

光共振器を用いた 1.55 μm 帯超狭線幅レーザーの開発

量子・物質工学科 植田研究室 長久 敦史

1.序論

近年、周波数安定化レーザーはレーザー冷却等の物理実験や、レーザーの絶対周波数の精密測定など様々な研究において活用され、需要が大きくなっている。

そこで我々の研究室では、光周波数コムによる広帯域な周波数領域における精密な周波数基準を作製し、光ファイバーを用いた他の研究室や研究機関への分配を計画している。その周波数基準となる光源は、狭線幅で非常に安定な光源を光周波数コムの縦モードのどれか1本と位相同期し、光周波数コムの全ての縦モードが狭線幅化することで実現可能となる。従って、本研究ではその光周波数コムを狭線幅化するための波長 1.55 μm において線幅 1Hz (安定度 1×10^{-15} 台) という非常に短期安定度に優れた超狭線幅レーザーを作製することを目的とする。

2.原理

レーザーの周波数を安定化するためには、その基準となる安定なリファレンスが必要となる。そこで今回は、光共振器の共振周波数を基準として用いる。光共振器にレーザー光を入射したとき、共振器長が半波長の整数倍という条件を満たすことで、共振器内のパワーが上昇し、透過光電場がコヒーレントになることから透過光強度が極大値となる共振という現象が発生する。共振条件をレーザーの周波数 f を用いて表すと、

$$f = \frac{c}{2nL} m$$

となる。 c は光速、 L は共振器長、 n は屈折率、 m は整数である。この式から横軸を周波数、縦

軸を透過光強度におけるグラフは Fig.1 のようになる。このように共振モードは等間隔に現れ、そのうちのどれかを周波数基準として用いることができる。また、この共振モードの鋭さを表す指標としてフィネス F があり、次式のように共振モード間隔 f_{FSR} を共振モードの線幅 Δf で割ったもので定義される。

$$F = \frac{f_{FSR}}{\Delta f}$$

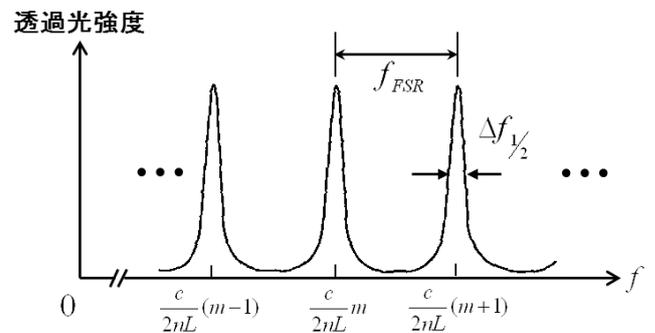


Fig.1 : 光共振器の共振モード

このように、共振周波数は共振器長 L によって決まるため、共振器長の安定性が重要となっている。共振器長が変動する要因としては共振器自身の熱雑音と振動や熱といった外乱がある。熱雑音よりも外乱の方が大きく影響するため、まずは熱雑音による理論限界値よりも外乱の影響を抑えなければならない。

振動による共振器長の変化は、共振器を支持する位置によって共振器の形状が微妙に変化することから生じる。従って、縦方向の振動に対し共振器長の変化が最も抑制される Airy Point と呼ばれる位置に共振器を支持する必要がある。また熱による共振器長の変化については、共振器を包むスペーサの熱膨張が原因となっている。

そのため共振器全体を熱シールドで囲い、熱膨張率が最小となる温度点にて共振器の温度を制御する必要がある。

3.実験と結果

目標とする周波数安定度を達成するために、光共振器は波長 $1.55\mu\text{m}$ においてフィネスが約 50 万という非常に高フィネスであるファブリ・ペロー (F.P.) 共振器を用いた。また、スペーサの素材は室温において熱膨張率が 0 になる温度点が存在する Ultra Low Expansion (ULE) ガラスが使用されている。そして後に行う加振実験に備え、共振器の支持点を移動できるような共振器台を作製した。その F.P.共振器の概形図及び実際の写真を Fig.2 に示す。

