

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04605

研究課題名（和文）超テラビット級光送信器に向けた高速変調半導体レーザーの研究

研究課題名（英文）High-speed semiconductor lasers toward beyond-terabit/s optical transmitters

研究代表者

碓塚 孝明（Kakitsuka, Takaaki）

早稲田大学・理工学術院（情報生産システム研究科・センター）・准教授

研究者番号：20522345

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：超100 Gbaud級かつ光ファイバ伝送の長延化をもたらす振幅変調光送信器をシミュレーションにより提案した。分布反射型薄膜レーザーにDetuned loading効果を導入し、直接変調時の周波数変動量を70%低減できることを示した。また、振幅と周波数の混合変調信号により、112 Gbit/sのNRZ信号を0帯内で70 nmに亘り10 km伝送可能であることを原理確認した。本変調条件の実装のため、DFB(分布帰還)領域と電界吸収変調領域を有する内部損失変調レーザーを提案し、単一電圧駆動による112 Gbit/sの振幅・周波数混合変調信号の生成と、波長範囲40 nmに亘る10 km伝送を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の大容量光送信器の実現に向けて、100 Gbaudを超える変調器集積レーザーおよび直接変調レーザーの検討が進んでいる。振幅変調の高速化に伴い、0帯における光ファイバの波長分散耐性の課題が顕在化してきたが、この点に着目した変調光源の検討は報告例が少ない状況であった。本研究は、振幅変調信号の分散耐性を向上する振幅・周波数混合変調信号の効果を検討し、加えて所望の変調信号を生成するための高速な変調レーザー構造を提案したもので、光伝送とデバイス構造の両面から方針を提示したものである。本成果は、今後も高速化が期待される光送信器用振幅変調レーザーの光ファイバ伝送の長延化に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：The intensity modulation optical transmitters have been proposed through the numerical simulation for over 100-Gbaud operation with extended the optical fiber transmission reach. The detuned loading effect has been employed to control the frequency modulation component of the directly modulated membrane distributed reflector lasers. The reduction of the frequency chirping up to 70% has been demonstrated. The combination of the amplitude and frequency modulation enables over 10-km transmission with the wavelength bandwidth of 70 nm in an O-band. To realize this modulation condition, the internal loss modulation lasers consisting of the distributed feedback (DFB) region and electro-absorption modulation region were proposed. 112-Gbit/s mixed amplitude-frequency modulation was generated by single-drive operation. 10-km transmission with the wavelength bandwidth over 40 nm has been theoretically demonstrated.

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 光ファイバ通信 光送信器

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

情報通信量は増大を続け、データセンターの IP トラフィックはゼタバイトを超えてきた (参考文献①)。これらのトラフィック増大に対応するため、光トランシーバの高速化に向けた標準化が進んでいる。クライアント側では、IEEE802.3 において 400G イーサネットが整備され (参考文献②)、コスト面の優位性から振幅変調が主たる変調方法として採用されてきた。2019 年当時の最大の変調速度は 50 GBaud であり、その後も大容量化に向けて 100 Gbaud を超えるボーレート、アレイ化、および PAM (パルス振幅変調) による多値化の検討が進み、この技術傾向は継続すると考えられる。既に 800G/1.6T の標準化に関する議論も進んでおり、超テラビット級光送信器に向けては、更なる変調速度およびチャネル数の増大が必須である。しかし、光ファイバ波長分散の低い 0 帯 (1270-1350 nm) においても、高速変調時には光ファイバの波長分散の影響による伝送距離の制限が課題として顕在化し、50 GBaud における 10 km 伝送の標準化は遅れていた。また、チャネル数増大に向けては波長多重化が必須であるが、CWDM (Course Wavelength Division Multiplexing) は波長間隔が広く、0 帯全域を用いると光ファイバ分散の影響が大きくなる。高速化に伴うスペクトル広がりによって分散の影響はより顕著となり、2023 年現在も、100 Gbaud 級の規格では 0 帯の伝送距離は 10 km 以下に留まっている。以上のように、100 Gbaud を超え、かつ分散耐性の高い変調レーザの実現が望まれている。これまで高速化に着目した電界吸収変調器集積レーザ、直接変調レーザ等が実現されてきたが、今後は高速変調動作に加えて、分散耐性の向上が極めて重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、0 帯の高速変調かつ分散耐性に優れた振幅変調光源の実現を目的とし、従来型の 100 Gbaud 級振幅変調レーザを凌駕する光ファイバ伝送特性の実現をめざす。このために、伝送特性改善をもたらす振幅変調と周波数変調を融合した変調条件を検討し、本変調条件を実装した半導体レーザ構造を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究では、100 GBaud 信号の 10 km 伝送を可能とする波長多重アレイ型光送信器の構成提案をめざして、(1) 伝送距離を長延化する変調条件の追求、(2) 周波数変調条件を実現するレーザ共振器構造、(3) 高速変調を可能とするレーザ構造を課題とし、理論検討、シミュレーションによりレーザ構造を検討した。研究の遂行にあたっては、レーザ設計から光伝送までの総合的なシミュレーション環境を構築した。導波路型の複合共振器変調レーザを提案し、解析にあたっては、共振器方向のキャリア分布および光分布を考慮した時間依存の転送行列モデルを構築し、レーザシミュレータを作製した。また、光伝送に関しては、光ファイバ分散の影響を解析するために光伝送シミュレータを作製して評価を行った。この他、光導波路解析や静電容量解析にあたっては、光導波路シミュレータおよび半導体シミュレータを活用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 光ファイバ伝送における振幅・周波数混合変調の効果

