

次世代重力波検出器用高安定・高効率 fiber-MOPA の開発

電子工学専攻 植田研究室 三浦 純一

本研究では、次世代重力波検出器用光干渉計光源に fiber-MOPA システムが使用されることを最終目標としている。まず fiber-MOPA システムの出力特性向上を行い、12.3W を得られた。次に安定化を行い、信号光と比較しても高安定化することに成功した。最後に、非線形結晶を用い fiber-MOPA システムからの出力(波長:1064nm)を波長変換し 2.70W の第二高調波出力、変換効率 25.68%を得ることができた。

1. はじめに

次世代の重力波検出器として宇宙空間での建設が計画されているDECIGO (Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory)は、地上では地面振動などにより観測が難しかった周波数域 (1Hz付近)での重力波の観測を目指している。また基線長を数万kmにすることで、地上では実現できなかった高感度な観測ができると考えられている。

DECIGO用光源には波長 532nm、出力 10W、強度雑音 10^{-8} [1/ Hz]@1Hz、周波数雑音 1[Hz/ Hz]@1Hz、縦、横単一モードで高効率な光源が要求されている。本研究では、DECIGO用光源としてfiber-MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)システムを用いて開発を進めている。fiber-MOPAシステムは、主レーザー光出力を希土類添加ファイバ増幅器で増幅させるシステムで、小型で高安定、高効率、更には冷却効率が高くビーム品質が良いといった利点をもつので衛星搭載を考えた場合、有効なシステムである。

2. 原理

2.1 ファイバ増幅器

希土類添加ファイバ増幅器は、光ファイバのコア部に希土類イオンを添加した希土類添加光ファイバを増幅媒体に用い、この希土類イオンの状態を光励起により反転分布を形成することにより誘導放出を可能にし、信号光を進行波的

に増幅する。このため、希土類添加光ファイバ増幅器では増幅可能な波長が増幅始準位と終準位のエネルギー差で増幅動作を行っている。

ファイバレーザーやファイバ増幅器は、固体レーザーに比べ高冷却効率、空間モード制御が可能、高効率などの利点を持つ。一方でファイバのコア中の電界強度が高くなることで非線形効果、誘導ブリュアン散乱(SBS)が発生し、利得のシフトによる出力飽和や強度雑音が増加してしまうという問題がある。

ファイバレーザーは周波数のゆらぎが大きく周波数制御性が悪いという欠点があるため、本研究ではファイバ増幅器を用いている。

2.2 Yb

Ybのエネルギー準位は上準位 $^2F_{5/2}$ 、下準位 $^2F_{7/2}$ のほぼ2準位系と考えることができる。2準位系のため、励起波長やレーザー波長における励起吸収状態(ESA)、高エネルギー励起状態に移行した光子による光放出(upconversion)が起きないため高密度励起が可能という特徴がある。また、Yb³⁺のイオン半径はY³⁺(yttrium)に近く、Nd³⁺イオンに比べイオン半径が小さいため高密度添加した時に濃度消光が起きにくい。そのため、Nd³⁺やEr³⁺に比べ高濃度添加が可能であり、ファイバ長を短くすることが可能である。Yb³⁺イオンの上準位寿命は 0.95ms程度と長く、高いエネルギー蓄積効果が期待でき、量子欠損が少

ない。レーザー媒質としては高い量子効率を期待できる反面、上、下準位のStark分岐の幅が狭いため各エネルギー準位は熱的にも励起される。このため励起強度が弱いとそれだけで下準位からの吸収が強くなる。

図 2.1 は、Yb³⁺の吸収、放出スペクトルであり、実線が吸収、点線が放出スペクトルを表す。吸収スペクトルは全体的にスペクトル幅が広く、励起用LDに対する制約が大幅に緩和されるという利点がある。その中で 975nm 付近をみると吸収、放出どちらにもピークがある。

