

# 論文内容の要旨

論文題目 Development of a 100-W Nd:YAG laser using the injection locking technique for gravitational wave detectors

(重力波検出器用注入同期型 100W Nd:YAG レーザーの開発)

氏名 竹野 耕平

## 1. 緒言

日本の次世代重力波干渉計 Large-scale cryogenic gravitational wave telescope (LCGT) 計画に必要とされる高出力・単一周波数発振レーザーの開発を行っている。重力波とは時空のひずみが伝播していく波動現象であり、その効果を捉えるために高性能の干渉計を建設する計画が提案されている。

LCGT 計画では、干渉計の重力波に対する感度が理論上の感度限界である散射雑音によって制限される。散射雑音は光が光子の集合であることに起因したものであり、この効果を低減させるには、高出力の光源を使用すればよいことが知られている。最終的には 150W の単一周波数レーザーが必要になると見積もられており、強度雑音や周波数雑音を低く抑えた高出力のレーザーを実現することが求められる。

高出力・高安定 LCGT 用光源を実現するための第一段階として、100W・単一周波数発振でかつ回折限界・直線偏光のビーム品質を持つレーザーを実現するのが本研究の目的である。励起効率や熱伝導・機械的強度など特性の優れた半導体レーザー励起の Nd:YAG (発振波長 1064nm) をレーザー媒質として選択し、注入同期法を用いて単一周波数特性を保ったまま出力の向上を試みた。

## 2. 注入同期実験

注入同期法とは、単一周波数レーザー (マスターレーザー) を多周波数発振の高出力レーザー (スレーブレーザー) に注入することで周波数を安定化する技術である。本研究では 2W の市販 Nd:YAG レーザー (InnoLight 社製 NPRO) をマスターレーザーとして用いた。

スレーブレーザーは三菱電機製の半導体レーザー側面励起式 Nd:YAG ロッドのモジュールを使用して作成した。ひとつのモジュールにつき二つの Nd:YAG ロッドとその間に設置された石英旋光子から構成され、偏光の回転によってお互いのロッドに生じる熱複屈折を補償するようになっている。

直線共振器によるモジュールのテストでは、単一モジュールで 60W・回折限界・直線偏光の出力が得られることを確認した。

このモジュールを二つ使用することで、最適化された直線共振器のパラメータを変えることなくリングレーザーに展開し、双方向発振で 121W 出力を達成した (図 1)。

双方向発振では出力が不安定であるため、共振器内にファラデーローテータ、波長板、ブリュスター窓を挿入することで単一方向化を試みた。二種類のファラデーローテータで実験を行



い、どちらの場合にも単一方向発振に成功した。

単一方向化の結果、リングレーザーの空間モードはほぼ回折限界であることが確認された。また、逆周りの波とのゲイン競合が抑圧された結果、強度雑音は直線共振器での結果と一致した。これは、強度雑音がレーザーモジュールに内在する雑音レベルにまで低減されたことを示す。

単一方向発振で出力が安定化されたため、ビームのプロファイルを測定することが可能となった。この測定結果に基づいてマスターレーザーとのモードマッチングを行った。

単一方向発振では、共振器内に光学素子を挿入するため、出力が双方向発振時の 121W から半分程度にまで低下した。逆周りの波はマスターレーザーによっても抑圧することが出来るため、注入同期実験においてはファラデーローテータなどの光学素子を取り外した。

注入同期では、二段のファラデーアイソレータを通し、15MHz の位相変調をかけたマスターレーザーの光をスレーブ共振器に注入した（図 2）。位相変調は、Pound-Drever-Hall(PDH)法により誤差信号を得るためである。

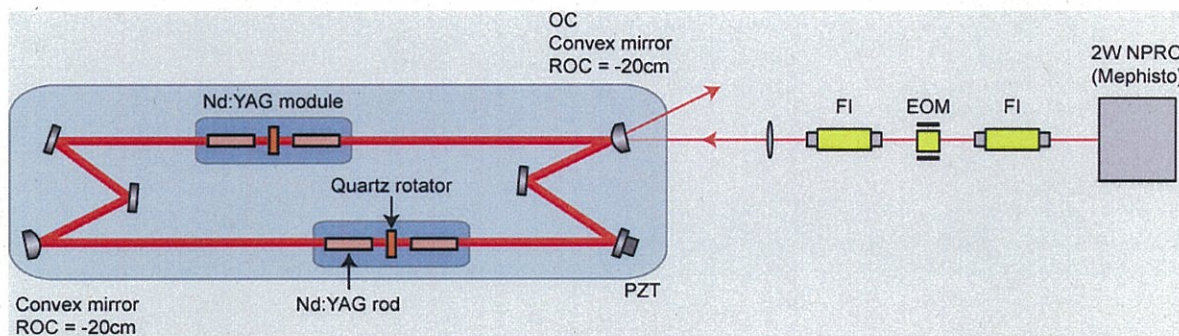


図 2. 注入同期の光学系の模式図。

スレーブ共振器には piezo actuator (PZT) に取り付けられた鏡が組み込まれており、共振器の長さを制御することが出来るようになっている。PDH 法により取得した誤差信号をフィルタにより増幅し、PZT に負帰還することでスレーブレーザーの周波数をマスターレーザーの周波数に追従させた。

