レーザー解説

重力波検出用LD励起YAGレーザーの周波数安定化

植田 憲一*・上原 昇*

(1993年7月14日 受理)

Frequency Stabilization of LD-pumped YAG Lasers
for Gravitational Wave Detection

Ken-ichi UEDA* and Noboru UEHARA*

(Received July 14, 1993)

Frequency stabilized solid state lasers related to the gravitational wave detection are reviewed. In order to detect gravitational waves from super novae or a coalescence binary stars, the sensitivity should be higher than 10^{-19} to 10^{-22} . A large interferometer is a possible solution if we can develop a stable light source, more cleaner optics, free-mass optical cavity, anti-vibration systems operating at their quantum or theoretical limits. We measured the FM-noise at the shot noise limit by means of LD-pumped YAG lasers. The tracking capability was examined by the beatnote spectrum of 193 mHz directly. The measured spectrum and Allan root variance showed that the beat line width is determined by the thermal drift of reference cavities in two-laser and two-cavity mode. We report the present status of technological development of ultra-stabilized lasers, ultra-high quality optics, and high power lasers for gravitational wave measurements.

Key Words : YAG lasers, LD-pumping, Frequency stabilization, Gravitational wave, Optical cavity

1. はじめに

一般相対性理論によってアインシュタインが予測した重力波を直接計測し、それを通じて、ダイナミックな宇宙像や真の宇宙の大きさを決定しようとする試みが進められている。重力波は4重極放射された横波であり、XY平面に垂直に入射した重力波は、X軸が伸びるならY軸が縮むというように空間を変形させる。マイケルソン干渉計の反射鏡を自由質量としておけば、重力波の入射によって生じる両腕の長さを、光

学的に計測できる。重力波アンテナで鏡が吊られているのは、地面振動の防振という意味もあるが、より基本的には鏡を慣性系における自由質量として、空間のひずみを測定するためである。重力波検出が代表する純学術的研究の特長は、ある部分の困難性を別の部分の改良で分担解決するようなトレードオフがないことである。レーザーの安定化、光学素子技術、干渉計の制御、防振技術、すべてにわたって、理論限界に到達して初めて、重力波は検出可能なレベルとなる。一見、非現実的に見える厳しい要求であ

* 電気通信大学レーザー極限技術研究センター (〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

* Institute for Laser Science, University of Electro-Communications (1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182 Japan)

る。しかし、現実世界で、そしてわが国でもこのような課題に正面から取り組んでいる有能な研究者がいることも事実であり、わが国でいうハイテクとは違った先端的科学技術研究が存在する。とりわけ、米国、欧州では、100億–250億円といった予算のプロジェクトが認められ、建設が開始されている。本論文では、わが国で進行中の重力波アンテナ開発に関係するレーザーの周波数安定化技術の現状について報告する。Arレーザーを光源とする諸外国と違って、わが国の計画ではLD励起固体レーザーを光源に採用する。LD(半導体レーザー)励起固体レーザーはフリーランニングモードにおける周波数雑音が他のレーザーに比べて際だって少ない。さらに、LDや新しい固体レーザー材料の飛躍的な進歩が期待されるので、重力波アンテナ用光源である周波数安定化レーザーとして、LD励起固体レーザーを採用した。本論文で紹介するように、このような選択が正しかったことをこれまでの研究成果は示している。

2. 重力波検出用干渉計が要求するもの

重力波天文学、重力波検出のためのアンテナの開発¹⁾は、その技術的困難さからいって、これまでわが国で行われた技術的研究の最右翼である。超新星爆発などに伴う重力波は存在はほぼ確証されているものの、いまだ直接的な観測の例はない。なぜなら、重力波は物質と相互作用をする力がきわめて弱いので、測定できないからである。実際、重力波アンテナが観測しようとする“重力波による空間の歪み”は、Fig. 1にみられるように地球と太陽の間の距離が水素原子1コ分だけ伸びるだけの量でしかない。重力波アンテナにはもっとも微量な変位を測定できるレーザー干渉計²⁾を用いる。当然、干渉計を構成しているミラーは予想される重力波の周波数において、想像を絶する精度で静止しており、同時に干渉計を構成するように高精度にアライメント・コントロールされなければならない。将来計画で想定しているアンテナは長さ150kmに相当する光学アーム長を持ち、それが

Fig. 1 The sensitivity for gravitational wave detection is relatively equivalent to the detection of a single hydrogen atom in the space between the sun and the earth.

