

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13961

研究課題名(和文)100Gb/s動作直接変調半導体レーザ光源実現へ向けた挑戦

研究課題名(英文)Challenge to realize a 100Gb/s directly modulated semiconductor laser

研究代表者

八坂 洋(YASAKA, Hiroshi)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：50509099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：外部共振器を導入することで発振光と帰還光の共鳴効果を誘起した半導体レーザ光源の超高速動作を実現するために、共振器損失変調法と注入電流変調法を同時に作用させる混合変調法を提案し、半導体レーザへ適用することで変調特性制御を実現した。本変調法により高周波数領域の変調感度劣化が低減できることを明らかにした。また本変調法を適用することで信号光の周波数チャープ制御を実現し、光ファイバ伝搬時の分散耐性の向上を図ることに成功した。さらに、本知見を基に100Gb/s動作可能な半導体レーザ光源の設計指針を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To realize ultra-high speed operation of semiconductor laser monolithically integrating with external cavity, hybrid modulation scheme is proposed which introduces cavity loss modulation and injection current modulation to a semiconductor laser simultaneously. It was confirmed numerically and experimentally that the frequency response of intensity modulation can be controlled and modulation sensitivity degradation at high frequency region can be reduced by applying the hybrid modulation scheme to the laser. It was also confirmed that the hybrid modulation scheme is also effective to control the frequency chirp of optical signal and enhance the dispersion tolerance in optical fiber transmission. Based on these results, the design principle for ultra-high speed semiconductor laser operating up to 100 Gb/s was made clear.

研究分野：高機能半導体レーザ光源や高機能半導体光集積回路を実現する半導体フォトリソ工学分野

キーワード：半導体レーザ 直接変調 相互利得変調 共振器損失変調 混合変調 周波数チャープ 外部共振器

1. 研究開始当初の背景

情報端末の普及に伴い、情報を蓄積し通信するデータセンタ内およびデータセンタ間のトラフィックが膨大な量となっている。このデータ通信容量の爆発的な増加に対応するために、適用されるイーサネット技術の通信容量も増大を続けている。現在 400GbE の標準化が進んでいるが、その光インターフェースでは、基本的な伝送速度は 50Gb/s 以下にとどまっている[1]。これは、半導体レーザ光源の動作速度が 50Gb/s 以下に制限されているため、コンパクトで低コストな高速光インターフェースを実現するためには 100Gb/s 以上の速度で動作可能な超高速半導体レーザ光源の実現が必要不可欠であった。

2. 研究の目的

未だ実現されていない 100Gb/s 動作可能な超高速直接変調半導体レーザ光源を実現することにある。本光源実現に向けて、半導体レーザの応答特性制御技術の確立および光源構成設計論の確立を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

高速動作可能な半導体レーザ光源の実現を目指して、外部共振器構造を集積することで外部共振器からの帰還光とレーザ発振光の相互作用(光子共鳴効果)を導入し、特定の変調周波数での感度を増強して帯域拡大を図るパッシブフィードバックレーザが報告されている[2]。本手法を用いて大幅な帯域拡大を実現するために問題となるのが、図 1(a)に示す直接変調レーザの応答特性となる。