光ファイバの低波長分散領域においても、変調速度の高速化に伴い伝送距離は大きく制限される。図 1 は 112 Gbit/s NRZ 信号の伝送波形の分散量依存性を示す。消光比は 10 dB である。分散値  $\pm 30$  ps/nm における波形が大きく崩れている。この変調条件はゼロチャープ動作であり、周波数変動を完全に抑制した条件下においても分散の影響を強く受けることがわかる。この分散耐性の改善に向けて、振幅変調と周波数変調を混合した変調信号を検討し、分散耐性に及ぼす効果を調べた。振幅変調と同相もしくは逆相の周波数変調信号を加えると、変調スペクトル幅が狭くなる。特にビットレート  $B$ 、消光比を  $EXT$  とした際、周波数変調振幅  $\Delta f = B(EXT-1)/(EXT+1)$  の条件下で抑圧搬送波単側波帯 (SSB) 条件となり、スペクトル幅が狭くなることで分散耐性が向上する (参考文献③)。この条件を NRZ (Non-Return-to-Zero) 変調信号に適用し、伝送シミュレーションを行った。図 2 は振幅、周波数混合変調信号の伝送シミュレーション結果である。周波数変調振幅は 45 GHz である。分散値  $\pm 30$  ps/nm においても明瞭なアイ開口を示しており、振幅変調レーザの周波数

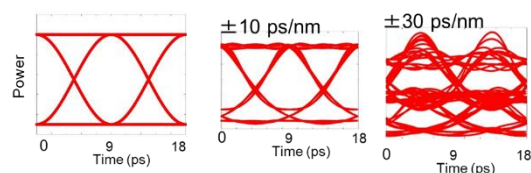


図 1 112-Gbit/s NRZ 信号の伝送波形

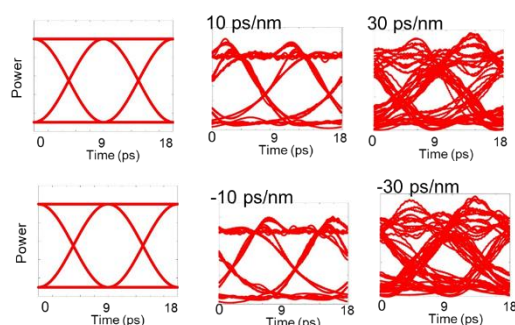


図 2 112-Gbit/s NRZ 振幅・周波数混合変調信号の伝送波形

変調成分の制御により伝送特性の改善が見込まれることが示された。波長 1260–1360 nm の典型的な分散値の範囲は -5 から 4 ps/nm/km であり、波長範囲 60 nm を超える 10 km 伝送の可能性を明らかにした。ここで特筆すべきは、正と負の分散に対して同等の効果が得られている点である。例えば従来技術として、電界吸収変調器のチャープパラメータの制御により波形劣化を抑制できるが、光ファイバ分散の符号によって周波数チャープの符号を調整することが必要である。正分散領域においては負のチャープパラメータ、負の分散領域においては正のチャープパラメータが有効である一方で、逆の分散領域に対しては特性が劣化するため、波長毎のチャープパラメータ設計が必要となる。特に 0 帯においては、波長分散が正負に跨がるため、本手法の特徴である、異なる光ファイバの分散に対して同等の効果が得られる点が優位と期待される。

