

平成21年 4月25日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18686031

研究課題名（和文） キャリアエネルギーフィルタリング構造装荷半導体レーザ

研究課題名（英文） Semiconductor lasers with carrier energy filter structure

研究代表者

宮本 智之 (MIYAMOTO TOMOYUKI)

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号：70282861

研究成果の概要：

光通信用半導体レーザの性能向上を制限するキャリア注入課題の克服のため、キャリアのエネルギー状態に基づく遷移を制御するエネルギーフィルタリングのためのトンネル注入量子構造とそのレーザ応用を検討した。理論解析から高速動作の設計指針と動作条件を明らかにし、実験的に製作条件検討に基づきレーザ発振を確認することで、本手法の課題を明確化した。また、新規発振特性を見出し、その高速動作応用を提案した。本研究により、新原理に基づく高性能レーザの基礎を築いた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
総計	23,100,000	6,930,000	30,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・機器，高性能レーザー，MBE，エピタキシャル，量子井戸，半導体物性

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザは、長距離通信や光配線等の応用に向け、10Gbpsの直接変調が実用化され、20Gbpsクラスの動作も視野となるなど、いっそうの高速動作や高効率化の高性能化が必要となっている。従来から新材料の開拓による静的な物性制御をもとに動作特性向上が行われてきたが、実際のレーザ動作では、静的物性だけでなく、活性層に注入されるキャリアの時間的な過渡特性も重要である。特に、いっそうの高速動作では、これまで無視でき

た過渡特性であるキャリアのエネルギー状態に基づく遷移が、動作特性の制限要因になると考えられる。このため本研究開始当初において、既に最適化の進められた従来手法の延長では動作特性の大幅な向上は困難であり、この限界を打ち破るためには、その制限要因である「キャリア注入におけるエネルギー状態と遷移の制御」が必要であると考えた。

2. 研究の目的

キャリア注入において重要な、キャリアの

エネルギー状態と遷移の制御には、様々なエネルギーをとるキャリアから、特定の状態を選択的に利用する手段を開拓する必要がある。その機能を持つキャリア注入におけるエネルギーフィルタリング構造として共鳴トンネル構造を用いる「トンネル注入量子構造」を装荷することで、従来手法の限界を打ち破る特性を持つ「トンネル注入レーザー」の構成法の開拓を目指した。特に、本研究においては、理論解析と実験からトンネル注入量子構造のレーザー動作特性への影響を検討し、その課題と限界の明確化により高速動作レーザー実現への指針を解明することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、理論解析および製作手法の開拓と製作した素子の動作特性測定を行った。

(1) 理論解析の方法

理論解析では、2つのモデルを構築し、解析を行った。

1つは、トンネル注入量子構造を通して流れる電流特性を、トンネル透過特性をもとに解析するモデルである。このモデルで、キャリアのエネルギー分布の影響を電流特性というマクロな特性として評価した。解析手法として、印加電圧を考慮したトンネル注入量子構造に伝搬行列法を適用して、トンネル透過電流特性より電流-電圧特性を求めた。

もう一方は、トンネル注入量子構造と活性層の波動関数形状をもとにキャリアの散乱に基づく遷移特性を解析するモデルである。このモデルで、キャリアのエネルギー分布と遷移時間を解析し、レーザー特性への影響評価と構造設計指針の検討を行った。解析手法として、各エネルギー状態ごとの多数のレート方程式をもとに電流-光出力特性を求めた。

(2) 素子製作と特性評価の方法

本研究で形成するトンネル注入量子構造は、1分子層単位の精密な構造制御が必要であり、また、その実現においては、多様な構造の検討が必要と考え、分子ビーム成長法を中心に MOCVD 法も適用して構造形成手法の検討を進めた。構造製作に必要な結晶成長条件について、光学特性を中心とした特性評価をもとに探索を進めた。用いた材料系は GaAs 基板上の GaInAs/AlGaAs を基本とした。レーザー構造の製作では、端面出射型レーザーを形成し、基本的なレーザー発振特性の測定により、試作した構造の評価を行った。

