

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2013～2016
課題番号：25709026
研究課題名(和文) 長波長帯トランジスタレーザ特性制御手法の確立と新世代ネットワークへの適応性実証

研究課題名(英文) Investigation of Characteristics Control Method for Long-wavelength Transistor Lasers and Demonstration of their Adaptability to Next Generation Network

研究代表者
西山 伸彦 (Nobuhiko, Nishiyama)
東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80447531
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来におけるネットワークの高速化に対応するため、従来の半導体レーザの限界を超える直接変調レーザの実現が求められている。この回答として長波長帯トランジスタレーザの高性能化とその高速性能を明らかにすることを目的として研究を行った。
理論検討によって、電圧変調方式のトランジスタレーザで、従来問題であった素子の寄生容量を低減するための設計指針を明らかにし、実際に作製した半絶縁基板上1.3μm帯トランジスタレーザにおいて、静特性の向上と理論通りの動特性の改善効果を確認し、理論検討の有効性を明らかにした。
これにより、ネットワークの高速化に対応可能な性能を実現できる見通しを示した。

研究成果の概要(英文)：To adapt the increase of the bandwidth for future photonic networks, it is expected to realize direct modulated lasers which have faster modulation bandwidth beyond conventional semiconductor lasers.
First, by theoretical discussion, design guidelines to reduce the parasitic capacitance of transistor lasers, which were a big issue for conventional transistor lasers, were established. And in actual fabrication, better static characteristics and dynamic characteristics, which agreed with the theoretical calculation, were demonstrated. Therefore, this proved the effectiveness of the theoretical discussion in this project.
Because of these results, outlook and ways to realize transistor lasers with enough performances for future high speed network are shown.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザ InP トランジスタレーザ フォトニックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信をバックボーンとするインターネット通信量は、スマートフォン端末の増加により益々増加しており、今後も末端回線通信の爆発的な需要が予想された。その中で、低消費電力で高速な光源を求める要求は常に強い。しかし、最も低消費電力になるはずの直接変調(レーザ駆動電流を変調し光強度を変える)半導体レーザは速度限界を迎えつつあり、電界吸収型外部変調器を集積したレーザに高速通信は依存している。そこで申請者は、長波長(1.3μm)帯トランジスタレーザの提案と性能の実証を通して、従来のデバイスを越える新デバイスの創造に挑戦していた。

半導体レーザは一般的には pn 接合を有しているため、「レーザダイオード」と呼ばれる。一方、活性層近傍にベース領域を有する pnp あるいは npn 接合からなる半導体レーザが「トランジスタレーザ」であり、申請者は、これまでに AlGaInAs 量子井戸埋め込み構造を利用したトランジスタレーザ構造(図1)を提案し、いち早くその実現に取り組み、昨年世界で初めてとなる 1.3μm 帯トランジスタレーザの室温連続発振・トランジスタ動作を達成した。

このように、実験・理論の両面から申請者により研究が行われてきたが、発振動作を達成した次のステップとして、理論通りの性能の発現を実際のデバイスによって目指す段階へ進む。

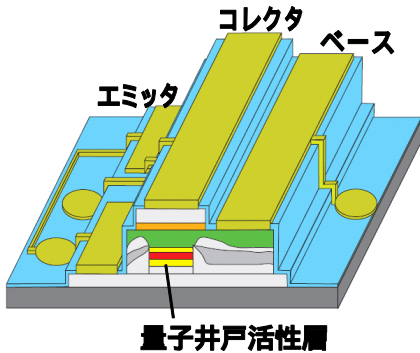


図1 長波長帯トランジスタレーザ

2. 研究の目的

レーザダイオードを超える高速動作と多端子動作が期待される長波長(1.3μm)帯 AlGaInAs/InP トランジスタレーザ(以下 TL と略す)の高性能化を達成し、変調特性の測定を通して、将来の通信網への適応可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成することを目指し、特にトランジスタレーザ特有の電圧変調動作に注目し、以下の4つの項目について検討を進