10^{-7} オングストロームだけ変化するのを測定しようとする。同時に干渉計の光源の強度、周波数に変動があってはならず、強度の安定度で、 $10^{-9}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、周波数の安定度で $10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ が“原理的に”要求される。このような安定度は1kWのレーザー出力が持っている量子雑音、すなわち本質的に光子の集団が不確定性関係で決められた変動をすることに起因する雑音を意味しており、それ以下の強度の光では達成することが原理的にできない。100 Wの単一縦横モードの発振をさせることが困難な現在のレーザー技術に比べて、いかに遠大な目標であるか、容易に理解することができるだろう。他の部分の技術に要求される水準も同様である。ちなみに、欧州で開発されている干渉計のミラー防振系のスケッチをFig. 2に示す。高さ11.6メートルに達するスーパー防振系は、7段の防振装置を重ね、地面振動の影響をわずか3ナノメートルにまで減衰させようという野心的なものである。

Fig. 2 Anti-vibration and mirror control tower in European VIRGO project.

3. 周波数安定化レーザー

レーザーは電波のように位相の揃った干渉性のよい光を発生させることが“できる”。しかし、現実には電波のように波としての性質を利用した応用は科学実験を除いて広く普及しているとは云いがたい。現状は、“強力な光”、“どこまでも平行な光”、“時間的に短い光パルス”など光の性質の内のほんの一部を利用しているにすぎない。これは、“光の純度”が理想的ではないために、限られた範囲の干渉性しか使えないことに起因している。光の純度はビームに含まれている光子のエネルギーのばらつきで決まり、光エネルギーが $E=h\nu$ で表されることから、レーザー周波数の純度を意味している。レーザーの周波数を安定化させ、光としての純度を向上させることは、レーザーの発明以来、基本的な課題であった。

3.1 LD励起YAGレーザーの周波数安定化

レーザーの周波数を極限的に安定化させるに

は、周波数を測定し、基準の周波数からずればよい。しかし、極限的な安定度を求める場合、他により精度の高い基準がない以上、自分自身を基準とする以外にない。すなわち、高フィネス光共振器に光を蓄積し、“時間積分した自らの過去”に、“現在の自分”を一致させるようにして安定化をさせる。光共振器は光をため込んでいる時間、光信号に対する積分器として働くので、光共振器の応答時間よりも短い時間の変化成分は、互いに打ち消しあって消滅してしまう。このため、自分を基準としながらも、自分よりもさらに安定な光信号を発生させるようにレーザーを調整することができるようになる。したがって、“物差し”となっている光共振器の性能は超高性能でなくてはならない。

周波数安定化を行うレーザーの共振器は、当然のことながら単一横モードで単一周波数発振をするものでなくてはならない。端面励起LDによる励起によって、単一横モード発振は容易になったが、縦モードを単一化するためには、Fig. 3のようなリング共振器またはツイストモード共振器で構成されたレーザーが適している。このような共振器では空間的ホールバーニングを起こさないで、単一モード発振が容易に実現される。ファラデー効果を内蔵した単一方向リング共振器や、 $1/4$ 波長板を挿入したツイストモード共振器³⁾で、参照共振器からの戻り光

Fig. 3 Resonators for frequency stabilized lasers.

の影響を排除している。結晶の全反射による共振器を構成するモノリシック共振器は、非平面型共振器に設計され、外部磁界を印加して、YAG結晶自体のファラデー効果で単一方向リング共振器となる。偏光固有モードの発振であるために、外部共振器からの光フィードバックの影響を受けにくい特長がある。結晶につけられたPZT素子がYAG結晶を変形させて、高速な周波数変調を可能にしている。

周波数安定化のためには、光共振器の長さを変調するPZT素子、外部で周波数シフトさせる音響光学素子(AOM)、電気光学素子(EOM)を利用する。AOMでは回折された光の周波数には、印加した超音波の周波数成分がドプラー効果で加算されるので、光周波数をシフトさせることができる。同時に、反対方向に入射した光に、ドプラー効果がさらに追加されるので、効果的な方向性フィルターとして作用する。同様のドプラーシフトは光学的距離を電氣的に制御できるEOMでも発生し、低周波から高周波まで、PZT, AOM, EOMを各々利用して、そのバンド幅に応じて周波数制御を行う。

