

## 光注入により帯域拡大された半導体レーザにおけるカオス同期実験

**Experiment on synchronization of bandwidth-enhanced chaos in semiconductor lasers with optical injection**

奥村 悠<sup>\*</sup>、会田 裕貴<sup>\*</sup>、内田 淳史<sup>\*</sup>  
Haruka Okumura<sup>\*</sup>, Hiroki Aida<sup>\*</sup>, and Atsushi Uchida<sup>\*</sup>

We experimentally investigate the synchronization of bandwidth-enhanced chaos in a semiconductor laser (drive laser) that is subject to optical injection from another chaotic semiconductor laser (injection laser) with optical feedback. Effective bandwidth enhancement is achieved over 12 GHz outside the injection locking range. The bandwidth-enhanced chaotic signal of the drive laser is injected into a third semiconductor laser (response laser) for synchronization. Synchronization of chaos with a bandwidth greater than 12 GHz is observed between the drive and response lasers, under the injection locking condition. High-quality chaos synchronization is observed within the injection locking range between the drive and response lasers.

**Keywords: Chaos, Laser, Synchronization, Bandwidth enhancement, Security, Information technology**

## 1. はじめに

近年、半導体レーザの特徴である数 GHz オーダでの超高速不規則振動を利用した光カオス秘匿通信の研究が盛んに行われている<sup>1)</sup>。光カオス秘匿通信は送信者側でカオス波形にメッセージを埋め込み、受信者側ではカオス波形を差し引くことでメッセージの送受信を行う方法である。この時、送受信間でカオス波形を共有するカオス同期法がメッセージの符号化に必要不可欠となる。代表的な光カオス秘匿通信方式として chaos masking, chaos modulation, chaos shift keying 等が挙げられ、これらは既に実証実験が達成されている<sup>2)</sup>。近年の研究では、市街地へ敷設された光ファイバ回線において高速光カオス長距離通信が実験的に実証されている<sup>1)</sup>。

光カオス秘匿通信において送受信できるメッセージ

<sup>\*</sup> 埼玉大学 大学院理工学研究科 数理電子情報部門  
Department of Information and Computer Sciences, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama City, Saitama, 338-8570, Japan

の伝送速度はカオス振動の周波数によって決まるため、より高速な通信を実現させるためには広帯域なカオスキャリアを発生させる必要がある。近年の研究では、外部レーザからの光注入により帯域拡大されたカオス同期が数値計算により達成されている<sup>3)</sup>。しかしながら、光注入により 10GHz 以上に帯域拡大されたカオス同期の実験的観測は報告されていない。10GHz を超える広いスペクトル帯域を持つカオス光はレーザ装置と検出機器の両方に高周波雑音成分を含むため、数 GHz 付近の遅いカオス振動よりも同期を得ることが困難と予測される。

そこで本研究では、光注入により帯域拡大された半導体レーザにおけるカオス同期を実験的に観測することを目的とする。2 つの半導体レーザを一方向に結合することで、カオスの帯域拡大を実験的に達成する。また、帯域拡大された半導体レーザカオスをさらに別の半導体レーザに一方向に注入することで、カオス同期を実験的に観測する<sup>4)</sup>。

(原稿受付日：平成 22 年 5 月 31 日)

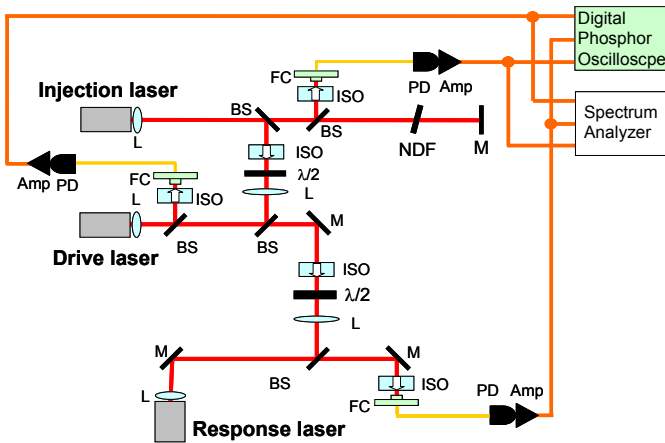


Fig. 1 Experimental setup for the synchronization of bandwidth-enhanced chaos in three semiconductor lasers.

