

# 重力波検出用光干渉計光源のためのファイバ MOPA の特性向上

電子工学科 植田研究室 三浦 純一

本研究では、重力波検出用光干渉計光源にファイバ MOPA が使用されることを最終目標とし、特性向上を試みた。まず、長さ 10m のファイバを使用し出力特性について評価した。次に、ファイバへ曲率を与え単一横モード化した状態で強度雑音、周波数雑音の特性測定と雑音抑制の評価をした。また、ファイバから出射時の偏光のゆらぎについても評価した。最後に、今後の予定を示した。

## 1. はじめに

現在、重力波を検出するために超高感度のファブリーペロー・マイケルソン干渉計が用いられている。この光源には、高安定性 ( $f/f < 10^{-6}$  Hz/Hz、 $P/P < 10^{-8}$  1/Hz) と同時に、干渉計のショット雑音を相対的に抑えるため 100 ~ 300W 以上の出力が要求されている。

本研究では、ファイバ MOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) システムが光源として有効であると考え、開発を行った。ファイバ MOPA とは、主となるレーザー光をダブルクラッドファイバ (DCF) 内で増幅させるシステムである。このシステムは、ファイバを使用しているため冷却効率が高く、伝搬モードで空間モードが決定するなどの特徴をもつ。

## 2. 原理

### 2.1 Yb

ファイバのコアへ Yb を添加した。Yb<sup>3+</sup> のエネルギー準位は、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> のほぼ 2 準位である。そのため、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フォトンによる光放出 (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、Yb<sup>3+</sup> のイオン半径は Y<sup>3+</sup> に近く Nd<sup>3+</sup> イオンに比べイオン半径が小さいため、高濃度添加した時に濃度消光が起きにくい。そのため、高濃度添加が可能で、ファイバ長を短くすることができる。Yb<sup>3+</sup> イオンには再吸収があり、再吸収を避ける為に、強励起が必要となる。

図 2.1 の吸収スペクトルを見ると、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利点もある。その中でも 975nm 付近は、吸収、放出どちらにもピークがある。975nm を励起波長に用いる場合は、スペクトル幅が狭いため高制度の制御が必要となる。

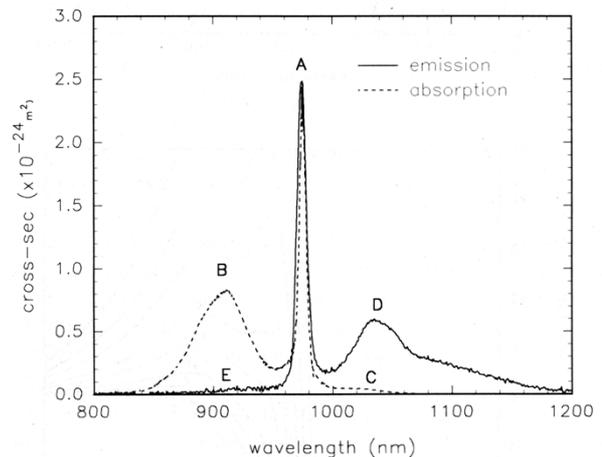


図 2.1 Yb<sup>3+</sup> の吸収、放出スペクトル

### 2.2 誘導ブリュアン散乱 (SBS)

SBS は光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 の大きな違いは光ファイバ中で SBS 起こるとストークス光は後ろ向きに伝播するのに対し、SRS では両方向に伝播する。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。以下へブリュアン