周波数安定化にはDrever-Hall法⁴⁾を用いて、出力最大の点に周波数をロックする。外部からの光雑音の影響を受けないようにリング共振器型のレーザー⁵⁾を使用した。EOMで20MHzの周波数で位相変調をかけたレーザー光をモード整合させて参照共振器に入射させ、共振器からの反射光を検出、DBM(Double Balanced Mixer)で復調する。周波数安定化されたLD励起YAGレーザーの周波数雑音スペクトルをFig. 4に示した。フィードバック回路のエラー信号で見る限り、周波数雑音はショット雑音に達している。レーザーの周波数が 3×10^{14} Hzであることを思い出せば、周波数安定の程度が理解できるだろう。これらの詳細については、別途、論文⁶⁾を参照されたい。

3.2 同じ共振器にロックした2台のレーザーのビート周波数の測定

2台のレーザーを同時に安定化させれば、電

Fig. 4 FM noise spectra of the LD-pumped YAG laser. Upper trace : free running mode, lower trace : stabilized mode.

波と同じようにレーザー光同士のビートを観測することができる。ここでは2台のレーザーは共に同じ参照共振器にロックされているが、まったく同じ周波数でなく、隣接する異なった縦モードに各々ロックされている。各々別個に安定化を行うために、位相変調の周波数も15, 20 MHzと分けられており、参照共振器の長さの変動1nmあたり3.6 Hzだけビート周波数が変化して、共振器長さの極微の変化も反映するようにした。測定された光ビートのスペクトル幅はFig. 5の通りで、193mHz⁷⁾のビート線幅が観測された。これは現時点で観測された固体レーザーの周波数ビートでもっとも狭い線幅である。スペクト

Fig. 5 Beat spectrum for one-laser locked to one-cavity.

ラム・アナライザの分解能が125 mHzであることを考慮すると、実際の線幅はもっと狭い。

念のために、ビート線幅の測定に用いた各種の計測器の雑音成分を測定した。中でも、周波数シンセサイザ(SSG)の周波数安定度は測定精度に大きく影響を与える。なぜなら、ビート周波数を与える参照共振器のFSR (Free Spectrum Range) は739 MHzと高周波であるため、1 Hz以下の分解能を得ることが不可能なので、739 MHzの電気信号をSSGで作出し、レーザーのビート信号と混合してそのビートを取って、低周波のスペクトラム・アナライザで高分解能に検出するミックスダウン法を採用せざるを得ないからである。したがって、SSGの基準周波数が変動すると、計測したビート信号は連動して変動する。739 MHzからミックスダウンして100 mHzの分解能を保証するにはSSGの安定度が 10^{-10} 以上なければ精度が保証できない。実際に測定されたSSGの周波数安定度を安定化のためのウォームアップ時間の関数として測定した結果がFig. 6

Fig. 6 Frequency stability of frequency synthesizers used in this measurement. Open circles show the measured noise of synthesized signal generators, crossed points show the measured laser beat by mix-down method using a SSG.

で、測定されたビート線幅はすべてSSGから発生している雑音であることが分かった。

3.3 独立の共振器にロックしたレーザー間のビート計測

同じ共振器に周波数ロックしたレーザーのビートは、周波数安定化の追従特性を調べるためには好適で、重力波検出のように干渉計に対する相対的安定度が必要な応用では十分である。しかし、参照共振器の変動成分はビート周波数に敏感に反映しないので、2つの独立な共振器にロックして、周波数ビートを観測した。今回は99.999%ミラーを用いたので、参照共振器はすべて真空中に配置して、音響雑音を防止した。結果はFig. 7に示した通りで、ビート線幅として16 Hz⁸⁾を得た。アラン分散の計測からも19 Hzの結果があり、確実な値である。Fig. 8のようなドリフトが観測され、共振器にレーザー光が入射すると、光学薄膜が加熱され、厚みが増える効果や、共振器そのものが熱平衡に達する時定数との関係を調べている。現状のビート線幅は熱的ドリフトで説明できる量なので、今後、参照共振器の温度安定化によって、周波数安定度は向上させることができる。

Fig. 7 Measured beat line spectrum for two-lasers locked to two-cavities individually.

Fig. 8 Drift of beat frequency of two-lasers locked to two-cavities system.

4. 超高性能光共振器の現状

さて、先に周波数のズレを測定するのは“物差し”である参照共振器の性能に大きく依存していることを指摘した。それでは高性能光共振器はどこまで進歩しているのだろうか。重力波検出に関係した現代の光学技術はFig. 9のような透過スペクトルを持つ光共振器を可能にした。Fig. 9の透過特性を生み出したミラーはイオンビーム蒸着法で製作され、共振器長が20cmであ

Fig. 9 Transmission spectrum of the Fabry-Perot cavity constructed by ultra-high quality mirrors.