## 2. 実験装置図

3つの半導体レーザを用いたカオスの帯域拡大と同期の実験装置図を Fig. 1 に示す。本実験では3つの分布帰還型(DFB)半導体レーザ(波長 1547 nm)を使用した。3つの半導体レーザは同一の基板から作られており、それらは類似したレーザパラメータ値を有している。ここでは外部注入用レーザを Injection laser と呼び、Injection laser の光注入により帯域拡大されるレーザを Drive laser と呼ぶ。さらに帯域拡大された Drive laser を光注入するための同期用レーザを Response laser と呼ぶことにする。半導体レーザの注入電流と温度は専用コントローラを用いて制御しており、半導体レーザの波長は温度制御により 0.097 nm/K の割合で精密に設定可能である。ここで温度調節分解能は 0.01 K である。各々のレーザの注入電流のしきい値  $I_{th}$  は 8.7 mA (Injection laser)、7.6 mA (Drive laser)、9.2 mA (Response laser) である。

Injection laser に外部鏡(M)を用い、戻り光を付加することでカオスを発生させた。外部鏡と Injection laser との距離は 1.4 m であるため、往復遅延時間は 9.3 ns である。また戻り光量は可変減光フィルタ(NDF)を用いることで調節した。一方 Drive laser と Response laser には外部鏡を用いていない。Injection laser から発生されたカオス光はビームスプリッタ(BS)によって分割され、一方は Drive laser に注入され

る。このとき2つの光アイソレータ(ISO)と2つの $\lambda/2$ 板を用いることで一方向結合を達成させている。光注入により Drive laser が帯域拡大カオスを発生するように、Injection laser と Drive laser の波長は調節される。

次にカオス同期を実現するために、Drive laser からの帯域拡大カオス光は、アイソレータとレンズを通して Response laser へと一方向に注入される。各々のレーザ出力はビームスプリッタにより分割され、光アイソレータを通り、ファイバーコリメータ(FC)に注入される。その後、光ファイバを通り光検出器(PD)によって電気信号に変換される。電気信号増幅器(Amp)によって増幅された信号をデジタルオシロスコープ(OSC)と RF スペクトルアナライザ(SA)に送り、各々のレーザの時間波形と RF スペクトルが観測される。またレーザの光波長は光スペクトルアナライザにより計測される。

## 3. 帯域拡大カオスの発生

初めにレーザの注入電流を調節することで Injection laser と Drive laser の緩和発振周波数を共に 8.0 GHz に設定した。この時の各レーザの注入電流は Injection laser で 44.39 mA (5.1  $I_{th}$ )、Drive laser で 43.50 mA (5.7  $I_{th}$ ) となった。Injection laser に戻り光を付加してカオスを発生させ、そのカオス光を Drive laser に一方向に注入した。帯域拡大カオスを発生させるために、2つのレーザ温度を調整することで光波長の制御を行った。Injection laser の光波長は 1547.333 nm に設定し、Drive laser の光波長を 1547.418 nm に設定した。この時 Injection laser と Drive laser の光波長差をインジェクションロッキングの範囲外の +0.073 nm に設定した。インジェクションロッキングとは2つの半導体レーザの光波長が近い場合、長波長の光の一部が短波長の光に注入されると、引き込みが生じて2つのレーザの光波長が一致する現象である<sup>5)</sup>。つまり本実験では Injection laser と Drive laser の光波長が一致しない条件に設定してある。

