

# 相互注入同期半導体レーザーを用いた直交振幅変調技術の研究

Research on quadrature amplitude modulation technology based on mutually injection-locked semiconductor lasers



**横田 信英** (Nobuhide YOKOTA, Ph. D.)  
東北大学 電気通信研究所 准教授  
(Associate Professor, Tohoku University, Research Institute of Electrical Communication)  
IEEE 電子情報通信学会、応用物理学会  
受賞: 船井研究奨励賞 (2018年) コニカミノルタ画像科学奨励賞 (2018年)  
IEEE GCCE2019 Excellent Paper Award (2019年) 他  
研究専門分野: 光エレクトロニクス

## あらまし

近年の大容量光通信では、光の振幅と位相の両方に情報を含むデジタルコヒーレント光通信方式が普及しており、信号光には周波数利用率の高い直交振幅変調方式が広く利用されている。直交振幅変調は、2つに分岐した光をそれぞれ独立に変調して情報を乗せ、その後に両者を直交位相状態で合波することにより実現可能である。しかしながら、そのためには簡便な半導体レーザーとは別に外部変調器が必要であり、これによる挿入損失、駆動電力、サイズ、コスト等が問題となる。そこで本研究では、外部変調器を用いることなく半導体レーザーから直交振幅変調光を直接生成する技術の研究を推進した。具体的にはリング共振器を用いて相互注入同期された2つの半導体レーザーを電流変調する手法を提案し、本手法の基本原則と直交振幅変調光生成の特徴について明らかにした。

## 1. 研究の目的

近年の高精細動画配信サービスの普及などに伴い、光通信トラフィックが爆発的に増大している。これまで、主に強度変調方式 (図 1 (a)) と波長分割多重技術によって光通信の大容量化が進められてきたが、さらなる大容量化へ向けた技術として、周波数利用率の高い直交振幅変調 (QAM) 方式を用いたデジタルコヒーレント光通信技術 [1]\*1 の導入が急速に進んでいる。図

1 (b) に示すように、QAM 方式では光電界の振幅と位相を両方制御するため、2 次元的な多値化が可能である。現在、QAM 信号光を生成するためにはニオブ酸リチウム導波路 [2] などを用いた外部変調器が必須であるが、ポッケルス効果等による小さい屈折率変化を利用するため一般的には cm オーダの導波路長が必要であり、これに伴い複雑な進行波型電極も要求される。数 V 程度の高い駆動電圧と数 dB 程度の光挿入損失も欠点となる。InP 系や Si 系の半導体導波路を用いた外部変調器 [3, 4] も研究されており、小型集積化に有利であるが、ニオブ酸リチウム導波路の場合とは異なり、量子閉じ込めシュタルク効果などの動作波長範囲が狭い物理現象を用いる必要があり、屈折率変調に付随して意図しない光損失変調が生じる課題が存在する。

そこで本研究では、外部変調器を用いない新規 QAM 光源の実現を最終目的とし、提案光源構成の動作原理を検証する。

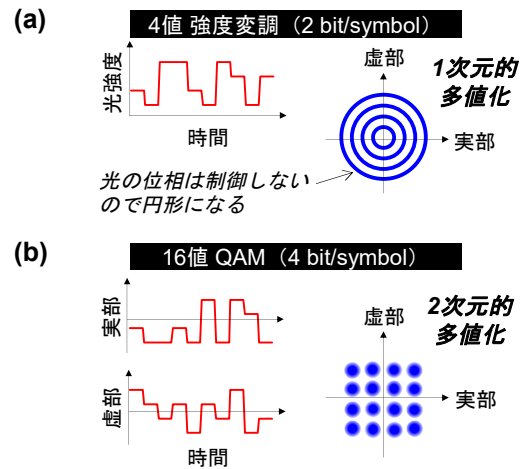


図 1 変調方式の比較 (a)強度変調方式、(b)QAM 方式

## 2. 研究の背景

QAM 信号光の生成に用いられる外部変調器の欠点を回避するため、単純な強度変調方式の場合と同様に、半導体レーザーの電流変調に基づく簡便な直接的 QAM 信号光生成技術の開発が期待されている。しかし、半導体レーザーを単純に電流変調するだけでは光電界の振幅と位相が同時に変化し、光信号の実部と虚部の独立制御ができないため QAM 信号が生成できない。この問題に対する先駆的研究 [5] では、図 2 (a) に示す光ファイ