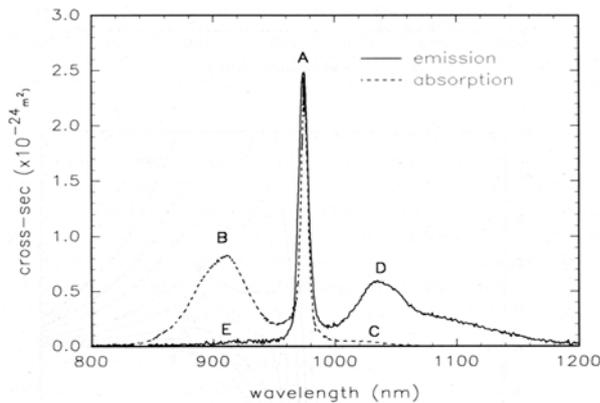


図 2.1 Yb³⁺の吸収、放出スペクトル

2.3 誘導ブリュアン散乱

SBS は、ファイバ中で起こる非線形過程であり、誘導ラマン散乱(SRS)よりも低い入射パワーで起こる。入射波の周波数のずれにより小さい周波数をもつストークス光の発生という形で現れ、その周波数のずれは非線形媒質によって決まる。SBS と SRS の大きな違いはファイバ中で SBS が起こるとストークス光は後ろ向きに伝搬するが、SRS では両方向に伝搬する。また、SRS には光学フォノンが寄与するのに対し、SBS には音響フォノンが寄与する。

SBS の閾値のほうが高いため SBS の閾値に着目して閾値を見積もる。式(2.1)に SBS の閾値を示す。

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff}}{g_b L_{eff}} \dots (2.1)$$

A_{eff} : 有効コア面積
 L_{eff} : 相互作用長
 g_b : ブリュアン利得

2.4 第二高調波発生(SHG)

位相整合を得る方法として最もよく知られているのが結晶の複屈折と屈折率の波長依存性を利用する方法である。しかし、この方法では入射光を強く集光する際に光ビーム内の集光角に応じて位相整合角からのずれが生じ(ウォークオフ)SHG への変換効率が低下し、また複屈折による位相整合に適した結晶(等方性媒質の利用不可)や波長が制限されてしまう。そこでこの問題をほぼ解決できる擬似位相整合法を本研究では用いた。擬似位相整合は、SHG において基本波と高調波の伝播定数差を周期構造で補償して位相整合をとる方法で、非線形光学相互作用を効率よく行える。

基本波から第二高調波への変換効率は、

$$\eta = \frac{P(2\omega)}{P(\omega)} = \left(\frac{2\omega^2 d_{eff}^2}{\pi n_{2\omega} n_{\omega}^2 \epsilon_0 c^3} \right) P_{\omega} L k_{\omega} h(B, \xi) \dots (2.1)$$

と表される。 d_{eff} は非線形光学定数で、擬似位相整合を用いるために非線形光学定数は、

$$d_{eff} = \frac{2d}{\pi} \dots (2.2)$$

と最適化される。擬似位相整合の場合には、 d は d_{33} をとる。 L は結晶長、 $h(B, \xi)$ はBoyd and Kleinman因子である。式(2.1)より変換効率は結晶長、入射光強度に各々比例し、つまり出射光は入射光の二乗比例する。

効率よく波長変換するために、非線形結晶の中心部でのビームの最適径 ϕ_0 を考える必要があり、これにはBoyd and Kleinman曲線からの導出でき式(2.3)のようになる。

$$\xi = \frac{L}{b} = \frac{\lambda L}{2\pi n_e \omega_0^2} \dots\dots (2.3)$$

今回は、 $\xi = 1.068$ とおいて求めた。

位相整合可能な基本波の半値全幅は、

$$\delta\lambda = \frac{0.4429\lambda}{L} \left| \frac{n_2 - n_1}{\lambda} + \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \right|^{-1} \dots\dots (2.4)$$

