

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月2日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360165

研究課題名（和文） キャリアエネルギー緩和現象制御に基づく半導体光デバイス

研究課題名（英文） Semiconductor Photonic Devices
based on Control of Carrier Energy Relaxation

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（和文）：

キャリアのエネルギー緩和を制御することにより、半導体レーザの直接変調帯域のボトルネックを解決し、高速変調動作を実現するための、量子構造の検討とその最適設計、及び実験的なデバイス製作を行った。提案構造の有効性を理論的に明らかにし、提案構造の試作と動作特性評価からは、高速動作の知見を確認するとともに、具体的な高速動作に向けた課題を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this study is to solve the bottleneck of the direct modulation bandwidth of semiconductor lasers by controlling the energy relaxation of the carrier. The study of quantum structure and device fabrication was carried out. To clarify the theoretical validity of the mechanism, the specific structure was proposed and the theoretical characteristics were investigated. Experimentally, prototype of the proposed laser was fabricated and the fundamental properties and the issues for high-speed operation of lasers were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

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：光通信・光配線・半導体光デバイス・半導体レーザ・量子井戸・半導体物性・キャリア緩和・高速変調

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザや半導体光増幅器などの半導体光デバイスの高性能化は、フォトニックシステムの高度化や新領域展開などに向けて、いっそう重要性が増している。例えば、半導体レーザは高速直接変調光源としてコ

ンピュータやルータの内部配線用に、また、半導体光増幅器はルータなどの高速スイッチングデバイスとして応用展開が拡大しており、高速化や高効率化などの格段の進展が不可欠である。

これまで、デバイスのマクロ構造と量子効

果や結晶歪など物性制御により、半導体光デバイスの特性は大きく進展し、半導体レーザでは40Gbps直接変調が視野に入ってきたが、いっそうの高速化において、活性領域へのキャリア注入において無視できないエネルギー緩和時間が重要な原理的制限となっていた(図1上)。また、半導体光増幅器では、誘導放出現象は高速だが、連続光パルス信号増幅による活性領域内のキャリア枯渇に伴うパターン効果が動作制限要因となっている(図1下)。この場合は、高速すぎる緩和時間が要因となっている。このように、これまで無視あるいは近似的に取り扱ってきたキャリアのエネルギー緩和やキャリアの活性領域注入過程といったキャリアダイナミクス制限により、半導体光デバイスの特性向上は限界に到達しつつあった。

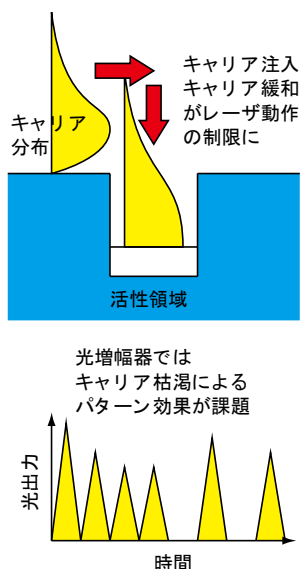


図1 半導体光デバイスの高速動作の課題

2. 研究の目的

光デバイスにおける素子サイズなどのマクロ構造の最適化や、新材料・量子効果などのキャリア状態密度制御といった静的物性制御などの従来手法の延長では、半導体光デバイスの動作特性の格段の向上は困難になっており、新たな原理の導入が不可欠である。そこで本研究は、半導体光デバイスに共通なボトルネックであるキャリア緩和時間あるいは活性層注入過程といった従来は制御や設計対象となっていないキャリアダイナミクスを制御するという、新しいデバイス原理基盤を創出することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、新しい動作原理デバイスの理論的なモデル化と特性解明、および実験的な

試作と特性評価により、従来限界を打ち破る高速動作光デバイスの可能性を探索するため、以下の具体的な研究内容を実施した。

(1) キャリア緩和・注入制御の原理・理論モデル構築と本手法の特性解明を行う。主要な光学フォノン散乱を中心に緩和モデルを構築し、半導体レーザのキャリア注入高速化と半導体光増幅器のキャリア蓄積制御による、高速動作可能性を探求する。

(2) デバイス試作に必要な半導体結晶成長技術の確立を行う。キャリア緩和制御には、量子化エネルギーや波動関数形状の高精度制御が重要であり、GaAs系量子薄膜構造形成技術の確立を、申請者のこれまでの実績をもとに進展させる。