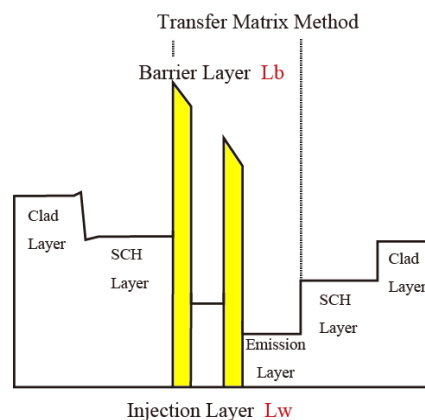


図1 トンネル注入量子構造の解析モデル (トンネル透過電流の解析用モデル.)

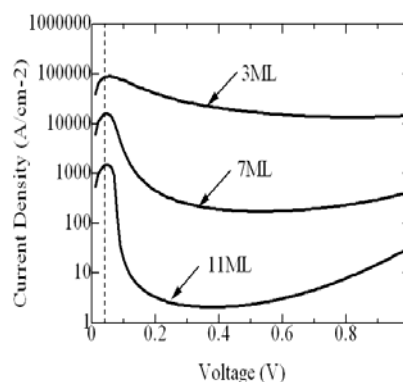


図2 トンネル透過電流-電圧特性の障壁層幅 L_b 依存性

4. 研究成果

(1) トンネル透過電流モデルに基づくトンネル注入レーザーの特異な動作条件の提案

1つ目のモデルによる理論的解析では、図1の共鳴トンネル構造の電流特性について、従来から電子デバイス解析で用いられる手法を適用した。

構造と印加電圧に依存するエネルギー透過スペクトルにより電流が大きく変化し、レーザー動作電流範囲において、印加電圧の大きな変化が必要になる条件が存在することを確認した(図2)。このことは、トンネル注入量子構造の適用で、従来レーザーとは異なる動作条件を生じることになると考え、後述する光出力のキック特性の発現メカニズムとして提案した。

(2) キャリア散乱モデルに基づくキャリアの遷移特性の解明

2つ目のモデルによる理論的解析では、共鳴トンネル構造のキャリアのトンネルを、活性層(発光層)も含めた量子閉じ込め構造に

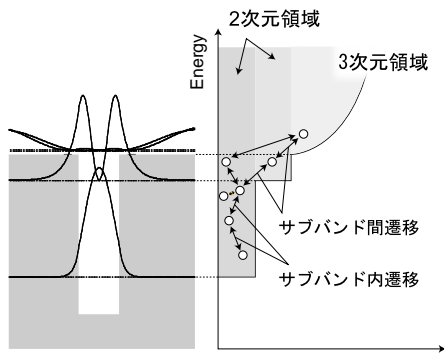


図3 従来量子井戸における上部エネルギーから量子井戸内へのキャリア緩和モデル

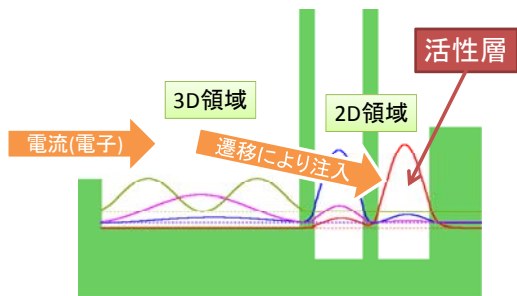


図4 トンネル注入量子構造におけるキャリアの散乱遷移による注入モデル

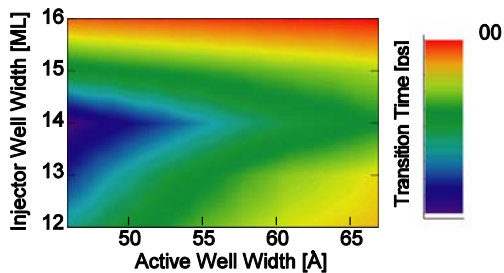


図5 トンネル注入量子構造における構造に対する遷移速度依存性のマップ

存在するエネルギー準位間の遷移に基づくモデルとした。各準位の波動関数をトンネル構造の設計により制御し、これら準位間のキャリア遷移を、光学フォノン散乱を考慮した遷移に基づくとして解析した。

