

重力波検出用干渉計光源としての高品質・高安定 fiber-MOPA の開発

電子工学専攻 植田研究室 梶原淳志

1. はじめに

極微の空間変位を検出する超高感度レーザー干渉計型重力波検出計画(LCGT)においてその光源には高安定かつ高出力という一般に相反する性能が要求される[1]。現行のTAMA300の光源には注入同期 Nd:YAG レーザー(出力 10W 波長 1064nm)が用いられているが、この方式だと熱効果により 20W 以上の出力を得ることは困難だと言われている。更なる感度の向上を図るため次世代の光源にはより高出力(100W ~ 300W)そして現行の光源と同程度の高いビーム品質(単一横モード)、強度・周波数共に高い安定度が求められる。本研究では小出力ながら強度・周波数共に非常に高安定な主レーザーの出力を Yb を添加したダブルクラッドファイバーアンプで増幅する fiber-MOPA を構成し、更に出力のモード選択を行うことにより上記の要求に応えうる高品質・高安定な光源を開発することを目的に研究を行った。高出力化は本研究で行った fiber-MOPA の出力を複数足し合わせるコヒーレント加算[2]によってなされる。

2. 概論

ファイバーはその構造により冷却効率が高く、バルク型増幅器で問題となる熱レンズや熱複屈折等の高出力時の熱効果による波面の乱れや空間モードの劣化が起きにくく、出力モードはファイバーの伝搬モードで決定されるという利点を持つ。その反面ファイバー増幅器はコア中の電界強度が高くなるため非線形効果、特に誘導 Brillouin 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。SBS の閾値は $P_{th} \sim (21A_{eff}) / (g_B L_{eff})$ で近似的に与えられ[3]、 A_{eff} は有効コア面積、 L_{eff} は有効作用長であり、 g_B は SBS 利得 peak 値である。この問題をさけるためにはコア面積を大きくすることでコア中の高い電界強度を下げ、更に SBS はファイバ

ーの長手方向に沿って成長していくためファイバー長を短くする必要がある。ファイバー長を短くするためには高濃度添加と高強度励起が必要であり、濃度消光が少なく高濃度添加が可能で、高強度励起時に上準位吸収(ESA)の起こらない Yb を添加したダブルクラッドファイバーアンプを用いた。また吸収効率を高めるため図 1 に示すクラッド形状が非対称(D 型)のものを用いた[4]。SBS の閾値を上げるためコア径 11 μm としたが、この径だと高次伝搬モードも伝搬し($V \sim 5.2$)単一横モード出力が得られない。これはファイバーを円状に巻くことにより高次伝搬モードの損失を大きくし、基本モードのみを残すことで単一横モード出力が実現でき[5]、更にファイバー中の非対称応力分布により偏光安定化も見込まれる[6]。