と表すことができる。式(2.4)より結晶長 L と半値全幅には反比例の関係がある。

3. fiber-MOPA システムの特性

3.1 fiber-MOPA システム実験系

図 3.1 に fiber-MOPA システムの概略図を示す。信号光に発振波長 1064nm、出力 500mW の半導体レーザー励起モノリシック型 Nd:YAG レーザー (NPRO) を使用し、発振波長 975nm のファイバ結合 LD で逆方向励起された長さ 10m の Yb 添加偏波保持ダブルクラッドファイバ (PM-DCF) を用いて増幅実験を行った。

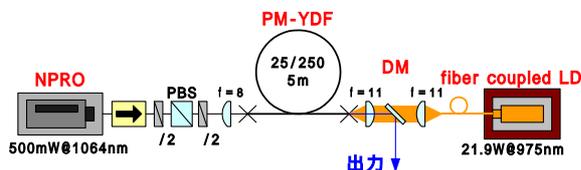


図 3.1 fiber-MOPA システム実験系

3.2 出力特性、スペクトル測定

出力特性を図 3.2 に示す。増幅動作をさせた結果、最大出力 12.3W、スローブ効率 70.6% を得られた。以前の実験では、増幅動作時にファイバ端面が損傷する現象が度々発生し再現性のある実験をすることが困難であったが、今回はファイバ端面が損傷ことはなくなり、再現性の良い実験をすることができた。

光スペクトル特性を図 3.3 に示す。以前の実験では、高出力動作時に 1040nm 付近に ASE がみられたが、今回は確認できず強度比 35dB

以上を達成することができた。

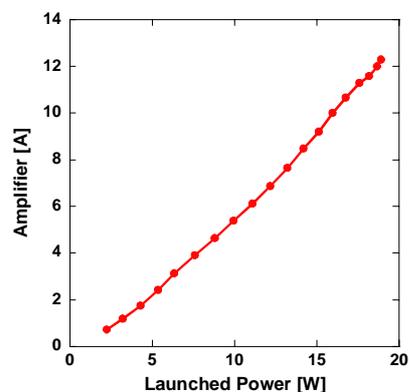


図 3.2 出力特性

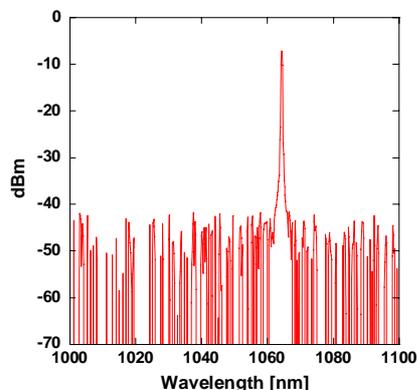


図 3.3 光スペクトル特性

3.3 単一横モード化

本研究で増幅媒体として用いている PM-DCF は、ファイバ内で発生する SBS の発生を抑えるためコア径 25 μm 、 $\text{NA}_{\text{core}}=0.06$ のマルチモードファイバを用いた。この出射モードを単一横モード化させるために、ファイバを曲げることで高次伝搬モードを抑圧する方法を用いた。簡単に巻くことができ、同じ巻き径で再現性良く巻け、安定性を高めるために、発泡スチロールにファイバを巻きつけた。巻き径を 8、10、15、20cm にした場合の出射ビームを観測した。20cm からはじめ、順に小さくしていった結果、10cm の時に図 3.4 に示すように単一横モード出射 ($M^2=1.12$) を得られた。そこで更に巻き径を小さくし 8cm の場合の出射ビームを確認したとこ

