

カオス駆動された相互結合VCSELにおける同期ダイナミクス Synchronization in Mutually Coupled Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Driven by Chaotic Laser

静大工 ○近藤 博文, 生源寺 類, 大坪 順次

Shizuoka Univ. ○Hirofumi Kondo, Rui Shogenji, Junji Ohtsubo

E-mail : tajohts@ipc.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

面発光半導体レーザ(VCSEL)は、低い値電流、高寿命、単一縦モード発振など様々な優れた特性を有している。その一方で、偏光モードの不安定性のような好ましくない特性も存在する。

また、半導体レーザにはある条件下においてカオスと呼ばれ予測不能な振る舞いをする状況がある。この不安定性は避けるべきである場合もあるが、逆にそれを積極的に使ったカオス秘匿通信なども提案されている。カオス秘匿通信などへ応用する上でカオス同期の精度を高めることは重要である。

本研究では、カオス化したドライブ光を注入した相互結合VCSELにおけるカオス同期について数値解析により調査した。

2. 理論モデルとレート方程式

使用したカオス同期のモデルをFig. 1に示す。

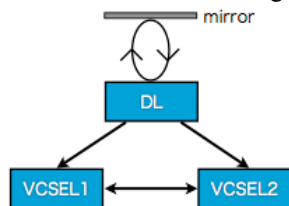


Fig. 1 Theoretical model of chaos injection

相互結合しているVCSEL1、2に、戻り光によりカオス化した端面発光半導体レーザであるドライブレーザ(DL)光を注入する。ドライブ光としては端面発光半導体レーザの戻り光カオスを使用した。今回の数値計算の条件下では、フリーランニングにおいてVCSELは、y偏光モード発振しており、相互結合はこの発振モードのみの結合とした。

数値計算で用いたレート方程式を以下で示す。

$$\frac{dE_x^{1,2}}{dt} = \kappa(1 - i\alpha) \left[(N^{1,2} - 1) E_x^{1,2} - in^{1,2} E_y^{1,2} \right] - (\gamma_a - i\gamma_p) E_x^{1,2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_y^{1,2}}{dt} = & \kappa(1 - i\alpha) \left[(N^{1,2} - 1) E_y^{1,2} + in^{1,2} E_x^{1,2} \right] + (\gamma_a - i\gamma_p) E_y^{1,2} \\ & + \eta^{1,2} E_y^{2,1} (t - \tau_c) \exp(-i\Delta\omega^{1,2}t) \\ & + \eta_d E_d (t - \tau_d) \exp(-i\Delta\omega_d t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^{1,2}}{dt} = & \gamma_N [\mu - N^{1,2} (1 + |E_x^{1,2}|^2 + |E_y^{1,2}|^2)] \\ & + in^{1,2} (E_y^{1,2} E_x^{*,1,2} - E_x^{1,2} E_y^{*,1,2}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{1,2}}{dt} = & -\gamma_s n^{1,2} - \gamma_N^{1,2} [n^{1,2} (|E_x^{1,2}|^2 + |E_y^{1,2}|^2) \\ & - in^{1,2} (E_y^{1,2} E_x^{*,1,2} - E_x^{1,2} E_y^{*,1,2})] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_d}{dt} = & \frac{1}{2} (1 - i\alpha) G_N (N_d - N_{th}) E_d \\ & + \frac{\kappa_d}{\tau_{din}} E_d (t - \tau_{ext}) \exp(i\Delta\omega_0 \tau_{ext}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dN_d}{dt} = \frac{J}{e} - \frac{N_d}{\tau_S} - G_N [N_d - N_{d0}] |E_d|^2 \quad (6)$$

式(1)は各VCSELにおけるx偏光モードについての電場の式である。式(2)は各VCSELにおけるy偏光

モードについての電場の式であり、第3項が相互結合による注入、第4項がドライブ光の注入を表している。式(3)、(4)は各VCSELの正と負のスピンのキャリア密度の和と差を表している。式(5)はドライブレーザの電場の式であり、第2項が戻り光を表している。式(6)はそのキャリア密度の式となっている。また、式(2)中の τ_c は結合遅延、 η_d はドライブ光注入率、 τ_d はドライブ光の遅延、式(5)の τ_{ext} は戻り光遅延を表している。今回の数値計算では離調 $\Delta\omega$ を0にし、自然放出光に起因するランジュバンノイズを付加している。

3. 数値計算結果

Fig. 2は相互結合の注入率5%における結果である。(a)はドライブ光無し、(b)がドライブ光の注入率を15%としたときの相互相関関数の図である。

Fig. 2の横軸は、VCSEL1、2間の時系列波形のタイムシフト量、縦軸は相互相関係数の値を表す。1に近いほど、精度の高いカオス同期といえる。

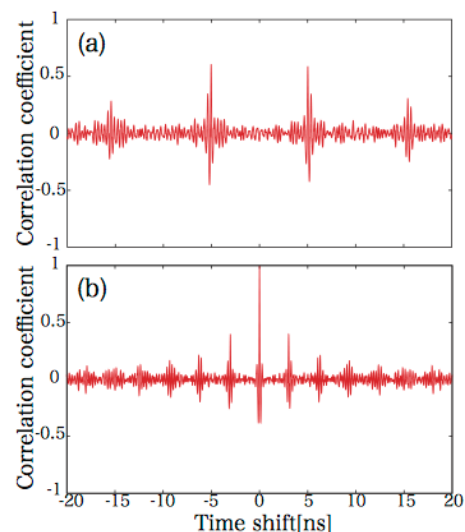


Fig. 2 Correlation function

ドライブ光が無い場合、相関係数の最大ピークは相互結合の遅延分(5ns)波形をずらしたときであるが、ドライブ光が有る場合、最大ピークはタイムシフトが0nsのときとなっており、相関係数も0.999という高い値を示した。また、サブピークについても変化がみられ、ドライブ光が無い場合10ns間隔であったが、ドライブ光が有る場合3ns間隔(戻り光の時間遅延)であった。

4. まとめ

本研究では、相互結合VCSELにおけるドライブ光注入の影響について調査した。ドライブ光注入を行うことにより、相関係数が上昇するだけでなく、VCSEL1、2間で遅延無しの同期が得られた。