(3) デバイス試作に基づく動作特性の実験的検証と高性能デバイス実現に向けた検討を行う。量子構造およびデバイス構造の試作により、キャリア緩和・注入の制御性について実験的に検証し、設計指針の進展、本手法の課題・限界の明確化を進めるとともに、高速動作デバイスとして実証を目指した。

4. 研究成果

本研究期間において以下の成果を得た。

(1) キャリア緩和・注入制御の原理・理論モデル構築と本手法の特性解明に関しては、キャリア緩和特性を個々のエネルギー状態に基づき考慮した光デバイス動作解析モデルについて、従来構築のものから数値解析精度改善などを進めた。まず、図2(a)の従来提案のトンネル注入構造と図2(b)の新たに提案したGaInAs系トンネル構造の特性解析を進めた。その結果、図3に示すように、半導体レーザの高出力化が可能となり、変調の帯域拡大が可能であることを指摘した。

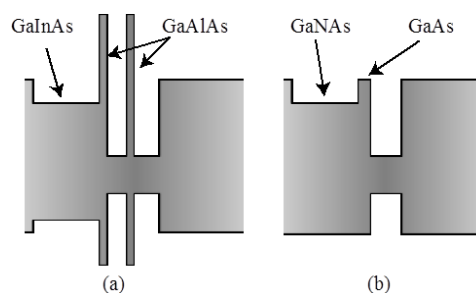


図2 キャリアの緩和過程制御構造、(a) トンネル注入構造 (b) GaInAsを用いた構造

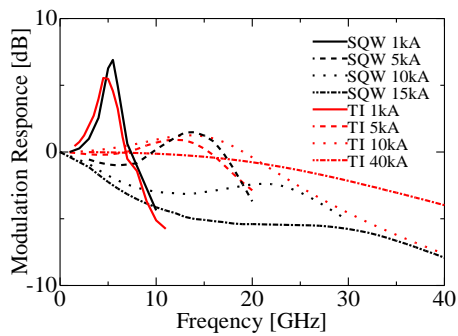
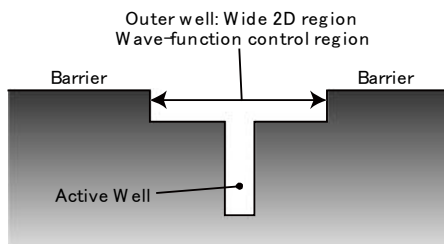
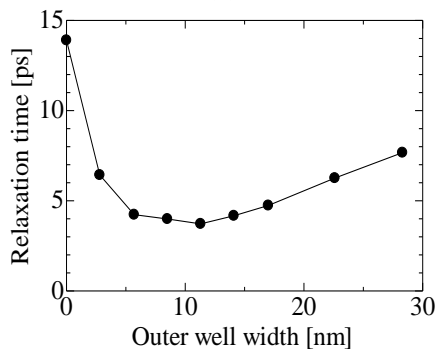


図3 キャリアの緩和過程制御構造導入による変調帯域の拡大

また、新たに図4 (a)に示す Well-in-well (WWell) 構造を提案した。この構造はトンネル構造と機能的に同等の特徴を持ちながら、製作性や発展性に優れる構造である。本構造における外側井戸幅に対するキャリア緩和速度の依存性を図4 (b)に示す。さらに、この WWell 構造の活性井戸を図5 (a)のように外側井戸の中心からシフトすることでより高速な緩和が可能になる (図5 (b))。

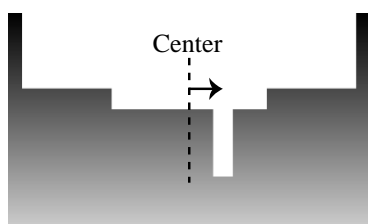


(a)



(b)

図4 Well-in-well 構造, (a)伝導帯ポテンシャル構造, (b)キャリア遷移時間の解析結果



(a)