めた。

- (1) 電圧変調による高速動作に向けた TL の理論解析
- (2) 半絶縁性基板上 TL の作成プロセスの検討
- (3) 半絶縁性基板上 TL の静特性評価
- (4) 半絶縁性基板上 TL の動特性評価

次章にてそれぞれについて、概要をまとめる。

4. 研究成果

(1) 電圧変調による高速動作に向けた TL の理論解析

まず、TL の等価回路モデルを立て、高周波解析シミュレータを用いて「電気」の観点から理論解析を行い、従来、変調動作が得られていない原因の究明や反射の抑制、高速変調に向けた設計指針の検討を行った。図2に TL の等価回路モデルを示す。

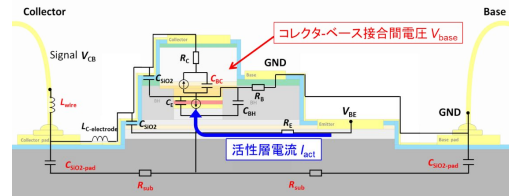


図2 トランジスタレーザ等価回路

素子部分に加え、ボンディングワイヤーのインダクタンスや電極下部の SiO₂ の容量などを考慮したモデルとしている。高周波において影響が大きい構造パラメータを赤字で示すが、特に電極パッド下部 SiO₂ の容量 C_{SiO₂-pad} は現状の変調特性に一番影響を及ぼすパラメータとなっている。これを用いて反射特性の理論解析を行った。また、電圧変調動作では、一定電流を注入して発光させ、コレクタ-ベース電圧を印加して光出力を制御するため、活性層に入る電流 I_{act}、コレクタ-ベース接合間にかかる電圧 V_{base} の二つのパラメータが光出力に直接影響する。そこで、これらのパラメータの過渡応答を計算することで、光出力が不安定になっている原因の究明を行った。図3に等価回路モデルによる反射特性を示す。コレクタ-ベース接合容量 C_{BC}、ワイヤーインダクタンス L_{wire} を変化させて計算を行うことで、反射特性の傾向を示している。n-InP 基板においては、C_{BC}L_{wire} の値を変化させても反射特性に改善効果がないが、これは電極パッド下部 SiO₂ の容量の影響が支配的であることが原因である。一方、半絶縁性基板では、電極パッド下部 SiO₂ および半導体の影響を無視する事ができるため、C_{BC}L_{wire} の削減で反射特性が大幅に改善していることが確認できる。従って、反射低減に向けまず半絶縁性基板の導入が必要であり、加えて C_{BC}L_{wire} の両方の削減が必要であることを明らかにした。

