重力波検出用の超高安定化高出力固体レーザーシステム

武者 満, 中川 賢一, 植田 憲一

電気通信大学 レーザー新世代研究センター (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

High-Power and Highly-Stable Solid-State Laser for the Gravitational Wave Detector

Mitsuru MUSHA, Ken'ichi NAKAGAWA, and Ken-ichi UEDA

Institute for Laser Science, University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received March 18, 1999)

A high-power and highly-frequency-stabilized laser has been developed for the laser interferometric gravitational wave detector. Requirements of the light source for this are a single transverse and longitudinal mode with the power and frequency noise of 10 W and 10^{-6} Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 300 Hz, respectively. The frequency of a LD-pumped injection-locked Nd:YAG laser was stabilized to a high finesse Fabry-Perot optical resonator that was isolated from seismic and acoustic noise, which was achieved by controlling master laser light. We evaluated the mechanical and thermal stability of Fabry-Perot cavities of both rigid spacer type and the independently suspended mirrors type. Finally we have achieved the absolute frequency noise of 2×10^{-2} Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ for an injection-locked high-power laser with the output power of 9.8 W.

Key Words: Injection-locking, Frequency stabilization, Nd:YAG laser, Gravitational wave

1. はじめに

相対性理論により存在が予測されている重力波は新たな天体観測の手段として注目されており, 従来の電磁波とは異なる物理量の検出による全く新しい天文学の幕開けが期待されている. しかし天体の崩壊, 爆発といった巨大な現象に起因する信号であるにもかかわらず発生する重力波は非常に弱く, 相対変位 $h = \delta l / l = 10^{-21}$ 以下の時空の変動が数100Hz以下の振動数で伝達してくると予想されている. このような極限的に微小な変位測定は従来の光を用いた測距技術の限界をはるかに越えており不可能と考えられていたが, 近年の光学素子やレーザーの発展にともない長基線のレーザー干渉計を用いた重力波直接検出の可能性が提案され, 各国でレーザー干渉計型の重力波検出器の建設が進められるようになった¹⁾. しかし $h = 10^{-21}$ 以下の変位検出感度を実現するには越えるべき多くの技術的な障壁が存在し, 特に重要な問題は干渉計用の高性能な鏡と高出力・高安定な光源の開発である. 本稿では高出力と共に極限的な周波数安定度をもつレーザーの開発についての解説を行う.

2. レーザー干渉計用光源

現在主流の重力波検出器は実効的な光路長を増加する

ために各腕にファブリーペロ共振器を持った基線長数100m~数kmのファブリーペロ・マイケルソン型レーザー干渉計であり, 日本ではTAMA300と呼ばれる基線長300mのレーザー干渉計が国立天文台を中心とした研究グループにより計画され現在建設中である²⁾. 光源はTEM₀₀縦横単一モード発振で出力10Wが要求されている. 本来干渉計の両腕の長さが完全に一致していれば光源に周波数安定度は必要なく, 極論すれば白色光でも干渉信号は検出されるはずである. しかし現実には両腕の長さは完全には一致しないのでTAMA300の目標感度である $h \leq 10^{-22}$ を実現するためには目標変位感度と同等の(実効的な光路長差に相当する同相雑音除去比を 10^{-2} とすると)相対周波数安定度 $\delta\nu/\nu = 10^{-20}$ が必要とされる. また干渉計は変調周波数15.25MHzの位相変調を用いたFM変調法により変位信号を得ているが, 検出周波数300Hz付近での検出感度は変調周波数帯域でのショット雑音が支配的である. このためTAMA300においては信号対ショット雑音比向上のため10Wの光源出力が要求されている. 研究方向は元々モード・周波数・強度の安定性を考慮せずに開発されている高出力レーザーを安定化するのではなく, まず極限的に周波数安定化された光源を開発してその安定度を保ったまま高出力化する順序で進めた. このような高出力・高安定という相反した性能を同時に追求するレーザーの開発はレーザー研究にとっても非常に興味深い対象であり, 電

