

重力波検出器用 1030nm 外部共振器型半導体レーザーの開発

武者研究室 中森真輝

1. 研究背景・目的

重力波とは質量による空間の歪みが波として伝搬する現象のことで、アインシュタインの一般相対性理論によって予想こそされていたがその直接検出の成功例はなかった。しかしながら、2016年2月にアメリカの研究によって世界で初めて検出されたことで、重力波天文学なる新しい学問の発展が期待され非常に関心度の高い話題となっている。重力波の空間的な影響は非常に小さく、相対変位量は $\frac{\Delta l}{l} = 10^{-23}$ である。これは地球と太陽の間で原子が1つ動く程度のスケールであり、その直接検出は困難を極める。検出方法として有力な方法の1つにレーザー干渉計を用いた方法がある。国内でも重力波検出のための計画が幾つかある。地上型検出器 LCGT(Large scale Gravitational Telescope)計画や、衛星を打ち上げ宇宙空間で干渉計を構成する DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)計画などがそうである。重力波検出のための光源自体に高い安定度が求められ、DECIGO 計画では観測帯域の1Hz で求められる強度雑音が $10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ となっている。現在重力波検出用光源として本研究室で採用されているのは、狭線幅で単一モード発振可能な 1030nm のファイバーDFB (Distributed Feedback) レーザーである。さらにヨウ素の吸収線 515nm を基準として周波数安定化を行っており、ヨウ素の吸収線の信号の SN 比が良いほど周波数安定度は向上する。信号はロックイン検出をして得ているが、その SN 比は電気光学変調器 (EOM; Electro-Optic Modulator) で変調する 200kHz の強度雑音で決まっている。この帯域での雑音が低いほど高い SN 比が得られ、周波数安定度は高くなる。しかし、ファイバーDFB レーザーでは変調帯域である 200kHz における強度雑音が高いという問題があり、周波数安定化の他に強度安定化も課題になっていた。外部共振器型半導体レーザー (ECLD) は高周波数領域での強度雑音が低いという特性が期待されるので、既存のファイバーDFB レーザーに代わる光源として有力な候補である。本研究では高周波域で強度雑音を低くすることを旨とし、回折格子型の外部共振器型半導体レーザーの作成、その特性を評価す

ることで作成した光源が重力波検出用光源の代用として有用かどうかを評価する。

2. 回折格子型外部共振器型半導体レーザーの原理

Littman 型と Littrow 型の2種類がある。

Littman 型の ECLD の概略図を図1に示す。この形の ECLD は回折格子とゲインチップの劈開面で共振器構造を取る。ゲインチップから出た光はコリメータレンズによって平行光になり回折格子で回折する。この時、共振器の共振モードごとに回折角は異なっている。そのうちの1次回折光をミラーで反射させゲインチップに戻す(フィードバック)ようにすることで単一のモードを切り出すことができる。レーザー発振出力は0次回折光を取り出すことによって得ている。波長選択はミラーの角度を変えることで行うことができる。

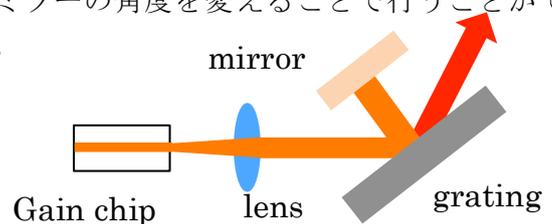


図1 Littman 型 ECLD

Littrow 型の ECLD の概略図を以下の図2に示す。

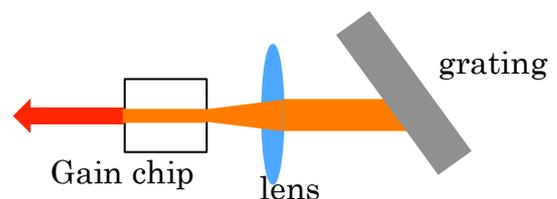


図2 Littrow 型の ECLD

Littrow 型は1次回折光をフィードバックするという点では Littman 型と同じだが、レーザーの反対側の劈開面から出力光を取り出す構造になっている。Littman 型とは異なり1次回折光を直接フィードバックして共振させる。発振波長は回折格子の角度で調節することができる。Littman 型に比べて少ないため機械的安定度は高い。