る。内部に何も含まない2枚のミラーを対向させて固定した光共振器は、透過帯域がわずかに7.3kHzという超狭帯域のファブリ・ペロー(FP)共振器となっている。測定されたフィネスは102,000程度である。ここで、フィネスとは光の選択性を表現する量

$$\tau = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad (1)$$

でミラーの反射率 R の関数である。従来の常識では、FP共振器のフィネスは普通30程度、特別に作ったとしても200程度が限界であった。しかし、最先端の技術を使ったミラーはこのような常識を完全に反故にしてしまった。Fig. 10に示した光共振器の周波数応答からの測定は、ミラー掃引を含まないのでより正確である。99.99%ミラーを用いた場合、驚くべきことに光共振器に入射した光入力の内83%は損失を受けることなく、反対側のミラーから出力した。測定された損失(吸収+散乱)はわずかに12 ppmである。世界では損失わずか1.6 ppm、フィネス 1.9×10^6 という驚異的な性能の共振器⁹⁾も製作された。このように従来の常識からかけ離れた光共振器が存在するとなると、改めて超高性能光共振器があれば、どのようなことが可能になるのかを再検討する必要が出てくる。

Fig. 10 Measurement of mirror parameters by frequency response of optical resonator.

改めて超高性能光共振器の能力について考えてみよう。フィネスが100万に達するような光共振器では、①光共振器の寿命が原子の寿命を上回るくらい長くなる。すなわち光エネルギーを蓄積する寿命はミリ秒にも達する。また②共振器内の光強度はフィネス倍になることから、弱いレーザーを共振器に同調させれば、それは直ちに高強度の光の場を作り出すことになる。実際、レーザー周波数の安定化の実験ではミリワット級出力のレーザーで、単位面積あたり30メガワットの共振器内光強度に達している。光共振器がエネルギーを蓄積する能力は、以下のように考えると、その重要性がよく分かる。光は常に秒速30万キロメートルの速度で伝播しており、減速したり、静止させたりすることが不可能な存在である。このため、これまでの方法はすべて原子や分子の内部エネルギーに変換してエネルギーを蓄積しており、光エネルギーの形で蓄積することはなかった。また、光共振器はすべてを人間が作りだし、制御できるもので、光エネルギーそのままの形で蓄積する点は特筆すべきことだろう。結果として、超高性能の光学素子は人工的な原子を生み出すに至ったのである。

5. 周波数安定化レーザーと超高性能光学素子の結合

これまで述べてきた周波数安定化技術と超高性能光学素子の技術を結合すれば、どのような新しい光技術を考えることができるのだろうか。例をあげて説明してみよう。

5.1 コヒーレント加算

高精度に周波数安定化させたレーザー光を用いれば、光のコヒーレントな性質によって、1本のレーザービームを2本に分けたのと同じように、2つのレーザーのビームは電界的に加算されるはずである。周波数安定化技術が普及すれば、このようなコヒーレント加算によって出力を増大することが広く行われるようになるだろう。なぜなら、このような方式の拡大則はシ

ンプルで線形だからで、エレクトロニクス技術の拡大則と同じだからである。すなわち、大電流の回路素子が必要なときに、レーザーのコヒーレント加算が可能になれば、標準品のトランジスタを大量に並列動作させるように、“部品としてのレーザー発振器”ということが現実化できる。このとき、個々のレーザー発振器の発生する雑音成分の内、独立な原因による雑音は、コヒーレント加算されるにしたがって互いに打ち消し合うので、加算のビーム数を N とすれば、周波数雑音も $1/\sqrt{N}$ 倍に減少するはずである。

5.2 アクティブなコヒーレント加算

同じ周波数に安定化されたレーザーを大量にコヒーレント加算すれば、どのような高出力も得ることができる。しかし、個々のレーザーの周波数を安定化するということが、お互いの周波数をぴたりと合わせるということは同じでなく、はるかにむずかしい技術となる。これは個々のレーザーが完全に独立の存在であるところにむずかしさがあるので、レーザー発振器の原理の誘導放出のように、入射レーザーがその性質をそっくり受け継ぐ子供を生むようにして増大して行く方式を採用すれば、困難性は半減するだろう。独立したレーザー同士をこのような関係にするのを注入ロック方式という。通常は小さな入力で大きな出力を発生させるように制御することが研究されているが、周波数安定化レーザーでは必ずしも注入ロック比を大きく取る必要はない。むしろ、お互いを密に結合してコヒーレント加算の精度をあげることが重要なので、これまでとはまったく違う注入ロック方式を考えることができる。