図 3 に双方向発振のスレーブレーザーおよび注入同期の周波数スペクトルを示す。注入同期により、単一周波数が実現されているのが確認できる。

また、図 4 に注入同期出力のパワーを示す。逆周りの波の強度およびスレーブ共振器の PZT にかかる電圧の変化も示してある。100W の注入同期出力を 10 時間以上持続することに成功した。また、その間、逆周りの波は完全に抑えられていることが分かる。PZT にかかる電圧は、スレーブレーザーとマスターレーザーの相対周波数差のドリフトを示しており、長時間にわたり緩やかに周波数が変化しているのが読み取れる。

注入同期レーザーのビーム品質は、 $M^2$  が水平面内で 1.11、鉛直面内で 1.13 であり、偏光比は 1:35 以上であることが分かった。

注入同期レーザーの強度雑音および周波数雑音の測定結果をそれぞれ図 5、図 6 に示す。

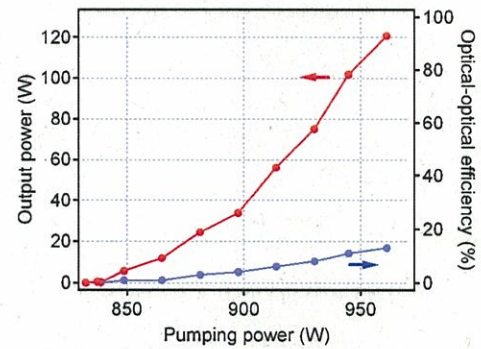


図 1. リング型スレーブレーザーの出力特性。



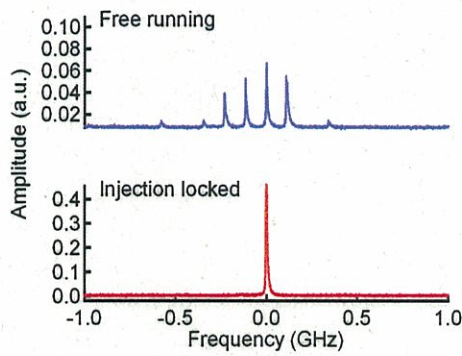


図 3. 自励発振時の周波数スペクトルおよび注入同期時の周波数スペクトル.

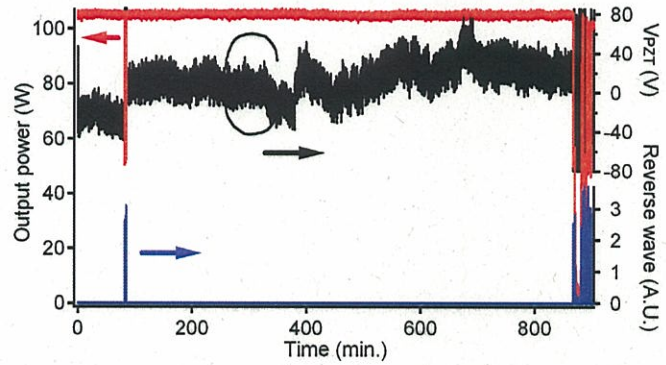


図 4. 出力パワー，逆周りの波の強度および PZT にかかる電圧の経時変化.

比較のため，強度雑音は直線共振器での測定結果とマスターレーザーのみでの測定結果を併せて示してある．グラフより，注入同期出力は直線共振器と同等の強度雑音であることが分かる．これは，双方向発振時の逆周りの波とのゲイン競合が消滅したため，励起用半導体レーザー固有の雑音や循環冷却水，光学素子の振動などの揺動に起因する強度雑音のレベルで一致したものと考えられる．したがって，さらに強度雑音を低減するには，揺動の原因を取り除くか，外部モジュールによる強度安定化が必要である．

周波数雑音は，スレーブレザーのアクチュエータにかかるフィードバック信号を周波数雑音に換算したものである．したがって，このグラフは，フィードバックの制御帯域（8kHz）内において，スレーブ共振器自体が持つ周波数雑音（あるいは共振器長揺らぎ）を反映したものである．グラフより，しきい値以下での周波数雑音と注入同期時でスレーブ共振器のグラフが一致していることが読み取れる．これは，スレーブ共振器の揺らぎが，レーザー発振によって生じる揺動に依存していないことを示している．したがって，レーザー発振に関わらず存在する揺らぎ，例えば光学素子の揺れによる共振器長揺らぎに関しては，スレーブ共振器の構造を強固なものにする，などの改良を加えていくことで周波数安定度を改善できることを示している．注入同期では，スレーブ共振器の揺動はマスター光を変調し，同期の維持される周波数帯域から外れるように作用するため，極力固有の雑音を低減させておくことが望ましい．