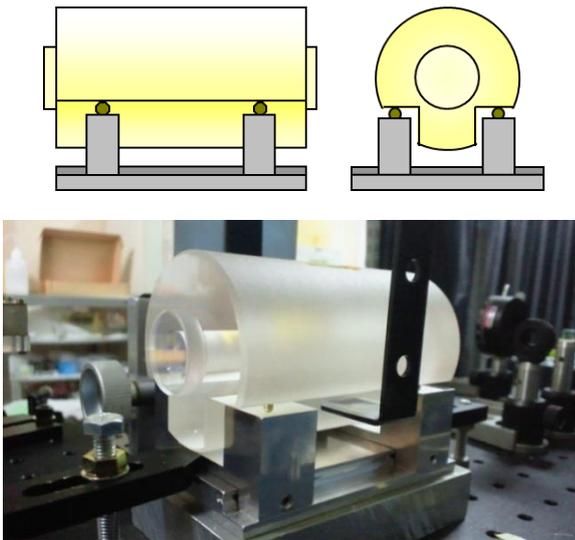


Fig.2 : F.P.共振器

3-1. F. P. 共振器への共振

高フィネスの共振器に光を共振させるのは非常に難しい。そのため、光学系を組む前に共振器固有モードへのモードマッチングの計算をする必要がある。従って、共振器へ入射したレーザー光が Fig.3 のような平面鏡と凹面鏡によって構成される共振器にてシングルモード共振させるための入射ビーム直径 $2w_0$ 、及びその $2w_0$ で F.P.共振器に入射させるための行路長 d_1 、 d_2 を光線行列による ABCD 則を用い

て計算した。その結果、 $2w_0 = 618\mu\text{m}$ 、 $d_1 = 503\text{mm}$ 、 $d_2 = 425\text{mm}$ とそれぞれ求めた。

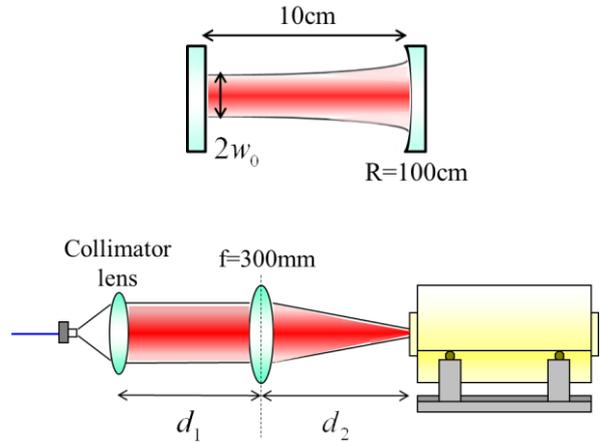


Fig.3 : モードマッチング

計算結果に基づいて、Fig.4 のような光学系を加振台の上に組んだ。また、安定化する光源は発振波長 $1.55\mu\text{m}$ の外部共振器型半導体レーザー (External Cavity Laser Diode : ECLD) を用いた。そして後に行う加振実験のため、ECLD は加振台とは別の場所に設置し偏波保持シングルモードファイバーで加振台まで光を運んでいる。そして、ピエゾ素子で ECLD の回折格子を動かすことによって周波数を掃引し、F.P.共振器からの透過光信号及び反射光信号をオシロスコープで観測しながら 2 枚のミラーを微調節することで F.P.共振器に光を共振させた。結果として、Fig.5 に示したように反射光信号は、DC レベルに比べ、共振時に青い矢印分下がっているため、共振カップリング効率は 46% を達成したことが分かった。