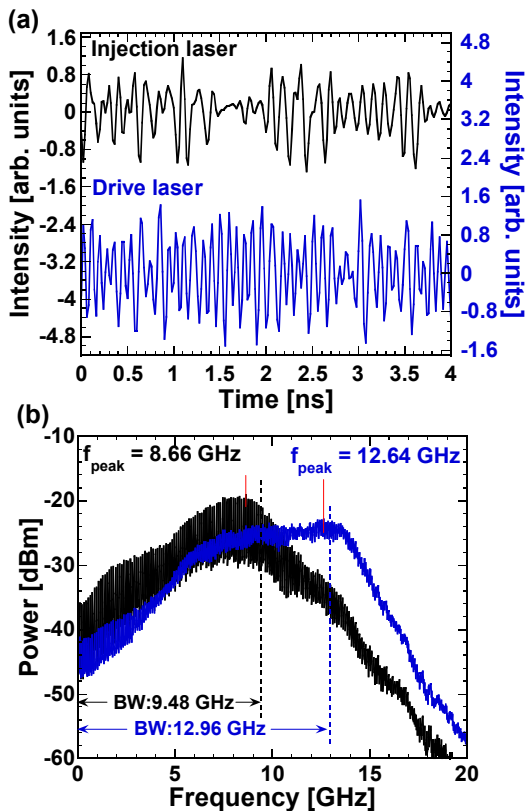


Fig. 2 Experimental results of bandwidth enhancement of chaos. (a) Temporal waveforms of the Injection and Drive lasers, and (b) their corresponding RF spectra. (b)  $f_{peak}$ , peak frequency of the RF spectrum; BW, bandwidth of the RF spectrum.

Fig. 2(a)は Injection laser の時間波形と、Injection laser を注入後の Drive laser の時間波形を示した図である。Drive laser のカオス振動が Injection laser より速く振動していることが分かる。この時の RF スペクトルを Fig. 2(b)に示す。中心周波数を見ると Injection laser が 8.66 GHz に対して注入後の Drive laser は 12.64 GHz と高くなっていることが分かる。また、カオスの帯域幅についても調査を行った。本研究では RF スペクトル全体の強度の 80 %を含む周波数帯域を帯域幅と定義している<sup>4)</sup>。帯域幅を調査したところ、Injection laser では 9.48 GHz であるのに対して、注入後の Drive laser は 12.96 GHz と帯域拡大していることが観測された。以上より、Injection laser と Drive laser の光波長を一致させない(インジェクションロッキングの範囲外)の場合に、Drive laser の帯域を拡大することに成功した。

#### 4. 帯域拡大カオス同期

次に Drive laser の帯域拡大カオスを Response laser に一方向に光注入し、帯域拡大カオス同期実験を行った。まず Drive laser は Injection laser からの光注入によって帯域拡大され、その光波長は 1547.418 nm から 1547.476 nm に変化している。次に Response laser の注入電流を 13.84 mA ( $1.5 I_{th}$ )に調節し、緩和発振周波数を 3.0 GHz に設定した。Drive laser で発生させた帯域拡大カオス光を一方向に Response laser へ注入し、カオス同期を達成させた。帯域拡大の場合と対照的に、Response laser の光波長は Drive laser に対してインジェクションロッキングの範囲内に設定している。この時、光注入前の Response laser の光波長は 1547.264 nm であり、Injection laser からの光注入により帯域拡大された Drive laser との光波長差は -0.212 nm であった。

Fig. 3(a)は Injection laser, Drive laser, Response laser の光スペクトル(光波長)である。Injection laser の光波長は帯域拡大させるために Drive laser と一致していない事が分かる。一方、Drive laser と Response laser の光波長はインジェクションロッキングによって一致していることが分かる。これより、帯域拡大カオス同期はインジェクションロッキング範囲内で達成されている。この時の Drive laser と Response laser の時間波形を Fig. 3(b)に示す。時間波形を見ると Drive laser と Response laser はほぼ同一の出力振動をしており、カオス同期していることが分かる。さらに Fig. 3(c)に 2 つの時間波形の相関図を示す。この時の相互相関関数を求めたところ、0.954 となり高い同期精度を示した。またこの時の RF スペクトルを Fig. 3(d)に示す。Drive laser の中心周波数は 12.22 GHz、Response laser は 12.12 GHz となった。また帯域幅を求めると Drive laser が 12.28 GHz、Response laser が 12.16 GHz となり、ほぼ等しいことが分かる。

以上の結果により、12 GHz 周波数帯域における帯域拡大カオスの高精度な同期を実験的に観測することができた。

### 5. おわりに

本研究では半導体レーザにおける帯域拡大カオス同期の実験的観測を行った。はじめに Injection laser に戻り光を付加することでカオスを発生させた。そのカオス光を Drive laser に注入し、2つのレーザの光波長を一致させない場合に、12 GHz を超える帯域拡大カオスの発生を実験的に実現した。

また帯域拡大された Drive laser のカオス光を Response laser に注入し、12 GHz を越える帯域拡大カオスの同期を実験的に観測した。Drive laser と Response laser 間でインジェクションロッキングを達成させて光波長を一致させたところ、相互相関関数が 0.954 という高精度なカオス同期を達成した。