従来量子井戸構造のキャリア注入は図3のモデルで表せる。キャリアは3次元領域に供給され、量子井戸の2次元領域に散乱による緩和で遷移するが、この際の遷移（緩和）時間が遅く、課題になると考えている。

一方、図4のトンネル注入量子構造では、電流として蓄積領域に供給されたキャリアは、トンネル障壁を経て活性層に遷移する。このとき、蓄積領域、トンネル領域及び活性層の間の波動関数の重なりを大きくするようにトンネル注入量子構造を適切に設計することで、キャリアを高速に活性層に遷移

(注入)することが可能になることを明らかにした。(図5)。

(3) キャリア散乱モデルに基づくトンネル注入レーザの静特性の解明

この遷移特性を用いて、半導体レーザの動作特性の数値解析を行った。図6は電流注入量に対する光出力である。ここでは、一般的なレーザ動作条件よりも高注入電流密度となる条件に注目した。この解析結果より、遷移が遅い従来量子井戸レーザでは、電流注入による発振エネルギー状態へのキャリアの補充が間に合わず、光出力が飽和する。一方、トンネル注入レーザでは注入（補充）が早いいため、電流に応じて光出力が増加し、大きな電流まで飽和が見られなくなる可能性を指摘した。

(4) キャリア散乱モデルに基づくトンネル注入レーザの動特性の解明

さらに同様な解析手法をもとに、動特性の解析を行った結果を図7に示す。先の議論の

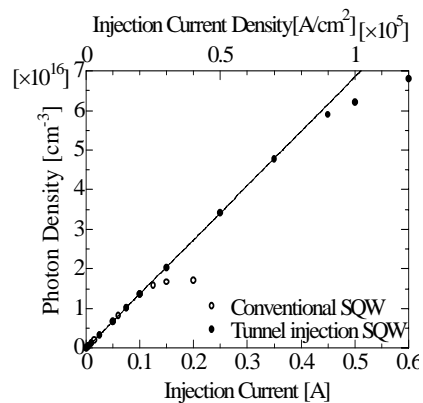


図6 トンネル注入レーザの高注入電流密度における光出力特性の解析結果。

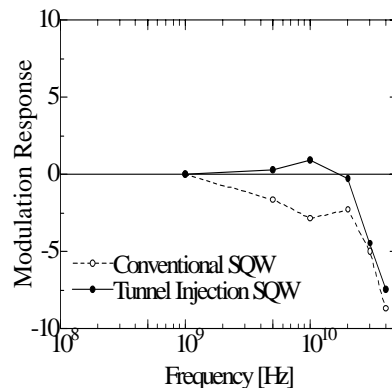


図7 トンネル注入レーザの変調感度特性の解析結果。

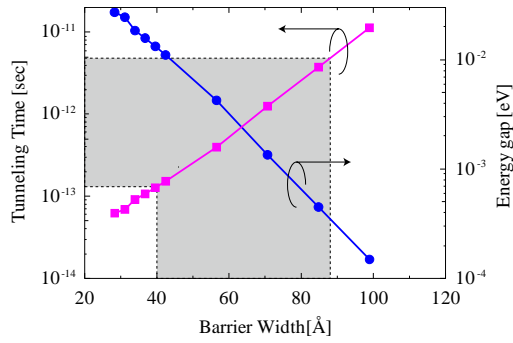


図8 トンネル注入レーザーの多重量子井戸化における障壁層厚の許容範囲

ように、従来レーザーでは遷移の遅さのために変調感度特性が高周波側で落ちているが、トンネル注入レーザーでは、変調感度の低下が高周波側まで生じにくい。さらに高注入動作も可能となることから、より広い変調帯域が可能であることを明らかにした。

