

全正常分散ファイバーレーザーの作製

白川晃研究室 田中望実

1 序論

ファイバーレーザーは材料としてシリカガラスを用いることから、低損失であり、また媒質となるファイバー自体がレーザーの通り道となることから相互作用長が長く、高利得である。このような性質は高出力レーザーにとって重要な性質である。

本研究室ではマルチコアやマルチモードファイバーによるコヒーレントビーム結合や分割パルス増幅などによる高出力レーザーが研究されてきたが、本研究はそれらのシード光源となりうるレーザーを開発することが目的である。シード光源として、短パルス・広スペクトル・高エネルギーをもつ正常分散モード同期ファイバーレーザーを用いることを検討した。正常分散モード同期ファイバーレーザーには ANDi と呼ばれる全正常分散型と self-similar と呼ばれる自己相似型が存在する。本研究では ANDi 共振器を作製した。

全正常分散モード同期ファイバーレーザー (ANDiFL) は名前の通り異常分散のないファイバーレーザーであり、周波数フィルターを用いることで安定したパルスを得られる。ファイバーレーザーでは非線形光学効果が発生しやすく、出力波形はファイバー長などによって大きく変化するため、多くの試行が必要である。本研究では、ファイバー長や WDM カプラー、周波数フィルターなどを変えながらより安定したモード同期を目指した。また、モード同期波形を得た後にパルス特性を評価しパルス幅を測定するため、自己相関波形の測定を行った。

2 原理

2.1 モード同期

レーザーが多モード発振しているとき、発振モード間の周波数の差は一般に等しくない。しかし、レーザー共振器の中に非線形光学素子などを入れたり、損失や屈折率を変調したりすると位相関係が固定され、多モード発振の周波数間隔が等しくなる。これをモード同期という。N 個のモード合成光電場 $E(t)$ はすべてのモードの振幅を等しくし、位相一定としたとき、中心角周波数を ω_0 、モード間隔を $\Delta\omega$ として以下のように表される。

$$E(t) = A_0 \frac{\sin\left[\frac{N\Delta\omega t}{2}\right]}{\sin\left[\frac{\Delta\omega t}{2}\right]} \exp(i\omega_0 t) \quad (1)$$

モード同期の状態になると、波形は図 1 のようになる。共振器長を L とすると周期 $T = 2L/c$ で繰り返すパルス列である。

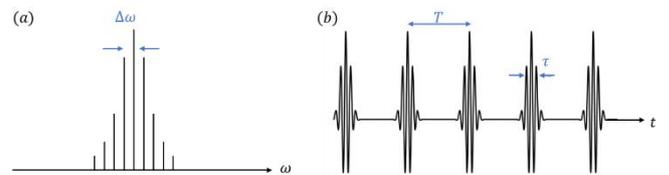


図 1 モード同期の(a)スペクトルと(b)電場波形

2.2 非線形偏波回転

図 2 に非線形偏波回転の概念図を示す。自己位相変調や相互位相変調によって位相変化が起こると、ファイバー中を非線形位相シフトを受けながら伝搬することにより、偏光がファイバーの途中で変化することがある。このような自己誘起された偏光変化の効果を非線形偏波回転(NPE)：

Nonlinear Polarization Evolution) という. QWP により, 光強度の強いパルスの中心部のみが検光子を通過し, 短パルス化が望める.

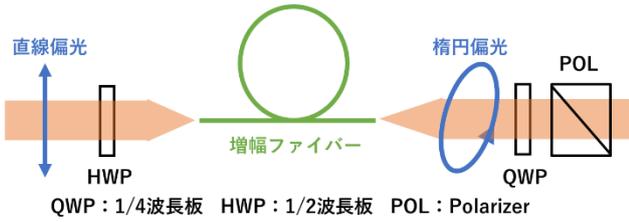


図2 非線形偏波回転の原理図

2.3 全正常分散モード同期ファイバーレーザー

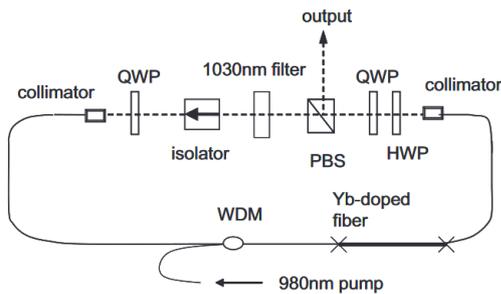


図3 ANDi 共振器の配置図[2]

ANDi 共振器の配置図を図3に示した. HWP と QWP, PBS を用いて NPE を起こし, パルス幅の抑制のために 1030nm の周波数フィルターを挿入している. このフィルターは自己振幅変調を与え, 結果として高エネルギーパルスでは偏った非線形偏波回転を得る.