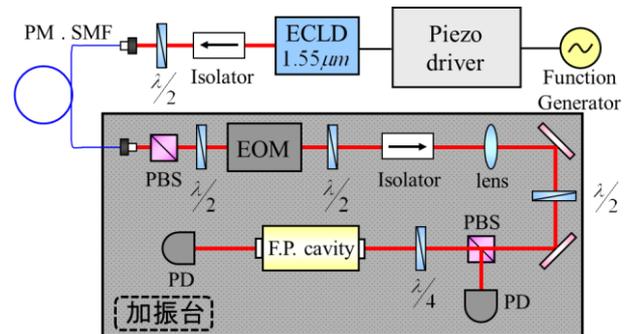


Fig.4 : 実験系セットアップ

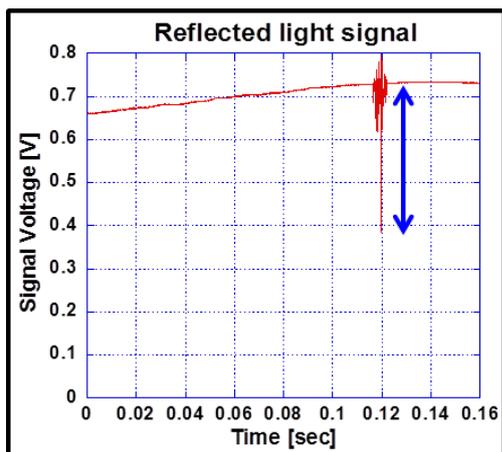


Fig.5 : 反射光信号

3-2. レーザーの周波数安定化

レーザーの周波数を安定化させる手段としては Pound-Drever-Hall (PDH) 法を用いた。その安定化システムの構成は Fig.6 のようになっている。手順としてまず、EOM を用いて 15MHz の位相変調をかけることによって、反射光信号にサイドバンドを出現させる。次に、DBM で掛け合わせることによって同じ 15MHz でその反射光信号を復調してやると、反射光信号の微分形である周波数弁別曲線が確認できる。よって、共振点である弁別曲線の中心点にロックされるようにサーボ回路を介して ECLD のピエゾ素子に負帰還制御をかけることによって周波数が安定化される。

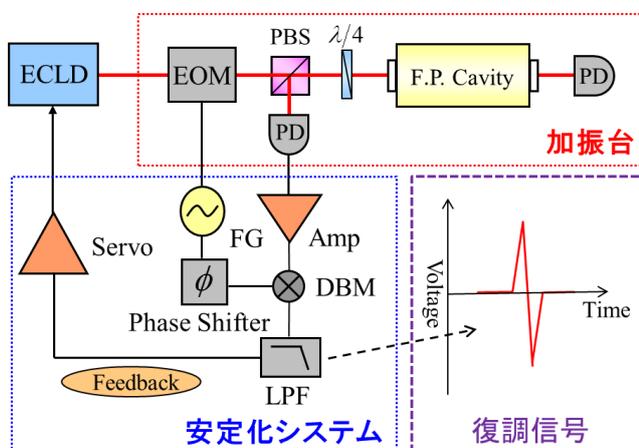


Fig.6 : PDH 法による周波数安定化

ここで、どの程度周波数安定化がなされたのかを確認するために FFT アナライザーで周波数雑音スペクトルを測定した。Fig.7 に示された結果から、フリーラン状態の青線に比べ、安定化時は 10kHz 付近から周波数雑音スペクトルが落ちているため、安定化されたことがわかった。また誤差信号評価としては、まだこの段階ではゲインの低い制御による安定化ではあるが、10Hz において $5\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度となった。

