# 全正常分散モード同期ファイバーレーザーの

## 作製とその増幅

白川研究室 相川 展弘

## 1. 序論

ファイバーレーザーは、シリカガラスを母材とした 円形導波路を伝搬するレーザーで、長距離の信号伝送 に向いており、現在の光通信には欠かせないものとな っている.光ファイバーは一般に髪の毛ほどの細さで、 引っ張りに強く限度はあるが曲げたり巻いて使用す ることができる.さらに一般的な固体レーザーと比べ、 小型で導波路構造により空間モードの安定性があり、 ファイバーの体積に対して表面積が非常に大きいた め冷却効率に優れている.さらにファイバーのコア部 に希土類金属イオンを添加した希土類添加ファイバ ーを用いることで増幅媒質として機能しファイバー 増幅を可能にする.一方で、光がコア内に閉じ込めら れるため高い強度の光によってファイバーが損傷し てしまうという問題がある.

本研究の目的は同期励起モード同期ファイバーレ ーザーの開発である.同期励起モード同期とは,マス ター発振器,スレーブ発振器からなり相互位相変調を 通じてモード同期を行う手法であり,近年報告されて いる[1].同期励起モード同期ファイバーレーザーの 構成例を図 1.1 に示す.これにより,既にモード同期 動作しているマスター発振器の繰り返し周波数を調 整することにより全ファイバー化されたスレーブ発 振器の繰り返し周波数を決定することができる.今回 はそのマスター発振器として全正常分散モード同期 ファイバーレーザー(ANDiFL)の作製を行った.また, ANDiFL から取り出した出力を増幅するための増幅 器の作製を行った.



#### 2. 原理

2.1 モード同期

光パルスは,非常に短い時間の間,出力される光の ことである.特に,複数の周波数でのレーザー発振 (多モード発振)において,それぞれの周波数間隔を等 しくし位相を揃えていくことで連続した光パルスを 発生させる手法をモード同期と言う.

本実験では可飽和吸収素子(SA)と言う高強度の光 を透過し,低強度の光を遮断する素子により損失を与 えモード同期を達成させる受動モード同期を発生さ せた. SA には,非線形偏波回転,半導体可飽和吸収ミ ラー(SESAM),カーボンナノチューブ,グラフェンな どがある.

安定したモード同期を起こすためには,損失の変調 周波数を共振器のパルスの往復時間の逆数(周波数)と 等しくする必要がある.受動モード同期では,パルス 自身が損失に変調を与え,自動的にモード同期するこ とができる(図 2.1).



2.2 全正常分散モード同期ファイバーレーザー

通常, 超短パルスレーザーを発生させるためには, 群速度分散(GVD)を補償する必要がある. 例えば, 光 ファイバーの正常分散をプリズム, 回折格子, チャー プミラーといった異常分散媒質により群速度分散を 補償し超短パルスレーザーを発生させる. しかし, ANDiFL(ANDi 共振器)を構成する光学素子は全て正 常分散を示しており分散補償を行う必要がない[2].

ファイバー中では,自己位相変調や相互位相変調に よって直線偏光の光がファイバーを伝搬していると き非線形位相シフトを受ける.これによってファイバ ーを伝搬中に偏光が変化する.このような偏光変化の 効果を非線形偏波回転という.非線形位相シフト量は, 光強度に依存し,光強度の高い成分の偏光は,低い成 分より大きく回転する.1/4 波長板により,偏光状態 が変わり,光強度の強いパルス(中心部分)が偏光子を 通過し,光強度の弱いパルスの裾部分が除去される可 飽和吸収によって短パルス化が可能となる.

図 2.2 は, ANDi 共振器におけるスペクトル形状の 変化を示している[3].



スペクトルフィルタを通過する際(a),フィルター の透過率のカーブに沿いガウス型の形状を取るよう になる.その後 SMF を通過し,このとき自己位相変 調によりスペクトル幅が広がる(b).利得ファイバー で増幅され(b)~(c),再度 SMF へと伝搬する.この SMF では自己位相変調による非線形位相シフトを受 けスペクトルの端に鋭いピークが発生する.その後, スペクトルフィルタによってピークがカットされ元 に戻る.

ANDi 共振器は正常分散媒質のみで構成されている ため群速度分散の影響でパルスのチャープは大きく なっている. パルス幅は主に最初の長い SMF で単調 に増加する. そしてスペクトルフィルタによって波長 の広がりが小さくなることでパルス幅が短くなり元 のパルス幅と一致する. パルス幅もスペクトルも共振 器を一周して元に戻るため定常発振が可能となる.