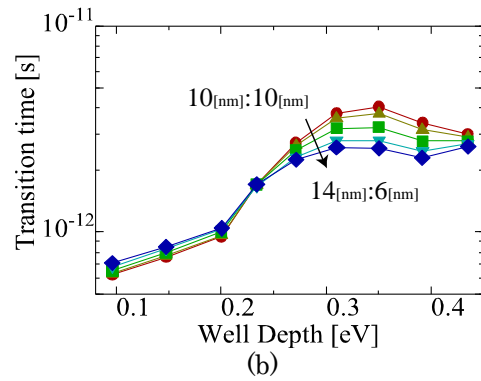


図5 シフト WWell 構造, (a)ポテンシャル構造, (b)緩和時間のシフト量依存性

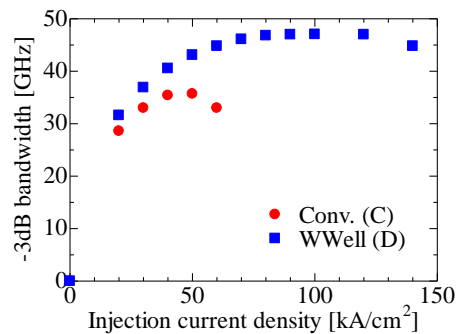


図6 WWell 構造レーザの変調帯域特性

以上のように量子構造を適切に設計することでキャリアのエネルギー緩和を早めることを確認し、これをもとに変調特性を数値解析により評価した。結果として、図6に示すように、小信号応答の-3dB 帯域として、10-15GHz もの増加が可能であることを明らかにした。なお、より高速動作のための井戸数増加や励起準位利用も提案し、その有効性を数値解析から明らかにするとともに、緩和制御による相対雑音強度の理論検討を進め、基本的特徴を明らかにしている。

一方、半導体光増幅器については、信号出力に生じるパターン効果を抑制する構造としてトンネル注入構造を適用することを提案し、その数値解析モデルを構築するとともに、構造に対する特性を解析し、図7 (a), (b)に示すように従来構造に比べ、高出力時の波形劣化抑制に有効であることを示した。また、図7 (c)に示すようにキャリアの蓄積と遷移の関係性を数値解析により明らかにした。

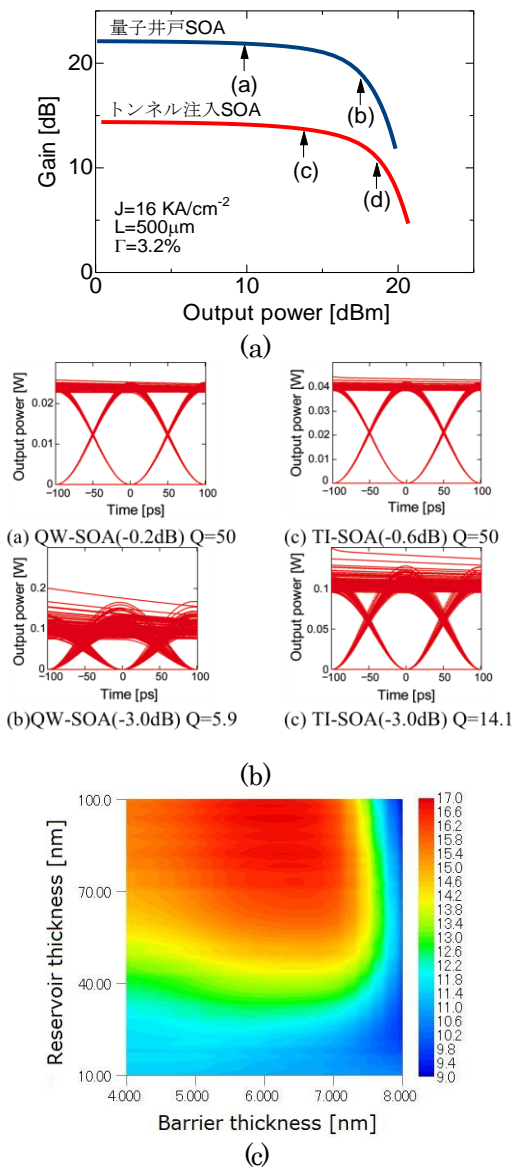


図7 トンネル注入SOAの解析結果, (a)利得飽和特性, (b)各点におけるアイパターン, (c)動特性のキャリアの蓄積と遷移の条件依存性

また、基本動作評価に向けて、製作が容易な構造として、緩和速度制御はできないがキャリア蓄積効果の得られる図8(a)に示す低バンドギャップ構造について解析を行い、図8(b)に示すように数値解析から高速動作化への有効性を確認した。

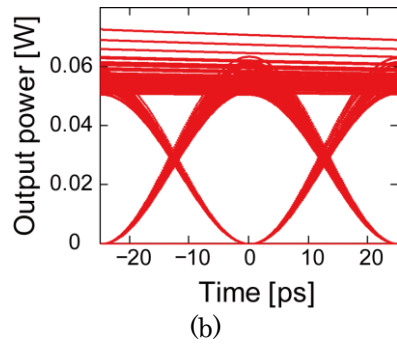
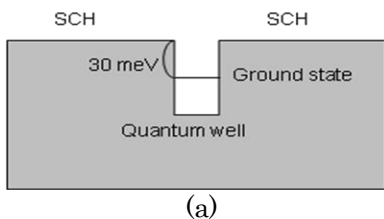