部品となったレーザー発振器を直並列に並べ、おのおのを密に結合した注入ロックまたは注入チェーンを行う概念図をFig. 11に示した。親となる安定化レーザーの出力はビームスプリッターで2つに分けられ、おのおの同じ規格のレーザー発振器に注入ロックされる。注入されるシードビームの位相をスレーブ発振器の共振器に整合させると、安定化された注入レーザー光は100%

Fig. 11 Future image of high power lasers. Stabilization techniques make it possible to produce high power laser beams by means of coherent addition of outputs of transistor-like modules in a series-parallel injection chain arrangement.

スレーブ発振器の共振器に吸収される。本来発振するパワーの50%もの大きさを持った入力を受けたスレーブ発振器は、雑音から立ち上がる通常のレーザーとは違って、ほとんど増幅器のように忠実に注入レーザー光のエネルギーだけを増大させて出力する。最初は0.5の入力に対して1.5の出力を出す注入ロックだが、増幅、分割を繰り返すにしたがって、次第に入力1に対して出力2を出すようになる。このように、親が子供を作るようにしてレーザー出力を増大した後、コヒーレント加算を行えば、元来同じレーザーから発生した種を分割、増幅した訳なので、お互いの周波数、位相関係は安定する。お互いのレーザーの制御も、注入ロック幅、通常数メガヘルツの周波数の幅では、入射レーザーと同じ周波数で出力するので、緩和されるだろう。この図を見れば、レーザー技術もかなり電子回路技術に近づいたことが実感できるだろう。

5.3 高性能光学素子の必要性

コヒーレント加算では光源としてのレーザーの周波数、位相、さらには空間的性質まで完全に揃えることが要求され、そちらだけで問題が解決するような感じを与える。しかし、使用さ

れる光学素子、ミラーやビームスプリッターなどの“パッシブな”光学素子もまた、高性能が要求される。なぜなら、もし挿入される光学素子に吸収、散乱などの損失があった場合、これらの損失は透過、反射の光ビームの位相を変化させて、結果として、完全なコヒーレント加算をすることを妨げるからである。したがって、光学素子もまた雑音源であると認識して、位相を乱さない超低損失光学素子を開発することがどうしても必要となる。光を発生したり、増幅する、または光の位相や周波数を変換するようなアクティブな光学素子が雑音を発生することは理解し易いが、ミラーのような静的で何もしていないように見える光学素子自身が雑音を生み出すということは必ずしも広く認識されていない。しかし、この問題は、光の性質を極限的に追求するときにはきわめて重要となる。ここで論じているような応用、例えばコヒーレント加算やその他の干渉性を利用した新しい応用は、その様な観点を不可欠のものとするだろう。同時に、重力波検出のような科学研究では、一足先にこのような基本的問題に直面しており、一般応用研究のよき先達となろうとしている。

6. 安定化レーザーによる高感度計測

重力波検出は将来の課題としても、現状の安定化レーザーで、参照共振器の長さの極微少な変化や共振器の傾きを高感度に測定することができる。2台のレーザーを同一共振器にロックした場合、お互いに隣合うモードに固定されているので、共振器長がわずかにずれると、ビート周波数に

$$\frac{df_b}{\nu_{FSR}} = -\frac{dL}{L} \quad (2)$$

という関係で反映する。実験条件を適用すると、共振器長 $L=203\text{ mm}$ が 1 nm 膨張すれば、ビート周波数は 3.6 Hz 減少する。 100 mHz オーダーまで計測できることから、 0.1 nm の長さの変動を計測できることが分かった。

振動の影響を測定するために、参照共振器の

足場にPZTを取り付け、わずかに振動を加える実験を行い、共振器の傾きに対する検出感度を測定した。共振器が傾くと、モード整合条件がわずかに変化し、横モードが発生するようになる。このため、与えた振動と同じ周波数成分の誤差信号が得られた。誤差信号と傾きの関係を示したものがFig. 12で、最小検出感度は 10^{-10} radに達することが分かった。これは1000 kmに対して、わずか0.1mmの変位が与える傾きの大きさである。

7. 固体レーザーのスケーリング則

重力波天文学の要求は出力に対しても途轍もなく厳しい。出力1kW以上で縦横単一モード、しかもその量子限界まで周波数を安定化させよ、というものであるから、従来の技術の延長でできる課題ではない。現時点では、本当に可能かどうか分からない。しかし、もし可能だとすれば、その方式は、コヒーレントなLDでなくてはできない新しい励起方式¹⁰⁾があるべきだろう。新しい励起方式を考案するために、基礎的な拡大則から検討しよう。

