

アセチレン安定化半導体レーザー光源の線幅狭窄化

量子・物質工学科 植田研究室 橋本 並樹

1. はじめに

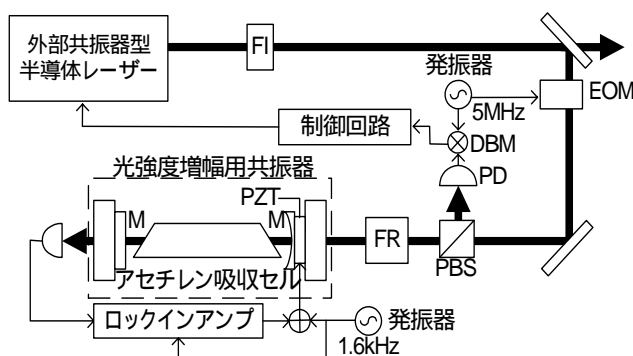
周波数安定度の高い光源にはさまざまな用途がある。光周波数標準として用いる光源には長期安定度が必要である。分光、光路長計測で用いられる光源には長期安定度に加えてビート線幅が細い必要がある。当研究では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の周波数標準として開発されたアセチレン安定化半導体レーザーの分光、測長応用を目的とした線幅狭窄化を行った。

2. 原理

2.1. アセチレン安定化半導体レーザー光源

アセチレン安定化半導体レーザー光源とは、吸収の弱いアセチレンの飽和吸収線に外部共振器型半導体レーザー(ECLD)の周波数を安定化させた光源である。周波数安定化の仕組みは、まず ECLD の光を EOM で位相変調を加え強度増幅用共振器に入射させる。共振器からの反射光を PD で受け DBM で復調し誤差信号を得る。この誤差信号を用いて、ECLD の周波数を共振器の共振周波数に安定化する。次に、ミラーに設置してあるピエゾ素子に変調信号として周波数 f_m の正弦波の電圧をかけることで共振周波に周波数変調をかける。これにより、共振器に安定化している ECLD にも周波数変調がかかるので、共振器からの透過光を復調することで誤差信号が得られ、誤差信号をもとにピエゾ素子を制御することで共振器をアセチレンの飽和吸収線に安定化させる。よってアセチレンに安定化された ECLD の周波数 f には以下に様な周波数変調がかかり、ビート線幅が広がってしまう。

$$f = f_{C_2H_2} + M \sin(2\pi f_m t) \quad f_{C_2H_2}: \text{アセチレン飽和吸収周波数} \quad M: \text{変調深さ}$$



DBM : ダブルバランスドミキサー
PBS : 変更ビームスプリッター
PZT : ピエゾ素子
EOM : 電気光学素子
FI : ファラデーアイソレータ
FR : ファラデーローテータ
PD : フォトダイオード
M : ミラー

図 2.1.1 : アセチレン安定化半導体レーザー

2.2. 音響光学変調器

結晶中に圧電素子などで超音波を発生させると周期的な屈折率変化が生じる。これが回折格子となりブラッグ回折が生じ、光ドップラー効果によって周波数が増加する。一次回折光の周波数 f_1 と回折角 θ を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{周波数 } f_1 &= f + f_{AO} & f: &\text{入射光の周波数} & f_{AO}: &\text{AOM 駆動周波数} \\ \text{回折角 } \theta &= \sin^{-1}(\lambda / \lambda_{AO}) & \lambda: &\text{入射光の波長} & \lambda_{AO}: &\text{AOM 駆動波長} \end{aligned}$$

よって Piezo 素子の変調に使用している変調信号を用いて AOM 駆動周波数に逆位相で変調を加えることで、光源の周波数変調を打ち消すことができる。

$$\begin{aligned} f_1 &= f + f_a \\ &= f_{C2H2} + M \sin(2\pi f_m t) + f_a - M \sin(2\pi f_m t) \\ &= f_{C2H2} + f_a \end{aligned} \quad f_a: \text{AOM 中心駆動周波数}$$

3. 実験

変調信号の位相と変調深さを位相シフターとアンプを用いて調整した後、シンセサイザーに変調信号として入力。周波数変調のかかった AOM 駆動周波数信号を用いることで変調打ち消しを行った。また、AOM の一次回折光の回折角は AOM 駆動周波数に依存するため、駆動周波数に周波数変調を加えると回折角はゆらいでしまう。このゆらぎは、凹面鏡を用いて一次回折光を AOM に通し回折させることで抑制した。