本研究で得られた知見は、10 GHz を超える高速光カオス秘匿通信や高速物理乱数生成器における要素技術として非常に重要である。

### 参考文献

- 1) A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I. Fischer, J. Garcia-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, and K. A. Shore, *Nature*, vol.438, pp.343-346 (2005).
- 2) A. Uchida, F. Rogister, J. García-Ojalvo, and R. Roy, *Progress in Optics*, edited by E. Wolf, vol.48, chap.5, pp.203-341, Elsevier, The Netherlands (2005).
- 3) Y. Takiguchi, K. Ohyaig, and J. Ohtsubo, *Optics Letters*, vol.28, pp.319-321 (2003).
- 4) H. Someya, I. Oowada, H. Okumura, T. Kida, and A. Uchida, *Optics Express*, vol. 17, no. 22, pp. 19536- 19543 (2009).
- 5) J. Ohtsubo “*Semiconductor Lasers -Stability, Instability and Chaos-*,” Second Edition, Springer-Verlag, Berlin (2008).

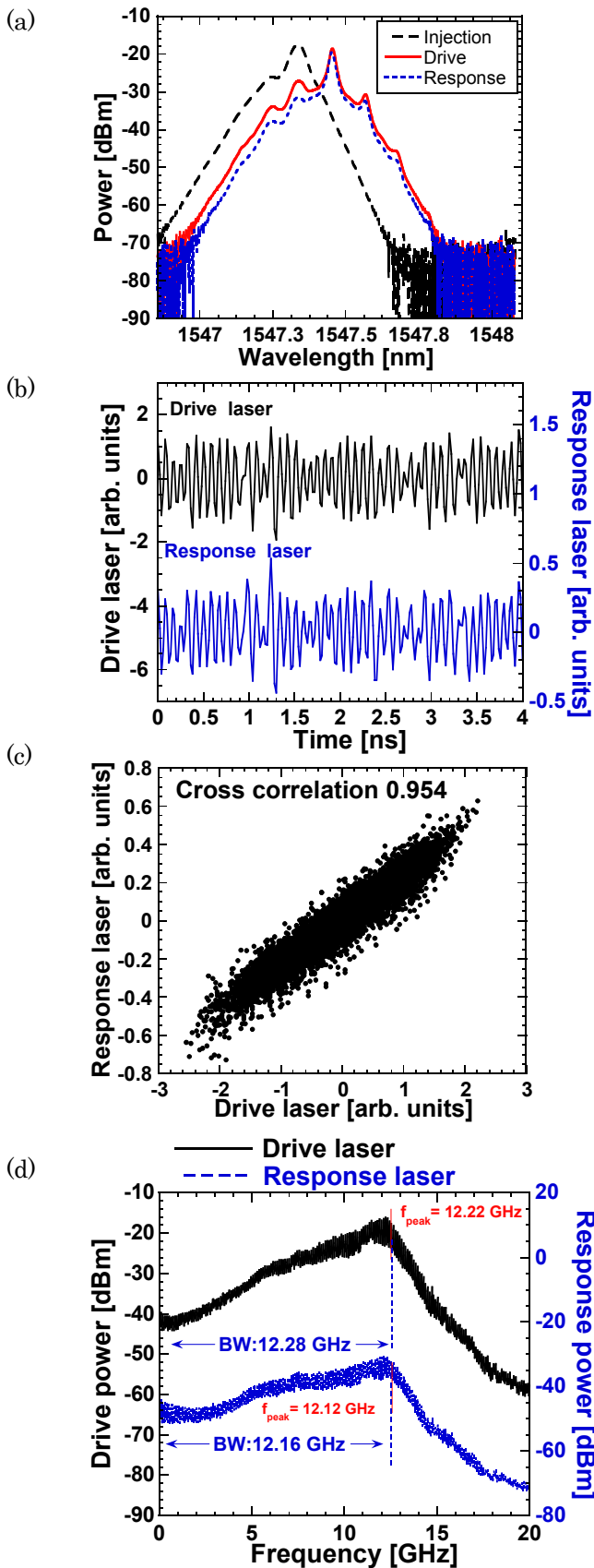


Fig. 3 Experimental results of synchronization of bandwidth-enhanced chaos. (a) Optical spectra, (b) temporal waveforms, (c) cross correlation, and (d) RF spectra of the Drive and Response lasers.