

修士学位論文要約 (令和4年9月)

# 混合変調半導体レーザーの100-Gbit/s 動的単一モード動作の研究

内山 香

指導教員：八坂 洋

## Study on 100-Gbit/s Dynamic Single Mode Operation of Hybrid Modulation Semiconductor Lasers

Kaori UCHIYAMA

Supervisor: Hiroshi YASAKA

We verify the dependence of the modulation bandwidth characteristics on the optical loss inside the cavity in hybrid modulation semiconductor lasers (HM lasers) and verify the dynamic single-mode operation with 100 Gbit/s NRZ signal of the HM lasers in order to achieve an ultra-wideband semiconductor laser with a modulation bandwidth over 100 GHz. Firstly, we analyzed the small signal response under the stable condition for single-mode operation and found that photon-photon resonance effect is suppressed by the increase in the internal loss of intra cavity loss modulation section. Secondary, we analyzed the dynamic modulation characteristics of the HM lasers with the large amplitude signal and numerically confirmed the HM laser shows 100-Gbit/s NRZ clear eye pattern with the overshoot less than 10% even under dynamic single mode operation.

### 1. はじめに

現在、短距離通信の大容量化に向け、多値化や多重化技術の導入が進められているが、更なる高速化には光源高速化によるシンボルレートの向上が必要不可欠である。近年、直接電流変調半導体レーザーを高速化する手法として外部共振器による光子共鳴(PPR: Photon-Photon Resonance)効果の導入が目目されており、PPR 効果による第2の共振ピーク(PPRピーク)を応答特性上に形成することで変調帯域を108 GHz まで拡大した報告がある<sup>2)</sup>。しかし、緩和振動周波数以上の高周波領域における急激な感度劣化のために変調帯域拡大量が制限されていた。この問題に対し、直接電流変調と共振器内部損失変調を同時に行う混合変調半導体レーザーが提案されており、PPR 効果と組み合わせることで変調帯域を66 GHz 以上にまで拡大できるという実験結果が報告されている<sup>3)</sup>。本研究では、100 GHz 以上の応答帯域を有する超広帯域な半導体レーザーの実現に向け、混合変調半導体レーザーにおける変調帯域特性の共振器内部損失依存性を検証し、100 Gbit/s NRZ 信号による動的単一モード動作の検証を行った。

### 2. 混合変調半導体レーザーの数値解析

本解析では共振器内のキャリア密度と電界振幅の空間的分布及び変化、PPR 効果を考慮するために結合波方程式<sup>4)5)6)</sup>を用いた。

図1に本解析で使用した混合変調半導体レーザーの構造を示す。InAlGaAs を使用したDFB 活性領域に外部共振器としても作用する共振器内部損失変調(ICLM: intra-cavity loss modulation)領域を集積した形となっており、それぞれの領域の端面には反射率10%のAR コーティングと反射率80%のHR コーティングが施されている。DFB 活性領域には注入電流に、ICLM 領域には印加する逆バイアス電圧にそれぞれ変調信号を重畳することで出力光の強度変調を行っている。

図2に結合係数が $30\text{ cm}^{-1}$ で $375\text{ }\mu\text{m}$ のDFB 活性領域と $220\text{ }\mu\text{m}$ のICLM 領域から成る混合変調半導体レーザーにおける小信号応答特性の逆バイアス電圧依存性を示す。図2より、ICLM 領域への逆バイアス電圧の増加に伴いPPRピークの応答感度が低くなることが確認できる。これは、逆バイアス電圧の増加によりICLM 領域の内部損失が増加しPPR 効果が抑制されることを表している。

### 3. 混合変調半導体レーザーの変調帯域特性の共振器内部損失依存性

図2に結合係数が $30\text{ cm}^{-1}$ で $375\text{ }\mu\text{m}$ のDFB 活性領域と $220\text{ }\mu\text{m}$ のICLM 領域から成る混合変調半導体レーザーにおける小信号応答特性の逆バイアス電圧依存性を示す。図2より、ICLM 領域への逆バイアス電圧の増加に伴いPPRピークの応答感度が低くなることが確認できる。これは、逆バイアス電圧の増加によりICLM 領域の内部損失が増加しPPR 効果が抑制されることを表している。