3. ECLD の開発

3.1. ECLD の設計

今回 ECLD を作成するにあたってその設計及び加工は全て自らの手で行った。機械的安定度を考えればフィルター型の ECLD が最適ではあるが、今回フィルターが手に入らなかったため、回折格子型の ECLD を作成した。使用したゲインチップが出力をファイバーで取り出すことができる仕様になっていたため Littrow 型を採用した。以下図 3 に作成した ECLD を示す。

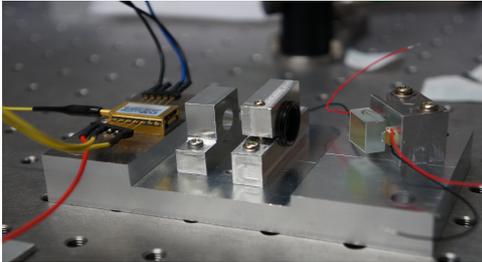


図 3 作成した ECLD

ゲインチップから出た光はコリメータレンズで平行光になり回折格子によって回折され、その一次回折光をゲインチップにフィードバックする。低強度雑音の光源の開発が目的であったため、強度雑音低減のため可動部の省略を試み、コリメータレンズの調節機構を削除した。可動部は波長選択のための回折格子のみである。また、光軸のずれの補正のためウェッジプレートをコリメータレンズと回折格子の間に入れてある。共振器長は 60mm で、使用しているゲインチップは Innolume 社製の中心波長 1030nm のものを、回折格子は THORLAB 社製の刻線数 1200 本/mm のものを使用した。

3.2. 出力特性と発振モードの確認

作成した ECLD の出力特性を以下に示した。

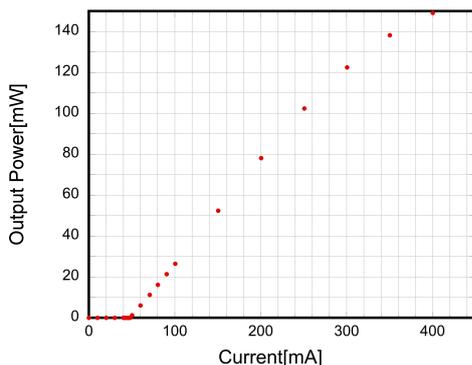


図 4 ECLD の出力特性

発振閾値は 50 mA、スロープ効率は 48 W/A、最大出力は 400 mA で 149mW であった。次に発振モードの確認を行った。発振モードの確認方法としては、波長計を用いる方法と別の狭線幅光源とのビート信号を取得する方法の 2 通りで行った。波長計で確認したところ絶対波長が 7 桁までしか表示されず、またその値が時事刻々変化していたためマルチモード発振の可能性が疑われた。そこで単一モード発振の狭線幅光源として Yb Fiber DFB レーザーを用いて作成した ECLD とのビート信号を取得した。図 5 に取得したビート信号を示す。この図から作成した ECLD ではマルチモード発振していることがわかった。マルチモード発振を抑えるべく空間系の調節を試みたが一向にシングルモード発振が得られなかったため、ECLD の再設計を試みた。

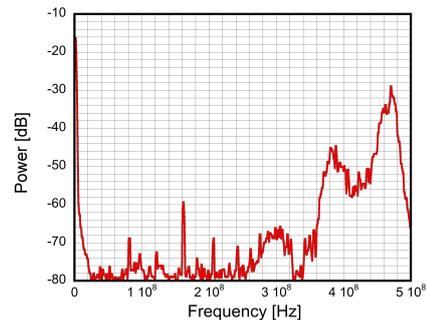


図 5 ECLD と Fiber DFB レーザーとのビート

3.3. ECLD の再設計

マルチモード発振の原因として考えられることは 2 つあった。1 つは機械的安定度向上のためにコリメータレンズの調節機構を省略してしまったためにコリメータが不十分であったこと。もう 1 つは回折格子の波長分解能が足りていなかったということである。回折格子の波長分解能 $\Delta\lambda$ は以下の式で与えられる。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{mN}$$