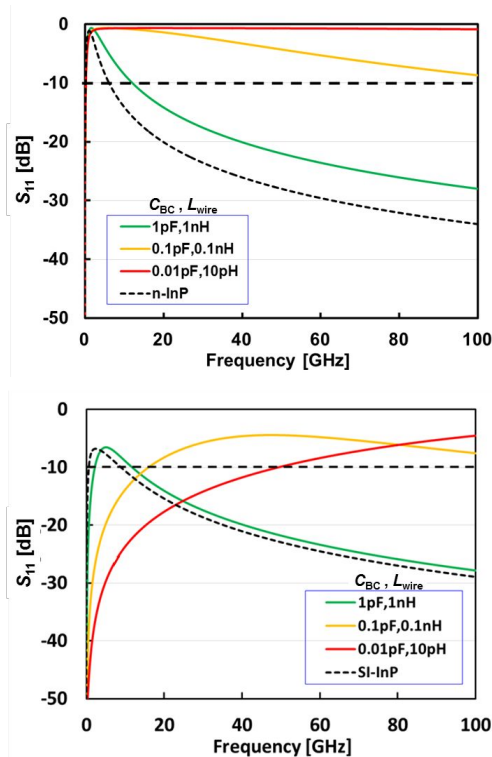


図3 反射特性の構造パラメータ依存性 (上) n-InP 基板 (下) 半絶縁性 InP 基板

変調用サブマウントをボンディングワイヤーの長さが短くなるように変更することで、 L_{wire} を 2.0 nH から 0.2 nH と 1/10 に削減、またコレクタ層のドーピング濃度を $N_C = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ に変更することで、 C_{BC} を 3.9 pF から 1.7 pF 程度まで改善できる。また、共振器長を 100 μm まで短共振器長化することで、さらに 0.34 pF まで削減可能であることが期待でき、 $S_{11} = -10 \text{ dB}$ (反射 10%) になる時の周波数が 170 MHz から 42 GHz まで、 S_{11} の最大値 $S_{11,MAX}$ の値は -1.1 dB (反射 78%) から -8.5 dB (反射 14%) までの改善が期待できるという結果を得た。また、過渡解析では仮にフリップチップボンディングを導入し、コレクタメサ幅を 2.0 μm まで縮小することが可能であれば 50 GHz

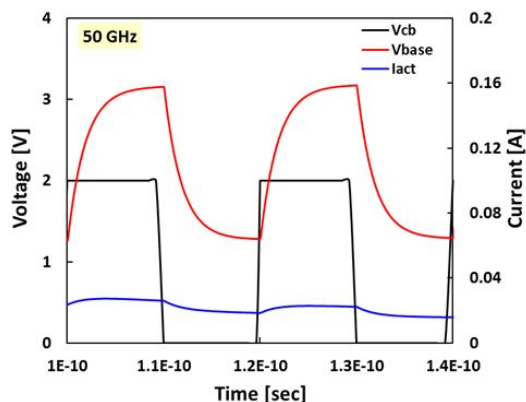


図4 最適構造での過渡応答 見積もり

までの動作が期待できるという結果を得た (図4)

(2)半絶縁性基板上 TL の作成プロセスの検討

前述したように、TL の高速変調に向けて半絶縁性基板上に TL の作製を行う必要があり、従来の n-InP 基板から半絶縁性基板に変更するにあたり、素子構造の検討、作製プロセスの検討を行った。従来構造では、n-InP 基板上に作製しており裏面電極からエミッタ電流注入を行っているが、半絶縁性基板に変更した場合は、裏面電極からの電流注入が不可能になってしまう。そこで、図5に示すように上面にエミッタ電極を形成し、エミッタメサを形成することで活性層への電流注入が可能となる。エミッタメサの n-InP 上に確実に電極のコンタクトをとるため、n-GaInAsP のエッチストップ層を導入している。また、新構造においては発振特性を向上させるため、電極を金メッキすることで放熱性を向上させ、熱抵抗の低減を図っている。図6に作製した素子の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示すが、エミッタメサの形成が確認でき、良好な埋め込みヘテロ構造が形成されており半絶縁性基板上 TL を実現した。

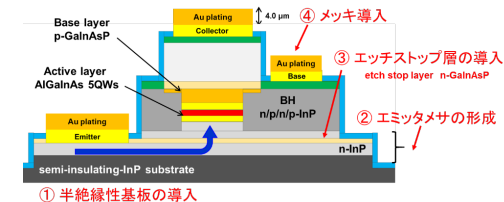


図5 半絶縁性基板上レーザ構造

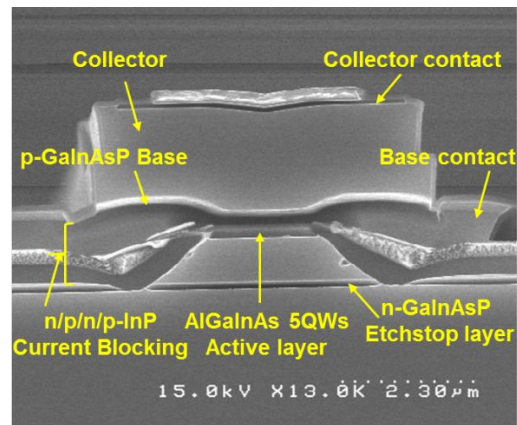


図6 断面 SEM 写真

(3)半絶縁性基板上 TL の静特性評価

作製した半絶縁性基板上トランジスタレーザの3端子静特性に関して評価を行った。図7にベース接地におけるエミッタ電流 (I_E) - 光出力、コレクタ電流特性を示す。コレクタベース電圧 $V_{CB} = 0V$ において、しきい値電流