る単一横モードではなく出力も減少してしまい、巻きによる損失が大きく基本モードにまで影響したと考えられる。

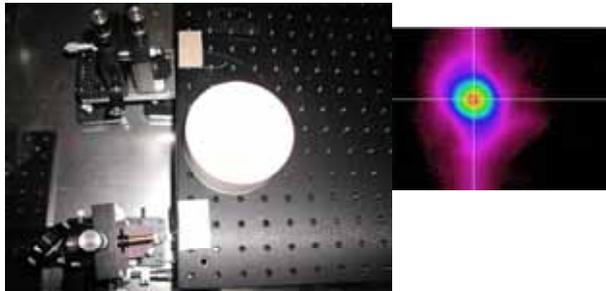


図 3.4 ファイバの巻き

3.4 偏光特性

増幅出力の偏波消光比を測定したところ 13dB であった。偏波消光比の改善を狙って信号光源の偏波消光比、信号光とファイバの入射結合の不完全さ、信号光とファイバの入射偏光の関係、ファイバの曲げによるモード競合、ファイバへの外乱の影響などを考え、偏波消光比悪化の依存性の検証を行ったが、大きな改善はみられなかった。

4. 相対強度雑音

4.1 相対強度雑音測定の実験系

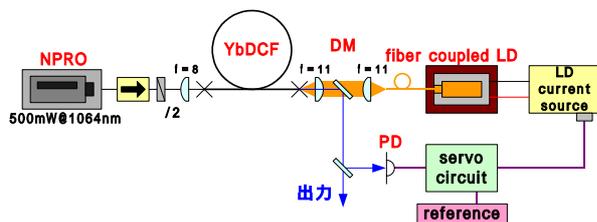


図 4.1 強度雑音安定化の実験系

誤差信号評価による相対強度雑音スペクトル測定のための実験系を図 4.1 に示す。測定方法は、fiber-MOPA 出力の一部をフォトディテクタ (PD) で受け、そこで得られた電気信号と電圧リ

ファレンスとなる信号を比較し、その誤差信号を評価することで相対強度雑音としている。

4.2 相対強度雑音安定化

まず図 4.2 より NPRO 単体と増幅時の無制御時の相対強度雑音を比較すると、2 桁の雑音悪化がみられる。fiber-MOPA システムの増幅出力は励起光出力が支配的であることから、励起光源を制御することで安定化できると考えた。サーボ回路で得られた誤差信号をカレントドライバの変調端子へ返した結果を図 4.2 の赤で示す。

2 次のLPFを挿入した結果、無制御時に比べ安定化時は最大で雑音を 4 桁抑制することに成功し、1Hz付近では $10^{-7}[1/\text{Hz}]$ を達成することができた。しかし、今回使用したカレントドライバの変調端子のカットオフ周波数が 10kHzであったために、広帯域に渡る雑音抑制は困難であった。

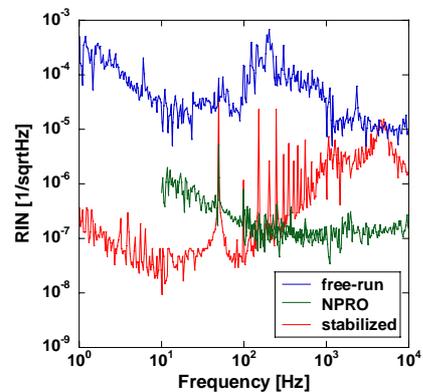


図 4.2 相対強度雑音安定化

5. 周波数雑音

5.1 周波数雑音測定の実験系

周波数雑音スペクトル測定の実験系を図 5.2 に示す。レーザー角周波数が基準角周波数からどれだけずれているか測定するために、ずれの量を与える周波数弁別器からなる周波数復調器に $F=55000$ のファブリー・ペロー共振器を使用し

た。周波数弁別器として、共振器の反射スペクトルとシグナルジェネレータ(SG)の信号をDBMで復調した復調信号を使用した。周波数ゆらぎ検出により基準角周波数とレーザー角周波数の差に比例した信号、つまり誤差信号が得られ、この誤差信号を増幅させて出力信号をNPROのfast端子(ピエゾ素子)へ加える、FMサイドバンド法という方法を用いた。

