

戻り光半導体レーザにおける光ヘテロダイン検波を用いた 周波数ダイナミクスの数値計算

Numerical calculation on frequency dynamics using optical heterodyne detection in 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: 半導体レーザに戻り光を付加することでカオスと呼ばれる GHz オーダの高速な不規則振動が発生する. 近年, 戻り光を有する半導体レーザの光強度時間波形を用いた高速物理乱数生成が提案されている[1]. 一方で, 戻り光を有する半導体レーザからのレーザカオス出力には光強度だけでなく, 周波数や位相の情報も含まれ, それらも時間変化する. しかしながら, 実験において周波数や位相の高速ダイナミクスを直接検出することは困難である.

これまでに, 光ヘテロダイン検波を用いて低周波不規則振動のような MHz オーダの低速な振動の周波数ダイナミクスの抽出が報告されている[2,3]. しかし, 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行われていない.

そこで本研究では, GHz オーダのカオス振動に対して, 周波数ダイナミクスの抽出を数値計算で行うことを目的とする.

方法: ヘテロダイン検波による周波数ダイナミクス抽出の方法を以下に示す. Fig. 1 に本研究における数値計算のモデル図を示す. レーザの電界振幅は $\hat{E}(t) = A(t) \exp(j2\pi f t)$ で表される. ここで, 戻り光を有する半導体レーザ 1 と戻り光を有していない参照レーザを干渉させることにより生じるヘテロダイン光の光強度 I_{htr} は以下のように記述できる.

$$\begin{aligned} I_{htr}(t) &= |\hat{E}_{LD}(t) + \hat{E}_{ref}|^2 \\ &= I_{LD}(t) + I_{ref} \\ &\quad + 2A_{LD}(t)A_{ref} \cos(2\pi\Delta f(t)t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで, I_{LD}, I_{ref} は, レーザ 1, 参照レーザの光強度をそれぞれ表している. また $\Delta f(t) = f_{LD}(t) - f_{ref}$ は, レーザ 1 と参照レーザの光周波数差を表している. なお, レーザ 1 は戻り光を有しているため, 電界振幅や周波数はカオス振動しているが, 参照レーザは戻り光を有していないため, それらは一定であると仮定する.

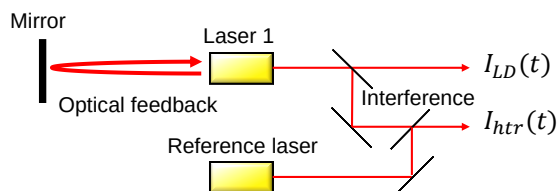


Fig. 1 Model for semiconductor laser with optical feedback.

式(1)の $\Delta f(t)$ を検出することで周波数ダイナミクスを抽出できるが, ヘテロダイン光の光強度には, 光周波数差 $\Delta f(t)$ によるビート振動とレーザ 1 のカオス振動が含まれているため, ヘテロダイン光の光強度から光周波数差 $\Delta f(t)$ を直接抽出することは困難となる. そこで, 式(1)の両辺をフ

ーリエ変換し, $\Delta f(t)$ について整理すると以下のように記述できる[3].

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[\cos(2\pi\Delta f(t)t)] \\ = \frac{\{\mathcal{F}[I_{htr}(t)] - \mathcal{F}[I_{LD}(t)]\}}{2} \ast \mathcal{F}[A_{LD}(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, $\mathcal{F}[\cdot]$ はフーリエ変換を表し, 記号 $\ast$ は逆畳み込み積分を表す. また, 瞬時の光周波数差 $\Delta f(t)$ を取り出すために, ある窓幅で時間波形を切り取り, その範囲を積分区間とする. また, 周波数ダイナミクスは, 理論的には以下で記述される光周波数差 $\Delta f_{opt}(t)$ と一致する.

$$\Delta f_{opt}(t) = \frac{\phi(t) - \phi(t - \tau)}{\tau} \quad (3)$$

ただし, $\phi(t) - \phi(t - \tau)$ はレーザ内部の電界と戻り光電界の位相差を表している.

結果: 本研究ではレーザ 1 からの光強度 $I_{LD}(t)$ とヘテロダイン光の光強度 $I_{htr}(t)$ を用いて半導体レーザ 1 の周波数ダイナミクスの抽出を行った. ここで, 光周波数差に由来する振動が周波数ダイナミクスに表れるので, ローパスフィルタで取り除いている.

本研究で用いたレーザ 1 とヘテロダイン光の光強度時間波形を Fig. 2(a) に示す. また抽出したレーザ 1 の周波数ダイナミクスと, 式(3)の理論値である光周波数差を Fig. 2(b) に示す. 抽出した周波数ダイナミクスは理論値と良く一致していることが分かる. また, Fig. 2(b) の周波数ダイナミクスは Fig. 2(a) の光強度ダイナミクスと異なる波形を示していることが分かる.

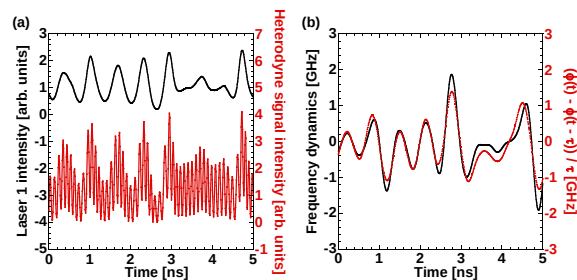


Fig. 2 (a) Optical intensity dynamics of laser 1 (black) and heterodyne signal (red). (b) Frequency dynamics of laser 1 with low-pass filter (black) and optical frequency difference (Theoretical value, red).

まとめ: 本研究では, 光ヘテロダイン検波を用いて戻り光を有する半導体レーザの周波数ダイナミクスの抽出を数値計算にて行い, 理論値と良く一致することが分かった.

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] D. Brunner, et al., Phys. Rev. Lett., **115**, 53901 (2015).