閾値を示す。

$$P_0^{cr} = 2I \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

$A_{eff}$  : 有効コア面積

$g_B$  : プリユアン利得のピーク値

$L_{eff}$  : 有効相互作用長

本研究では、コア径 11  $\mu\text{m}$ 、Yb を使用し有効相互作用長を短くすることで、プリユアン閾値を上げて SBS を避ける対策をとった。

### 3. ファイバ MOPA 装置の設計

#### 3.1 ファイバ MOPA 装置

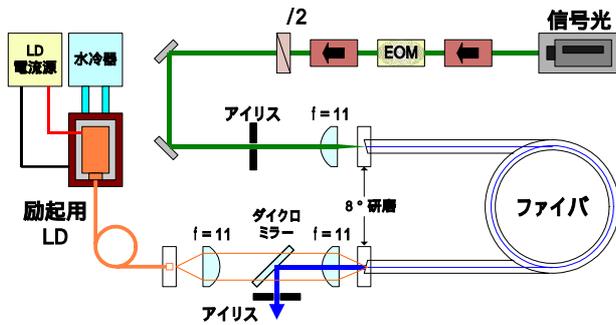


図 3.1 ファイバ MOPA 装置

図 3.1 にファイバ MOPA 装置の概略図を示す。信号光に発振波長 1064nm、出力 500mW の半導体レーザー励起モノシリック型 Nd:YAG レーザー (NPRO) を使用した。励起光源には、発振波長 975nm、最大出力 21.9W (実測値) のファイバ結合レーザーダイオードアレイ (LD) を使用した。LD の温度制御方法は、ペルチエを用いた直接温調のため、0.1 以下まで温度制御が可能となった。結果的に、励起光出力のゆらぎがかなり減少した。増幅媒体には長さ 10m の Yb 添加の DCF を使用した。ファイバの両端面は 8° 研磨することで、共振器を組ませないようにしている。また、励起光を信号光とは逆端面から入射させる逆方向励起を採用することにより、効率良く増大させることを可能にしている。得られた増幅器出

力には、クラッドモードも含まれている。クラッドモード除去のために、最後に空間フィルタ (アイリス) を設置した。

#### 3.2 周波数雑音抑制装置

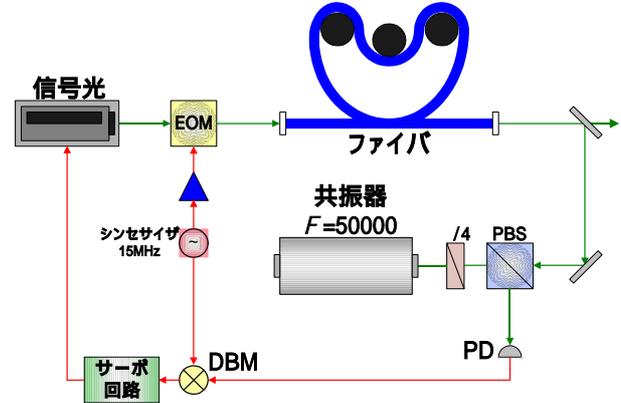


図 3.2 周波数雑音抑制

信号光と MOPA の周波数雑音を測定してみたところ、両者の周波数雑音はほとんど一致した。増幅動作による周波数雑音悪化がないことから、信号光を制御することで周波数雑音抑制が可能であると予想した。

図 3.2 に周波数雑音抑制装置を示す。周波数雑音抑制のため、高フィネスのファブリーペロー共振器を周波数基準とし、Pound-Drever-Hall 法により誤差信号を求める。その誤差信号を、サーボ回路を介した後に信号光へ負帰還させることで、増幅器出力の周波数雑音抑制を試みた。

#### 3.3 強度雑音抑制装置

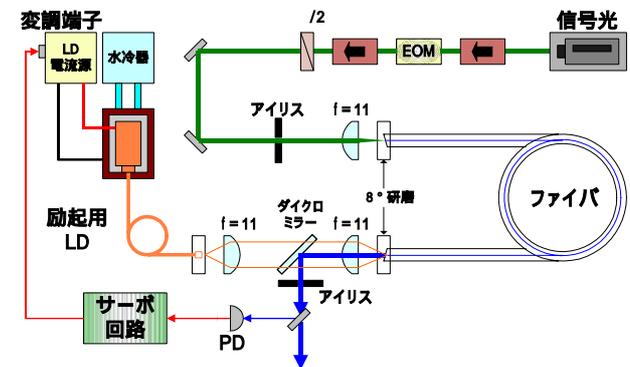


図 3.3 強度雑音抑制装置

信号光と MOPA の強度雑音を測定してみたところ、信号光に比べ MOPA の相対強度雑音は、10Hz 付近において 2 桁程度悪化していた。この悪化の大きな原因は、励起光源の出力のゆらぎと外部からの音響や地面振動などが考えられる。そこでまずは、励起光源を制御することで強度雑音抑制が可能であると予想した。