高出力レーザーの最終的な限界を決定するのは熱的拡大則である。光励起レーザーの熱的

拡大則を簡単に検討すると、すべての熱は結晶表面を通じて散逸されるので、吸収体積vs表面積の比率で冷却能力が決定される。端面冷却、側面冷却の各々について体積/表面積を検討すると、

$$\text{端面冷却の場合} \quad \frac{V}{S} = \frac{\pi b^2 L}{\pi b^2} = L$$

$$\text{側面冷却の場合} \quad \frac{V}{S} = \frac{\pi b^2 L}{2\pi b L} = \frac{b}{2} = \frac{\sqrt{V}}{2\sqrt{\pi L}}$$

となる。ただし、端面冷却は1端面からの冷却とし、 b はロッドの半径、 L は長さである。冷却能力の拡大則の意味するところは、端面冷却の場合、長さが短ければ短いほど、冷却能力が大きくなるということで、一方、側面冷却では半径が小さければ小さいほど良い。もし、一定の励起体積を考えれば、冷却能力の点からいえば、きわめて薄い薄膜状のレーザー媒質を端面冷却する方式と、きわめて細いロッドを側面から冷却する方式が、もっとも多くの励起入力を許容するということである。これを励起吸収の観点から云えば、前者はOptically Thickで、後者はOptically Thinな条件の励起を行うことになる。我々は実際にこの2つの極限を満足させるような固体レーザーの開発に取り組んでいる。YVO₄アクティブミラーと仮想光源クラッド励起YAGレーザーがそれである。以下では後者に絞って、紹介する。

7.1 仮想光源クラッド励起YAGレーザー

アクティブミラーと対称的な方式として、仮想光源クラッド励起レーザーを考案した。すべての点でアクティブミラーと好対称をなす。結晶形状としては、高いアスペクト比の細長いロッドを用いる。励起方式は本質的に側面励起である。積極的に吸収係数の低い、光学的に薄い (Optically Thin) レーザー媒質を用いることなどである。

7.1.1 原理

仮想光源クラッド励起方式の原理的な説明のためにFig. 13を参考にしよう。本方式の特長を

Fig. 12 Frequency stabilized lasers can measure the tilting angle of 10^{-10} rad.

Fig. 13 Conceptual view of virtual source clad pumping scheme of solid state lasers.

列挙すると、

- 1) 半導体レーザーで一旦、光軸上に仮想的光源を形成し、円筒状反射鏡によって同軸側面励起を行う。
- 2) 結晶の半径×吸収係数を小さく設定し、励起光の収束性を励起分布に反映させ、中心に集中したモード整合のよい励起分布を形成する。
- 3) 同軸円筒における光軸上光学イメージの転送により、多重パス吸収を行い、高い励起効率を保持する。

などである。この方式では、非常に細長い結晶の中心に効果的に励起を行い、同時にアクティブミラー方式でも実験した利得誘導型の横モード制御を実現しようとする。Fig. 13の構成で、円筒型反射鏡断面を考える。z軸方向の分布は積分効果として働くと考え、原理的な考察から外す。仮想的な光源の大きさを無視して点光源を仮定すると、収束励起ビームによる吸収過程は、

$$\frac{dI}{dr} = \left(\alpha + \frac{1}{r} \right) I \quad (4)$$

と表現される。 I は励起光強度、 α は吸収係数である。収束ビームで励起する場合、光は $r=R \rightarrow 0$ と移動するので、光強度は吸収されて減少する効果と、収束によって強度が高まる効果の両者を含む。吸収方程式の解は

$$I = I_0 \frac{b}{r} \exp \left\{ ab \left(1 - \frac{r}{b} \right) \right\} \quad (5)$$

となる。ここで分布を決定するのは、 ab 、すなわちロッドの光学厚さ (Optical Thickness) であることを注意したい。円筒ミラーと光軸状の点光源の組み合わせでは、点光源は点イメージに結像し、ロッドで吸収されなかった光はもう一度反射して次の場所に点イメージを形成する。完全同軸励起では全ての光はロッド表面に垂直に入射するので、多重パスを繰り返しても光源像の転送特性が変化することはない。吸収係数が飽和することはないので、励起光強度分布はそのまま励起強度分布と一致する。