通大レーザー研, 東工大, ソニー(株)がTAMA300の光源開発を担当した。

3. 周波数安定化

従来レーザーの周波数安定化は周波数標準の作製や高分解分光用の線幅狭窄化を目的として行われてきた。前者は分子・原子を周波数基準とした長期的な周波数安定化であり、後者は周波数雑音の積分値である線幅を数kHz程度に狭窄すれば十分であった。しかし重力波用光源には信号検出周波数である300Hz付近の帯域300Hzでの周波数安定度が要求され、300Hzでの雑音のパワースペクトル密度を $5 \times 10^{-6} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に抑圧する必要がある(線幅はsubHz以下に相当する)。このために300Hzという速い周波数域で十分な安定度を持つ周波数基準の開発と高利得の負帰還制御ループの構築が周波数安定化の鍵となる。

第一世代のレーザー干渉計光源には高出力が容易に得られるとの理由から波長514nmのArイオンレーザーが用いられてきた。しかし長期運転には不向きでありプラズマ振動による雑音が大い・効率が低い等の点で高安定化には不都合であり、現在では高効率で雑音が少ない波長1064nmのNd:YAGレーザーが主流となっている。また波長が長い方が鏡の散乱、吸収による損失が少なく、高性能鏡開発の点でも有利である。Nd:YAGレーザーはランプ励起から高効率の半導体レーザー励起へと移行することにより効率、安定度が向上し、Showlow-Towns限界以下への周波数安定化が行われるようになった³⁾。特に1980年代後半にNPRO(Non-Planar Ring Oscillator)と呼ばれる安定で制御性の高い半導体レーザー励起モノリシック型Nd:YAGレーザーが開発され⁴⁾、鏡の高性能化により実現されたフィネス数万～数十万のファブリーペロ光共振器を周波数基準として周波数安定化が行われ周波数安定度が飛躍的に向上した^{5,6)}。我々は出力200mWのNPROに対してフィネス50000のファブリーペロ共振器を基準共振器としてFM-sideband法⁷⁾を用いて周波数安定化を行った。NPROはピエゾ素子によるNd:YAG結晶の変形により共振器長を制御して周波数の高速制御を行っているが、結晶自体の機械共振により制御帯域が50kHz以下に制限される。重力波検出帯域である300Hz近辺で十分な周波数雑音抑圧利得を得るためには広い制御帯域が必要となるので、EOMを位相制御素子として出射光の高速制御に用いてNPRO本体とEOMの併用により1MHzの制御帯域を確保している。このような周波数安定化を行う場合通常周波数弁別信号からの誤差信号により雑音を評価するが、誤差信号により求められる周波数雑音は基準共振器に対する相対的な周波数雑音つまり基準共振器に対する追従度を表す。このため誤差信号評価ではサーボの利得を上げることによりショット雑音限界以下まで周波数雑音を抑圧することが可能で1kHz以下で $1 \times 10^{-4} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ の値を得ている。この場合の周波数雑音はサーボ回路の電気雑音で制限されており、受光強度を増加して周波数弁別曲線の利得を上げることにより限界値を下げる事が出来る。

真の周波数安定度(絶対周波数雑音と呼ぶ)は基準共振

器自体の安定度に誤差信号評価による周波数雑音を加えた値であり、基準共振器自体を安定化することにより絶対周波数安定度を向上することができる。基準共振器は熱膨張率が非常に低いULE(Ultra-Low Expansion glass ceramic)製の中空円筒スペーサと両端面にオプティカルコンタクトされた高反射率鏡で構成されている。光共振器は2段振子により懸下され地面振動を振子の共振周波数以下で周波数の4乗に反比例して減衰させており、振子の共振周波数での振動は光共振器を載せた最下段のアルミ製ステージの真下におかれた永久磁石によるeddy currentにより制動している。また全体を真空容器に納めることにより音響振動を遮断し、系全体は空気バネ除振された光学定盤に載せられている(Fig.1)。基準共振器に安定化された光の絶対周波数雑音は(a)他の同程度またはより以上の安定度を持つ基準共振器による評価、(b)同じ安定度を持つレーザー同士のビート、の2通りの方法で評価することができる。周波数安定化されたレーザー光の周波数雑音を(a)の方法で評価したところFig.2に示されるように5kHz以下で防振効果があらわれ300Hzでは周波数雑音が約50dB抑圧され $1 \times 10^{-2} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に達した⁸⁾。