# 相互注入同期半導体レーザーを用いた直交振幅変調技術の研究

## Research on quadrature amplitude modulation technology based on mutually injection-locked semiconductor lasers

バ型の構成が用いられた。マスターレーザーの出力光を半導体レーザーに注入することで同期を得る注入同期技術を用いており、2つの半導体レーザー間の直交位相関係を維持した状態で各レーザーを電流変調しており、生成した振幅変調光に含まれる搬送波(DC光)成分を干渉計によって抑制することで、約1Vの低い駆動電圧にも関わらずQAM信号光の生成を実現している。しかし、注入同期用のマスターレーザー、アイソレータ、DC光抑制用干渉計を含む複雑な本構成を半導体基板上へ集積することは困難である。本構成を面発光レーザーレイに適用する研究[6]も報告されているが、大掛かりな空間光結合系が必要となり、外部変調器を活用した光源構成を凌駕することが困難である。

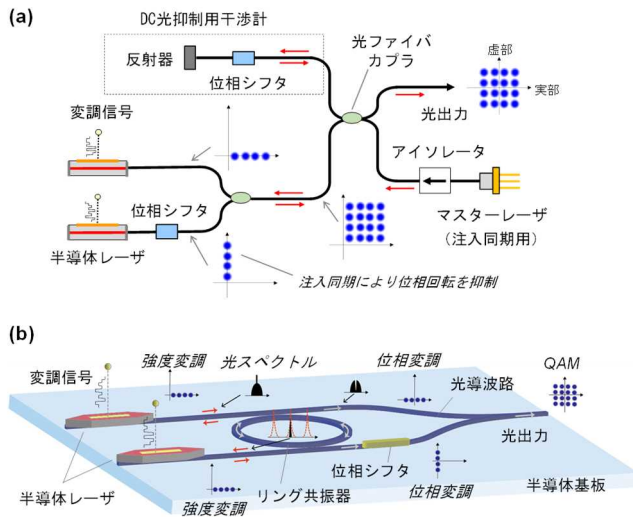


図2 (a) 先行研究の提案する光源構成、(b) 本研究で提案する光源構成

### 3. 研究の方法

#### 3.1 デバイス構造・原理

図2(b)に示すように、提案する光源構成では2つの半導体レーザーが相互に光を注入することで同期を得る現象(相互注入同期)を活用する。しかし、単純に相互注入同期した半導体レーザーを電流変調すればレーザー間でクロストークが生じ、相互注入同期を維持できない。そこで、フィルタ特性を有するリング共振器によって変調光の高周波成分(変調信号)を分離して透過させ、低周波成分(搬送波)のみを切り出して相互注入同期に用いる。リング共振器を透過させることで