図8 低バンドギャップSOA構造, (a)伝導帯ポテンシャル構造, (b)アイパターンの数値解析結果

(2) デバイス試作に必要な半導体結晶成長技術の確立としては、デバイス製作可能な条件においてこれまでのトンネル構造結晶成長条件を、より高品質化するための条件探索を進めた。得られた条件を用い、共鳴トンネル構造、Well-in-well構造、低バンドギャップ構造のデバイス結晶成長を行った。

(3) デバイス試作に基づく動作特性の実験的検証と高性能デバイス実現に向けた検討として、まずレーザについては、成長したトンネル注入構造レーザウェハを用いてワイドストライプ構造レーザを製作し、トンネル注入構造レーザの基本動作が可能であることを確認した。ただし、その構造から結晶を高品質にしにくく、しきい値の増加がみられ、製作条件のひっさうの検討が必要であることを指摘した。

また、WWell構造について1.5-2 μm 幅狭リッジ構造レーザ製作条件を検討し、従来量子井戸と遜色ないしきい値電流特性となることを確認し、さらに、動特性に関連する評価として、図9(a), (b)に示す相対雑音強度スペクトル特性、および、小信号周波数応答を評価した。結果として、相対雑音強度から、WWell構造では大きな雑音強度が得られる傾向がみられ、緩和制御が行われている可能性を得たものの、正確な解釈には詳細な理論検討が必要と結論づけた。小信号応答では、発熱により十分な変調帯域が得られていないことを確認し、キャリア緩和の確認および高速変調動作には、発熱の抑制と放熱の改善が必要であることを指摘した。

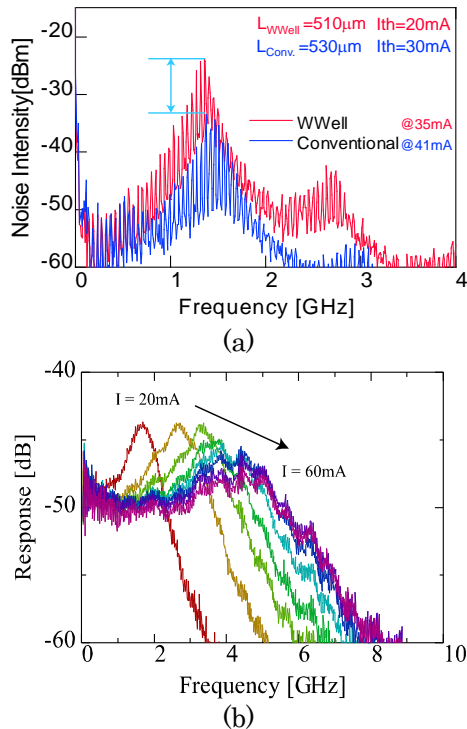


図9 WWell 構造レーザ, (a)相対雑音強度スペクトル特性, (b)小信号周波数応答特性

一方, SOA に関しては, 低バンドギャップ構造の SOA を製作し, 発光特性評価から図 10 (a) のように自然放出光の増幅とみられる光出力特性を観測するとともに, 図 10 (b) のようにそのスペクトル評価から光閉じ込め層へのキャリア蓄積を確認した.

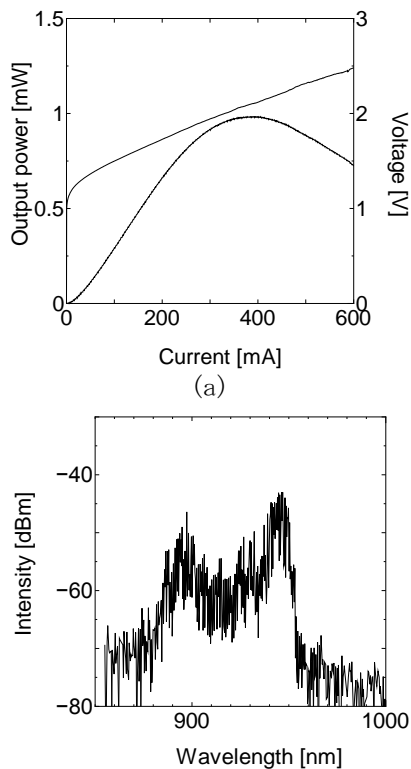


図 10 低バンド半導体光増幅器の特性評価, (a) I-L 特性, (b) スペクトル測定

以上, 本研究において, 理論面においてはキャリアの緩和や注入を制御する手法を提案し, 半導体レーザおよび半導体光増幅器の高速化を詳細に検討し, 実験面においてはデバイス製作と評価まで実施した. 実験的な高速動作の検証には至っていないが, 理論検討も含め, 適切なデバイス製作とその動作条件を実現することで, その有効性を実証するための基礎を確立できたものと信じている.