ここで λ は波長、 m は回折次数、 N は回折格子の刻線数、 W は回折格子に当たる面積である。使用していたのは刻線数 1200 本/mm の回折格子でこの 1 次回折光の回折角は 38° であった。刻線数が 1800 本/mm の回折格子を用いると 1 次回折角は 67° となり、回折格子に当たるビームの面積が大きくなる。その結果回折格子の波長分解能が向上すると考えた。

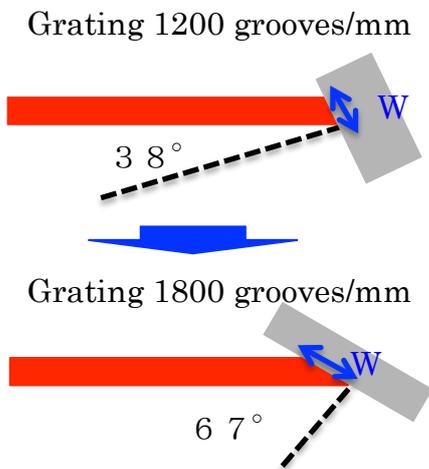


図6 回折格子の波長分解能向上の原理

コリメータレンズに微調整機構として板バネ構造を追加し、回折格子は刻線数 1800 本/mm のものに取り替えた。改良後の ECLD の図を図7に示す。

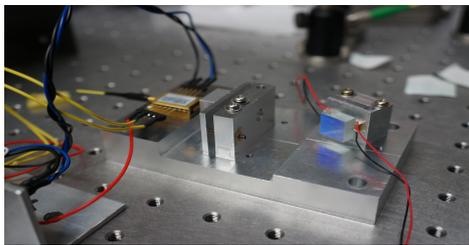


図7 改良した ECLD

改良後では波長計での表示桁が8桁まで表示されるようになった。Fiber DFB レーザーとのビート信号は図8のようになった。これから ECLD はシングルモード発振していると考えられる。

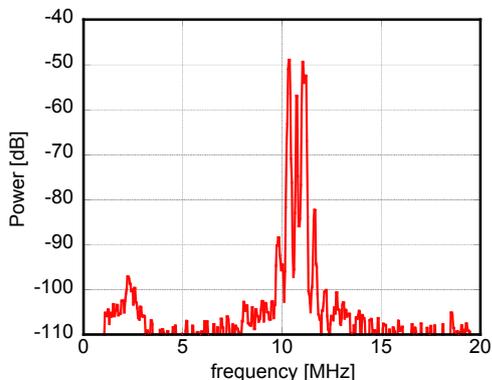


図8 改良 ECLD と Fiber DFB レーザーとのビート

また、ECLD のスペクトルを光スペクトルアナライザで取得したところ図9のようになった。この時の分解能は 0.05nm であった。スペクトルの形だけで判断するとシングルモードと断定はできなかつたため、ビー