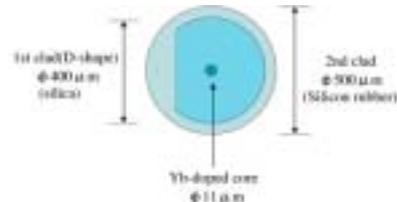


図 1 Yb 添加ダブルクラッドファイバー

3. 実験

3.1 fiber-MOPA の設計・構築

本研究で設計・構築した fiber-MOPA の全体図を図 2 に示す。

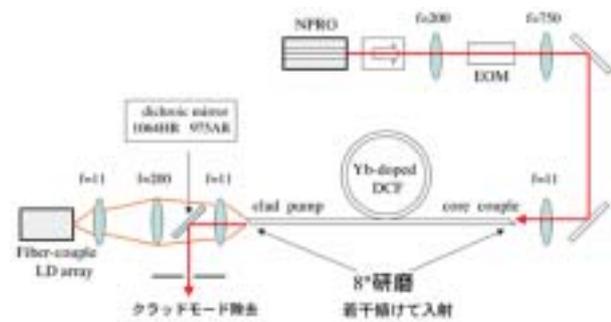


図 2 fiber-MOPA 全体図

波長 1064nm(単一縦モード)のモノリシック型半導体励起 Nd:YAG レーザー(NPRO)出力を信号光とし 11 μm ファイバーコアに入射させ、ファイバー結合 LD 出力を励起光として Yb 添加ダブルクラッドファイバーの D型クラッド(400 μm)を信号光入射端とは逆方向から励起を行った。信号光の 11 μm コアへの結合効率は 68%以上、また励起光の 400 μm クラッドへの結合効率は 70%以上である。また、ファイバーの両端面にはレーザー発振を抑えるために 8° の角度がつけてあり、最終的な fiber-MOPA 出力は信号光(1064nm)に対し高反射率を持つダイクロイックミラーによって系外に弾かれ、空間フィルターによりクラッドモードが除去される。信号光の 11 μm ファイバーコア(NA=0.16)への入射光学系および、励起光の 400 μm クラッド(NA=0.38)への入射光学系は図 3 および図 4 のように設計し、それぞれファイバーに対し NA 以下で入射するよう設計してある。

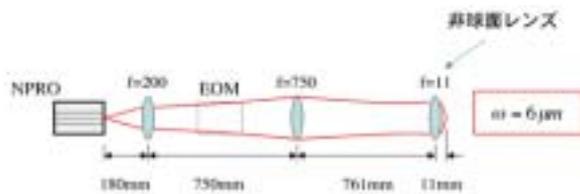


図 3 信号光入射光学系

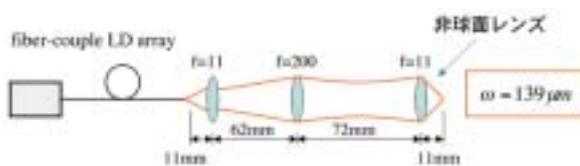


図 4 励起光入射光学系

3.2 出力特性評価

図 5 および図 6 にファイバー長 4m における fiber-MOPA の出力スペクトル、出力パワーを示す。信号光なしのときは広い増幅自然放出光(ASE)が見られ、ここに信号光を入射させると ASE が消え、信号光(1064nm)が増幅される fiber-MOPA 動作が確認された。

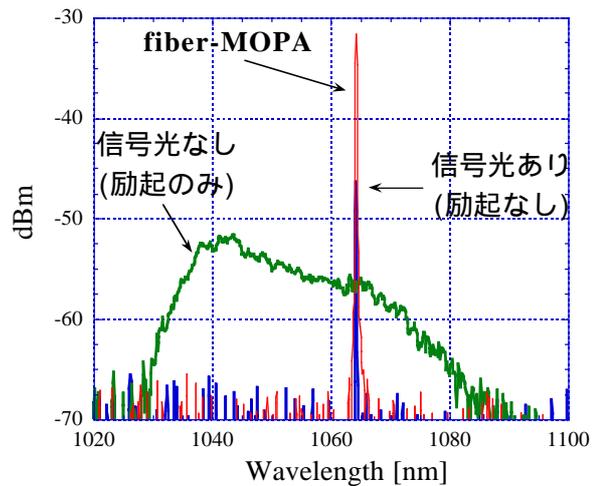


図 5 fiber-MOPA の出力スペクトル (4m-fiber)

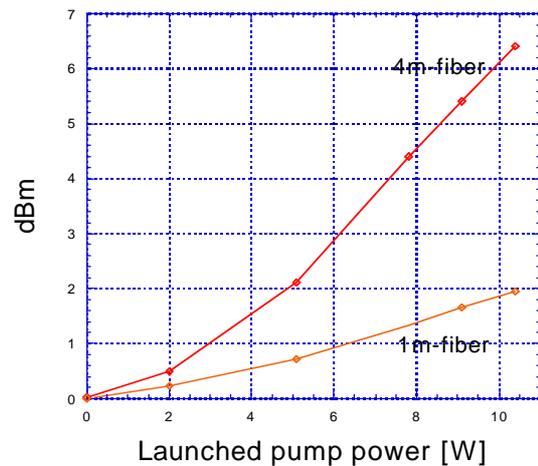


図 6 fiber-MOPA 出力

出力は共に 10.4W 励起時においてファイバー長 1m で 1.95W(光-光変換効率 18.7%)、4m で 6.4W(光-光変換効率 61.5%)が得られた。

さらにファイバーの最適長シミュレーションを行った。まず 2 準位系のレート方程式を解いて fiber-MOPA 出力のファイバー長依存性のモデリングを行った。fiber-MOPA 出力がある長さで peak に達し、それ以降は急激に落ちていくのは再吸収に起因する。こ