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 Yasutaka Higa, Mikio Sorimachi, Takuya Nishinome, and Tomoyuki Miyamoto, "Well-in-well structure for high speed carrier relaxation into quantum well," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 080209.
- ② Yasutaka Higa, Hiroshi Nakajima, Mikio Sorimachi, and Tomoyuki Miyamoto, "Large kink characteristics in light output of tunnel injection quantum well lasers," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 080205.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 反町幹夫, 半導体光増幅器におけるキャリアの蓄積と遷移の影響解明, 電子情報通信学会 2012 総合大会, 2012. 3. 21, 岡山大.
- ② 岩崎創, キャリア緩和制御構造レーザの高微分利得化に関する検討, 電子情報通信学会 2012 総合大会, 2012. 3. 21, 岡山大 (岡山県).
- ③ 比嘉康貴, キャリア緩和を制御する直接変調レーザの高速動作設計, 電子情報通信学会 2012 総合大会 (招待講演), 2012. 3. 20, 岡山大.
- ④ 比嘉康貴, Well-in-Well 量子井戸レーザの動特性に関する検討, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), 2011. 12. 16, 機械振興会館 (東京).
- ⑤ Mikio Sorimachi, Numerical analysis of gain saturation characteristics of semiconductor optical amplifier using tunnel injection structure, 17th Microoptics Conference (MOC2011), 2011. 11. 1, 仙台国際センター.

- ⑥ Yasutaka Higa, The Reduction of Dumping Factor at Well-in-Well Quantum Well Lasers, IEEE Photonics 2011Conference (IPC2011), 2011.10.11, Arlington (USA) .
- ⑦ 西野目卓弥, WWell 活性層レーザの製作とRIN特性の評価, 2011年電子情報通信学会通信ソサエティ大会, 2011.9.14, 北海道大学.
- ⑧ 比嘉康貴, Well-in-Well 構造を用いたレーザの高速変調動作解析, 2011年電子情報通信学会通信ソサエティ大会, 2011.9.14, 北海道大学.
- ⑨ 反町幹夫, 数値解析によるトンネル注入 SOA の利得飽和特性の評価, 2011年電子情報通信学会通信ソサエティ大会, 2011.9.13, 北海道大学.
- ⑩ Yasutaka Higa, Control of carrier relaxation for suppression of optical gain damping by using Well-in-Well structure, 12th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD2012), 2011.9.7, Rome (Italy) .
- ⑪ 比嘉康貴, Well-in-Well 量子井戸レーザの相対雑音強度特性, 第71回応用物理学学会学術講演会, 2011.9.1, 山形大.
- ⑫ 反町 幹夫, 数値解析によるトンネル注入 SOA の動作特性の解明, 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011.3.27, 神奈川工科大学.
- ⑬ 比嘉 康貴, Well-in-Well 量子井戸レーザの製作と測定(I), 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011.3.26, 神奈川工科大学.
- ⑭ 比嘉 康貴, Well-in-Well 構造による高速直接変調量子井戸レーザの検討, 電子情報通信学会 2011 総合大会, 2011.3.16, 東京都市大学.
- ⑮ 比嘉 康貴, 変形トンネル注入構造としての Well-in-Well 量子井戸構造の電子緩和解析, 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010.9.16, 長崎大学.
- ⑯ Mikio Sorimachi, Numerical simulation of dynamic properties of high speed SOA with a tunnel injection structure, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2010.5.18, San Jose (USA).
- ⑰ 反町幹夫, 数値解析によるトンネル注入 SOA の動特性の構造依存性, 電子情報通信学会 2010 総合大会, 2010年3月18日, 東北大学
- ⑱ 比嘉康貴, GaNAs トンネル注入量子井戸レーザの設計及び動作解析, 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月19日, 東海大.

- ⑲ 反町幹夫, トンネル注入 SOA の数値解析による動作メカニズムとデバイス特性の解明, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2010年1月29日, 京都大学
- ⑳ 比嘉康貴, トンネル注入量子井戸レーザの動特性の理論解析 (II), 第70回応用物理学学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山大.

〔その他〕
ホームページ等

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 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：