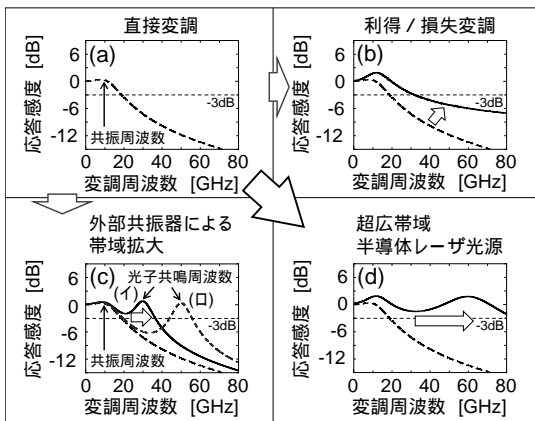


図 1 半導体レーザ応答帯域拡大技術

直接変調レーザの変調感度は、緩和振動周波数以上の高周波数側で急激に低下する。このために、光子共鳴効果による感度増強周波数(光子共鳴周波数)を高くしすぎると、図 1(c)に示すように光子共鳴周波数と緩和振動周波数の中間周波数帯での応答感度が低減し、平坦な応答特性を実現できなくなってしまう。光子共鳴効果を帯域拡大に効果的に用いるためには図 1(b)に示すように半導体レーザの高周波領域における応答感度劣化を低

減できるブレイクスルー技術となる変調法を導入する必要がある。これにより図 1(d)に示す超広帯域な動作の実現が期待できる。本研究では、高周波数変調領域の応答感度劣化を低減する変調法として、相互利得変調法と共振器損失変調法を採用する。報告者は、半導体レーザの発振モード利得を光信号で変調する相互利得変調法により高周波数領域の変調感度が改善できることを明らかにしている。この変調法を光子共鳴効果を導入した半導体レーザに適用することで、応答帯域の飛躍的な増加が可能であることを実証する。帯域実測には光変調器による高次変調波発生および光ドメインでの高調波サイドバンド強度測定の手法を用いる。また、電気 RF 信号で動作可能な半導体レーザ光源を実現するために、発振モード利得変調と同様の作用が期待できる共振器損失変調法を導入し、その有効性を実証する。

4. 研究成果

(1)相互利得変調法を用いた外部共振器集積型半導体レーザの構造図を図 2 に示す。集積した外部共振器は電圧印加で屈折率を調整できる位相調整部と光導波路部により構成した。

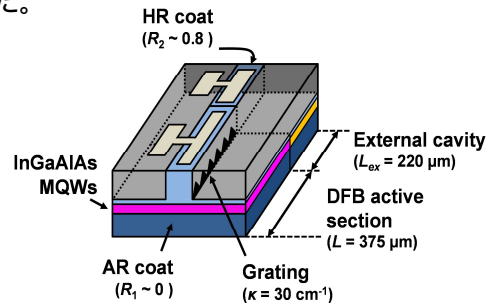


図 2 素子構造

光変調器により強度変調した信号光を DFB レーザ部へ入力することで相互利得変調を実現した。応答特性の測定結果を図 3(a)に示す。外部共振器内の位相調整部への印加電圧を最適化することで 59GHz の 3dB 帯域が確認できた。図 3(b)に示すように、本実験結果は数値解析結果ともよく合致しており、相互利得変調法による半導体レーザの強度変調時の高周波数領域の感度劣化改善が帯域拡大に大きく寄与していることが実証できた。

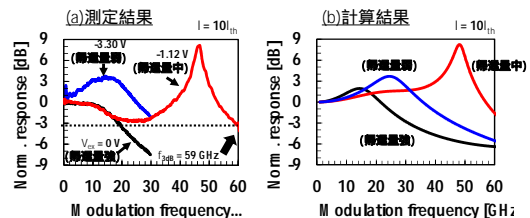


図 3 素子応答特性

また、当初目標としていた 70GHz 以上の 3dB 帯域が達成できなかった原因を数値解析を通して検証し、今回の試作素子の位相変調部では損失と屈折率の独立した制御ができず

最適条件での動作ができなかったためであることを明らかにした。両者を独立に制御可能な素子構造を採用することで、さらなる帯域拡大が可能であることを数値解析で明らかにした。

(2)続いて、電気 RF 信号で動作可能な超高速半導体レーザを実現するために、発振モード利得変調と等価な動作が期待できる共振器損失変調法の検討を進めた。半導体レーザの共振器中に損失変調領域を設けた光源素子の構造設計、動作特性の数値解析および試作素子の特性評価を通して高周波数領域での感度劣化改善が可能であることを明らかにした(図4)。しかし緩和振動周波数での感度が高く、光デジタル信号の発生には適用が困難であることが明らかとなった。