周波数雑音抑圧の制限を決めるショット雑音限界を下げるためには受光強度つまり共振器入射光強度を増加しなければならないが、入射光による熱の影響で共振器の共振周波数のドリフトがおこると考えられる。そこで(2)の方法を使い2台の安定化レーザーのビート周波数の変化を測定した(Fig.3)⁸⁾。この結果より入射光強度の増加とともにビート周波数のドリフト量が増加し10mW入射時には1時間で約2MHzシフトして5000秒経過後も平衡に達していないことがわかる。この実験では2台のレーザーは同方向に周波数がシフトすると考えられ、実際には差の周波数を表すビート周波数で示される以上の周波数ドリフトが生じている。重力波干渉計光源には長期の安定度は必要とされていないが、干渉計の長期の安定な動作を行う上では

Fig.1 The Fabry-Perot cavity for the frequency reference. The length and the finesse of the cavity are 275 mm and 56000, respectively. The spacer of the cavity is made of ULE glass. The cavity is isolated from external perturbations by a double pendulum suspension and all those components are housed inside the vacuum chamber.

Fig.2 The frequency noise suppression by isolating perturbations from outside. (a) The cavity is fixed directly on the optical bench, (b) the optical bench is air suspended, (c) the cavity is suspended by single-pendulum, and (d) the cavity is suspended by doubled-pendulum suspension.⁸⁾

Fig.3 The drift of the beat frequency between two lasers whose frequencies are locked to independent cavities. The trace (a), (b), and (c) indicate the beat frequency when the cavity input power are 2 mW, 10 mW, and 20 mW, respectively.⁸⁾

長期の周波数シフトを考慮に入れる必要があるだろう。

周波数雑音評価用の共振器に周波数基準と同種の共振器を用いると、両共振器の同相雑音はキャンセルされて検出することができない。そこで共振器自体の安定度は別種のより安定度が高い周波数基準を用いて評価する必要がある。上記の実験で用いていた固定共振器(スペーサーで鏡の距離を固定されたファブリーペロ共振器をこのように呼ぶ)の安定度を評価するため、この共振器で周波数が安定化されたレーザーの周波数雑音を国立天文台のプロトタイプ20mレーザー干渉計に組み込まれているレーザー光のモード成形に使われる4mモードクリーナを用いて評価した⁹⁾。4mモードクリーナは主干渉計と同様それぞれ2段振子で独立に懸下された2枚の鏡で構成された共振器長4mのファブリーペロ共振器である(この型の共振器を独立懸下型共振器と呼ぶ)。2枚の鏡の間にスペーサーは無くそれぞれの鏡の位置をローカルに制御することにより共振器長を一定に保っている。この基準共振器による周波数雑音スペクトル

をFig.4の実線で示す。100Hz以下の構造は別に加速度計で測定した評価用共振器の鏡の振動スペクトルと一致しており評価用共振器の不安定さに起因している。100Hz~10kHzは評価用共振器の安定度が基準共振器の安定度を上回っている範囲であり周波数安定化レーザーの絶対周波数雑音を示しており、500Hzで $2 \times 10^{-2} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に抑圧されている。またこの周波数領域での周波数雑音スペクトルは周波数安定化サーボのゲインを上げて誤差信号評価の周波数雑音が減少しても形状がかわらないことより基準共振器自体の安定度を示している。共振器の不安定さは外来振動(地面振動等)により共振器の振動が励起されたものと考えられ、30kHz以上に見られる鋭い共振ピークはスペーサーの共振モードである。