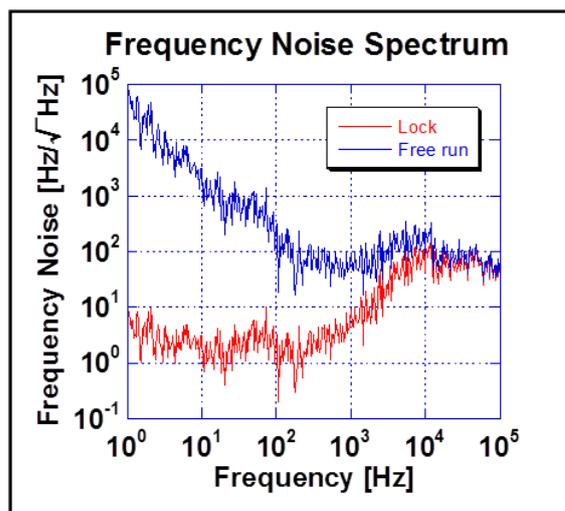


Fig.7 : 周波数雑音スペクトル

3-3. 加振実験

続いて、Airy Point を求めるための加振実験を行った。実験系は Fig.8 のようになっている。

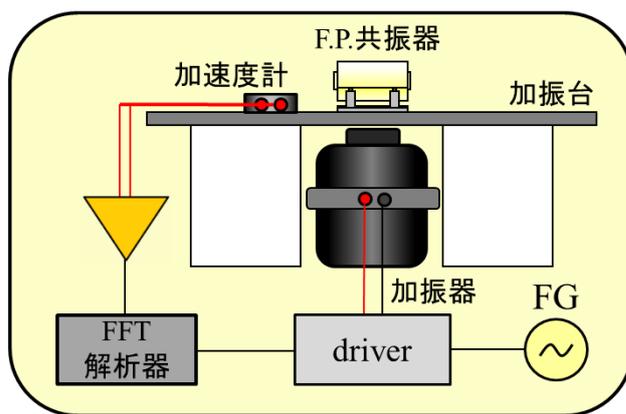


Fig.8 : 加振実験セットアップ

測定の手順としては、まず PDH 法による周波数安定化をかけた状態にし、F.P.共振器の下に設

置した加振器によりある一定の周波数で加振台を揺らす。ここでFFT解析器を用いて周波数雑音スペクトルを測定すると、加振周波数において励起された雑音を確認できる。この励起された雑音ピーク値及び加振台の上に設置された加速度計より振動方向の加速度を測定する。

この一連の測定をFig.9のように定義したF.P.共振器の支持点の位置 d を15mm、17mm、18mm、19mm、20mm、21mm、22mm、23mm、24mm、27mm、30mmと変えてゆき、それぞれ3回ずつ行った。その結果として、平均値をプロットし、標準誤差をエラーバーとして表したグラフをFig.10に示した。ここで、横軸は支持点の位置 d 、縦軸は励起された雑音ピーク値を加振加速度で割った値で定義される伝達関数 T [Hz/(m/s²)]である。また、加振周波数は20Hzである。

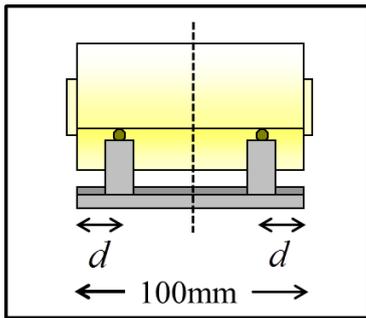


Fig.9 : 支持点の位置 d

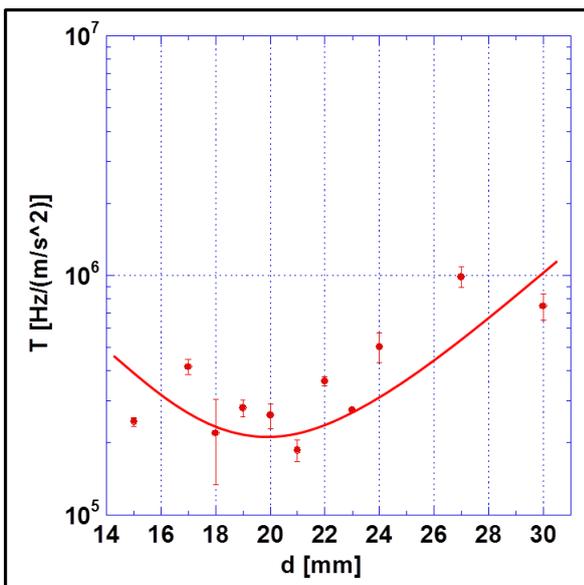


Fig.10 : 加振実験の結果

さらに、プロット点を二次曲線でフィッティングすると、 d が20mmにおいて伝達関数の値が一番小さくなっている。従って、Airy Pointは $d=20\text{mm}$ であると求められた。また伝達関数の値は 10^5 台のオーダーとなったが、これは後に除振台の上にF.P.共振器を設置することを考慮した場合では十分に相殺できる値であると考えられる。

4.まとめと今後の展望

光周波数コムを用いた光周波数基準の分配のための超狭線幅レーザーの開発において、周波数安定化システムを構築し、Airy Pointを求めるまで至った。

今後の展望としてはまず、現在は共振器を真鍮ボールによって支えているが、これをテフロンやステンレスといった他の素材のボールについても同様の加振実験を行い、比較検討を試みる事が挙げられる。さらに原理で述べたような熱膨張の対策も行う必要がある。その上で更なる安定度の向上を目指すために、真空槽を用いてF.P.共振器を真空状態し、音響雑音をできる限り遮断する。ここまですることにより、目的とする超狭線幅レーザーが実現できると考えられる。

5.参考文献

[1] Kenji Numata, Amy Kemery, and Jordan Camp, "Thermal-Noise Limit in the Frequency Stabilization of Lasers with Rigid Cavities" PRL **93**, 250602 (2004)