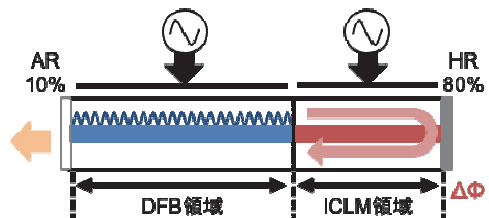


図1 混合変調半導体レーザーの構造図

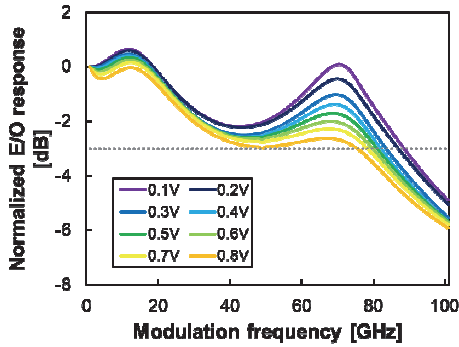


図2 小信号応答特性の逆バイアス電圧依存性

#### 4. 混合変調半導体レーザの動的単一モード動作

更なる高速化を目指し、短共振器化した混合変調半導体レーザにおける高速変調動作特性を調べた。大振幅変調時の出力強度変調波形によるアイパターンを確認することで信号の品質を検討した。図3に結合係数が  $180 \text{ cm}^{-1}$  で  $100 \mu\text{m}$  のDFB活性領域と  $50 \mu\text{m}$  のICLM領域から成る混合変調半導体レーザに動的単一モード動作条件の下で最大振幅の 100 Gbit/s NRZ 信号を入力した際の出力光アイパターンを示す。波形中央部のアイ開口部の消光比が 3dB 以上となる明瞭なアイ開口が確認できた。しかし、マーク側上部にパターン効果による大きなオーバーシュートが発生してしまうことが問題となった。原因として、図4に示したように、直接電流変調と共振器内部損失変調のステップ応答に時間差が生じていることにあると考えた。そこで、ICLM領域とDFB領域への変調信号に時間差を設けることでオーバーシュートの抑制を図った。図5は同構造の混合変調半導体レーザにおいてICLM領域への入力信号を9 ps 早めた場合のアイパターンである。この手法で、オーバーシュート量を 10%程度に抑えながら明瞭なアイ開口を得られることが確認できた。

#### 5. まとめ

本研究では、超高速光通信システムの実現に向け、直接電流変調と共振器内部損失変調を組み合わせ合わせた混合変調半導体レーザの数値解析を行った。長共振器構造混合変調半導体レーザの安定動作条件下での変調帯域特性の共振器内部損失依存性を検討するとともに、短共振器化により高速化を実現し、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を通して明らかにした。

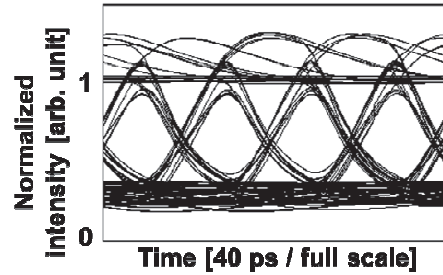


図3 100 Gbit/s NRZ 信号入力時のアイパターン

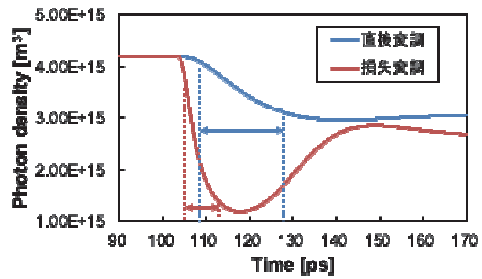


図4 各変調時のステップ応答

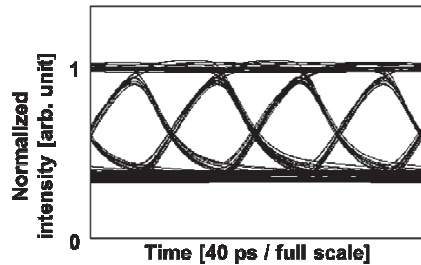


図5 時間差導入時のアイパターン

#### 文献

- 1) Y. Matsui, R. Schatz, G. Carey, T. Sudo, and C. Roxlo, ISLC 2016, paper WA1 (2016).
- 2) S. Yamaoka, N.-P. Diamantopoulos, H. Nishi, R. Nakao, T. Fujii, K. Takeda, T. Hiraki, S. Kanazawa, H. Tanobe, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, F. Koyama, and S. Matsuo, ECOC 2019, paper PDP.2.1 (2019).
- 3) M. Kanno, N. Yokota, and H. Yasaka, IEEE Photon. Technol. Lett. 32, 839 (2020).
- 4) J. Awrejcewicz, InTech, 436-468 (2011).
- 5) T. Numai, Wiley, 57-92 (2010).
- 6) J. Zhi, H. Zhu, D. Liu, L. Wang, and J.-J. He, Opt. Express, 20(3), 2277-2288 (2012).