

外部共振器型半導体レーザー線幅の電流ノイズの影響評価

岩國研究室 山口 朋華

1. 研究の背景と目的

分光学は原子や分子の内部構造を解明し、物理学、化学、天文学など様々な分野に寄与してきた。1960年にレーザーが誕生すると、高い周波数安定度を持つことから精密分光に必要な道具として研究されてきた。近年、安価かつ狭線幅な波長可変レーザーである外部共振器型半導体レーザーの登場によって、比較的手軽にレーザー分光が行えるようになった。

本研究では、外部共振器型半導体レーザーの線幅への電流ノイズの影響を評価する。そこで、低ノイズのLDドライバーと高ノイズのLDドライバーを用意し、それぞれの電流ノイズを測定した。そして外部共振器型半導体レーザーと狭線幅な光コムのビート信号を測定することによって線幅を測定し、電流ノイズの影響を観察した。ここで狭線幅な光コムは狭線幅なNd:YAGレーザーに光コムを位相同期することで得た。

2. 外部共振器型半導体レーザー

半導体レーザーは、劈開面でフレネル反射をしてレーザー発振し、二つの劈開面が共振器の役割を果たすため、共振器長が数mmと非常に短い。図1は発振周波数の選択の原理を示す。半導体レーザーの利得スペクトル(図1(d))と半導体レーザーの縦モード(図1(b))が重なったところでレ

ザー発振する。ここで、隣接する縦モードの共振周波数間隔FSRは、共振器長を L として

$$\nu_{FSR} = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

として表せられる。干渉縞の鋭さ(フィネス)はFSRと線幅の比で、共振器の半値全幅 $\Delta\nu$ を用いて、

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = \frac{\nu_{FSR}}{\Delta\nu} \quad (2)$$

と表す。

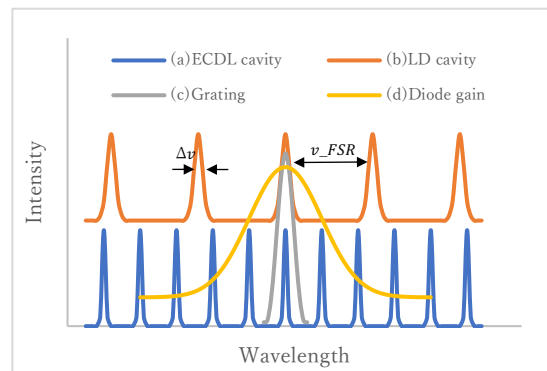


図1 発振周波数の選択

LDの外部で共振器を組み共振器長を伸ばすとFSRが小さくなる。フィネスは一定とすると線幅は(2)式より図1(a)のように細くなる。しかし、利得のスペクトルの中に発振しうる縦モードが多く含まれ、マルチモード発振する恐れがある。そこで回折格子(図1(c))で一つ縦モードだけ損失を少なくし、一つのモードだけで発振させる。このLDの外部で共振器を組んだレーザー

を外部共振器型半導体レーザー(ECDL)という。

半導体レーザーのスペクトル線幅は周波数雑音に起因する。自然放出によって生じるレーザーの周波数揺らぎ $\Delta\nu_0$ は、シャウロー・タウンズの式で表される[1]。

$$\Delta\nu_0 = (\Delta\nu)^2 \frac{2\pi h\nu_0}{P} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\nu$ は共振器の半値全幅、 ν_0 はレーザーの発振周波数である。今回の研究で使ったレーザーの共振器長は $L = 25 \text{ mm}$ 、 $R = 0.3$ なので、式(3)より共振器の半値全幅は 2.8 GHz となる。したがって、 $\nu_0 = 200 \text{ THz}$ 、 $P = 10 \text{ mW}$ とすると $\Delta\nu_0 = 0.64 \text{ kHz}$ となる。一般に ECDL の線幅を測定すると数百 kHz～数 MHz で、この量子限界の線幅の値より大きい。その原因は、音響ノイズや電流ノイズによる影響が考えられる。そこで本研究では、音響ノイズは ECDL を箱詰して遮断し、またペルチェ素子による温度制御、ゲインチップの温度制御を行った。図2は箱詰めした ECDL を示す。この ECDL と光コムとのビート信号を測定し、線幅の電流ノイズによる影響を評価した。



図2 箱詰めした ECDL

3.2. LD ドライバーの電流ノイズ測定

電流ノイズの大きさが異なる2台の LD ドライバーを用意し、これらの電流ノイズを測定した。図3は電流ノイズ測定の概要図を示す。

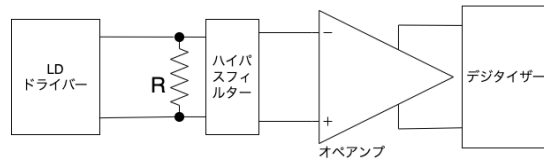


図3 電流ノイズ測定の概要図

電流を電圧に変換するため測定回路に抵抗を入れ、ハイパスフィルターにより直流成分を除き、オペアンプで交流成分の信号を増幅させた。測定回路の負荷抵抗は 5Ω 、オペアンプゲインは2000倍である。電流ノイズは低周波での影響が考えられるので、帯域幅 1 MHz 、分解能 10 Hz とした。サンプリング周波数はナイキスト条件から 2 MHz 、1秒間あたりのデータ数は(4)式から求められ、 2×10^5 個とした。

$$\text{データ数} = \frac{\text{サンプリングレート}}{\text{分解能}} \quad (4)$$

2台の LD ドライバーに電流 100 mA を流して電流ノイズを測定した。その結果を図4に示す。図4より、電流ノイズが低ノイズ LD ドライバーの方が 100 Hz から 200 kHz の測定において1桁ほど小さく測定限界以下となった。また、自作したケーブルはシールドが少なくノイズが乗ることが考えられたので、接続するケーブルによる電流ノイズの違いを評価した。測定結果を図5に示す。ケーブルの違いによって電流ノイズに大きな差は生じなかった。

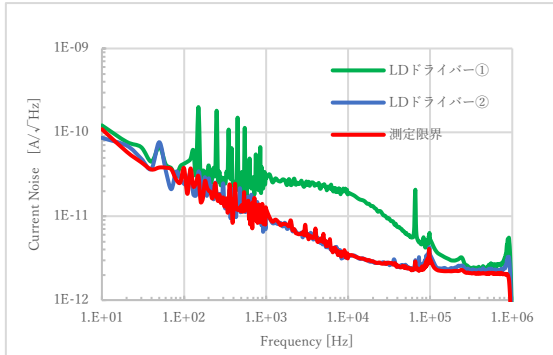


図4 電流ノイズの比較(LD ドライバー)

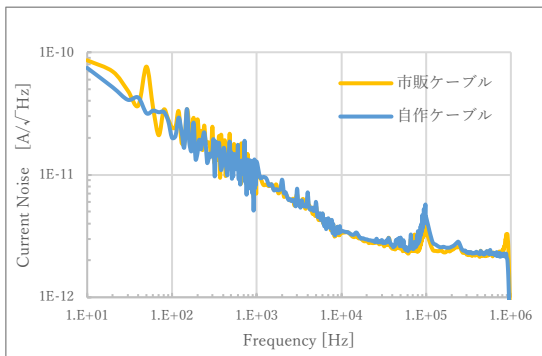


図5 電流ノイズ評価(ケーブル)

2-1. 線幅測定の方法

2-2-1. 光コム

光コムの出力は、等時間間隔で並んだ光パルス列である。図6は周波数領域の光コムの出力を示す[2]。

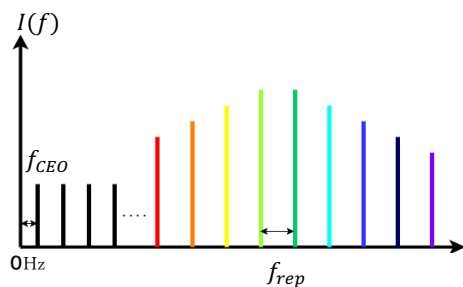


図6 光コム

縦モードの間隔を繰り返し周波数 f_{rep} 、光コムを仮想的に 0 Hz まで拡張した時のあまりの周波数はキャリアエンベロープ周波数 f_{ceo} として、n 番目のモード周波数 f_n は、

$$f_n = f_{ceo} + n f_{rep} \quad (5)$$

と表せる。

2-2-2. 光コムを用いた線幅測定

波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーは、固有レーザーノイズが低く、狭いスペクトル線幅を持つ。この Nd:YAG レーザーに光コムの 1 モードを位相同期して狭線幅化し、同時に f_{ceo} ラジオ周波数領域の基準信号に位相同期することで光コムの全てのモードが狭線幅化される[3]。

図7は ECDL の線幅測定の概要図を示す。ECDL の周波数 f_{ECDL} に最も近い光コムの周波数 f_{comb} と f_{ECDL} のビート信号 f_{beat}^{ECDL} を受光器で検出する。

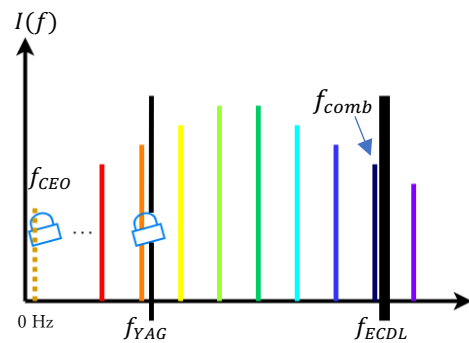


図7 線幅測定の原理

光コムと ECDL の周波数ゆらぎをそれぞれ $\Delta\nu_{comb}$ 、 $\Delta\nu_{ECDL}$ とすると、受光器で検出される線幅 $\Delta\nu_{beat}^{ECDL}$ は

$$\Delta\nu_{beat}^{ECDL} = \Delta\nu_{comb} + \Delta\nu_{ECDL}$$

となる。このとき、光コムの線幅が ECDL の線幅より非常に小さければ ($\Delta\nu_{comb} \ll \Delta\nu_{ECDL}$)、

$$\Delta\nu_{beat}^{ECDL} = \Delta\nu_{ECDL}$$

となる。

図8は線幅測定の光学系のセットアップを示す。光コムと ECDL のレーザーを 7:3 のファイバーカップラで光軸を揃えた。回折格子で波長選択し集光レンズで集光して受

光器で検出した。

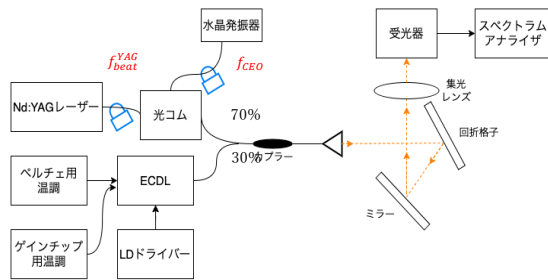


図8 線幅測定の実験系

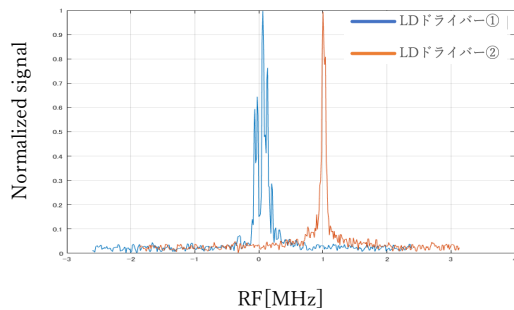


図9 線幅測定結果

図9は測定したビート信号を示す。ここで分解能帯域幅(RBW)は30 kHz, 掃引時間は7 ms に設定した。ビート信号の半値全幅をグラフから読み取り, 低ノイズの LD ドライバーで駆動した場合の線幅は, 100 kHz 以下となった。Nd:YAG レーザーに位相同期した光コムの線幅は数 kHz なので $\Delta\nu_{comb} \ll \Delta\nu_{ECDL}$ が満たされ, この線幅は ECDL の線幅とみなすことができる。電流ノイズが大きい LD ドライバーで駆動した場合の線幅は数 100 kHz となり, 電流ノイズが小さい LD ドライバーを駆動した場合の線幅の方が, 狭線幅になる。

3. まとめと今後の展望

電流ノイズが大きい LD ドライバーと小さい LD ドライバーで ECDL を駆動した場合の線幅は, 数 100 kHz から 100 kHz 以下に小さくなった。

電流ノイズが大きい LD ドライバーで駆動した場合の線幅はジッターノイズが多く, 今回の測定方法では, 線幅を正確に測れなかった。今後は, より定量的にノイズの評価を行うために, ビート信号の周波数ノイズ成分の測定を行う。

4. 参考文献

- [1] Sebastian D. Saliba and Robert E. Scholten, “Linewidths below 100 kHz with external cavity diode lasers,” Doc. ID 118174 (2009).
- [2] Steven T. Cundiff and Jun Ye, “Colloquium: Femtosecond optical frequency combs,” Rev. Mod. Phys. **75**, (2003).
- [3] H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, Y. Nakajima, K. Iwakuni, D. Akamatsu, S. Okubo, T. Kohno, A. Onae and FL. Hong, “Spectroscopy of ^{171}Yb in an optical lattice based on laser linewidth transfer using a narrow linewidth frequency comb,” Opt. Express, 21 (7), 7891-7896 (2013).