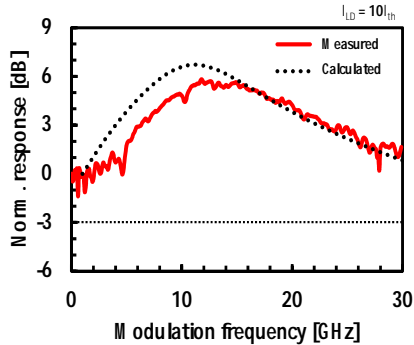


図4 共振器損失変調時の応答特性

(3)当初予想していなかった上記共振器損失変調法の問題点を解決するために、注入電流変調を併用する混合変調法を新たに提案し、その有効性を数値解析および試作素子の特性評価実験を通して実証した。素子構造を図5に示す。新たに提案した混合変調法では、高周波数領域での感度劣化が改善された共振器損失変調と低周波数領域で平坦な周波数応答特性を有する注入電流変調を同時に作用することで広帯域な応答特性を実現した。また両変調の比率(η)を制御することで応答特性制御が行えることを明らかにした(図6)。

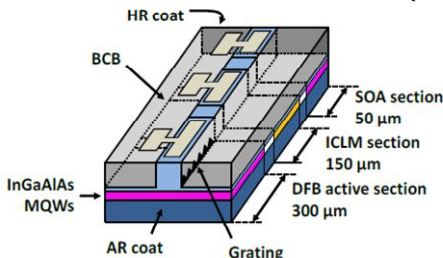


図5 混合変調レーザの構造

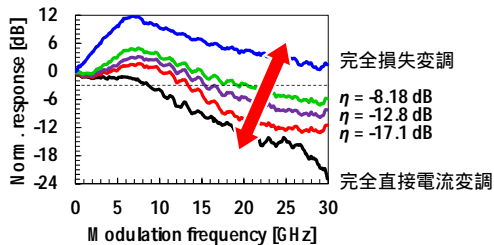


図6 混合変調時の応答特性

加えて、図7に示すように両変調に遅延を与え時間差を最適化することで、緩和振動の抑制された応答特性が実現できることを数値解析および実験で実証した。

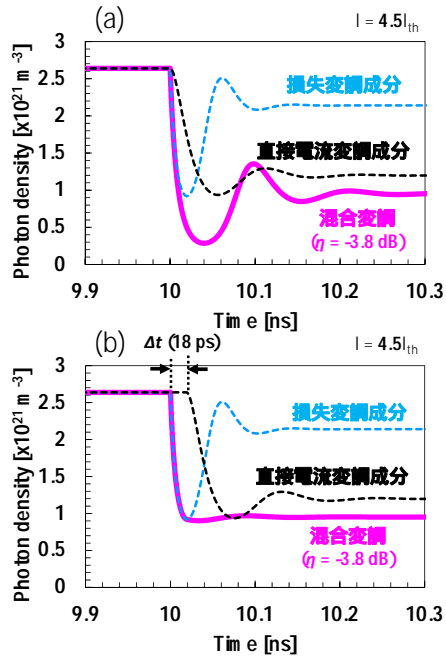


図7 混合変調時のステップ応答
(a)変調信号の時間差無し
(b) 時間差あり

また、混合変調法においては注入電流変調時に問題となっていた出力光の周波数チャープの制御が同時に達成できることを明らかにした。これは半導体レーザによって生成した高速光デジタル信号の光ファイバ分散に対する耐性を大幅に向上する技術として有用であり、計画段階では想定していなかった興味深く、かつ非常に重要な知見である。これらの成果は国内外で高く評価され、国際会議および国内会議で招待講演を依頼されたほか、学会発表に対して2016年度電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティレーザ量子エレクトロニクス研究会(LQE)奨励賞が授与されている。