強度雑音抑制のため、増幅器出力の一部をフォトディテクタで受光し、この値を電圧リファレンスと比較して誤差信号を求めた。サーボ回路を介した誤差信号を LD の電流源の変調端子に負帰還させ雑音抑制を行った。

### 3.4 偏光特性

ファイバの出射モードを単一横モード化させる際に、ファイバへ曲率を与える方法を用いると、出力の偏光ゆらぎへつながる恐れがある。そこで、図 3.4 のような実験系を組み偏光のゆらぎの評価を行った。具体的には、 $1/4$  板と  $1/2$  板を通し、最後に PBS で p 偏光と s 偏光に分けた光を PD で検出する。 $1/4$  板を調節し直線偏光にした後、 $1/2$  板を調節し p 偏光と s 偏光の出力を等しくする。この状態で 1 秒毎に 1 時間それぞれの出力を観測した。

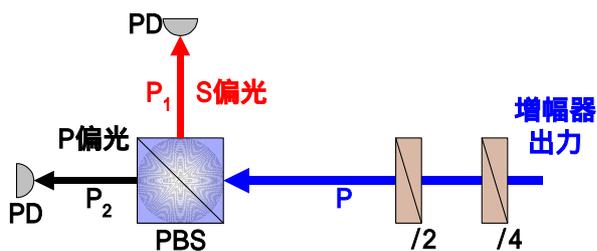


図 3.4 偏光特性実験

## 4. ファイバ MOPA の評価

### 4.1 出力特性

励起用 LD を 1 台使用し、10.9W の増幅器出力を得ることができた。この時の光 - 光変換効率は 80.7%、スロープ効率は 83.0% と非常に高い値を得ることができたが、結合効率は 65.9% と今後改善の余地がある結果となった。しかし、光学系の

改良により 80% 程度まで改善可能となったので、今後増幅器出力をもう一度取る予定である。

### 4.2 モード選択

増幅媒体のファイバは、SBS の閾値を上げるためコア径の大きいものを使用しているため、多重モード出射である。出射モードを単一横モードにさせるため本研究では、ファイバへ曲率を与えることで余分な高次伝搬モードの抑制を行った。図 4.2 のようにファイバの一部の曲率半径を 25mm まで小さくすることで、単一横モード出射を得た。この時の増幅器出力を測定すると、単一横モードにする前後でほとんど変化がなかった。

更に最小曲率半径を小さくした場合についても、出射モードの測定を行った。最小曲率半径を小さくしようとした結果、図 4.2 の右側部分には大きな曲率を与えることができたが、中央に直線部分ができてしまったため、最小曲率半径 20mm の時には、単一横モードを得ることが出来なかった。これより、ファイバに曲率を与えて単一横モード化する場合、ファイバの全体の形を考慮にいれる必要があることがわかった。



・最小曲率半径 25mm



・最小曲率半径 20mm

図 4.2 ファイバへ曲率を与えた場合

### 4.3 周波数雑音抑制

図 4.3 に周波数雑音抑制結果を示す。10Hz 付近において、2 桁前後雑音抑制が観測された。しかし、雑音抑制できた周波数帯域は、1kHz 以下と狭い。更に、300Hz 付近をみると、抑制前も抑制後も大きな雑音がのってしまった。

