Canada, September 6-11, 2009.

(8) T. T. Lin, K. Ohtani, and H. Ohno, "Fabrication and operation of a metal-metal waveguide GaAs terahertz quantum cascade

laser” 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14), Kobe, Japan, July 19-24, 2009.

(9) K. Ohtani, “InAs quantum cascade lasers: molecular beam epitaxy, current laser performance, and perspective”, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems (NGS²-14), Sendai, Japan, July 13-17, 2009.

(10) K. Ohtani and H. Ohno, “Quantum cascade lasers”, 2nd Japan/German Workshop “Nanolaser Based Optical Sensing, Tokyo, Japan, February 17, 2009.

(11) 大谷啓太、林宗澤、大野英男、“分子線エピタキシによるテラヘルツGaAs量子カスケードレーザの成長”、第38回結晶成長国内学会、仙台市戦災復興記念会館、2008年11月4-6日

(12) Tsung-Tse Lin, Keita Ohtani, and Hideo Ohno, “Temperature dependence of threshold current density of terahertz QCL”, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tsukuba International Congress Center, Japan, September 24-26, 2008.

(13) Tsung-Tse Lin, Keita Ohtani, and Hideo Ohno, “Temperature dependence of threshold current density of terahertz QCL: Comparison with mid-infrared QCL”, International Quantum Cascade Lasers School & Workshop, Monte Verita, Switzerland, September 14-20, 2008.

(14) Keita Ohtani and Hideo Ohno, “Thermal property of an InAs/AlSb quantum cascade laser”, International Quantum Cascade Lasers School & Workshop, Monte Verita, Switzerland, September 14-20, 2008.

(15) K. Ohtani, M. Belmoubarik, and H. Ohno, “Intersubband optical transitions in ZnO-based quantum wells grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy”, The 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, The University of British Columbia, Canada, August 3-8, 2008.

(16) K. Ohtani, and H. Ohno, “Development of mid-infrared and THz quantum cascade lasers at Tohoku University”, International Symposium on Terahertz between Japan and Sweden, May 28-29, 2008.

(17) Tsung-Tse Lin, Keita Ohtani, and Hideo Ohno, “Temperature dependence of threshold current density of terahertz QCL: Comparison with mid-infrared QCL”, 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、日本大学理工学部船橋キャンパス、2008年3月27-30日

(18) 大谷啓太、“テラヘルツ量子カスケードレーザの現状と問題点”、量子エレクトロクス研究会・テラヘルツ電磁波技術研究会合同研究会、上智大学軽井沢セミナーハウス、2008年1月11-12日

(19) K. Ohtani and H. Ohno, “Photocurrent spectroscopy of InAs quantum-cascade laser structures”, 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, Tokyo, Japan, July 23-27, 2007.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：量子カスケードレーザ

発明者：森安嘉貴、大野英男、大谷啓太

権利者：旭化成エレクトロニクス(株)、東北大学

種類：特許

番号：特許出願 2008-026653

出願年月日：2008年2月6日

国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ohno.riec.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 英男 (OHNO HIDEO)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：00152215

(2) 研究分担者

大谷 啓太 (OHTANI KEITA)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40333893

(3) 研究協力者

林 宗澤 (LIN TSUNG-TSE)

東北大学・大学院工学研究科・博士後期課程学生

ベルムバーリック モハマド (BELMOUBARIK MOHAMED)

東北大学・大学院工学研究科・博士前期課程学生

佐藤 啓貴 (SATO HIROKI)

東北大学・工学部情報知能システム総合学科・学部学生