## (2) 変調レーザの周波数変調量制御

振幅変調信号における周波数変調量制御の有効性を確認できたため、変調レーザにおける周波数変調量制御方法を検討した。直接変調レーザにおける周波数変調量の制御方法として、Detuned loading 効果を検討した。レーザ構造には、低駆動電流での高速直接変調動作に実績のある、シリコン基板上のメンブレン型の分布反射型レーザを用いた。周波数変調量の制御原理を図 3 に示す。分布帰還型 (DFB) 活性層と分布ブラッグ (DBR) 反射鏡を有する InP 系分布反射 (DR) 型薄膜レーザである。DFB のストップバンド両端からの発振モードを、DBR 反射器で選択してレーザの単一モード発振を実現する。ここで、DFB と DBR のブラッグ波長間隔を調整し、DBR の反射率が DFB の発振周波数変動に沿って変動する領域を用いる。活性層への電流注入に伴うブラッグ波長シフトによって DBR の反射率が增大すると、閾値キャリア密度が下がるため、活性層内のキャリア密度変動が抑制され、この効果によって、発振周波数 (波長) の変動を抑制、もしくは増幅できる。DFB 長、DBR 長および、双方の結合係数依存性を検討し、周波数変調量の制御を試みた。図 4 は 50 Gbit/s NRZ 信号における直接変調レーザの振幅変調波形と周波数変調波形を Detuned loading 効果の有無について比較したものである。ここでは、周波数変調量の抑制効果を示す結果である。DFB 長は 100  $\mu\text{m}$ 、回折格子の結合係数は 400  $\text{cm}^{-1}$  とし、線幅増大係数は 3 とした。Detuned loading 効果の導入により、70% の周波数チャープ量の低減効果と、実効微分利得の増大に伴う振幅変調波形の改善が得られた。本成果により、Detuned loading を用いた周波数変調量の制御が有効であることが明らかとなった。

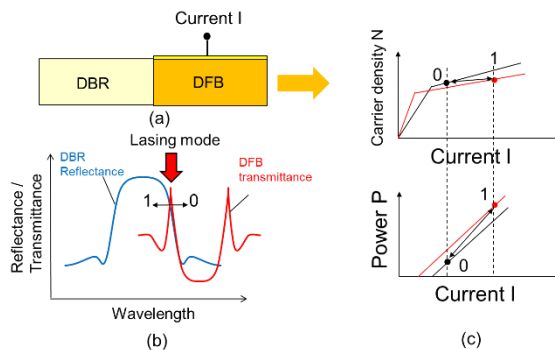


図 3 Detuned loading 効果によるキャリア変動抑制の説明図。(a) レーザ構造、(b) 共振器スペクトル、(c) キャリア密度と光出力の変動

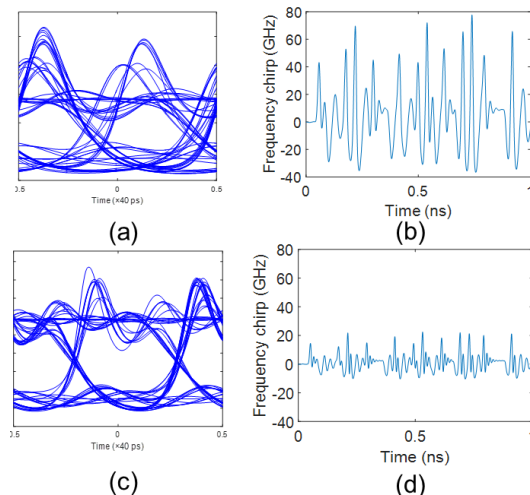


図 4 DR レーザにおける 50 Gbit/s NRZ 変調波形。Detuned loading 効果なしの場合の (a) 振幅変調波形と (b) 周波数変調波形。Detuned loading 効果を用いた場合の (c) 振幅変調波形と (d) 周波数変調波形