搬送波の抑制効果も得られるため合理的である。Si系光導波路とInP系半導体レーザーのハイブリッド集積構造を将来的に想定している。

#### 3.2 相互注入同期特性

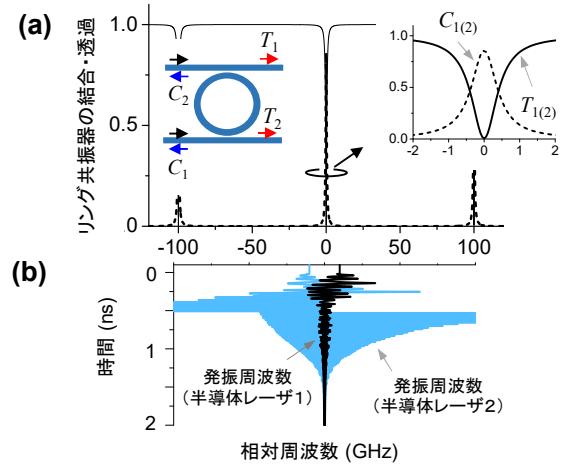


図3 (a) リング共振器の結合・透過特性、(b) 相互注入同期のダイナミクス

半導体レーザーの一般的な解析モデルであるレート方程式を拡張し、2つの半導体レーザーの出力光がリング共振器を介して相互に注入される状況について解析した。まず、考慮するリング共振器の特性を図3(a)に示す。鋭い共振状の光結合( $C_1, C_2$ )または光透過( $T_1, T_2$ )を示しており、その半値全幅は約870MHzである。また、自由スペクトル間隔は100GHzである。光導波路の伝搬損失0.1dB/cmを考慮しており、このような伝搬損失は窒化シリコン導波路等を用いることで実現可能である。半導体レーザーの解析には、歪補償InGaAlAs/InGaAsP多重量子井戸を活性層とする1.55μm帯半導体レーザー[7]のパラメータを用いた。

図3(b)に示すように、リング共振器のある共振周波数を基準とし、そこから各半導体レーザーの相対的周波数を数GHz程度ずらしても、互いにリング共振器の共振周波数に引き込み合い一定時間経過後に安定する相互注入同期現象が確認できた。通常、2つの半導体レーザーの出力光を相互に注入すると不安定になりやすいが、リング共振器のフィルタ特性により、過渡的な光応答はリング共振器を透過し、DC成分に近い光を

# 相互注入同期半導体レーザを用いた直交振幅変調技術の研究

## Research on quadrature amplitude modulation technology based on mutually injection-locked semiconductor lasers

結合させている点が重要である。

### 3.3 変調周波数応答特性

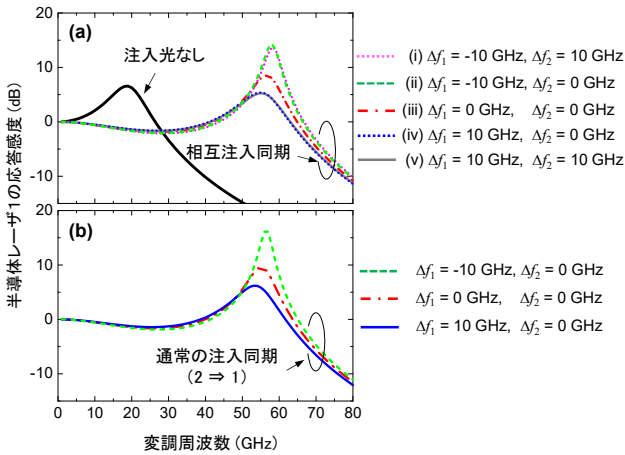


図4 (a)相互注入同期半導体レーザおよび(b)注入同期半導体レーザの変調周波数応答特性

半導体レーザでは変調周波数応答帯域幅が注入同期によって拡大することが知られている[8]。そこで、相互注入同期状態の半導体レーザの変調周波数応答を調べ、通常の注入同期半導体レーザと比較した。図4(a)に示すように、注入光なしの場合に比べて、相互注入同期状態の半導体レーザは帯域幅が拡大することが確認できる。各半導体レーザ(1と2)について、リング共振器の共振周波数に対する相対周波数差( $\Delta f_1, \Delta f_2$ )を変化させた(i)-(v)の条件下において解析しているが、(i)と(ii)、(iii)、(iv)と(v)、においてそれぞれ同様な応答特性を示していることがわかる。図4(b)に示すように、半導体レーザ2から半導体レーザ1への一方的な光注入が行われる場合(通常の注入同期)との比較により、半導体レーザ1の応答特性には $\Delta f_1$ が関係することがわかった。したがって、 $\Delta f_1$ と $\Delta f_2$ の値が大きく異なるように設定することで、2つの半導体レーザの変調周波数応答特性を合わせることができる。

### 3.4 直交振幅変調光の生成

図2(b)で示したように、QAM信号光を生成するためにはリング共振器を透過した2つの導波路出力光を直交位相関係で合波する。このような位相シフト・合波を行う前に、各半導体レーザの出力光( $E_1, E_2$ )、リング共振器における結合光( $C_1, C_2$ )と透過光( $T_1, T_2$ )