最初に市販のシンセサイザー (Agilent 社製 E4420B) を用いて変調打ち消しを行った。その結果、変調打ち消しの効果がみられたため、より実用化を考え、小型で安価であるため変調打ち消し用として使用可能なダイレクト・デジタル・シンセサイザー (DDS) を用いた変調打ち消しを行った。

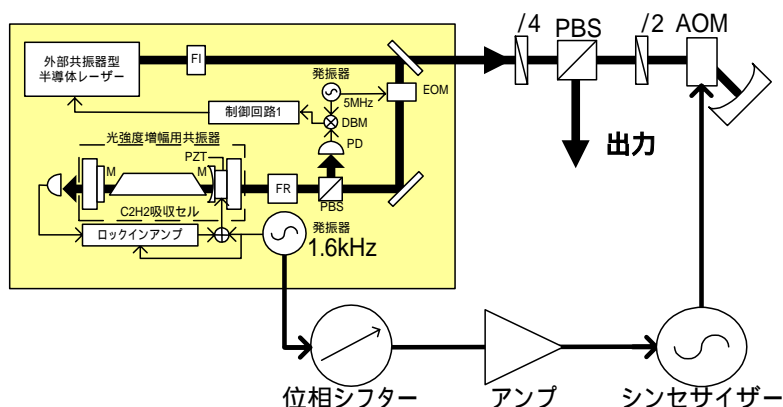


図 3.1 : 変調打ち消しの光学系

4. 評価

25km の光ファイバーを用いて自己遅延ヘテロダイン法でビート線幅を測定した。

4.1. 市販のシンセサイザーを用いた変調打ち消し

市販のシンセサイザーを用いた変調打ち消しを行った結果、図 4.1 の線幅が得られた。アセチレンに安定化時のビート線幅 A : 2.7MHz を変調打ち消しによって線幅 B : 40kHz まで狭窄化することに成功したが、周波数変調を加える前の本来の線幅である共振器安定化時の線幅 C は再現できなかった。本来の線幅を再現できなかった理由として、変調信号の位相と変調深さの調整が不十分であったこと、 piezo素子のヒステリシスによって周波数変調が完璧な正弦波として再現されていないことなどが考えられる。今回得られた線幅 B : 40kHz は共振器安定化時の線幅が 20kHz ことから、変調打ち消しによって本来の線幅をかなり再現することができることが実証された。

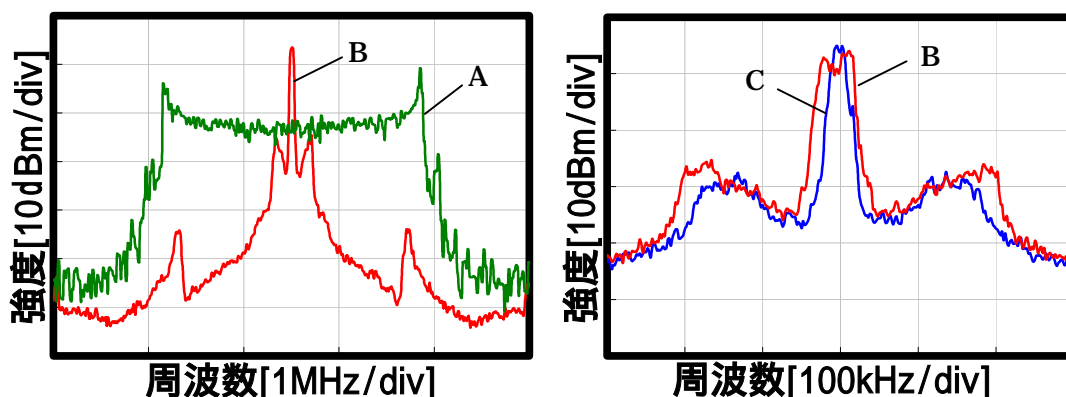
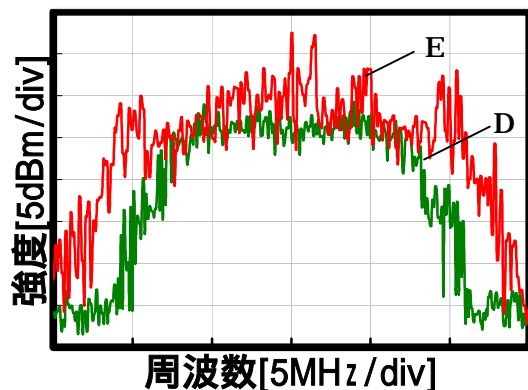


図 4.1 : 市販のシンセサイザーを用いた変調打ち消し

4.2. DDS を用いた変調打ち消し

DDS を用いた変調打ち消しを行った結果、図 4.2.1 の線幅が得られた。図 4.2.1 から分か



z

図 4.2.1 : DDS を用いた変調打ち消し

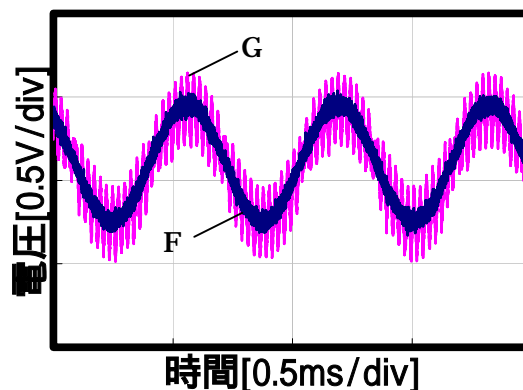


図 4.2.2 : DDS に入力する変調信号(1)

るように、アセチレン安定化時の線幅 D と AOM 駆動周波数に周波数変調が加えた変調打ち消し時の線幅 E で幅が違うが、D より E の方が広がっている。この原因として、今回変調信号の振幅を変調深さとするため比較追従型 A/D 変換を使用したのだが設定が不十分だったため発振してしまい、本来の変調信号(図 4.2.2 : F)に振幅変調が加わったためだと考えられる。図 4.2.2 の変調信号 G は、本来の変調信号 F を A/D 変換した後、D/A 変換した信号である。また、図 4.2.3 に示す通り変調信号を A/D コンバータに入力していない状態 H でも振幅変調が加わった信号 I が DDS に入力され、その結果 図 4.2.4 に示す通り本来の線幅 J を再現できなかった。

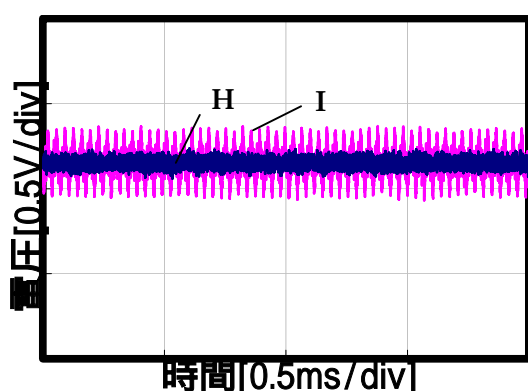


図 4.2.3 : DDS に入力する変調信号(2)

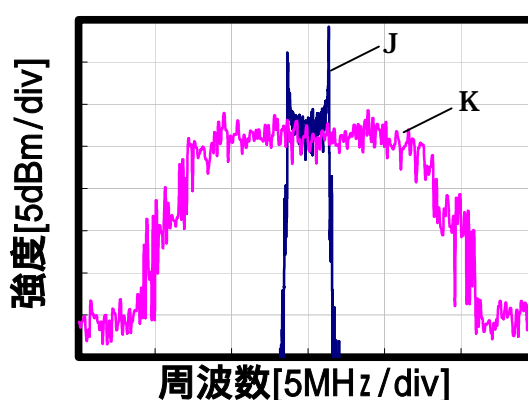


図 4.2.4 : アセチレン安定化時の線幅

5. まとめ

市販のシンセサイザーを用いた変調打ち消しでは、アセチレン安定化時に 2.7MHz あったビート線幅を、40kHz まで狭窄化することが出来た。共振器安定化時の線幅が 20kHz であることを考慮すると、本来の線幅をかなり再現できたといえる。この結果、アセチレン安定化半導体レーザー光源を測長、分光へ応用することが可能になった。

DDS を用いた変調打ち消しでは、使用した比較追従型 A/D 変換の設定が不十分であったため狭窄化の効果はみられなかったが、DDS を用いて周波数変調が加わった AOM 駆動周波数を出力することができた。今後は A/D 変換の設定を最適化することで、DDS を用いた変調打ち消しを図る予定である。

参考文献

- [1]S.Taubman and John L.Hall: "Cancellation of laser modulation from optical frequency standards" OPTICS LETTER, Vol.25(2000),p311-312
- [2]Ken'ichi Nakagawa, Atsushi Onae: "Development of a Compact Acetylene Optical Frequency Standard at 1.5 μ m", Proc. of SPIE Vol.4269(2001),41