## (3) 単一電圧駆動内部損失変調レーザによる振幅・周波数混合変調信号の生成

前述の手法により、直接変調レーザにおける周波数変調量の制御が可能となる。直接変調レーザにおいては、非線形利得に起因する断熱チャープによる周波数変調成分が振幅変調成分と同相となるため、原理的には振幅および周波数の混合変調信号を生成できる。このとき、断熱的チャープ成分を前述の SSB 条件となるように制御することも可能である。しかし一方で、直接変調時には過渡チャープ成分が生じ、また、振幅と周波数の応答にジッタが生じるため、特に高速変調時には、直接変調のみでは品質のよい SSB 条件の振幅・周波数変調信号を得ることが難しい。直接変調レーザの断熱的チャープ成分を用いた光送信器としては、直接変調レーザと光フィルタを用いたチャープ制御レーザ (CML) が報告されている。光ファイバ分散耐性に優れる一方で、変調レーザの外部に光フィルタを必要とすることが課題である (参考文献④)。この他、同相の振幅・周波数混合変調信号の生成方法としては、EA 領域と DFB 領域を個別に変調する手法が報告されているが、2つの変調ドライバを必要とする。

これらの課題の解決に向けて、単一電圧駆動により振幅・周波数変調信号の生成を可能とする内部変調レーザをシミュレーションにより検討した。レーザ構造を図5に示す。DFB 活性層領域と電界吸収(EA)変調領域、導波路領域から形成される複合共振器構造である。EA側には反射コーティングを設ける。EA領域に逆バイアスを与えると損失が増大して共振器の閾値利得が変調され、キャリア密度の変化によりレーザの発振周波数が変調される。本変調方式は、内部損失変調のために、変調帯域が高い特徴を有する(参考文献⑤)。また、EA側の端面反射に基づいた光子-光子共鳴の導入により、100 GHzを超える高い変調帯域も実現できる。これらの原理を用いることにより、単一電圧の変調により振幅・周波数変調信号を生成することができる。時間依存の転送行列モデルを用い、共振器方向のキャリア分布および光分布を考慮した数値シミュレーションモデルを構築した(参考文献⑥)。100 GbaudにおけるSSB条件を満たすためには50 GHz程度の周波数変調量が必要となるため、所望の変調量が得られるように各領域素子を設計した。層構造はシリコン基板上のメンブレン構造とし、EA、導波路領域、DFB領域はそれぞれ100  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、80  $\mu\text{m}$ 、EA側の端面反射率は0.2とした。DFB領域の結合係数は600  $\text{cm}^{-1}$ であり、ブラッグ波長の異なる2領域から形成される単一モード発振構造である。図6は、活性層電流40 mAにおける、EA領域のモード損失を変えた場合の光出力、および周波数シフト量を示す。EA領域の損失の増大に従い、発振周波数の短波長シフトが得られ、EA側出力、DFB側出力共に3 dBを超える消光比と45 GHzの周波数変調幅が得られた。

レーザの変調波形を図7に示す。112 Gbit/sのNRZ信号で変調し、EAの電圧振幅は3 Vとした。DFB側出力において、強度変調波形に加えて、明瞭な周波数変調波形が得られた。動的な変調振幅量は最小でも20 GHzであり、光ファイバ伝送において混合変調の効果を発現できる範囲である。一方、EA側出力においては、図6から期待されるように消光比は高くなるが、EA領域の遅延により、1レベルでの波形の変動が見られる。EA端面の反射量を抑制し、EA-DFBレーザの動作に近づけることで振幅変調波形は改善できるが、本構造では、周波数変調量を確保する観点から、DFB側の出力を用いた。

振幅・周波数の混合変調が得られたため、数値シミュレーションによる光ファイバ伝送特性の評価を行った。図8はDFB側出力による112 Gbit/s NRZ信号の伝送波形である。変調条件は図7と同様である。負の分散領域では-10 ps/nm、正の分散領域では30 ps/nmまでのアイ開口の保持が得られた。この分散範囲は、一般的な単一モードファイバにおける、0帯の波長範囲40 nmに対応する。図2の理想条件の変調波形と比較すると波形劣化が大きい、強度変調のみのNRZ信号と比較すると改善が見られており、強度変調と周波数変調の混合変調の効果を確認できた。