のスペクトルと時間波形について調べた。ここで、単純化のため $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 0$ とした。図5(a)に示すように、ワード長 $2^{11}-1$ の疑似ランダム信号(PRBS)\*2で各半導体レーザを変調した場合、半導体レーザ1からは $E_1$ のようなパワースペクトルを有する光が出力され、注入同期に利用される成分 $C_1$ は、主に中央のピーク成分(搬送波)が抽出されている。一方、リング共振器を透過した成分 $T_1$ は、主に変調によって生じたサイドバンドを含むことがわかる。光の時間波形を調べると、図5(b)に示すように、 $E_1, E_2$ はPRBSの波形を維持しているものの、 $T_1, T_2$ は波形が歪んでおり、 $C_1, C_2$ においても純粋なDC成分ではなく変動が見られる。これらは、約870MHzの透過半値全幅を有するリング共振器が信号光の低周波成分を弱めてしまうことに起因している。そこで、図5(c)に示すように、長い信号パターンが連続しないように補正する8B/10Bエンコーディング\*3を用いた場合、 $E_1$ のスペクトルが有する低周波成分が抑制されるため、図5(d)に示すように、時間波形の歪を抑制できることがわかった。

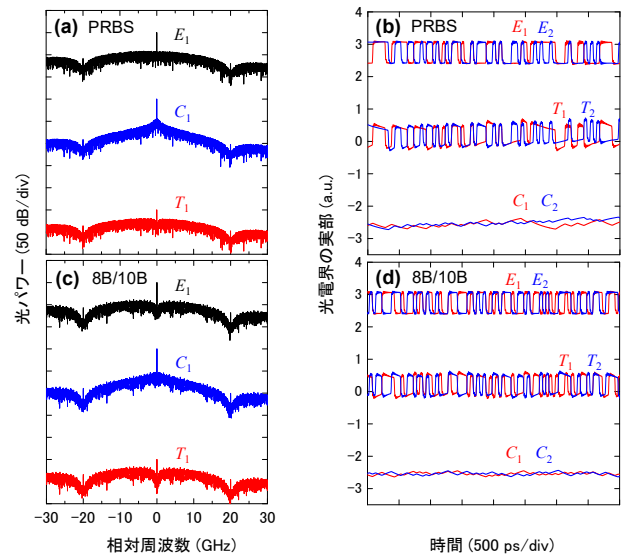


図5 PRBS信号で変調した時の(a)光スペクトルと(b)光信号波形、8B/10B信号で変調した時の(c)光スペクトルと(d)光信号波形

$T_1, T_2$ を直交位相関係で合波することによりQAM信号光を生成し、信号のボーレートに対するコンステレーション\*4とそのエラーベクトル振幅(EVM)とし

# 相互注入同期半導体レーザーを用いた直交振幅変調技術の研究

## Research on quadrature amplitude modulation technology based on mutually injection-locked semiconductor lasers

て図6にまとめた。ここで、コンステレーションはQAM信号の品質を信号配置点のずれや広がりとして大雑把に確認することができ、EVMはそれを定量化するものである(値が小さいほど高品質と言える)。PRBS信号では、40 GBdまでボーレートを向上することによってEVMが低減されている。これはボーレートの向上により信号の周波数帯が高くなり、リング共振器による低周波信号の抑制の影響を受けにくくなるためである。40 GBd以上にボーレートが向上すると、相互注入同期半導体レーザーの変調周波数応答帯幅による限界のためEVMが劣化している。一方、8B/10B信号の場合、すべてのボーレートにおいてPRBS信号の場合よりも低いEVMを示しており、低ボーレートにおいてもリング共振器の透過半値全幅に起因したEVMの劣化を抑制できることを確認した。80 GBdにおいても、受信信号の誤りを訂正する前方誤り訂正技術で要求されるEVM閾値を下回っており、本提案原理によるQAM信号光の生成が可能であることを示す結果が得られた。