次に独立懸下型共振器の安定度を評価する目的で基線長1mのモードクリーナで安定化されたレーザーの周波数雑音を20mレーザー干渉計の片腕の独立懸下型ファブリーペロ共振器を用いて評価した¹⁰⁾。結果をFig.4の点線で示す。この実験では周波数安定化サーボは最適化されていなかったが300Hz~10kHzの間で固定共振器より高い安定度を示し2kHzで $2 \times 10^{-3} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に周波数雑音が抑圧されている。独立懸下型共振器の安定度は共振器長の相対変化量 δ/l で決まり、ローカルな鏡の振動量で決まる δ は一定であるので共振器長 l に比例して安定度が向上し、現在の300mレーザー干渉計の片腕の独立懸下型ファブリーペロ共振器は1-mモー

Fig.4 The estimation of the frequency noise of the frequency-stabilized laser. (a) Under free-running condition, (b) frequency stabilized to the 1-m mode cleaner, and (c) frequency stabilized to the rigid cavity.⁹⁾

ドクリーナの300倍,つまり300Hzで $10^{-5}[\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 以下の安定度が期待される。

以上の実験結果よりTAMA300では300m干渉計の片腕を周波数基準としてレーザーの周波数安定化を行う。具体的にはレーザーを10mモードクリーナーに周波数安定化し,さらに10mモードクリーナーを300m干渉計に対して安定化する2段階のサーボトポロジーを構築する。サーボの利得を分割することにより140dB以上必要な周波数雑音抑圧利得を確保して要求値である300Hzでの周波数雑音を $5 \times 10^{-6}[\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ を実現する予定である。

4. 注入同期

基線長20mのプロトタイプ重力波干渉計は光源に半導体レーザー励起モノリシック型Nd:YAGレーザー(NPRO)を用いていたが,このレーザーの出力は構造上1W程度が限界である。長基線レーザー干渉計の信号対ショット雑音比を向上させ重力波検出可能感度を達成するには光源に10W以上の高出力が要求されるが,NPROの安定度を維持したまま高出力を得るためにはMOPA(Master Oscillator Power Amplifier)と呼ばれるNPROの出力を光アンプを用いて増幅する方法とNPROを主レーザーとして高出力レーザーに注入する注入同期の2通りが考えられる。MOPAの方法は比較的容易であるが光アンプで生じる自然放出雑音が加算され強度雑音が増加する欠点を持つ¹¹⁾。観測帯域の1kHz以下での強度雑音は後述のように励起光強度の制御等で抑圧できるが,変調周波数帯域(数10MHz)では強度雑音抑制が困難であり,また変調周波数帯域での強度雑音がショット雑音を上回ると出力増加の意味を失うことになる。そのため我々は注入同期法によるレーザーの高出力化を行った。注入同期レーザーの強度雑音は緩和振動数以上では従レーザーに支配されるが,従レーザーは一般に主レーザーに比べて緩和周波数が低いために変調周波数帯域であるRF帯域では強度雑音が主レーザーより低くなり,その結果注入同期レーザー光のRF帯域での強度雑音は主レーザーより低減される。また注入同期レーザーの周波数はロッキングレンジ周波数以下では主レーザーの周波数雑音に支配されるので理論的には主レーザー光の制御のみで注入同期レーザーの周波数安定化が実現されるはずである¹²⁾。ここでロッキングレンジとは従レーザー光の一つのモードが主レーザーに引き込まれる周波数差であり,共振器の長い固体レーザーの場合数MHz程度である。そこで2W出力の注入同期レーザーを作製して主レーザー光のみの制御による周波数安定化の実験を行った³⁾。従レーザーとしてマルチモード出力の半導体レーザー端面励起リング型Nd:YAGレーザーを作り,200mW出力NPROを主レーザーとして注入することにより縦横シングルモード2W出力を得た。従レーザーの共振器長を2枚の鏡につけられたピエゾ素子で制御することにより従レーザー発振周波数を主レーザーに対して位相同期させ,注入同期の安定な運転と主レーザー・従レーザー間の残差雑音抑圧を行っている(制御帯域20kHz)。注入同期レーザーの出力を一部取りだして上述の安定化された基準共振器