上で述べた原理は、吸収係数が非常に小さなレーザー材料やロッド半径が細い結晶を用いると、光収束の影響を表面化した励起分布を得ることができて、そのときの励起効率は光源の性

質さえよければ低下することはない、ということを示している。

7.1.2 励起分布の計算

計算された励起分布の例はFig. 14の通りである。光源サイズが増大するにつれて、吸収係数の低い場合に、励起分布がガウス形状に近づく様子が分かる。光源サイズをさらに大きくすれば均一分布に接近することは当然で、本方式は均一分布からガウス分布まで、仮想光源の大きさを調整することで変化させることができる。したがって、与えられた共振器モードに整合させることも、LDの集光特性を調整すればできるだろう。LDアレイなどのビーム重畳による利得整形の試み¹¹⁾に比べて、格段とガウス形状に近づいており、この方式の有利性が理解できる。

マルチビームのLDで励起する場合を考え、光線追跡法で3次元解析を行い、励起分布の実際を計算することを試みた。3D光線追跡計算には、広がり角をもった励起ビーム、軸外れの収差の影響、ロッド表面での屈折、ビーム偏向、円筒反射鏡の表面損失、その他の単純なモデルでは考慮しなかった要素を含ませて、単純モデルがどこまで適用可能かをチェックした。計算結果の一例をFig. 14に示す。仮想光源の光源内強度分布を均一やガウス形状に変化させて、単純モデルの妥当性を検証した。本質的に同一の結果が得られ、単純なモデルでも問題ないことが分かった。均一分布としてトップハット形状を仮定したが、光源内強度分布としてはガウス

Fig. 14 Calculated pumping distribution.

型よりもむしろトップハット分布の方が励起強度分布としてよい結果を得た。ビーム数を32本にすると、LDが離散的に重畳されていることの影響はまったく観測されなくなった。

7.1.3 クラッド励起装置の試作

実際に32本のLDビームで励起するための装置を試作し、実験を開始した。実際に試作した仮想光源クラッド励起レーザーの断面図はFig. 15の通りである。光軸上に一旦、点または線光源を形成する代わりに、ファイバー結合されたLD出力を円錐ミラーで円筒キャビティーに導入するようにした。この方式では $r\theta$ 平面では原理と同様に収束ビーム励起となるが、 rz 平面内では平行ビームとなるので都合がよい。仮想光源の位置は必ずしもロッドの外部である必要はなく、本方式では仮想光源はYAGロッド内に形成される。

ロッドは0.5%濃度と薄いものを用い、ロッド直径は2 mm ϕ である。したがって、すべての励起光を吸収するには20パス程度必要となる。本装置の入射角ではマルチパス吸収の回数は最大10回でかなりの部分が吸収されずに損失となるが、Optically Thinの状態で実験を行うために、あえて試作をしてみた。ロッドの周辺は水冷されており、LDは冷却水を通して励起する。冷却水の屈折率の影響を受けないのも、すべてを同軸配置にし、励起光をロッドに垂直入射させている利点である。装置の外観はFig. 16の通り、シンプルである。

Fig. 15 Cross-sectional view of the VSCP laser head.

Fig. 16 Picture of outlook of the VSCP laser. Thirty-two fibers transport the power of LDs into the pumping cavity.

7.1.4 励起分布の計測

LDを入射するためのレンズとして、 $f=5.4\text{mm}$ のGRINレンズと $f=25\text{mm}$ の平凸レンズを用いた。GRINレンズはファイバーとの結合効率が高いが集光スポット径が大きく、一方、平凸レンズは集光スポット径が小さいが立体角が制限され、LD光の一部しか取り込まない。しかし、本実験ではレーザー共振器のモード体積と励起体積の比較を行うために、あえてこの2種類の条件で実験を行った。

1パス励起の条件でロッドの発光分布を測定したものがFig. 17である。 $f=25\text{mm}$ レンズでは1ビーム照射のビーム直径が170ミクロンとなり、端面励起と同等の集光特性を示した。32ビームを重ねると310ミクロンと拡大する。一方、GRINレンズによる集光では1ビームの励起分布で690ミクロンの幅をもち、32本を重ねると1.97mmとロッド全体に広がった励起が行われた。したがって、 $f=25\text{mm}$ レンズは中心に強く集中した励起で、GRINレンズはロッド全体を使った励起が効果的にされていることが判明した。今回の実験では共振器のモード体積が直径2mm程度の長大な共振器で実験できないが、両者はモード体積と励起体積を比較する良い例となった。 $f=25\text{mm}$ レンズの結果は、側面励起にもかかわらず、1ビーム励起では170ミクロンと、端面励起と同等の局所的励起ができることも明らかにした。

Fig. 17 Pumping distribution measured in a single pass excitation. The effective pumping width is 170 microns at the center.