(5) トンネル注入レーザー特性向上のための多重量子井戸化条件の解明

半導体レーザーでは多重量子井戸による利得増加でも高速動作化を行うため、トンネル注入レーザーの多重量子井戸化を検討した。

トンネル注入レーザーでは量子井戸間のキャリア遷移も高速化する必要がある。そこで、量子井戸間の障壁層厚さの設計指針を検討した。障壁層が薄い場合は利得スペクトル特性が劣化し、厚い場合は遷移が遅くなる。図8に示す結果より、トンネル注入レーザーにおいても、障壁層幅 40-90 Å と従来の多重量子井戸構造に近い設計で適切に動作できる可能性を示した。

(6) トンネル注入構造によるキャリア遷移速度制御の半導体光増幅器応用の提案

トンネル注入量子構造の応用として、キャリア遷移速度の制御が可能なることから、半導体光増幅器へ適用することを提案した。遷移速度を適切に設計することで、キャリアの蓄積量を制御して、半導体光増幅器のパターン効果が抑制できる可能性を指摘した。

(7) トンネル注入構造形成条件の確立

続いて、実験的な検討の成果を示す。

トンネル注入量子構造の形成では、各種の材料を分子層厚精度で形成する必要がある。本研究で主に検討した、GaInAs と AlGaAs の組み合わせは、良好な特性となる結晶成長温度が両者で大きく異なるため、これらを積層

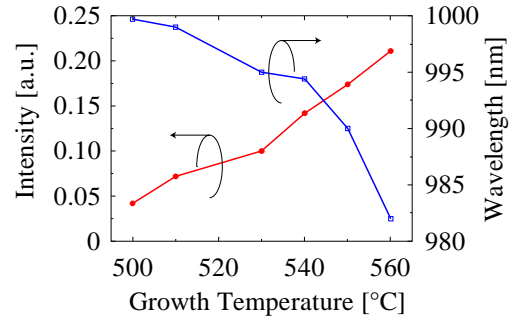


図9 MBE法で形成したトンネル注入量子構造のフォトルミネッセンス特性の成長温度依存性

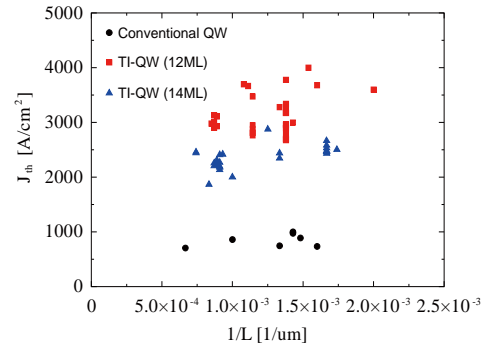


図10 試作したトンネル注入レーザーのしきい値電流特性

しながら適切な結晶特性を維持する形成手法や条件の検討を行った。

図9は、MBE法によりトンネル注入量子構造を連続して形成した場合の成長温度に対するフォトルミネッセンス発光特性である。この結果より、比較的高い温度で成長することで発光効率劣化を抑制できることを明らかにした。ただし、急速に短波長化しており、GaInAsのInの取り込みが困難になっているため、550°C程度が適切と考えた。

このような最適化条件の把握を進め、比較的良好な条件が把握できたと考え、実際のトンネル注入レーザーの試作を行った。

(8) トンネル注入レーザーの発振の実現

図10は、製作したレーザーのしきい値電流の共振器長依存性を示す。トンネル注入量子構造は、通常のレーザーに比べてしきい値が高いという課題を確認した。本質的にしきい値特性に影響を与える可能性もあるが、結晶成長条件の制限がこのような結果に影響している可能性が高く、その形成方法についていっそうの検討が重要であることを指摘した。