に対してFM sideband法により誤差信号をとりだし,主レーザーのNPROと主レーザー光路に置かれているEOMに負帰還することにより制御帯域700kHzの周波数安定化を行った(Fig.5)。誤差信号評価による周波数雑音スペクトルをFig.6の実線で,また主レーザーと従レーザー間の残差雑音を破線で示す。図に示されるように50kHz以上では残差雑音の影響による周波数雑音の増加が見られる一方50kHz以下では残差雑音成分は完全に抑圧されている。この結果注入同期レーザーの周波数安定度は50kHz以下ではほぼ完全に従レーザーの周波数安定度に追従し,周波数雑音は検出帯域である1kHz以下で $2 \times 10^{-4}[\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に抑圧されている。この結果より注入同期レーザーは制御性のよい主レーザー光制御のみで観測帯域での周波数安定化が実現できることを確認し,またこの場合高速制御用のEOMも小出力の主レーザー光に使用されるので損傷閾値に対する要求が緩和される。現在TAMA300ではソニー(株)により製作された出力10Wの注入同期Nd:YAGレーザーが組み込まれ干渉計運転の準備が行われている。この10Wレーザーは出力700mWのNPROを主レーザーとして用い2本のYAGロッドを2台の半導体レーザーで励起することにより実質9.8Wの出力を得ている¹⁴⁾。このレーザーに対してEOMと

Fig.5 The schematic diagram of the frequency-stabilized injection-locked laser. EOM, DBM and PD are electro-optic modulator, double-balanced mixer and photo detector, respectively.

Fig.6 The solid line indicates the frequency noise of the injection-locked laser which is estimated from the error signal and the dotted line indicates the residual frequency noise between master and slave laser. The bold dotted line is the frequency noise of the laser under free-running condition.¹³⁾

MOPA(master oscillator power amplifier)

Coherent Addition

Parallel

Serial

Fig.7 The future plans for realizing lasers with more than 100 W output power. The master laser optical amplified (MOPA) and coherent addition by using injection-locking chain.

偏光板を組み合わせたアクチュエータによる強度安定化を行い300Hzで要求値である 2×10^{-8} [1/Hz]の相対強度雑音の要求値を達成している¹⁵⁾。ただし偏光を利用した強度安定化は干渉計で出力光の偏光変化に起因する雑音を生じさせる可能性があるので従レーザーの励起用LDの強度変動による強度安定化を検討している。

5. 将来計画

TAMA300 では出力10Wのレーザーを10mのリング型モードクリーナでビーム成形し、干渉計への入力パワーは3Wとなる。干渉計は暗干渉で信号を取っているのでレーザー側に大部分の光が戻ることになる。そこでこの戻り光を再度干渉計に打ち込むパワーリサイクルと呼ばれる技術を使い実効的干渉計入力30W(パワーリサイクル利得10)を計画している。また日本で将来計画されているさらなる高感度の重力波計画では、基線長の増加(～3km)、鏡の冷却による熱雑音の影響減少、そして入射パワー増大によるショット雑音低減の3本を柱としている。そのためレーザーには現在と同程度の安定度で出力100Wが要求される。100W級の出力実現には光アンプによる出力増加と光のコヒーレント加算による方法が挙げられている(Fig.7)。光アンプの方法は前述の理由によりRF帯域での強度雑音低減が問題となる。一つの解としてファブリーペロ共振器の低域通過フィルター特性を利用してRF域での強度雑音を下げる方法があるが、我々は後者のコヒーレ