7.1.5 発振モードの計測

$r=1000\text{mm}$ の凹面鏡を用いた平面-凹面光共振器で、共振器長を500mmとした条件は、今回の実験の中ではもっともモード体積が大きい。モード体積の半径は0.41mmである。このときの発振特性をFig. 18に示した。両者とも、すべての励起条件において TEM_{00} 単一モード発振をした。そのときのモードパターンをFig. 19に示す。高出力でも完全な単一横モード発振をして

Fig. 18 Output characteristics for TEM_{00} mode operation. The focal length of collimating lenses is 25 mm for flat concave lenses and 5.4 mm for GRIN lenses, respectively.

Fig. 19 Mode patterns of single transverse mode output using GRIN lens collimation.

いることが分かる。 $f25$ レンズの場合は、励起が中央部に集中するため、中心部の利得係数が高くなり、発振しきい値はGRINレンズの場合の半分である。

GRINレンズによる集光がロッド全体を励起する形でガウス分布的な形状をしていることは先に述べた。2種類の共焦点共振器条件における発振特性を示したのがFig. 20である。モード体積の小さなものはマルチモード化したのに対して、 $r=1000\text{ mm}$ でモード体積が比較的大きな条件では最後までTEM₀₀モードであった。ロッド体積全体を有効に利用したマルチモード発振の方がスロープ効率が高くなるのは自然である。一方、共振器長が短い方が回折損失が少ないので、しきい値パワーが低い。実際、マルチモード発振に移行する様子を示したのがFig. 21であり、330 mW出力までは単一モードであったものが、利得上昇に伴って大きな励起体積からエ

Fig. 21 Mode transition from single to multi-mode in a cavity of 200 mm length and 400 mm curvature. GRIN lenses were used for collimation of laser beams.

ネルギーを引き出すためにマルチモード化する様子がはっきりと分かる。共振器長が200 mmの場合には、単一横モードに対応するビームウェスト半径は0.26 mmであり、これらの共振器による差はモード整合条件によると結論できる。

8. まとめ

現在、わが国で進行中の重力波検出の研究を例にして、重力波検出用に要求される光学技術、レーザー技術を紹介した。真の意味で極限的な計測である重力波検出は、同時にきわめて多くの技術的挑戦課題を抱えている。このように量子限界に挑戦する応用では、レーザー技術の発展なしには、解決が困難な問題がたくさんある。一方、きわめて大きな飛躍が必要なために、自由な発想で研究を新たに見直す良い機会も提供している。最後に示した仮想点光源クラッド励起方式などでは、新しい発想に基づき、実験が行われ、現在、320Wから1 kWの高出力LDで励起する新方式の固体レーザーが開発されつつある。学術分野の研究者のみならず、広く産業分野で活躍する研究者のご協力をお願いする次第である。なお、本研究は文部省科研費重点領域研究「重力波天文学」の一環で、計画研究「高出力・高安定レーザーの開発」として行われている。

Fig. 20 Input/output characteristics of GRIN lens pumping.

参 考 文 献

- 1) 重力波アンテナ技術検討書—干渉計ハンドブック—, 三尾典克, 大橋正健編 文部省科研費重点領域研究「重力波天文学」, 1992年10月.
- 2) 藤本真克, 大橋正健: レーザー研究 19 (1991) 830.
- 3) D. Shoemaker, A. Brillet, C. Nary Man, O. Cregut, and G. Kerr: Opt. Lett. 14 (1989) 609.
- 4) R. Drever, J. Hall, et. al.: Appl. Phys. B, 31 (1983) 97.
- 5) T. Kane and R. Byer: Opt. Lett. 10 (1985) 65.
- 6) 上原昇, 植田憲一: レーザー研究 21 (1993) 590.
- 7) N. Uehara and K. Ueda: Opt. Lett. 18 (1993) 505.
- 8) K. Ueda and N. Uehara: SPIE & OSA to be published.
- 9) G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble and R. Lalezari: Opt. Lett. 17 (1992) 363.
- 10) K. Ueda and N. Uehara: SPIE 1837 (1992) 336.
- 11) F. Brioschi, E. Nava and G. C. Reali: IEEE J. Quantum Electron. QE-28 (1992) 1070.