レーザー発振は確認できたために、その動作特性の評価を進めた。なお、トンネル注入レーザーの高速変調動作については、しきい値が

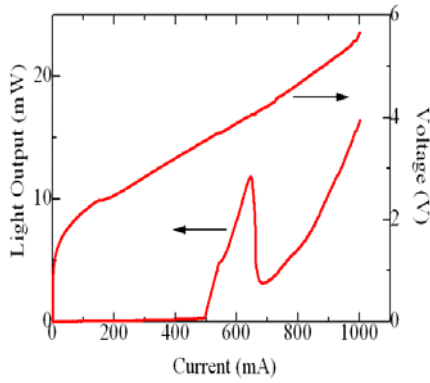


図 11 トンネル注入レーザの電流-光出力特性における、大きな光出力の減少（キンク）

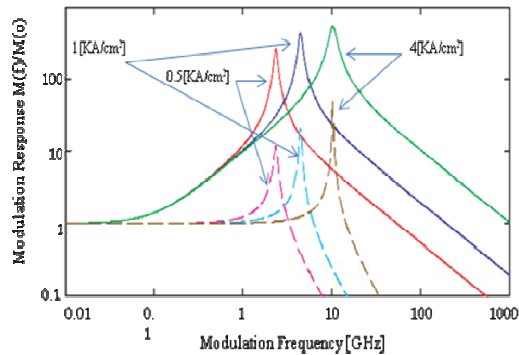


図 12 利得変調の変調感度特性の数値解析結果

高く連続動作が出来ないために評価は行えなかった。したがって、パルス動作測定にもとづく特性の評価のみを行った。

(9) トンネル注入レーザに見られるキンク特性の拡大手法の開拓

図 11 のように、電流-光出力特性の途中で光出力が急峻に減少する特性（キンク）が得られた。このような特異な現象は通常のレーザでは見られないため、トンネル注入レーザに特有といえる。本研究開始以前の基礎的研究の段階において、このような光出力が見られるレーザの存在を確認していたが、本研究においてキンク特性の構造依存性を検討することで、図に示すように、大きなキンクが可能となる条件を明らかにした。

(10) 利得変調を用いた新たな高速変調手法の提案

このキンク特性のメカニズムの解明には到っていないが、既に述べた理論的検討の 1 つ目のモデルによる解釈を行った。キンクが生じる電流において印加電圧が大きく変化し、その結果、トンネル注入量子構造のポテ

ンシャル構造が大きく変化し、レーザの利得特性が変化するというモデルを提示した。このモデルに基づくと、従来の電流変調とは異なる利得変調型の直接変調レーザとして動作する可能性がある。利得変調が可能な場合、図 12 に示すように 100GHz 程度までの高速動作の可能性を指摘した。

(11) トンネル注入レーザの低電力動作のための小型面発光レーザ形成手法の開拓

電流変調のトンネル注入レーザの高速動作には高注入電流密度が必要なため、レーザの微小化により過剰な光出力を抑制する必要がある。本研究では、微小化面発光レーザの実現手法の検討を進めた。特に微小化時に課題となるキャリア拡散の抑制手法として、量子構造混晶化手法を提案した。基礎的製作手法の検討と発振特性評価を進め、量子構造混晶化手法が微小化面発光レーザ製作に有効であることを明らかにした。

本研究をまとめ、結論を述べる。

本研究では、いっそうの高速動作など次世代光源に求められる特性を、キャリアのエネルギー状態と遷移を制御するトンネル注入量子構造を利用して実現する、新しい原理の半導体レーザの基本的実現手法の指針とその課題を明らかにした。

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 2 件)

- ① Yuta Sugawara and Tomoyuki Miyamoto, "Laterally intermixed quantum structure for carrier confinement in vertical-cavity surface-emitting lasers," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 167-168, Jan. 29, 2009. 査読有り
- ② Yasutaka Higa, Tomoyuki Miyamoto, Hiroshi Nakajima, Kosuke Fujimoto, and Fumio Koyama, "Theoretical design of carrier injection rate and recombination rate in tunnel injection quantum well lasers," *phys. stat. sol. (c)*, vol. 5, no. 9, pp. 2838-2840, Jul. 2008. 査読有り

[学会発表] (計 14 件)