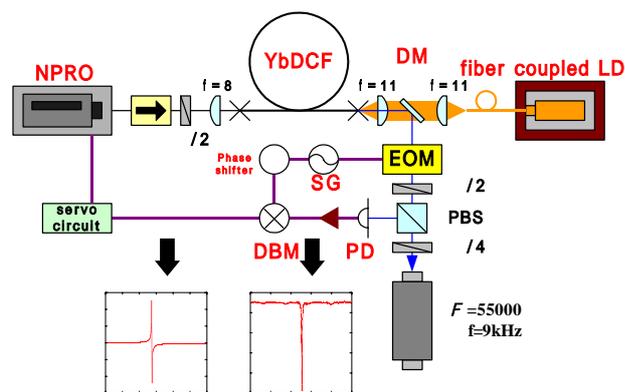


図 5.1 周波数雑音安定化の実験系

5.2 周波数雑音安定化

図 5.2 に増幅出力 1W の場合の無制御時と安定化時の周波数雑音スペクトルを示す。無制御時のスペクトルは、NPRO 単体の周波数雑音とほぼ同等であり、増幅動作による周波数雑音の悪化はほとんどみられなかった。また増幅出力 7.5W 時の周波数雑音スペクトルの測定を行ったが、この時も無制御時の雑音スペクトルには悪化はみられず、今回の fiber-MOPA の実験系では増幅出力 7.5W までは位相雑音による影響はないことが確認できた。

FMサイドバンド法により 1Hz付近において、雑音を 4 桁以上抑制(10^{-2} [Hz/ Hz])することに成功した。50Hz、100Hz付近などにみられる雑音は、電源の雑音であるため光源の性能とは関係のないものである。また 10kHz付近にみられる雑音は、LDの水冷機の振動が音響雑音となり

今回現れたものである

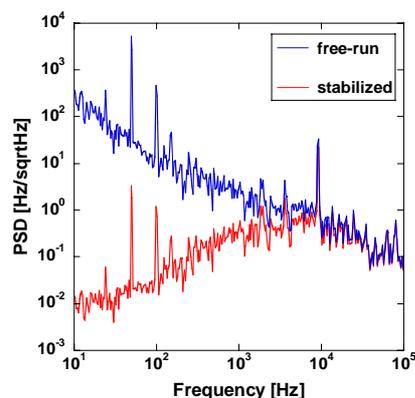


図 5.2 周波数雑音安定化

6. ビート信号測定

増幅前と最大出力時のビート信号の測定を行った結果を図 6.1 に示す。ビート信号の半値全幅は、増幅前 6.22kHz、増幅時 8.22kHz となった。ビート信号より増幅前の光源の半値全幅を求めるには 1/2 する必要がある(同じ性能同士の光源を使用しているため半値全幅もほぼ同じである)ので 3.11kHz、増幅時は NPRO 単体に比べ fiber-MOPA 出力の半値全幅が支配的であるため、増幅出力の半値全幅はほぼ 8.22kHz といえる。これよりも、NPRO 単体では半値全幅が非常に細いことがわかる。増幅することにより 10W 以上の出力では半値全幅は 3 倍程度悪化した、それでも半値全幅は 8.22kHz と狭線幅である。

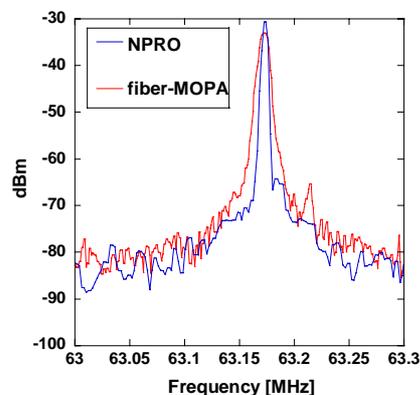


図 6.1 ビート信号の測定

7. 第二高調波発生

7.1 第二高調波発生の実験系

図 7.1 に第二高調波発生の実験系を示す。fiber-MOPA システムで得られた出力の偏波特性は 13dB と悪かったために $\lambda/4$ 板、 $\lambda/2$ 板を挿入後にグランレーザーへ通して偏波消光比を高くした状態で S 偏光にして結晶へ入射させる。