#### 3 実験

 3.1 ANDi 共振器の作製とスペクトルフィルタ 実際に作成した ANDi 共振器の配置図を図 3.1 に示 す.



図 3.1 実際に作成した ANDi 共振器の配置図

利得ファイバーとして Yb 添加ファイバー(1 m, コ ア径 5  $\mu$ m)を使用し, 共振器長約 13 m のリング型 共振器を作製した. PBS は偏光ビームスプリッタを表 している. スペクトルフィルタとして公称値, 中心波 長 1030 nm, 透過幅 3 nm のバンドパスフィルタ (BPF)と厚さ 5 mm, 3 mm の複屈折フィルタ(BRF)を 使用した. それぞれの透過特性の測定結果を図 3.2 に 示す.



図 3.2 スペクトルフィルタの波長透過特性 左図: BPF, 右図: BRF

3.2 BPF と BRF を用いたモード同期

スペクトルフィルタと非線形偏波回転による受動 モード同期を達成させた.初めに, BPF を使用したと きのスペクトルを図 3.3 に示す.



このとき,出力が5mW,スペクトル幅が14nm,繰 り返し周波数  $f_{rep} = 15.28$  MHz であった.スペクト ル形状が複雑であるため,スペクトル幅は 20 dB 幅 (ピーク強度の1%)とした.

次に, BRF(5 mm, 5 + 3 mm)を使用したときのスペ クトルを図 3.4 に示す.



左図:厚さ5mm,右図:厚さ5+3mm

出力はそれぞれ 24.9 mW, 34.0 mW, スペクトル幅 は 11.5 nm, 25 nm となり, フィルタの透過幅によって スペクトル形状が大きく変わることが確認できた.

BRF の厚さ 5 + 3 mm のパルス列と RF スペクトル を図 3.5 に示す.



図 3.5 BRF の厚さ 5 + 3 mm のパルス列と RF スペクトル

パルス列の形状に乱れがあり,RFスペクトルでは左 右の大きなサイドバンドが目立ち,ピークと雑音の差 が20dB程度であるため非常に不安定なモード同期で あると考えられる.

さらにモード同期の安定化と出力の増加を図るた め、ファイバー長を短くした. Yb 添加ファイバーの長 さは変更せず, 共振器長約 10.7 m となった. このとき のスペクトルと RF スペクトルを図 3.6 に示す.



図 3.6 ファイバー長変更後のスペクトルと RF スペクトル(BRF 5 + 3 mm)

共振器長が短くなったことにより $f_{rep} = 17.6$  MHz と大きくなっただけでなく,出力が 62.7 mW と 2 倍 近く増加した.また,RF スペクトルの形状からモード 同期がわずかに安定化したと考えられる.

3.3 増幅器を用いた出力特性図 3.7 に増幅器を含めた実験構成図を示す.



図 3.7 増幅器を含めた実験構成図

LD とアイソレータ部分を除き,全て偏波保持ファ イバーを使用した. 高出力化のため Yb 添加ファイバ -(2 m)のコア径を 10 μm とした.

LD の出力 635 mW 励起で増幅を行い, そのときの スペクトルと RF スペクトルを図 3.8 に示す.



アイソレータ通過直後の出力が 22.5 mW, 増幅され た光の出力が 266.4 mW となり増幅率は約 11.8 倍と なった.しかし, 増幅後の RF スペクトルの中心部分 の線幅が広がっている.これは増幅時のわずかな戻り 光でモード同期が不安定化している可能性があり, 増 幅時の共振器からの光を観測する必要がある.

### 4 まとめ

ANDi 共振器の作製とモード同期, その増幅に成功 した. 複屈折フィルタを2枚使用することでスペクト ル幅の広帯域化と出力の増加を達成した. また, ファ イバー長を短くしたことにより繰り返し周波数のみ でなく出力の増加とモード同期の安定化を確認した. さらに, 増幅を行ったところ増幅率がおよそ 11.8 倍 となったがモード同期が不安定化した可能性がある.

今後の展望として, 共振器と増幅器の構成を検討し モード同期の安定化と出力の増加を図る. また, パル ス幅の測定と評価を行う. さらに, 共振器長を可変と することでANDi 共振器のパルスの繰り返し周波数も 可変とし, 同期励起モード同期ファイバーレーザーの 開発を行う.

#### 5 参考文献

[1] S. Huang, S. Zheng, J. Wang, H. Chen, F. Dong, L.
Yu, X. Luo, X. Guo, P. Yan, J. Wang, Y. Lei, W. Liu, Q.
Lue, C. Guo, S. Ruan, "Tunable mode-locked Tmdoped fiber laser based upon cross-phase modulation," Optics Express, Vol. 30, No. 18, pp. 32256-32266, 2022
[2] A. Chong, J. Buckley, W. Renninger, F. Wise, "Allnormal-dispersion femtosecond fiber laser," Optics Express, Vol. 14, No. 21, pp. 10095-10100, 2008

[3] A. Chong, W. H. Renninger, Frank W. Wise, "Properties of normal-dispersion femtosecond fiber lasers," Journal of the Optical Society of America B, Vol. 25, No. 2, pp. 140-148, 2008