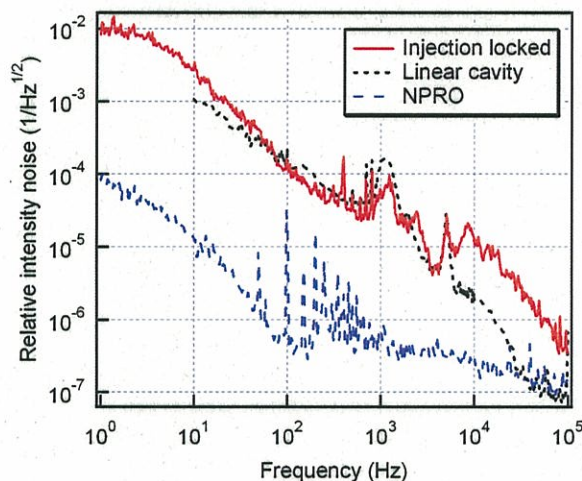


図 5. 注入同期出力，直線共振器レーザーおよび NPRO の強度雑音.

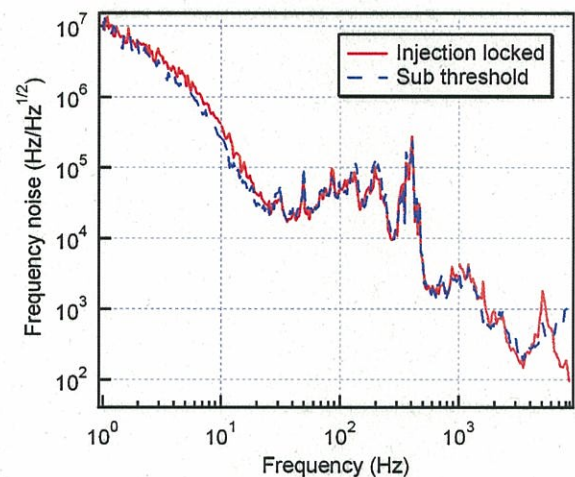


図 6. スレーブレザーのしきい値以下の場合と注入同期の場合の周波数雑音.



### 3. 周波数安定化実験

作成した注入同期レーザーの周波数特性を評価するため、リング型の光共振器を作成し、18MHz 位相変調の PDH 法を用いて位相同期する実験を行った。この方法ではレーザーの周波数を安定な周波数参照に追従させることになるため、同期後の光の周波数は、光共振器の安定度に対して安定化されることになる。PDH 法による誤差信号を測定することで、残渣の雑音を評価することが可能である。

光共振器は、熱膨張を抑えるためスペーサーをスーパーインバーで作成し、それに鏡を 3 枚（2 枚は平面鏡、1 枚は曲率半径 30cm の凹面鏡）貼り付けたものである。フリースペクトルレンジは 714MHz、フィネスは S 偏光に対して 2900、P 偏光に対して 220 である。

レーザーの周波数を光共振器（周波数参照）に追従させ、注入同期系の周波数雑音特性を測定した。その結果を図 7 に示す。

上のグラフが注入同期レーザーの周波数雑音を示しており、これはマスターレーザーの雑音特性とほぼ一致した。したがって、注入同期の周波数特性はマスターレーザーで決まるという理論上の予測が確かめられた。

また、点線のグラフは安定化後の周波数雑音スペクトルを示している。100Hz 帯域で、およそ 50dB の抑圧が確認され、 $7 \times 10^{-4} \text{ Hz Hz}^{-1/2}$  の安定度が達成された。

我々の知る限りにおいて、100W クラスの単一周波数発振レーザーの周波数安定度が評価されたのは、本研究が世界で初めての例である。

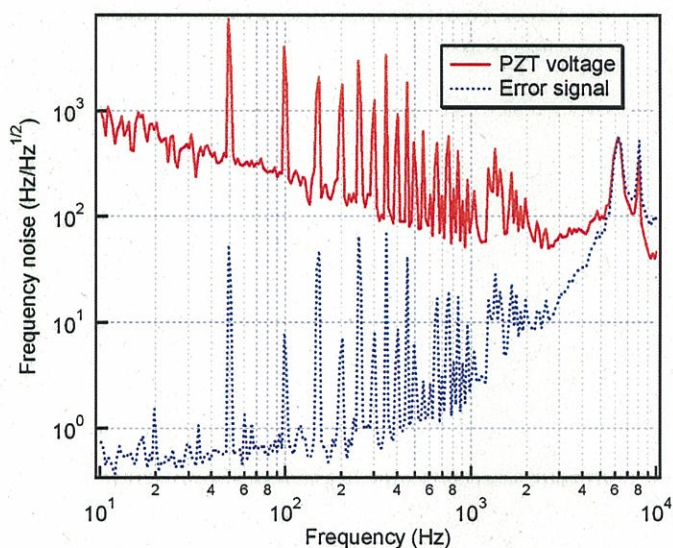


図 7. 注入同期の周波数雑音(実線)と安定化後の周波数雑音スペクトル(点線).