ここに 1m-fiber および 4m-fiber から得られた出力を重ね合わせるとよく一致しており、ここからファイバーの最適長を 10m と決定した(図 5)。最適長(10m)で予想される出力は 10.4W 励起時において~7.6W であり、このとき光-光変換効率~73%が見込まれる。

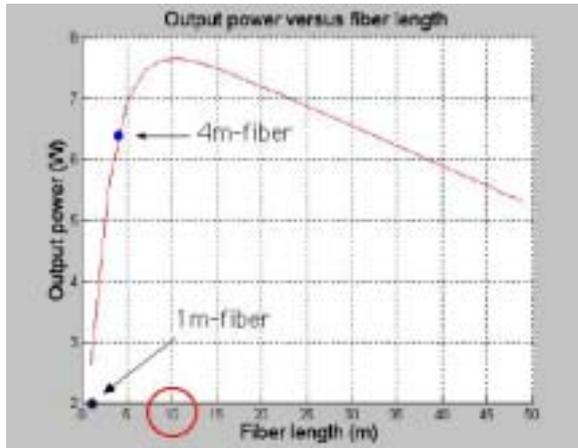


図 7 最適長シミュレーション

3.3 モード選択・偏光安定化

TEM₀₀ 基本ガウシアンビーム(M²=1)に比べどれだけ悪いかを示すビーム品質の1つの指標となる M² はファイバー長 4m でモード選択前は M²~2.47 の多重横モードであった。これはファイバーコアが 11μm マルチモードコア(V>2.4)であることによる。ここから単一横モード出力を得るため、図 8 から図 12 に示すようにファイバーを巻き、徐々に曲率半径を小さくしていくことで高次伝搬モードの損失を大きくし伝搬モードを基本モード LP₀₁ に変換し、結果 TEM₀₀ 出力を得る。またこの際、高次伝搬モードの利得を基本モードが獲得することができるため、出力に大きな減少は見られないのではないかと予想し実験を行った。曲率半径を小さくしすぎると高次伝搬モードだけでなく基本モードの損失にまで至ってしまうため、その都度出力ビームパターンを 2D および 3D プロファイルして最適な曲率半径を探するという操作を行った。

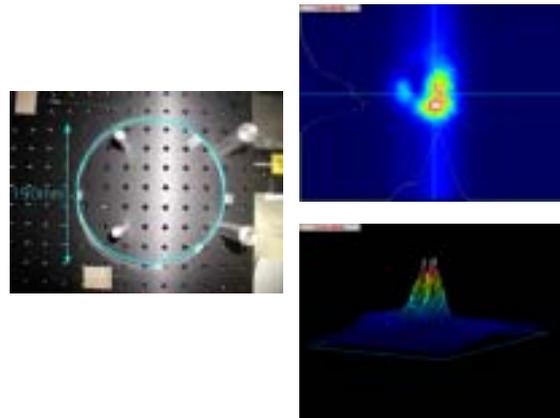


図 8 曲率半径 95mm

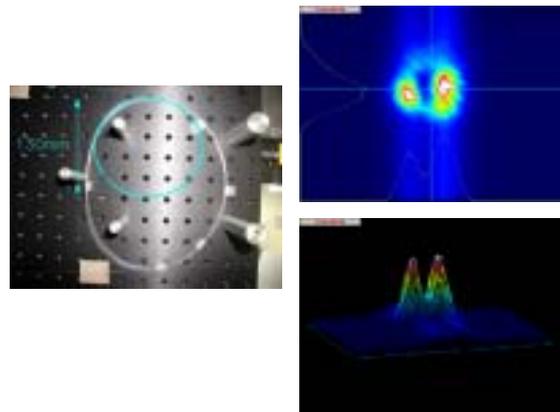


図 9 曲率半径 65mm

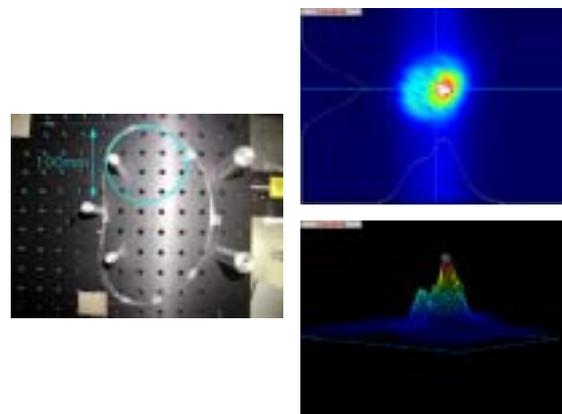


図 10 曲率半径 50mm

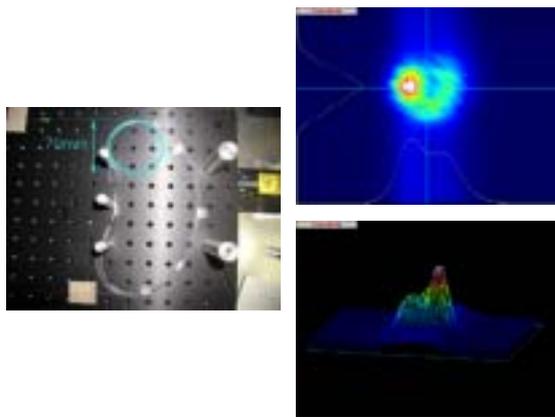


図 11 曲率半径 35mm

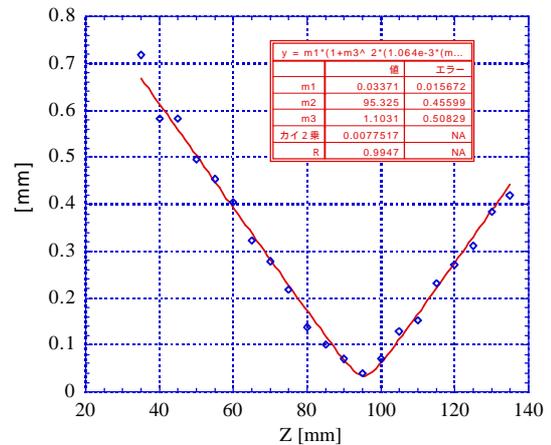


図 13 M²測定 (曲率半径 25mm)

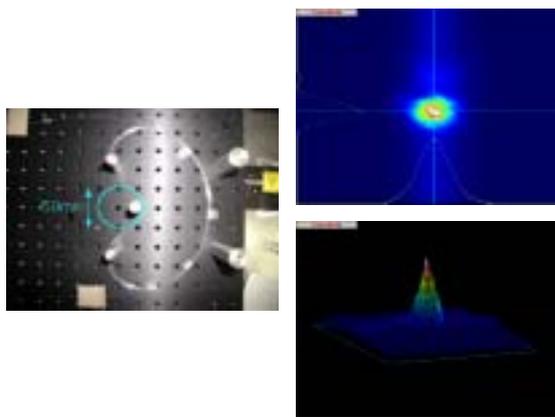


図 12 曲率半径 25mm

図 12(曲率半径 25mm)まで出力に大きな減少はほとんど見られなかったが、曲率半径を 25mm よりも更に小さくすると出力の急激な減少が見られた。よって曲率半径 25mm で高次伝搬モードを完全に落としきったと判断し、再度 fiber-MOPA 出力ビームの M²測定を行った結果、図 13 のように M²=1.1 ±0.5 のほぼ単一横モード出力が得られた。ここで強調すべきは出力の大きな減少無く多重横モードを単一横モード化することができたということである。

偏光安定化はファイバーを巻いた状態で更に非対称応力分布を与えることで複屈折を誘起し、偏光方向を整えることが目的である。実際には先のモード選択において単一横モードが実現された状態(最小曲率半径 25mm:図 12)で、その出力を図 14 のように、2 台の PD を使い、片方の PD 出力を P、もう一方を S として、偏光回転角 $\theta = \tan^{-1}(S/P)$ の変動量を見積り評価を行った。結果、応力を加える前の偏光回転角の変動量が ~2° だったのに対し、応力を加えた場合の偏光回転角変動量は ~1° と大きな改善は見られなかった。しかし、偏光回転角の変動とファイバー周辺の温度の間には相関があることが確認され(図 15)、偏光安定度をさらに良くするためにはファイバーを断熱材などで囲い、温度変化の影響を軽減する対策を講じる必要がある。

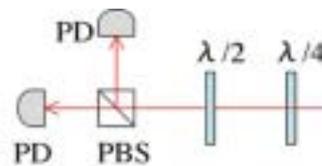


図 14 偏光安定度の評価

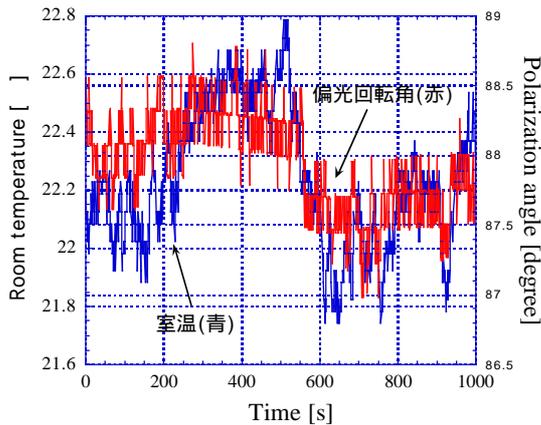


図 15 偏光回転角(応力あり)と
周辺温度の相関

3.4 相対強度雑音

モード選択後、fiber-MOPA の相対強度雑音(Relative Intensity Noise:RIN)の評価を行った。その結果を図 16 に示す。

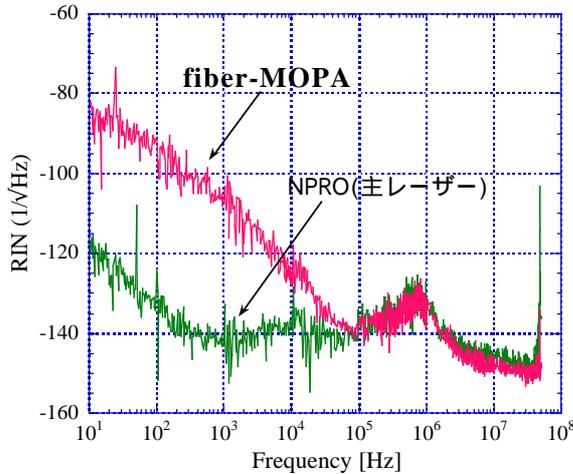


図 16 相対強度雑音

およそ 900kHz に緩和振動が見られ、その付近および緩和振動以上の周波数領域において fiber-MOPA の強度雑音は NPRO(主レーザー)のそれとほぼ一致している。しかし 100kHz 以下の周波数領域で強度雑音が増加している。この原因としては、音響雑音、励起用 LD への印可電流および冷却温度の不安定性が考えられる。緩和振動以下の強度雑音は干渉計に直接の影響を及ぼす。

もしマイケルソン干渉計において 2 つの腕の長さが完全に一致していれば強度の揺らぎは相殺されるが、実際に腕の長さを完全に一致させることは困難である。よって緩和振動以下の強度雑音を更に落とすためには、印可電流および冷却温度の厳密な制御が必要である。

4. 問題点

1 出力パワーの不安定性

本研究において得られた fiber-MOPA 出力にはふらつきが見られた。その大きな原因として励起用 LD の冷却温度制御がきちんとなされていないことが考えられる。図 17 は fiber-MOPA 出力と LD の最高出力時における冷却温度を約 30 分間観測したものであり、このとき冷却温度は 16 に設定されている。

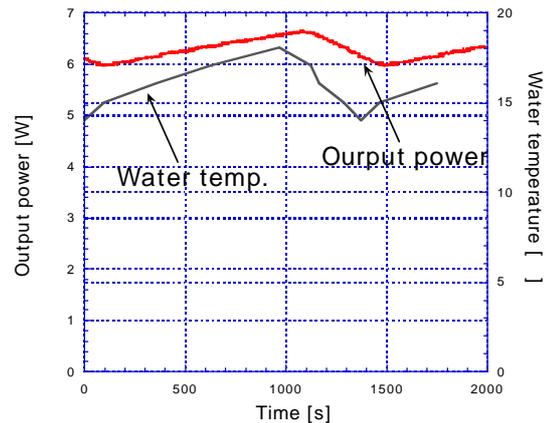


図 17 fiber-MOPA 出力と
励起用 LD 冷却温度の相関

約 30 分周期で ± 2 の変動が見られ、それに追従して fiber-MOPA 出力も変動していることがわかる。LD 冷却系の制御が不安定なのは冷却方式が水冷であり、かつ実際の熱源である LD と温度コントローラーの間に距離があるためである(図 18)。その結果、熱源と制御部の間にタイムラグが発生し、正確な制御をより困難にしている。特に本研究のようにスペクトル幅の非常に狭い Yb の 975nm 吸収線を利用して励起する場合には正確な温度制御は必要不可欠である。

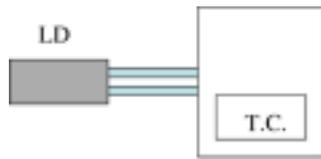


図 18 LD 冷却系の概念図

2 偏光安定度の周辺温度との相関

偏光安定度はファイバーの周辺温度の影響を大きく受ける。これを避けるためにはファイバーを断熱材などで囲うような対策が必要である。また、ファイバー自身が発する熱も同様に影響を及ぼすため、ここでもやはり励起用 LD の正確な冷却温度制御が必要となる。

3 系全体の安定度

高強度励起時に fiber-MOPA 出力ビームの位置が時間経過と共に若干ではあるが移動する様子が見られた。その原因としてファイバーの励起光入射端におけるファイバー保持が不十分であり、そのため高強度励起により発生した熱でファイバー自身が動いていることが考えられる。ファイバーが動くとアライメントに影響を及ぼし、結果、出力の不安定性、最終的に強度雑音に影響を及ぼす。ビームの移動は光学定盤の上ではさほど問題にならなくても、実際の重力波干渉計、例えば TAMA300 ではビームを 300m 飛ばすことになるので、重力波検出用干渉計光源においては重要な要素である。系全体の安定度を高めるため、ファイバーに関してはフェルールに収めるなどより堅固にする必要がある。

4. まとめ

将来の重力波検出用干渉計光源に必要なとされる高出力・高品質・高安定な光源を実現するため、強度・周波数共に非常に高安定な主レーザー(モノリシック型半導体励起 Nd:YAG レーザー:NPRO)出力を信号光として Yb を添加したダブルクラッドファイバ

ーアンプで増幅する fiber-MOPA を設計・構築した。励起光および信号光のファイバーへの入射光学系の設計を行い、1m および 4m と長さの異なるファイバーによる fiber-MOPA により 1m で出力 1.95W(光-光変換効率 18.7%)、4m で出力 6.4W(光-光変換効率 61.5%)が得られた。この結果はモデリングの結果とよく一致し、ここからファイバーの最適長を 10m と決定し、このとき出力 7.6W、光-光変換効率 ~73%が見込まれる。

fiber-MOPA(4m)出力ビームは $M^2 \sim 2.47$ の多重横モードであった。そこでファイバーを巻くことによるモード選択を行った結果、出力の大きな減少なしに $M^2=1.1 \pm 0.5$ のほぼ単一横モード出力が得られた。

モード選択後、偏光安定度の評価を行い偏光回転角がファイバー周辺温度の影響を大きく受ける事が確認された。

重力波検出用干渉計光源として重要な強度雑音の評価を行った。900kHz 付近に緩和振動が見られ、その近傍およびそれ以上の周波数領域において fiber-MOPA の強度雑音は主レーザーのそれとほぼ一致し、高安定性が確認された。しかし 100kHz 以下の周波数領域において強度雑音の増加が見られた。この原因は音響雑音および励起用 LD の印可電流および冷却温度の不安定性が考えられる。

参考文献

- [1] TAMA プロジェクト研究報告書(第 2 版) 2002
- [2] M.Musha et al, appl.Phys.B73, 209-214 (2001)
- [3] Govind.Pagrawal NONLINEAR FIBER OPTICS
- [4] Anping Liu, Kenichi Ueda, Opt.Commun. 132 (1996)
- [5] Jeffrey P.Koplow et al, Opt. Lett., 25, No.7 (2000)
- [6] Jeffrey P.Koplow et al, Opt. Lett., 25, No.6 (2000)
- [7] David C.Hanna et al, J.QuantumElectronics., 33, 1049(1997)