さらに、研究遂行で得られた知見を基に数値解析を進め、混合変調法を導入した外部共振器集積型半導体レーザ光源で、100Gb/s NRZ 光デジタル信号発生が可能であることを明らかにした。

<引用文献>

[1] John D'Ambrosia, IEEE P802.3bs Baseline Summary, 2015
 [2] J. Kreissl, V. Vercesi, U. Troppenz, T. Gaertner, W. Wenisch, and M. Schell, Up to 40-Gb/s Directly Modulated Laser Operating at Low Driving Current: Buried-Heterostructure Passive Feedback Laser (BH-PFL), IEEE Photon. Technol. Lett., 24(5), 2012, 362-364

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3件)

S. Mieda, N. Yokota, R. Isshiki, W. Kobayashi, and H. Yasaka, Frequency response control of semiconductor laser by using hybrid modulation scheme, Optics Express, 査読有、24巻、2016、25824-25831 DOI:10.1364/OE.24.025824

S. Mieda, N. Yokota, W. Kobayashi, and H. Yasaka, Ultra-Wide-Bandwidth Optically-Controlled DFB Laser with External Cavity, IEEE Journal of Quantum Electronics, 査読有、52巻、2016、2200107 DOI:10.1109/JQE.2016.2557489

S. Mieda, S. Shiratori, N. Yokota, W. Kobayashi, and H. Yasaka, Intra-cavity Loss Modulation for Ultra-High-Speed Direct Modulation Lasers Based on Photon-Photon Resonance, Applied Physics Express, 査読有、8巻、2015、082701 DOI:10.7567/APEX.8.082701

[学会発表](計9件)

八坂 洋 他、混合変調法による半導体レーザーの変調特性制御(依頼講演)、2016年電子情報通信学会総合大会、2017年3月22日-3月25日、名城大学(愛知県・名古屋市)

H. Yasaka 他、Tailoring of Semiconductor Laser's Frequency Response by Hybrid Modulation Scheme, The 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2016)、2016年9月12日-9月15日、Kobe Meriken Park Oriental Hotel (Hyogo, Japan)

H. Yasaka 他、Transmission Performance Improvement of Semiconductor Lasers by Hybrid Modulation Scheme, The 28th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2016)、2016年6月26日-6月30日、Toyama International Conference Center (Toyama, Japan)

八坂 洋 他、共振器損失変調領域を集積した分布帰還型半導体レーザーの変調特性制御、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) 2016年06月17日、機械振興会館(東京都・港区)

H. Yasaka 他、Ultra-high-speed semiconductor light source for

next-generation optical communication system (招待講演)、The 2016 Energy Materials Nanotechnology (EMN) Beijing Meeting、2016年4月22日-4月25日、Beijing (China)

八坂 洋 他、混合変調による直接変調レーザーの変調特性制御実験、2016年電子情報通信学会総合大会、2016年3月15日-3月18日、九州大学(福岡県・福岡市)

八坂 洋 他、混合変調による半導体レーザーの周波数応答特性改善、2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2015年9月8日-9月11日、東北大学(宮城県・仙台市)

八坂 洋 他、共振器内部損失変調による半導体レーザーの帯域拡大、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) 2015年08月27日~08月28日、青森県観光物産館アスパム(青森県・青森市)

H. Yasaka 他、Gently-sloped Small Signal Response by Intra-cavity Loss Modulation, The 20th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2015)、2015年06月28日~07月02日、Shanghai (China)

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称:半導体レーザー光源
発明者:小林亘、八坂洋
権利者:日本電信電話(株)、東北大学
種類:特許
番号:特開 2017-017077(特願 2015-129329)
出願年月日:2015年06月26日
国内外の別:国内

[その他]

ホームページ等
東北大学電気通信研究所八坂研究室ホームページ
<http://www.yasaka.riec.tohoku.ac.jp/publication.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

八坂 洋 (YASAKA, Hiroshi)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号:50509099

(4)研究協力者

三枝 慈 (MIEDA, Shigeru)