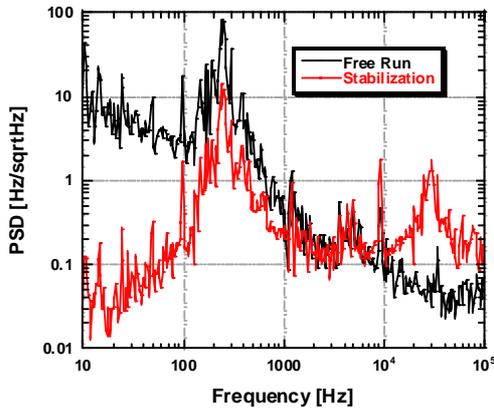


図 4.3 周波数雑音抑制

### 4.4 強度雑音抑制

図 4.4 に強度雑音抑制結果を示す。10Hz 付近において、3 桁前後雑音抑制が観測された。しかし、雑音抑制できた周波数帯域は 2~3kHz 以下と狭く、更に 10kHz 付近に雑音がのっている。これは LD の変調端子が 10kHz で高次の LPF となっていたため、発振しかけていると考えられる。

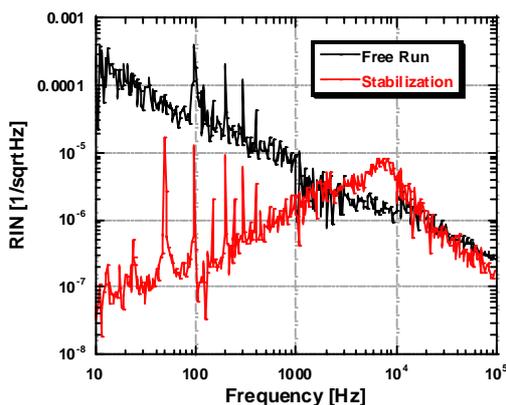


図 4.4 強度雑音抑制

### 4.5 偏光特性

P 偏光と S 偏光の比をとった偏光特性を図 4.5 へ示す。この測定は、あくまで直線偏光が維持されているという仮定のもとでの結果である。1 時

間の測定で、偏光回転角は  $\pm 0.05^\circ$  内でほとんど偏光が回っていないことが確認できた。仮に、ファイバ中で偏光がまわっていても、出射時には偏光が安定していることが確認できた。

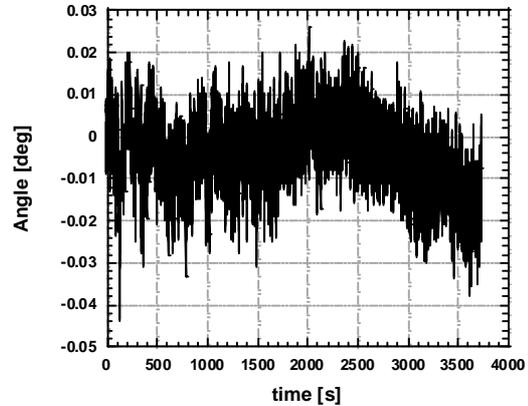


図 4.5 偏光特性

## 5. 結論

Yb 添加ファイバ MOPA を作成し、励起用 LD1 台で最大 10.9W の増幅器出力が得られた。

周波数雑音抑制には、信号光源の制御をすることで可能であるという原理実証ができた。強度雑音抑制には、励起光源の制御をすることで可能であるという原理実証ができた。また偏光回転角を定義し、偏光のゆらぎがほぼないことを確認した。

## 6. 今後の展望

出力特性増加のためには LD を 2 台使用し、ファイバの両端面から励起する双方向励起、同一レーザーを複数のファイバで並列に増幅し、それぞれの出力光を足し合わせるコヒーレント加算が有用であると考えられる。

更なる雑音抑制のためには、周波数雑音、強度雑音それぞれのサーボ回路の最適化が必要である。広帯域にわたって強度雑音抑制するためには、誤差信号を変調端子へ返す方法と、LD へ直接返す直接電流注入法を併用することで、可能であると考えている。300Hz 帯の周波数雑音特定には、2 段振り子の使用によりファブリーペロー共振器を高安定な状態にして、測定することで外部からの雑音が特定できる。