非線形結晶の中でも変換効率が高く、破壊にも強い MgO:LiNbO₃ 結晶を用いた。

集光条件は Boyd Kleinman 曲線より結晶の中心にてビーム半径が 23 μm 程度になるようにレンズを配置した。温度変化により第二高調波出力の影響も非常に大きいため、0.1 以下まで制御可能な温調を使用し、35.0 で結晶の温度制御を行っている。

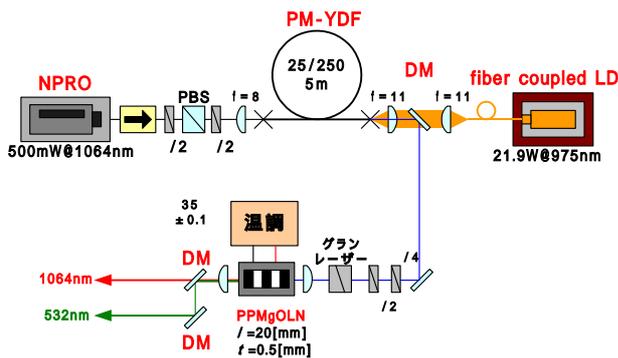


図 7.1 第二高調波発生の実験系

7.2 第二高調波発生の実験系

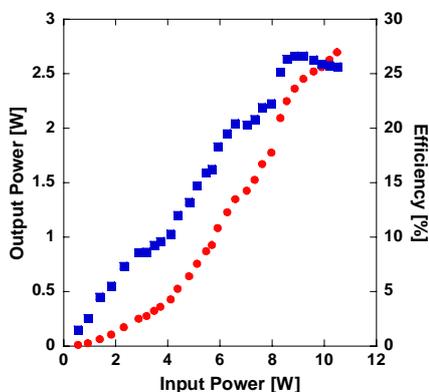


図 7.2 第二高調波発生の実験系

長さ 20mm の PPMgOLN 結晶を用いて 10.5W の基本波を入射させたところ、532nm 出力 2.70W で変換効率 25.68%を得ることができた。(図 7.2)しかしこの結果は、原理で示した式(2.1)から求めた理論値に比べ 50%程度の値である。これは、ビーム形状が完全に単一横モードになっていないことが起因していることや、調節のパラメータが多いことから最適化が不十分と考えられる。また図 7.2 より、基本波が 8W 以上では、効率が頭打ちになっていることがわかる。これは、熱レンズによる影響と考えられる。

8. まとめ

fiber-MOPA システムにより波長 1064nm、出力 12.3W、単一縦横モード出射、10kHz 程度の狭線幅の光源を開発することができた。

励起光を制御することで相対強度雑音 10^{-7} [1/Hz]@1Hzを達成した。周波数雑音を測定したところ、増幅しても周波数雑音の悪化はほとんどみられなかった。また信号光を制御することで周波数雑音 10^{-2} [Hz/Hz]@10Hzを達成した。非常に高安定、高効率な基本波光源を作成することができた。

この光源を基本波として非線形結晶を用い高効率波長変換した結果、基本波 10.5W に対して第二高調波 2.7W、変換効率 25.68%を得ることができた。

9. 今後の予定

まずは、fiber-MOPA システムからの出力の偏波消光比の向上、波長変換効率の向上させる必要がある。これが達成できた段階で、コヒーレント加算を行い要求出力の 10W を達成できるか検証を行う。

その後は、532nm の相対強度雑音、周波数雑音の安定化を進める必要がある。