ト信号取得の際に使用した Fiber DFB レーザーのスペクトルも取得し、図10に示した。

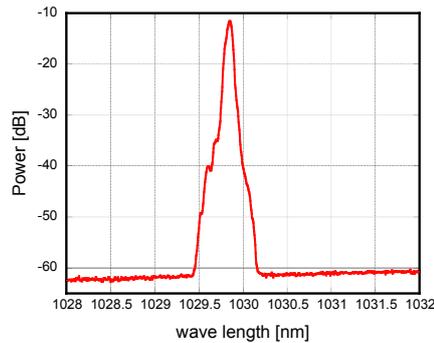


図9 ECLD のスペクトル

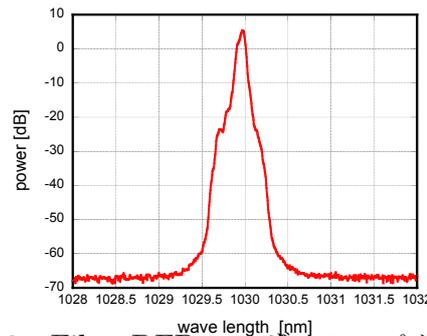


図10 Fiber DFB レーザーのスペクトル

FiberDFB レーザーの発振スペクトルも ECLD と似通った形を示した。したがってスペクトルからは有意な差異はないと判断できる。スペクトルの形がこのように太った形を示す原因は定かではないが、測定器である光スペクトルアナライザの分解能によって制限されているためではないかと考えられる。Fiber DFB レーザーの線幅が 100kHz 以下であるため、ECLD の線幅は大まかに見積もって 1MHz 以下であることが推察される。

3.4. 相対強度雑音の評価

作成した ECLD の相対強度雑音を以下の図11に示す。

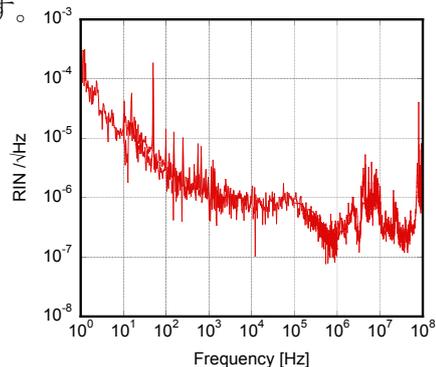


図11 ECLD の相対強度雑音

200kHz での相対強度雑音は $4.7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ であった。現在本研究室で周波数安定化用光源として使用されている Yb Fiber DFB レーザーの相対強度雑音は 200kHz で $1.1 \times 10^{-6} / \sqrt{\text{Hz}}$ であるから、これより強度雑音の低い光源であることがわかった。

4. まとめと展望

本研究では、高周波数域での強度雑音が低いと期待される外部共振器型半導体レーザー(ECLD)の設計開発を行った。ECLD の仕様は回折格子型の Littrow 型で、共振器長は 60mm である。現在は波長 1030nm で発振することは確認できた。スロープ効率 は 48% で 400mA での出力は約 150mW であった。しかし、出力がシングルモード発振ではなくマルチモード発振であることがわかった。そのためシングルモード発振を得ることを最優先に ECLD の再設計を試みた。再設計ではコリメータレンズに微調整機構を追加し、回折格子をより刻線数の多いものに取り替えた。その結果、シングルモード発振を得ることができた。シングルモード発振の確認は波長計、光スペクトルアナライザ、Fiber DFB レーザーとのビート信号を取得するという 3つの方法で検証し、確かにシングルモード発振していることが確かめられた。また、相対強度雑音は 200kHz で $4.7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ であり、既存の周波数安定化用光源である Yb Fiber DFB レーザーより低い強度雑音を達成できた。

今後の展望としては、まず線幅を測定し既存のファイバーDFB レーザーとさらなる性能の比較を行い周波数安定化光源としての有用性を検証していく必要がある。既存の光源に代用可能であれば新たな周波数安定化用光源として使用する予定で、将来的には高安定度なレーザーの高出力化のための光源としての利用も検討している。さらには、より堅牢なフィルター型の ECLD の作成も視野に入れている。

5. 参考文献

[1] Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takeshi Ikegami, and Ryuzo Kawabata “External cavity diode laser with frequency drift following natural variation in air pressure,” Appl. Opt. 54. 5777(2015)

[2] L.D. Turner, K.P. Weber, C.J. Hawthorn, and R.E. Scholten, “Frequency noise characterization of narrow line width diode laser,” Opt. Com. 201(2002) 391-397

[3] X. Baillard, A. Gauguet, S. Bize, P. Lemonde, Ph. Laurent, A. Clairon, P. Rosenbusch, “Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers,” opt. Com. 266(2006)609-613