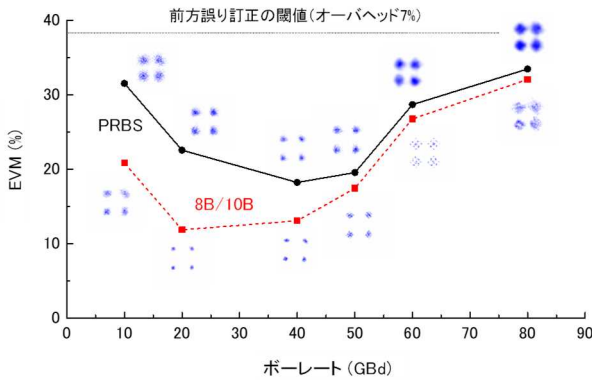


図6 信号のボーレートに対する生成したQAM信号光のコンステレーション(青いプロット分布図)とEVMの関係

### 4. 将来展望

デジタルコヒーレント光通信技術はコストや消費電力よりも性能を重視する長距離光通信において導入が進んでいるが、近年ではデータセンターでの中～短距離向けデジタルコヒーレント光通信技術が研究され始めている。本研究で提案するQAM光源は半導体レーザーの電流変調に基づくため効率がよく、消費電力、コス

ト、サイズを低減することが可能であり、中～短距離通信の用途として有望である。また、相互注入同期のために利用するリング共振器の動作波長帯域は広いいため、集積する半導体レーザー材料と発振波長を制御することで、Cバンド(1530-1565 nm)に限らず、幅広い波長帯においてQAM光源を実現することが可能となる。これはデジタルコヒーレント光通信技術の適用範囲を拡張し、新たな産業的需要を創出する機会となり得る。

現在、ファウンドリサービスを活用した提案デバイスの試作を進めており、本研究で得た様々な理論的知見を実験的に確認することを目指している。

### おわりに

本研究は次世代の中～短距離用デジタルコヒーレント光通信システムにおける簡便なQAM信号光の生成を目的とし、外部変調器を用いることなく半導体レーザーからQAM信号光を直接生成する手法について検討した。2つの半導体レーザーがリング共振器を介して相互に光を注入し同期する相互注入同期現象を活用し、各半導体レーザーからの変調出力光を直交位相関係で合波することにより、QAM信号光を生成できることを数値解析によって明らかにした。

### 用語解説

- \*1 信号光と局発光の干渉とデジタル信号処理を用いる光通信方式であり、光の振幅と位相の両方を通信に活用する点が特徴である。
- \*2 一定の周期で”0”と”1”が繰り返される擬似的なランダム信号であり、ワード長に応じて”0”または”1”の最大連続数が異なる。
- \*3 高速シリアル転送方式の一種であり、”0”または”1”の期間が4以下になるように、8ビットのデータを10ビットのデータに変換する。
- \*4 信号光の振幅と位相を複素平面にプロットしたものであり、信号配置点における各プロットの分布が狭いほど理想的である。

### 参考文献

[1] K. Kikuchi, “Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications,” J. Lightwave Technol.

## 相互注入同期半導体レーザーを用いた直交振幅変調技術の研究

Research on quadrature amplitude modulation technology based on mutually injection-locked semiconductor lasers

- 34, 157 (2016).
- [2] A. Rao and S. Fathpour, “Compact Lithium Niobate Electrooptic Modulators,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 24, 3400114 (2018).
  - [3] M. Nakamura et al., “192-Gbaud Signal Generation Using Ultra-Broadband Optical Frontend Module Integrated with Bandwidth Multiplexing Function,” *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf., Th4B.4* (2019).
  - [4] J. Lin et al., “Single-carrier 72 GBaud 32QAM and 84 GBaud 16QAM transmission using a SiP IQ modulator with joint digital-optical pre-compensation,” *Opt. Express* 27, 5610 (2019).
  - [5] Z. Liu et al., “Modulator-free quadrature amplitude modulation signal synthesis,” *Nat. Commun.* 5, 5911 (2014).
  - [6] N. K. Fontaine et al., “Chirp-Free Modulator using Injection Locked VCSEL Phase Array,” *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun., Th.3.A.3* (2016).
  - [7] Y. Matsui et al., “Bifurcation in 20-GHz Gain-Switched 1.55- $\mu$ m MQW Lasers and Its Control by CW Injection Seeding,” *IEEE J. Quantum Electron.* 34, 1213 (1998).
  - [8] E. K. Lau et al., “Enhanced Modulation Characteristics of Optical Injection-Locked Lasers: A Tutorial,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 15, 618 (2009).

この研究は、平成30年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和元年度～令和3年度に実施されたものです。