戻り光を有する半導体レーザにおける周波数ダイナミクスの抽出

Extraction of frequency dynamics in a semiconductor laser with optical feedback

埼玉大、○舟橋 遼、菅野 円隆、内田 淳史
Saitama University
○Ryo Funabashi, Kazutaka Kanno, and Atsushi Uchida
E-mails: r.funabashi.728@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

はじめに: 戻り光を付加した半導体レーザから出力される光は、カオスと呼ばれる GHz オーダの高速不規則な振動を生じる。これまでに、戻り光を有する半導体レーザの光強度ダイナミクスを用いた高速物理乱数が提案されており、光強度ダイナミクスを用いた応用が報告されている[1]。一方で戻り光を有する半導体レーザは、光強度だけでなく、周波数や位相も同様にカオス振動する。

これまでに、 MHz オーダで低速振動する低周波不規則振動の周波数ダイナミクスを光ヘテロダイン検波により抽出した報告例がある[2]。しかしながら、GHz オーダのカオス振動における周波数ダイナミクスの抽出は報告されていない。このような高速振動する位相ダイナミクスの検出には、コヒーレント光通信に用いられる光コヒーレント検波技術が有用であると考えられる[3]。

そこで本研究では、光コヒーレント検波を用いることにより、GHz オーダで高速振動する半導体レーザカオスの周波数ダイナミクスの抽出を数値計算にて行うことを目的とする。

方法: 光コヒーレント検波による位相および周波数ダイナミクスの抽出方法を以下に示す。Fig. 1 に本研究における数値計算のモデル図を示す。90° 光ハイブリッドを用いた位相ダイバーシティホモダインレシーバにより、レーザカオスの位相を抽出する。戻り光を有する半導体レーザ (Laser 1) と戻り光を有していない参照レーザ (LO) は、片方の信号が 180° 位相シフトする 3 dB カプラで干渉させる。そして、光強度はバランスドフォトレシーバにより検出される。ここで、Laser 1 と LO の複素電界をそれぞれ、E_S、 E_{LO} とすると、光ハイブリッドの出力光強度は以下のようになる。

$$I_1(t) = |E_S(t) + E_{LO}(t)|^2 \quad (1)$$

$$I_2(t) = |E_S(t) - E_{LO}(t)|^2 \quad (2)$$

$$I_3(t) = |E_S(t) + iE_{LO}(t)|^2 \quad (3)$$

$$I_4(t) = |E_S(t) - iE_{LO}(t)|^2 \quad (4)$$

ここで、複素電界は$E(t) = A(t)\exp(i2\pi ft)$で表される。また、バランスドフォトレシーバの出力は以下の式により与えられる。

$$I_I(t) = I_1(t) - I_2(t) \quad (5)$$

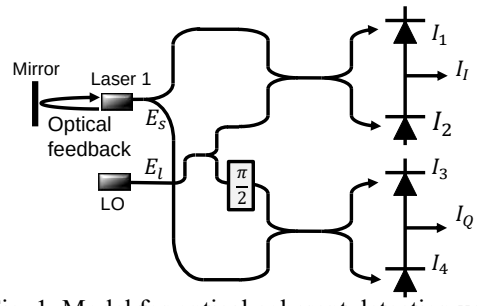

Fig. 1. Model for optical coherent detection using 90-degree optical hybrid.

$$I_Q(t) = I_3(t) - I_4(t) \quad (6)$$

式(5)と(6)を用いることで、式(7)で記述される Laser 1 の複素電界を復元できる。

$$I_e(t) = I_I(t) + iI_Q(t) = A_S(t)A_{LO}\exp[i2\pi\Delta ft + \theta_s(t) + \theta_n(t)] \quad (7)$$

ここで、Δfは初期光周波数差を表し、$\theta_s(t)$と$\theta_n(t)$はそれぞれ、Laser 1 の位相とノイズの位相を表している。初期光周波数差を$\Delta f = 0$とすることで、以下の式により位相を抽出できる。

$$\theta_e(t) = \arg(I_e(t)) \quad (8)$$

また、周波数ダイナミクス$\Delta f_{opt}(t)$はτ秒前との位相差により算出される。

$$\Delta f_{opt}(t) = \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\phi(t) - \phi(t-\tau)}{\tau} \quad (9)$$

結果: 本研究における Laser 1 の光強度ダイナミクスを Fig. 2(a)に示す。Laser 1 は GHz オーダの高速カオス振動をしていることが分かる。次に、式(8)により抽出した位相から算出された Laser 1 の周波数ダイナミクスを Fig. 2(a)の赤色の点線に示す。また、Fig. 2(a)の黒色の実線は、モデル方程式の位相ダイナミクスから直接算出した Laser 1 の周波数ダイナミクスの理論値を表している。本手法により抽出された周波数ダイナミクスと理論値は完全に一致しており、その相関値は 1.00 であった。以上より、Laser 1 の周波数ダイナミクスは光強度と同様に、GHz オーダの高速カオス振動を生じていることが分かる。

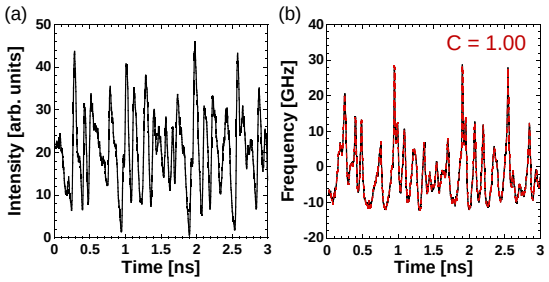

Fig. 2. (a) Optical intensity dynamics of Laser 1. (b) Frequency dynamics obtained by coherent detection (red) and theoretical frequency dynamics (black).

まとめ: 本研究では、光コヒーレント検波を用いて、GHz オーダで高速振動する半導体レーザカオスの周波数ダイナミクスの抽出を行った。抽出した結果は理論値と完全に一致することが明らかとなった。

参考文献

[1] A. Uchida, et al., Nat. Photon., **2**, 728 (2008).
[2] D. Brunner, et al., Sci. Rep., **2**, 732 (2012).
[3] K. Kikuchi, IEICE Electronics Express, **8**, 20 (2011).