33 mA, 外部微分量子効率 14% が得られた。また、 V_{CB} の増加に伴い光出力が減少しており、 V_{CB} による光出力制御を確認した。今回作製した素子はベース層膜厚が 100 nm でバンドギャップが 1.15 eV の素子であるが、外部微分量子効率の共振器長依存性から内部量子効率 30%、導波路損失 12.7 cm^{-1} が見積もられた。次にエミッタ接地トランジスタ特性を図 8 に示す。この特性から電流増幅率 $\beta (=I_C/I_B)$ は約 0.3 が得られ、先行研究における $\beta=0.14$ の 2 倍の向上に成功した。

先行研究では GaInAsP ベース層のバンドギャップが 1.19 eV であり今回作製した素子では 1.15 eV であるため、ベース層のバンド障壁が抑制されたため、コレクタへキャリアが流れやすくなり、コレクタ電流が増加し電流増幅率が向上したと考えられる。

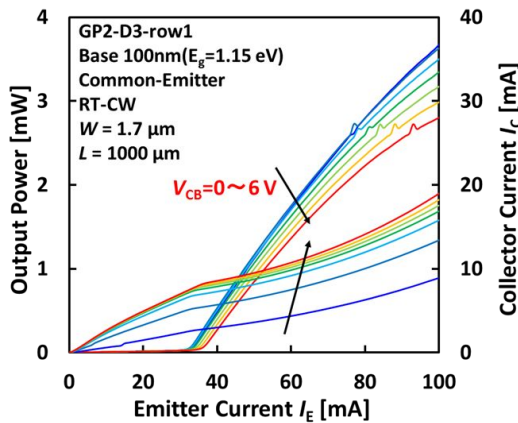


図7 作製したトランジスタレーザのエミッタ電流(I_E)-光出力、コレクタ電流特性

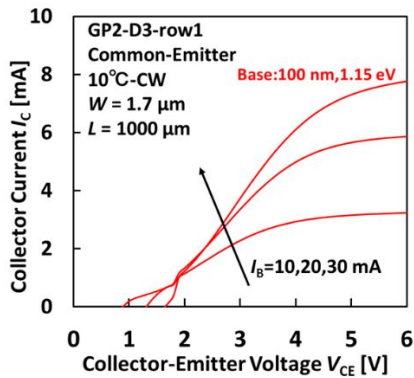


図8 エミッタ接地トランジスタ特性

次に、メッキを導入した素子の発振特性を図 9 に示す。

メッキを導入した素子ではしきい電流が 31 mA → 21mA の低減、外部微分量子効率の 9.6% → 17.1% への向上が確認された。

これは、メッキ導入により放熱性が向上し、発熱による発振特性への影響が抑制されたと考えられる。また、熱抵抗は 140 K/W から 110 K/W まで低減しており、メッキ導入による熱抵抗の低減を実現した。

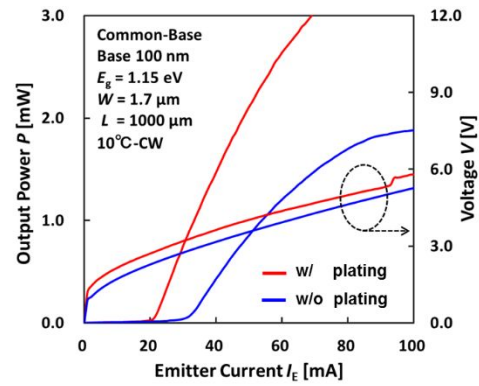


図9 発振特性 メッキ比較

(4) 半絶縁性基板上 TL の動特性評価

トランジスタレーザの電圧変調を行いその動特性の評価を行った。図 10 に反射特性の先行研究との比較を示す。実線が実験結果であり、点線が等価回路モデルによる理論計算である。半絶縁性基板の導入により S_{11} が -10 dB になる周波数が 500 MHz から 1.3 GHz までの改善を確認した。これらの改善は理論で予測される通りであり、反射特性の理論解析と同様の傾向が得られた。今後はこれに加えて、前述したワイヤー、素子構造の変更により、高周波特性を向上できる見通しを得た。