- ① 比嘉康貴, 藤本康介, 松崎真也, 宮本智之, "トンネル注入量子井戸レーザの特性向上に関する検討," 第 56 回応用物理

- 学会春季講演会, つくば, 1p-G-5, 2009年4月1日. 査読無し
- ② 松崎真也, 比嘉康貴, 藤本康介, 宮本智之, "半導体レーザーの利得変動動作の特性解析," 第56回応用物理学会春季講演会, つくば, 1p-G-4, 2009年4月1日. 査読無し
- ③ Yasutaka Higa, Hiroshi Nakajima, Kosuke Fujimoto, and Tomoyuki Miyamoto, "Controllable large I-L kink of tunnel injection quantum well lasers," 21st IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC2008), Sorrento, Italy, paper TuC2, Sep. 16, 2008. 査読有り
- ④ 比嘉康貴, 藤本康介, 松崎真也, 小山二三夫, 宮本智之, "トンネル注入量子井戸レーザー構造の製作と基本発振特性の評価," 第69回応用物理学会学術講演会, 愛知, 2a-PI-6, 2008年9月2日. 査読無し
- ⑤ Yasutaka Higa, Hiroshi Nakajima, Kosuke Fujimoto, and Tomoyuki Miyamoto, "Energy relaxation control of injection carriers in tunnel injection quantum well lasers," Opto-Electronics and Communications Conference 2008 (OECC/ACOFT 2008), Sydney, Australia, paper P-68, July 10, 2008. 査読有り
- ⑥ Kosuke Fujimoto, Tomoyuki Miyamoto, Yasutaka Higa, Hiroshi Nakajima, and Fumio Koyama, "Theoretical analysis of high speed semiconductor optical amplifier using tunneling injection structure," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, USA, paper JThA25, May 8, 2008. 査読有り
- ⑦ 比嘉康貴, 宮本智之, 中島浩, 藤本康介, 小山二三夫, "トンネル注入量子井戸レーザーの動特性の理論解析," 第55回応用物理学会春季講演会, 千葉, 29a-ZQ-8, 2008年3月29日. 査読無し
- ⑧ 藤本康介, 宮本智之, 比嘉康貴, 中島浩, 小山二三夫, "トンネル注入構造を用いた半導体光増幅器の理論解析," 第55回応用物理学会春季講演会, 千葉, 29a-ZQ-9, 2008年3月29日. 査読無し
- ⑨ Yasutaka Higa, Tomoyuki Miyamoto, Hiroshi Nakajima, Kosuke Fujimoto, and Fumio Koyama, "Theoretical design of carrier injection rate and recombination rate in tunnel injection quantum well lasers," The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Japan, paper ThC P13, Oct. 18, 2007. 査読有り
- ⑩ 比嘉康貴, 宮本智之, 中島浩, 藤本康介, 小山二三夫, "トンネル注入量子井戸構造におけるキャリアのエネルギー分布の基礎的検討," 第68回応用物理学会秋季講演会, 北海道, 7p-C-7, 2007年9月7日. 査読無し
- ⑪ 中島浩, 宮本智之, 比嘉康貴, 藤本康介, 小山二三夫, "理論解析を基にしたトンネル注入レーザーの発振特性の検討 (II)," 第68回応用物理学会秋季講演会, 北海道, 7p-C-8, 2007年9月7日. 査読無し
- ⑫ Hiroshi Nakajima, Tomoyuki Miyamoto, Takahiro Iwasaki, Yasutaka Higa and Fumio Koyama, "Analysis of large kink mechanism in I-L characteristics of tunnel injection lasers," 12th Optoelectronics and Communications Conference (OECC2007), Yokohama, Japan, paper 13D1-5, July 13, 2007. 査読有り
- ⑬ 比嘉康貴, 宮本智之, 岩崎鷹博, 中島浩, 小山二三夫, "トンネル注入量子井戸レーザーにおけるキャリア遷移特性の構造依存性," 第54回応用物理学会春季講演会, 神奈川, 28p-SG-6, 2007年3月28日. 査読無し
- ⑭ 中島浩, 宮本智之, 岩崎鷹博, 比嘉康貴, 松浦哲也, 小山二三夫, "理論解析を基にしたトンネル注入レーザーの発振特性の検討," 第54回応用物理学会春季講演会, 神奈川, 28p-SG-7, 2007年3月28日. 査読無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 智之 (MIYAMOTO TOMOYUKI)
東京工業大学・精密工学研究所・准教授
研究者番号：70282861

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし