武者研究室 清水 光

1. はじめに

精密分光、光周波数の精密測定など幅広い分野 においてレーザーが応用されており、特に短期的 周波数安定度の高い、すなわち線幅の狭いレーザ ーを用いれば測定の精度は向上する.このような1 Hz以下(周波数安定度 10⁻¹⁵@1 秒)の線幅を有する レーザーは ¹⁷¹Yb や Ca⁺の分光実験に用いられて おり、今後はさらに多様な波長毎に超狭線幅光源 が要求されるだろう[1][2]. このような狭線幅なレ ーザーを実現するためには高安定な光周波数基準 を用意した上で、電気的な制御を用いる必要があ る. 実際, 無制御状態でのレーザーでは数 kHz 程度の線幅しか報告されていない[3][4]. また, こ れら応用分野で用いられる周波数基準を地面振動 や熱膨張などのマクロなゆらぎから隔絶させるた め、真空チャンバーや防振台等の大がかりな装置 を必要とする.よって各波長それぞれに高安定な 光周波数基準を用意することは困難である.従っ て本研究では光周波数領域における広帯域光周波 数基準を開発し,異なる波長光源の周波数安定度 の評価や、レーザーの絶対周波数の精密測定を目 的としている. さらに位相安定化ファイバーを用 いた遠方の研究機関への周波数基準レーザーの分 配をめざす.

本研究でははじめに高い周波数安定度を持つ 光周波数基準を用いて超狭線幅光源を開発し、こ れを基本光源とする.基本光源には狭線幅で波長 選択性に優れた外部共振器型半導体レーザー (ECLD)を用いており各特性の測定,評価を行っ た、基本光源の周波数を安定化するために用いる 光周波数基準は、低熱膨張率でかつ室温付近で熱 膨張率が 0 点になる温度をもつ Ultra Low Expansion(ULE)ガラスをスペーサーとして用い た超高フィネス Fabry-Perot 共振器(F.P.共振器) の共振周波数とする.この光周波数基準にレーザ ーの周波数が一致するように基本光源に電気的な 制御を行い、周波数雑音を抑制することで、高安 定な周波数基準を開発する. また,モード同期レ ーザーと狭線幅光源の位相同期するためのビート 信号を得るための系を構築した.

2. F. P.共振器

共振器の共振周波数は共振器長に依存しており, 共振器長の僅かな変化がレーザーの周波数安定度 を悪化させる.共振器長を変化させる外乱として, 温度変化による熱膨張,地面振動,熱雑音などが 挙げられる.

熱膨張による温度変化について、共振器におけ るミラー間のスペーサーとして使われる材料は熱 膨張率の小さい材料が望ましい. スペーサーに用 いられる材料の候補として Sapphire や Corning 社の ULE Glass, Schott 社の Zerodur などが挙 げられる. Sapphire の熱膨張率は室温では小さく ないが, 極低温(@3~4 K)では 10⁻¹¹ K⁻¹のオーダー まで小さくなることが分かっている. しかしなが ら、共振器を液体 He 温度まで冷却することは容 易ではない. ULE と Zerodur の比較だが、熱膨 張率はどちらもおよそ 10⁻⁸ K⁻¹ であり、クリープ を考慮すれば ULE が優位といえる. クリープは 結晶構造が時間とともにゆっくりと緩和する現象 である.この現象が共振器長に与える変動が Zerodur に比べ ULE は一桁小さく ULE の熱膨 張率は温度制御を施すことで限りなく0に漸近す ることが可能である[5]. 従って、本研究に用いる 共振器は ULE ガラスをスペーサーとして用いた 超高フィネス F.P.共振器により、温度変化による 共振器長の変動を最小限にする.

前述のように空気の温度や屈折率変化,音響等の外乱による共振器長の変動を防ぐため図1のように真空チャンバー内に共振器を設置した.



図1 温度制御システムの構成



共振器はスペーサー両端面から 21 mm の距離に ある Airy Point に支えられ,地面振動の伝達関数 を最小限にしている.このとき外部からの熱輻射 を防ぐと同時に熱輻射による温度制御を行うため, 2 層の熱シールドで共振器を覆った.熱シールド は金コーティングを施した銅版を用いており,共 振器の温度制御に用いる熱輻射源の役割も担って いる.外側の熱シールドは直列した 2 枚のペルチ ェ素子により支えられ,前面にサーミスタが取り 付けてある.このように,外側の熱シールドに温 度制御機構を施すことで,外乱の温度ゆらぎに対 し即座に制御を行うことが可能である.現在は振 動の少ないイオンポンプにより真空を引いており 真空度は 2.4×10⁷ Torr である.

地面振動について本研究に用いたカットアウト 型共振器(図2)は支持位置を最適化することで、地 面振動による共振器長の変動を相殺することが知 られている(Airy Point) [6]. これらを駆使するこ とで地面振動による共振器長の変動を抑制するこ とができ、本研究ではフーリエ周波数1 Hz にお いて周波数雑音パワースペクトルが1 Hz/vHz を 下回ることが見積もられている. 真空チャンバー 内ではバイトンゴムとステンレス球によりカット アウト光共振器を支持し、縦振動による共振器長 の変動を抑制している.本実験で用いる F.P.共振 器のミラーは片面が平面, もう一方が曲率半径 500 mm の凹面ミラーであり, 共振器長は 100 mm, フィネスは波長 1550 nm に対して 500000(カタログ値)であり実測では 420000 程度 であった.地面振動による変位がもたらす周波数 雑音は Airy Point や Minus K Technology 社の



受動除振台 minus-k を用いることで抑制され,計 算上では線幅1Hzに到達することが見込まれる. minus-k の防振特性を図4に示す.

温度変化について、温度制御システムにおける 外側の熱シールドの温度を測定した結果を図3に 示した.熱シールドの温度ゆらぎは16 mK であ り、真空チャンバー内に設置されている共振器の 温度ゆらぎを ΔT_{in} ,その他の外部の温度ゆらぎを ΔT_{out} とするとそれぞれの関係性は以下の近似式 で表される[5].

$$\Delta T_{in} \approx \frac{\Delta T_{out}}{\Delta f \tau} \tag{2.1}$$

ここで Δf は共振器の温度が ΔT_{in} 変化したときの共振周 波数の変化であり、 τ は共振器の温度時定数である.本 研究室により測定された大気中での温度時定数は 1000 s 程度であり、共振周波数の変化が1 Hz 以内に 収まる温度許容ゆらぎは 1.6 mK であった[7]. 共振器 の温度時定数について、真空温度制御システム内では 気体による熱伝達が大気中に比べて小さいこと、熱源 が二重の熱シールドによる輻射であることを考慮する と、温度時定数 τ はさらに長くなることが予測され、1 Hz 以内の共振周波数変化は十分達成できることが見 込まれる.



3. ECLD 周波数安定化システム

本研究で用いた ECLD は回折格子をリトロー 配置で用いている(図 5). 回折格子にはピエゾ素子 が付いており,電圧を印加することで発振波長を 調節できる.発振波長は通信波長として知られる 1550 nm とした.発振閾値 37 mA,最大出力は 50 mW 程度であった. ECLD からの出力光はフ ァイバーへとカップリングされる.

次に自己遅延ヘテロダイン法により ECLD の 線幅を評価する. 自己遅延ヘテロダイン法に用い た AOM の変調周波数は 55 MHz, 遅延ファイバ ー長は25kmのシングルモードファイバーであ り、測定分解能は8kHzである.ここまで長い遅 延ファイバーを用いられる波長は1.55 um 帯のみ である.ファイバーの透過損失は主にレイリー散 乱と OH イオンの吸収である.純粋な石英ガラス は紫外域と2umより長波長側に吸収を持つ.レ イリー散乱は長波長になるにつれ少なくなるが、 それでも波長1.37 µm付近に大きな吸収ピークを 持ち, この吸収は OH イオンに依るものである. 以上を総合すると1.55 um での損失は0.2 dB/km という値をとる[8]. 図6における実線はローレン ツ型関数によるフィッティング曲線である. 測定 したビート信号の線幅は80kHzであった. 自己 遅延ヘテロダイン法により得た測定点にローレン ツ型やガウス型関数のフィッティングを適用する

と実際のレーザー線幅より広い線幅が測定され てしまう.この要因としてローレンツ型の場合は 散射雑音,ガウス型の場合は 1/f 雑音の影響をそ れぞれの関数ではフィッティングできないためだ と考えられている.これらの影響を加味すると, ローレンツ型はビート線幅を 1/2 倍した値,ガウ ス型は 1/√2 倍した値が実際の線幅である[3][9].



図5 回折格子型 ECLD



従って、本実験で用いる ECLD の線幅は 40 kHz 程度だと推定できる. 以上より評価した ECLD に 電流源およびゲインチップに対する制御をするこ とで、線幅の狭窄化を進める.

ECLD 周波数安定化の実験配置図を図7に示す. 共振器や光学素子の端面による戻り光を防ぐため, 空間とファイバー中に光アイソレータを設置した. 10 dB カプラは入力光を1:9の割合で分割し, それぞれ共振器系と光周波数コムに出力した.フ ァイバーから出力された光は一段目のHWPによ り偏光を回転され,EOMにより15 MHzの位相 変調を受ける.光アイソレータは共振器からの戻 り光を抑制するために用いた.二段目のHWPは PBS と組み合わせ共振器に入射する光のパワー の調節に用いる.共振器に入射する光のパワー の調節に用いる. 只振器に入射した光はQWPを 往復することでPBSに対してS偏光になり,PD1 により検出される. PD1により検出された信号 はローノイズアンプにより増幅され15 MHzの信 号により復調されることで誤差信号を得られる.



図7 ECLD 周波数安定化システム



図8 制御回路の周波数応答シミュレーション

復調信号を LPF により高周波成分を除去し, 位 相シフターにより S/N を大きくする. また図 7 に おける共振器系は minus-k に設置することを考 慮し, 500 mm×500 mm のブレットボード上に 配置した.

上記の過程により得られた誤差信号の電圧が0 Vになるよう、すなわち共振器の共振周波数との 周波数差が0になり周波数が安定化されるように レーザーの周波数を制御する.具体的に、先の実 験により得た周波数弁別信号を制御回路に送りレ ーザーの周波数を変調させる機構へとフィードバ ックする.一般的にレーザーの周波数変調には電 流やピエゾ素子による共振周波数の変化を利用す る. ピエゾ素子はダイナミックレンジが大きいが, 機械共振により数 kHz で制御帯域が制限される. 従って温度ゆらぎのような低周波のダイナミック な変動には向いているが、数百 kHz オーダーの 高速制御には向いていない. そこで本実験では ECLD の電流源に制御信号をフィードバックす ることでレーザーの周波数を制御する.本実験で 用いた回路の応答特性のシミュレーションを図8 に示す.本研究において開発した制御回路の特徴 として制御信号を低周波成分と高周波成分に分割 し、別々のアクチュエーターにより制御すること が挙げられる.低速制御信号は電流源の変調端子 へ帰還するが、高速制御信号はゲインチップに直 接帰還する.これにより図8のように広帯域に制 御回路のゲインを確保した.この回路を用いて測 定した ECLD の周波数雑音を図 9, 制御回路の動 作時間測定結果を図 10 にそれぞれ示す.



図9における緑色の線はECLDの無制御時での 周波数雑音のシミュレーションであり赤線が制御 時の周波数雑音である.制御回路の最適化が不完 全であるため 60 kHz 付近に雑音のバンプが確認 できるが 1 Hz~1 MHz のほぼ全ての範囲におい て目標値である 1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を下回り,フーリエ周 波数 1 Hz における周波数雑音は 0.1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ に到 達した.制御帯域は 1 MHz 程度であり,線幅が 40 kHz の光源を安定化するための制御回路にお いて十分な制御帯域である.

周波数基準の安定度について、温度ゆらぎによ る共振周波数のゆらぎは前述したとおり線幅1 Hz を達成する見込みがある. 地面振動について は本研究室の以前の研究により同様に達成するこ とが見込まれた[10]. また,図9のような誤差信 号評価は周波集基準への追従度を示す.以上のこ とから、間接的ではあるが、本研究により開発し た狭線幅光源の線幅は1 Hz 以下と予想される. 図 10 は ECLD の周波数制御を行った際の制御時 間を測定した結果である. 縦軸は制御回路から出 力し ECLD 電流源のモジュレーション端子へ注 入される電流値を示しており、6時間以上の長時 間動作を達成した.この結果は狭線幅光源を分光 実験やレーザーの絶対周波数測定に応用する際に 必要な駆動時間の要求値を十分に満たしている. 6時間半の時点で制御が外れたが、このときの注 入電流は電流源のダイナミックレンジを超えてお らず瞬間的な衝撃が原因だと分かる.また注入電 流の長期的なゆらぎは空調の温度変化によるもの だと考えられる.



図10 制御回路の長時間動作

4. 光周波数コムとの位相同期

周波数を安定化した ECLD に光周波数コムの 縦モード1本を位相同期することで, ECLD の周 波数安定度を光周波数コムに移譲し広帯域光周波 数基準を開発する.周波数安定化 ECLD と光周波 数コムの位相同期系を図 11 に示す.

本実験で用いた光周波数コムは EDF (Erbium doped fiber)が挿入されたリング型共振器から出 力され、非線形偏光回転によるモード同期により パルスを生成している[11]. f_{ceo} は LD (laser diode) の 励 起 電 流 、 f_{rep} は EOM 及 び EDFA(Erbium doped fiber amplifier)が巻かれた ピエゾ素子によりそれぞれ制御する. このとき f_{ceo} はマイクロ波領域の基準である Rb 原子時計 (Rb atom clock)を周波数基準するが、 f_{rep} は光領 域において 10⁻¹⁵の周波数安定度が見込まれる ECLD に位相同期する必要がある. f_{rep} の周波数



図 11 frep 位相同期システム



を制御するため光周波数コムの縦モードの1本と ECLD のビート信号を検出する.光周波数コムの 出力側に挿入した EDFA と OBPF (Optical band pass filter)はビート信号の S/N 比を大きくするた めに用いた.本実験で用いた OPPF のバンド幅は およそ5 nm であり十分量子雑音を低減できる. 制御回路から出力する信号の内、高速制御に用い る信号を EOM, 低速制御に用いる信号をピエゾ 素子に負帰還するが、現段階ではその前哨実験と してピエゾ素子にのみ信号を出力している. Rb 原子時計は周波数カウンタ及びシンセサイザーの 周波数安定度を向上するために用いた.本実験に より得た光周波数コムと ECLD のビート信号を 図 12 では S/N 比 30 dB 程度の 図 12 に示す. ビート信号が確認できる.一般的にfrepを位相同 期する際に必要なS/N比は30dB程度とされてお り、本実験においても同程度の S/N 比を得ること ができた.しかしながら,現状得られるビート信 号の S/N 比は時間的に不安定であり、安定して S/N 比 30 dB 以上の信号を得ることができない. これはモード同期レーザーの出力パワーが小さす ぎることが原因と考えられる.従って、今後はモ ード同期条件の最適化することで出力の向上をめ ざし、モード同期レーザーの出力側に EDFA を2 段階で構築し出力光を増幅すると同時に、出力側 に回折格子を用いて信号の波長選択することで量 子雑音の低減を図りビート信号のS/N比を向上す る.

5. 結論

狭線幅光周波数基準のための狭線幅光源の開発 を行った. 周波数安定化光源用の ECLD を調整し 特性を測定した. その結果, 発振波長は 1550 nm, 線幅は80 kHz であり自己遅延ヘテロダイン法を 用いた際のローレンツ関数フィッティングを考慮 すれば線幅は40 kHz 程度となる.発振波長につ いて、一般的に本実験で用いた Er 添加ファイバ ーを用いたモード同期レーザーの波長中心は 1560 nm だということ, ULE 共振器が最も高い フィネスを持つ波長が 1540 nm であることを考 慮すればモード同期レーザーとの位相同期の際に より高い S/N 比をもつビート信号が得られる.し かしながら,現在 1550 nm 付近にスペクトルの 窪みができており ECLD の発振波長を再検討す る必要がある.これに伴い、フリーランでの線幅 が狭いレーザーを周波数制御することでより狭線 幅な光源を得られ、長期安定動作も見込まれるフ ィルター型 ECLD の開発が望まれる.

周波数安定化実験系を構築した. このとき共振 器のカップリング効率は 25 %, 真空度は 2.4× 10-7 Torr であった. この信号を用いて LD の電流 源及びゲインチップに負帰還制御をかけるための 制御回路を最適化した.制御帯域は1 MHz であ りフーリエ周波数 1 Hz において周波数雑音 0.1 Hz/√Hz に到達した. このとき制御回路の駆動時 間は6時間以上であり分光実験やレーザーの絶対 周波数測定に必要な制御時間の要求値を十分満た している.ULE 共振器は真空チャンバーを用いた 温度制御システム内に配置し、外側の熱シールド の温度ゆらぎを 16 mK で制御した. この結果は 共振器の温度時定数が大きいこと, 共振器を真空 内に設置したことを考慮すれば、温度変化による 共振周波数のゆらぎを1 Hz 以下に抑制し得る値 である. 共振器の温度時定数についてイオンポン プを用いて高真空状態を実現したことに伴い、真 空状態での温度制御の精度や熱膨張率が0になる 温度(Zero-Crossing Temperature)を再評価する 必要がある.また、周波数安定化光源とモード同 期レーザーの位相同期実験系を構築し、 位相同期 に必要とされるS/N比30dB程度のビート信号を 得た.しかしながら、30以上の信号を安定して得 ることができず位相同期実験は行えなかった.こ の問題の解決策としてモード同期レーザーの出力 側に EDFA を作成し、回折格子などを併用するこ とで S/N 比を向上させることが考えられる.

狭線幅レーザーを開発したあとの展望として, モード同期レーザーに狭線幅レーザーを同期させ ることで,全ての縦モードが線幅1Hz以下(周波 数安定度 10-15@1 秒)をもつ広帯域光周波数基準 を開発し,別波長光源,例えば本研究室で開発さ れている宇宙型重力波検出器の前哨衛星 DECIGO Pathfinder 用光源を用いて周波数安定 度の評価を行う.広帯域光周波数基準の開発,及 び評価が完了した後は,光ファイバー長の制御に よる精密伝送システムを開発し,遠方の研究機関 等に対してファイバーを通じた周波数基準分配を めざす.

参考文献

- [1] H. Inaba, et al., Opt. Express 21, 7891 (2013).
- [2] Ying LI, et al., J. Appl. Phys. 47, 6327 (2008).
- [3] S. Bennetts, *et al.*, Opt. Express. **22**, 10642 (2014).
- [4] D. J. Thompson, et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 023107 (2012).
- [5] 保坂 一元, 産総研計量標準報告.7, 11 (2008).
- [6] L. Chen, et al., Phys. Rev.A. 74, 053801 (2006).
- [7] http://www.minusk.com
- [8] G.P.アグラワール著,小田垣孝,山田興一共訳,吉岡書店(2004).
- [9] Linden B, IEEE J. Lightwave Technology. 9, 485 (1991).
- [10] 長久敦史, 平成 24 年度電気通信大学光エレクト ロニクスコース修士論文.
- [11] 松丸直也,平成25 年度電気通信大学光エレクトロ ニクスコース卒業論文.