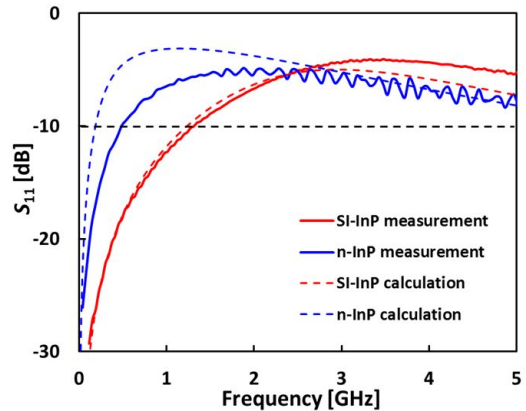


図10 反射特性
(青線) n-InP 基板 TL (赤線) S.I-InP 基板 TL

まとめ

長波長帯トランジスタレーザについて、静特性の向上と、電圧変調方式による広帯域動作に向けた理論的検討と実証を行った。理論的な構造設計指針を明らかにするとともに、金属メッキの導入、半絶縁性基板の導入によって、静特性、動特性ともに従来に比べ改善できることが分かり、理論どおりの特性向上を得たことから、今後の素子性能向上への見通しを明確化することができた。

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 4 件)

- [1] N. Sato, M. Shirao, T. Sato, M. Yukinari, N. Nishiyama, T. Amemiya, S. Arai, "Design and Characterization of AlGaInAs/InP Buried Heterostructure Transistor Lasers Emitting at 1.3- μ m Wavelength," IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., Vol. 19, No. 4, p. 1502608, Jul. 2013. [査読有り]
- [2] N. Sato, M. Shirao, T. Sato, M. Yukinari, N. Nishiyama, T. Amemiya, S. Arai, "Room-Temperature Continuous-Wave Operation of npn-AlGaInAs Transistor Laser Emitting at 1.3- μ m Wavelength," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 25, No. 8, pp. 728-730, Feb. 2013. [査読有り]
- [3] M. Yukinari, N. Sato, N. Nishiyama, S. Arai, "Spectral characteristics of a 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP transistor laser under various operating conditions," IEICE Electronics Express., Vol. 11, No. 18, pp. 1-6., Aug. 2014. [査読有り]
- [4] T. Kaneko, T. Yoshida, S. Tadano, N. Nishiyama, S. Arai, "Improvement in the current-gain of a 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP transistor laser using a thin p-GaInAsP base layer," Jpn. J. of Applied Physics, Vol. 55, No. 7, pp.070301-1-070301-4, Jun. 2016. [査読有り]

〔学会発表〕(計 21 件)

- [1] M. Yukinari, N. Sato, N. Nishiyama, S. Arai, "Spectral Characteristics under Various Operation Conditions of 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), ThK2-2, Kyoto, Jul. 2013.
- [2] T. Kaneko, T. Yoshida, S. Tadano, N. Nishiyama, S. Arai, "Dynamic Behavior of 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Lasers under Collector-Base Voltage Loss-modulation," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015), No. 26J2-2, Busan, Aug. 2015.
- [3] T. Kaneko, T. Yoshida, S. Tadano, N. Nishiyama, S. Arai, "Lasing Characteristics of 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser," Compound Semiconductor Week 2015, 27th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials., No. O6.4, California, Jun. 2015.

- [4] S. Tadano, T. Kaneko, K. Yamanaka, N. Nishiyama, S. Arai, "Analysis of Voltage Dependence on Lasing Characteristics of 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Lasers," The 28th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), No. ThD1-6, Toyama, Jun. 2016.

他 17 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 伸彦 (NISHIYAMA, Nobuhiko)

東京工業大学・工学院電気電子系・准教授

研究者番号: 80447531

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし