

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02185

研究課題名(和文) 広帯域低位相雑音半導体レーザー光源実現への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to realize wide frequency range low phase noise semiconductor lasers

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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：全共振器長が595 μmの混合変調半導体レーザーが80 GHzに迫る(-78 GHz)応答帯域を有することを実証した。本混合変調半導体レーザーに光負帰還法を適用して位相雑音低減を行うことで、位相雑音低減帯域が1桁程度拡大できることを明らかにした。また、混合変調半導体レーザーの共振器長短尺化で、小信号E/O応答帯域を130 GHz以上に拡大でき、100 Gbit/s NRZ信号による動的単一モード動作が可能であることを数値解析で明らかにした。さらに、狭線幅光負帰還半導体レーザー光源のFMCW方式LiDARシステムへの適用性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

簡便な構成で半導体レーザーの発振スペクトル線幅の狭窄化(位相雑音低減)が可能な光負帰還法と周波数変調帯域の拡大が可能な混合変調半導体レーザーを組み合わせることで広帯域位相雑音低減を実現した半導体レーザー光源が実現できることを明確にしたことは学術的意義の高い成果である。また実現困難とされてきたサブTbit/s NRZ信号で動的単一モード動作可能な半導体レーザーの実現可能性を明確化したことも学術的意義の高い成果である。本成果によってコンパクトで超高速動作可能な半導体レーザーを安価に提供できる可能性があり、光通信システムのコスト低減へ大きく貢献できる等、社会的意義の高い成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：It is confirmed experimentally that the hybrid modulation semiconductor laser with cavity length of 595 μm has wide modulation bandwidth close to 80 GHz. It is also confirmed that phase noise reduction bandwidth can enlarge almost one order of magnitude by applying optical negative feedback method to the hybrid modulation semiconductor laser. It is shown numerically that the E/O modulation bandwidth of the hybrid modulation laser can enlarge up to 130 GHz and dynamic single mode operation with 100 Gbit/s NRZ signal can be realized by shortening the cavity length. It is also shown that the optical negative feedback semiconductor laser can improve the system performance of FMCW-LiDAR thanks to the laser's narrow spectral linewidth and ability of direct frequency modulation by injection current.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー 狭線幅 高速変調 周波数雑音 位相雑音 光負帰還

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光通信システムや光計測システムでは、小型で低消費電力特性に優れる半導体レーザが適用されているが、その共振器特性（quality factor: Q値）の低さ故に発振光のスペクトル純度は高くない。このため、次世代デジタルコヒーレント光通信システムや高精度光計測システムの機能の飛躍的向上を目指して半導体レーザのスペクトル純度向上（狭スペクトル線幅化）の研究が進められている。

従来の狭線幅半導体レーザは、半導体レーザの外部にミラーや高性能光フィルタによって構成される外部共振器を増設することで共振器のQ値を増加し、スペクトル線幅の低減を図っていた^[1-4]。しかし、本手法では長い外部共振器の付与が不可欠となり、光源の肥大化が問題となる。また、外部共振器モードに起因した周波数雑音が発生するため^[4]、システム応用にはこの雑音の除去が不可欠となるという問題があった。

レーザ共振器特性の改善によらずに小型な超狭線幅半導体レーザ光源を実現する手法として、申請者は光負帰還法と呼ぶ新奇な光源構成技術を提案し、簡便な光源構成で単一モード半導体レーザのスペクトル線幅を低減することに成功していた。しかし、光負帰還法は帰還光による半導体レーザの周波数変調を原理としているため、位相雑音低減可能な周波数帯域は使用する半導体レーザの周波数応答帯域で制限されていた。このため、光負帰還法の適用による広帯域低位相雑音半導体レーザ光源の実現および位相余裕を十分確保した安定動作のためには、数十GHzの周波数変調帯域を有する超高速半導体レーザ光源の実現が不可欠であった。

申請者は、半導体レーザの応答速度を向上する新奇技術として単一モード半導体レーザの注入電流と共振器内部損失を同時に変調する混合変調方式を採用した半導体レーザを提案しており、本半導体レーザ光源の広帯域応答特性の実証と、光負帰還法による狭線幅半導体レーザ光源への適用性を明らかにすることが急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、現状の半導体レーザの応答速度限界を打破する新奇混合変調技術の実証、および超高速半導体レーザ光源と新奇なスペクトル線幅低減技術である光負帰還法を融合することによる広帯域低位相雑音半導体レーザ光源の実現を目的とした。外部共振器導入による光子共鳴（photon-photon resonance: PPR）効果誘起技術と申請者が考案した混合変調法の融合をブレイクスルー技術とした100 GHz以上の応答帯域を有する直接変調半導体レーザ光源を世界に先駆けて実現し、本レーザ光源に申請者が考案した光負帰還技術を適用することで数十GHzの広周波数領域にわたって位相雑音を低減した小型な超狭線幅半導体レーザ光源の実現を目的とした。

3. 研究の方法

広帯域位相雑音低減半導体レーザ光源の実現に向け、図1に示す活性領域への注入電流と共振器内部損失を同時に変調可能な混合変調レーザの高速動作特性の実証を進める。

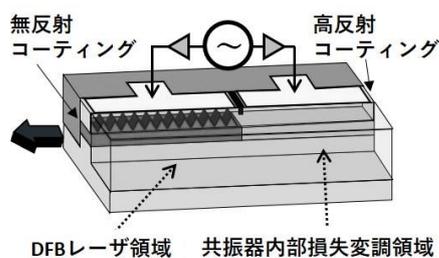


図1 混合変調半導体レーザの構造図

本半導体レーザ光源では共振器内部損失変調領域は外部共振器構造としても作用し、変調応答特性での緩和振動ピークに続く第2の応答感度ピークの発出に貢献する。この応答感度ピークは光子共鳴（PPR）効果と呼ばれる原理によって発出する^[5]。

本混合変調半導体レーザの応答特性を実測するとともに数値解析を通して本半導体レーザの応答特性の解明を進める。数値解析では、混合変調半導体レーザの共振器内部の発振モード電界強度分布とキャリア密度分布がその応答特性に大きく影響することから、時間領域スプリットステップフーリエ法を導入

した結合波方程式による数値解析手法を用いる^[6]。

さらに光負帰還法による半導体レーザの発振スペクトル線幅（位相雑音）低減の実証実験を並行して進め、本位相雑音低減方式の原理解明と特性改善を図っていく。本検討を進め、広帯域応答特性を有する混合変調半導体レーザへ光負帰還法を適用することで広帯域な位相雑音低減が実現できることを実証する。

4. 研究成果

(1) 混合変調半導体レーザの応答特性と光負帰還狭線幅半導体レーザ光源への適用：

DFBレーザ領域長を375 μm 、共振器内部損失変調（ICLM）領域長を220 μm とした混合変調半導体レーザの応答帯域の数値解析結果を図2に示す。素子長を上記のように設定することでPPR効果による第2の応答感度ピークを65 GHz程度に設定でき、保有する実験系（評価可能帯域：80 GHz）で確認可能な周波数帯域に発出できることが確認できた。また-3 dB帯域として80 GHz前後が実現できる可能性が確認できた。

本数値解析手法および結果の妥当性を確認するために、図1の光源構成においてDFBレーザ

領域長を 375 μm 、共振器内部損失変調 (ICLM) 領域長を 220 μm とした光源を作製し、光学的応答帯域測定系を用いて光源の応答帯域の評価を行った結果を図 3 に示す。測定結果から、変調周波数 10 GHz あたりに緩和振動による応答感度ピークと 65 GHz 付近に PPR 効果による第 2 の応答感度ピークが観測され、数値解析によって示されたとおり PPR 効果によって応答帯域拡大が実現できていることが確認できた。共振器内部損失変調領域へ印加する逆バイアス電圧を増加して共振器内部損失変調振幅を大きくすることで PPR 効果による応答感度ピークの感度を増大でき、共振器内部損失変調の効果による高周波変調領域の感度増加によって 80 GHz に迫る -3 dB 帯域が実現できることが実証できた。

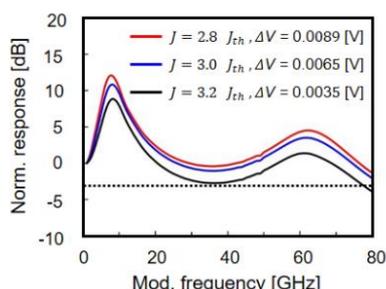


図2 混合変調半導体レーザの周波数応答特性(数値解析結果)

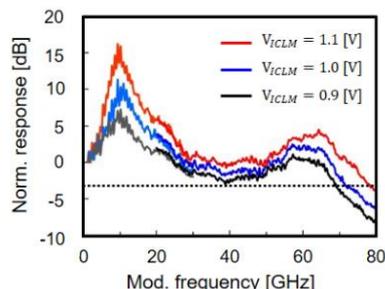


図3 混合変調半導体レーザの周波数応答特性(実測結果)

本混合変調半導体レーザに光負帰還を施すことによる位相雑音低減の検証を行った。光源構成は、混合変調半導体レーザとファブリペロエタロンをレンズで結合した簡便な構成となっている。DFB レーザ領域長を 375 μm 、共振器内部損失変調 (ICLM) 領域長を 220 μm とした混合変調半導体レーザの発振光を変調して自身へ帰還した際の周波数変調応答特性の数値解析結果を図 4 に示す。

20 GHz あたりに感度低減領域があるものの、50 GHz 付近まで応答感度があることが確認できた。本素子に反射率 98%、共振器長 2 mm (透過帯域幅 185 MHz) のエタロンを用いて光負帰還を施した際の周波数雑音パワースペクトル密度低減量の雑音周波数依存性を数値解析によって求めた。結果を図 5 に示す。従来の DFB レーザでの位相雑音最大低減帯域 (全低減帯域) が 70 MHz (7 GHz) であったもの^[7]を 1 GHz (50 GHz) にまで拡大できる可能性があることを明らかにした。またその際の最大周波数雑音パワースペクトル密度低減量は -40 dB と見積もられ、発振スペクトル線幅低減量として 1/10,000 が期待できることも確認できた。

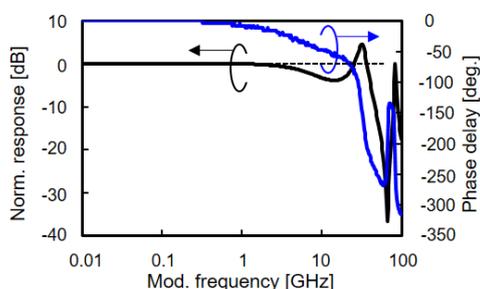


図4 混合変調半導体レーザのコヒーレント光注入時の周波数変調特性

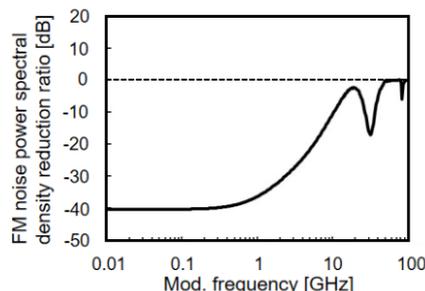


図5 周波数雑音低減特性

(2) 混合変調半導体レーザの高速動的単一モード動作 :

共振器長短尺化による混合変調半導体レーザのさらなる高速化に挑戦した。半導体レーザ光源をデータ通信システム等に適用するには大振幅デジタル信号での変調が不可欠で、また大振幅デジタル信号変調時でも単一モード動作 (動的単一モード動作) する必要がある。本検証では短共振器化による混合変調半導体レーザの高速化と高速動的単一モード動作の可能性を追究した。

短共振器混合変調半導体レーザは DFB レーザ領域長が 100 μm 、共振器内部損失変調領域長が 50 μm とした。本構造素子の応答特性および 100 Gbit/s NRZ 信号による動的単一モード動作の数値解析による検証を行った。図 6 に本混合変調半導体レーザ光源の小信号 E/O 応答特性の数値解析結果を示す。130 GHz 以上の -3 dB 帯域が実現できることが確認できた。

100 Gbit/s NRZ 信号による動的単一モード動作の検証では、発振モードの安定性を考慮することにより、大振幅デジタル信号による変調時の発振モードの伝搬定数を逐次求めることで考察を行った。発振モードの伝搬定数を逐次求め、伝搬定数が隣接モードへホップすることのない最大の変調信号振幅を印加した際の強度変調信号波形 (アイ波形) を求めた。結果を図 7 に示す。混合変調動作を導入することで、100 Gbit/s NRZ 信号による大振幅変調時において、単一モード動作しながらも良好なアイ開口が得られることが確認できた。最適動作条件下では、3.5 dB 以上の中心のアイ開口部消光比が得られることも確認できた。

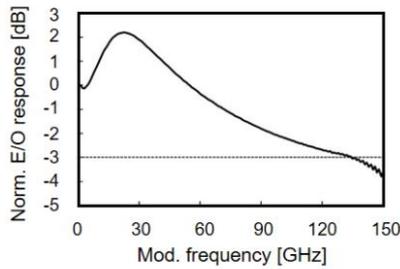


図6 短共振器混合変調半導体レーザの小信号E/O応答特性

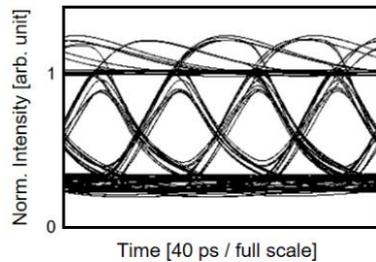


図7 短共振器混合変調半導体レーザの100 Gbit/s 動的単一モード動作

(3) 光負帰還狭線幅半導体レーザ光源の長距離測距システムへの応用：

近年、光学的測距技術として LiDAR (Light detection and ranging) が注目されている。本技術は空間分解能が高いという特徴を有し、自動車の自動運転技術への適用が検討されている。特に受光感度の点で有利な FMCW (frequency-modulated continuous-wave) 方式の LiDAR システムが注目されている。本方式では、レーザ光を三角波形状に周波数変調し、そのターゲットからの反射光と参照光とを干渉させることで生じるビート信号をコヒーレント検波してそのビート周波数から距離を算出する。このため、長距離の測距を可能とするために発振スペクトル線幅の狭いコンパクトで低コストな半導体レーザ光源が必要不可欠となる。本光源として本研究課題で取り上げた光負帰還狭線幅半導体レーザを適用することを考え、本半導体レーザの長距離測距システムへの適用性を検証した。システム構成および実験系を図 8 に示す。

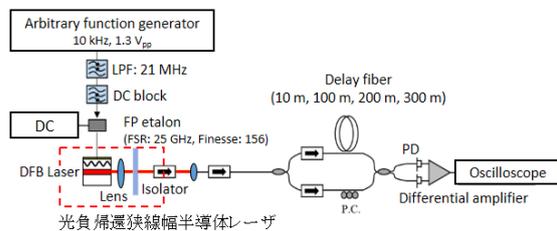


図8 光負帰還狭線幅半導体レーザを用いた長距離測距システム(FMCW LiDAR)

周波数変調を施した光負帰還狭線幅半導体レーザ光源からの出力光を被測定物体を模擬した遅延光ファイバ(Delay fiber) と参照光とする経路に 2 分割し、両者をコヒーレント検波することでビート信号を得る。コストを抑えるためには周波数変調を行うために外部光変調器を使うことは難しく、半導体レーザ光源の注入電流を変調することによる発振光の直接周波数変調を実現することが必要となる。本検討では、光負帰還を施して狭線幅化した半導体レーザ光源の直接周波数変調の可否と FMCW

LiDAR システムへの適用性を明らかにした。

光負帰還状態の半導体レーザは周波数雑音を低減していることから、周波数変調を施すことが難しいと考えられたが、検討の結果 (図 9)、光負帰還によって周波数雑音パワースペクトル密度をフリーランの青線で示したものを赤線で示したものへ低減することに成功し (換算線幅： ~ 2 kHz)、周波数変調時も雑音低減状態が保持できることが確認できた (図中の黒線)。

遅延ファイバー長を変化した際に得られたビートスペクトルを図 10 に示す。遅延ファイバ 300 m (空気中での換算往復距離：450 m) においても 30 dB 以上の高い信号対雑音比 (SNR) を有するビートスペクトルが得られることを実証でき、光負帰還狭線幅半導体レーザ光源の FMCW LiDAR システムへの適用性の高さを実証できた。

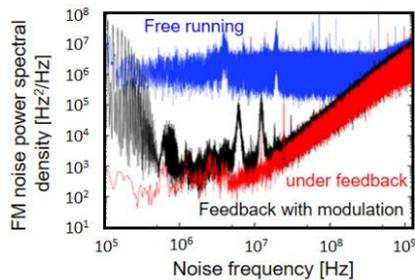


図9 光負帰還狭線幅半導体レーザの周波数雑音パワースペクトル密度低減効果

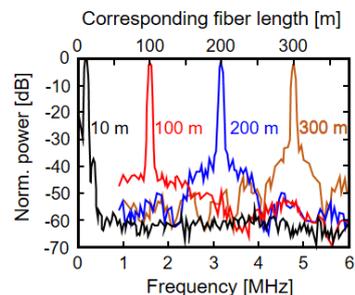


図10 長距離測距実験での高SNRビート信号

<引用文献>

- [1] H. Debregeas et al., ISLC2014, pp. 50-51, 2014.
- [2] K. Kasai et al., CLEO2011, paper CTuV4, 2011.
- [3] PH. Laurent et al., IEEE JQE, 25(6), 1131-1142, 1989.
- [4] O. Nilsson et al., Electron. Lett., 17(17), 589-591, 1981.
- [5] M. Radziunas et al., IEEE JSTQE, 13(1), 136-142, 2007.
- [6] B. S. Kim et al., IEEE JQE, 36(7), 787-794, 2000.
- [7] N. Yokota et al., JJAP, 59(10), 102001-1-10, 2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 M. Kanno, N. Yokota, H. Yasaka	4. 巻 32
2. 論文標題 Measurement of Intrinsic Modulation Bandwidth of Hybrid Modulation Laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 839-842
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LPT.2020.2993797	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 N. Yokota, H. Kiuchi, H. Yasaka	4. 巻 30
2. 論文標題 Directly modulated optical negative feedback lasers for long-range FMCW LiDAR	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 11693-11703
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.452284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 吸坂直樹、横田信英、八坂洋
2. 発表標題 光負帰還混合変調レーザーによる周波数雑音低減帯域拡大
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shima, M. Yoshida, N. Yokota, W. Kobayashi, H. Yasaka
2. 発表標題 Measurement of wide-band modulation characteristic in hybrid modulation laser
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Uchiyama, N. Yokota, W. Kobayashi, H. Yasaka
2. 発表標題 Numerical analysis of hybrid modulation semiconductor lasers for 100 Gbit/s dynamic single mode operation
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

八坂研究室ホームページ http://www.yasaka.riec.tohoku.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	横田 信英 (YOKOTA NOBUHIDE) (00734542)	東北大学・電気通信研究所・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------