以上のように、本研究により、複合共振器構造による100 Gbaud 超級振幅・周波数混合変調の生成と、伝送距離の長延化の効果を確認し、本変調レーザが0帯多波長アレイ変調光源の光ファイバ伝送距離の長延化に向けて有効であることが示された。

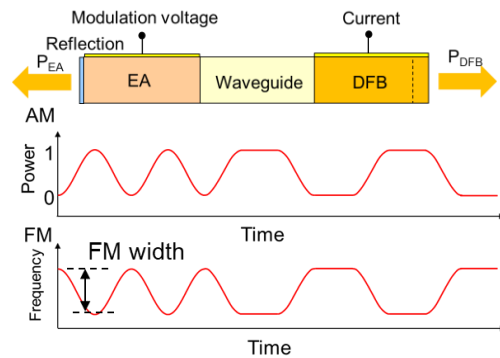


図5 内部損失変調レーザ構造と振幅・周波数混合変調信号の生成原理

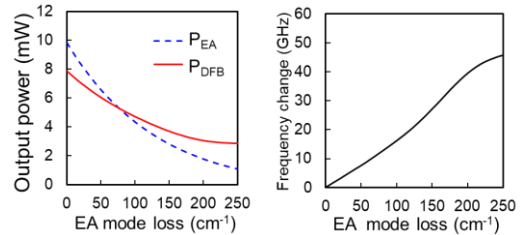


図6 レーザ出力と周波数変調量のEA損失量依存性

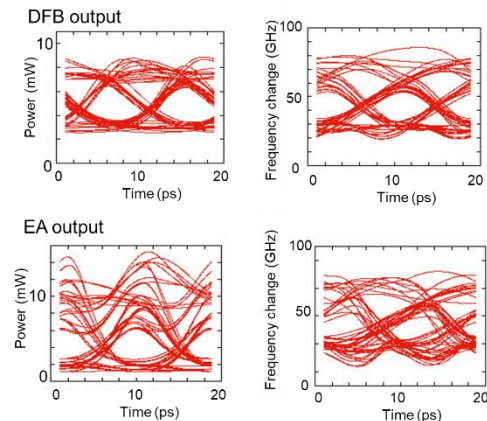


図7 内部損失変調レーザの変調波形

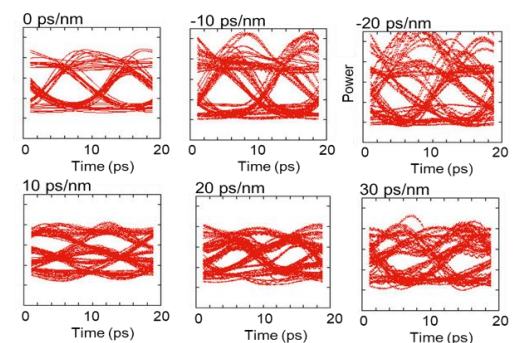


図8 112-Gbit/s NRZ 変調信号の分散依存性

<引用文献>

- ① Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021 White Paper.
- ② IEEE 802.3 Ethernet Working Group, <http://www.ieee802.org/3/>

- ③ J. Binder and U. Kohn, "10 Gbit/s-Dispersion Optimized Transmission at 1.55  $\mu\text{m}$  Wavelength on Standard Single Mode Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, no. 4, pp. 558-560, 1994.
- ④ Y. Matsui et al., "Chirp-managed directly modulated laser (CML)," Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 2, pp. 385-387, 2006.
- ⑤ S. Mieda et al., "Intra-cavity loss modulation for ultrahigh-speed direct modulation lasers based on photon-photon resonance," Appl. Phys. Express, vol. 8, no. 8, 082701, 2015
- ⑥ B. S. Kim et al., "An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes," J. of Quantum Electron., vol. 36, no. 7, pp. 787-794, 2000.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuan Luo, Zicong Han and Takaaki Kakitsuka   |
| 2. 発表標題<br>Directly-modulated distributed reflector lasers using detuned-loading effect for extended optical fiber transmission reach |
| 3. 学会等名<br>15th International Collaboration Symposium on Information, Production and Systems (国際学会)                                   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takaaki Kakitsuka and Kiyoto Takahata  |
| 2. 発表標題<br>Theoretical analysis of dispersion-tolerant single-drive mixed amplitude-frequency modulation lasers |
| 3. 学会等名<br>28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2022) (国際学会)                                 |
| 4. 発表年<br>2022年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|