ント加算による出力増大を検討している。コヒーレント加算には直列に注入同期レーザーを繋げる方法と、複数の従レーザーを並列に1台の主レーザー光に注入同期させ、発振周波数の等しいそれぞれの出力を位相を合わせて加算させる方法がある。固体レーザーの場合熱複屈折等の理由により安定な出力は1台あたり10W程度が限界であるので、100W出力を実現するためには複数の従レーザーを注入同期により結合させる方法が有望である。結合方法は複数段の注入同期を行う直列方式と1台の主レーザーより注入同期された複数のレーザー光をコヒーレント加算する並列方式があるが(Fig.7)、われわれは後者の並列なコヒーレント加算を検討している。2台のレーザーのコヒーレント加算は半導体レーザー¹⁶⁾・Arイオンレーザー¹⁷⁾等では試みられているが大出力の固体レーザーでは行われておらず、出力の結合効率や強度・周波数雑音の制御性など調べるべき点が多いので、2Wの注入同期レーザーを用いて基礎研究を行う予定である。またより広範な応用のためには実験室レベルで短期安定度の高いレーザーの実現が必要であり、より安定な周波数基準の開発も重要である。現在ドイツのグループ等がサファイア製スパーサーを持つファブリーペロ共振器を液体ヘリウム温度に冷やすことにより驚異的な安定度を実現している¹⁸⁾。この共振器は大がかりな装置を必要とするが、ある種のサファイアでは液体窒素温度で安定度が得られる可能性があり非常に興味深い。

参考文献

- 1) A. Giazotto: Phys. Report **182** (1989) 365.
- 2) K. Tsubono, M.-K. Fujimoto, and K. Kuroda: *Gravitational Wave Detection* (Universal Academy Press, INC., Tokyo, 1996) p.183.
- 3) D. Shoemaker, A. Brillet, C. N. Man, O. Cregut, and G. Kerr: Opt. Lett. **14** (1989) 609.
- 4) T. J. Kane and R. L. Byer: Opt. Lett. **10** (1985) 65.
- 5) N. M. Sampas, E. K. Gustafson, and R. L. Byer: Opt. Lett. **18** (1993) 947.
- 6) F. Bondu, P. Frischel, C. N. Man, and A. Brillet: Opt. Lett. **21** (1996) 582.
- 7) R. W. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, and J. Hough: Appl. Phys. **B31** (1983) 97.
- 8) K. Nakagawa, T. Katsuda, and M. Ohtsu: Appl. Phys. **B60** (1995) 489.
- 9) M. Musha, S. Telada, K. Nakagawa, M. Ohashi, and K. Ueda: Opt. Comm. **140** (1997) 323.
- 10) A. Araya, N. Mio, K. Tsubono, K. Suehiro, S. Telada, M. Ohashi, and M. Fujimoto: Appl. Phys. **36** (1997) 1446.
- 11) W. M. Tulloch, T. S. Rutherford, E. H. Huntington, R. Ewart, C. C. Harb, B. Willke, E. K. Gustafson, M. M. Fejer, and R. L. Byer: Opt. Lett. **23** (1998) 1852.
- 12) A. D. Farinas, E. K. Gustafson, and R. L. Byer: J. Opt. Soc. Am. **B12** (1995) 328.
- 13) M. Musha, Ken'ichi Nakagawa, and Ken-ichi Ueda: Opt. Lett. **22** (1997) 1177.
- 14) S. T. Yang, Y. Imai, M. Oka, N. Eguchi, and S. Kubota: Opt. Lett. **21** (1996) 1676.
- 15) S. Nagano, M. Musha, L. Ying, N. Mio, and K. Ueda: Laser Phys. **8** (1998) 686.
- 16) W. Wang, K. Nakagawa, S. Sayama, and M. Ohtsu: Opt. Lett. **17** (1992) 1593.
- 17) G. A. Kerr and J. Hough: Appl. Phys. **B49** (1989) 491.
- 18) R. Stortz, C. Braxmaier, K. Jack, O. Pradl, and S. Schiller: Opt. Lett. **23** (1998) 1031.