また, 図4に共振器内の位置に対するパルス幅の数値シミュレーションを示す.

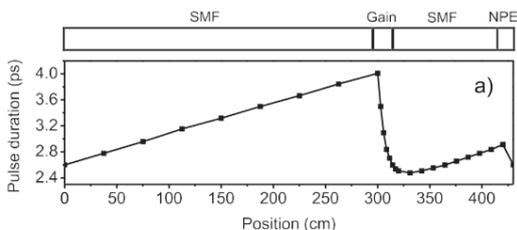


図4 パルス幅のシミュレーション [2]

励起 LD から出発した光は SMF 中でパルスが広がるが, ゲイン (Yb: fiber) で大きく圧縮される. その後 SMF をもう一度通りパルスが広がるが, NPE により再びパルスが圧縮される. ANDi 共振器はリ

ング共振器であるので, 出発地点と終了地点でのパルスは等しくなるようにパルス幅やエネルギーの動作パラメーターが決定される.

また, 正常分散型ファイバーレーザーにおいてはファイバーの長さも重要な指標である. Yb ファイバー通過直後の SMF は短くするとパルスエネルギーの増加に, NPE 通過直後の SMF は短くすると発振パルスの時間幅が短く, エネルギーも増加するといった影響を与える [3].

3 共振器設計

本研究では以下のような共振器を作製した.

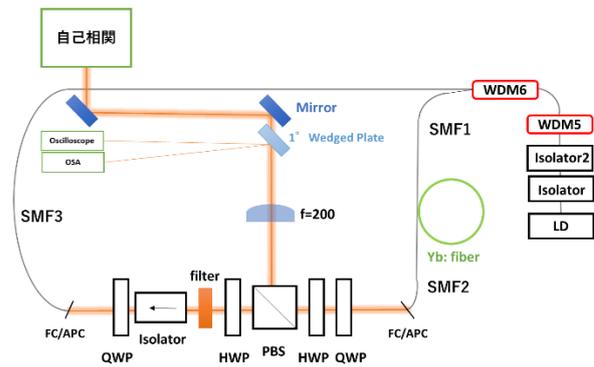


図5 作製した共振器

SMF として HI-1060 を使用している. ファイバー長は SMF1 が 97cm, Yb: fiber が 1.5m, SMF2,3 が 2.35m, 1.9m である. PBS 後の HWP は, アイソレーターの入射偏光に合わせるため挿入した. よって 図3に示した ANDi 共振器の配置図より波長板が一枚多くなっている. また, 光が一周した際に Yb: fiber 側ではなく LD 側に流入してしまうと LD の破損, 共振器の不安定性に繋がるため, 流入防止のために LD 後に WDM を 2 つ, アイソレーターを 2 つ挿入したものを励起光として使用した. WDM は 980nm と 1030nm の光の弁別を行うために, アイソレーターは 1030nm の戻り光をブロックするために挿入している. Yb: fiber の V パラメーターは $V = 2.01 @ 1030nm$ であった.

LD の波長とパワーを図6に示す. スペクトルは 975.4nm 前後でロックされている.

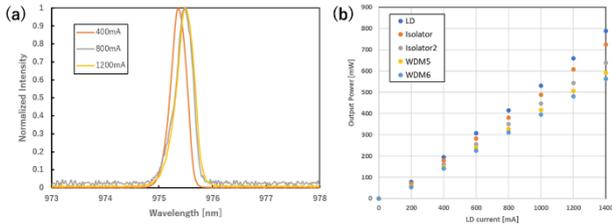


図6 LDの(a)波長 (b)パワー

また、本研究では二種類のフィルターを用いた実験も行った。フィルターの特性を図7に示す。

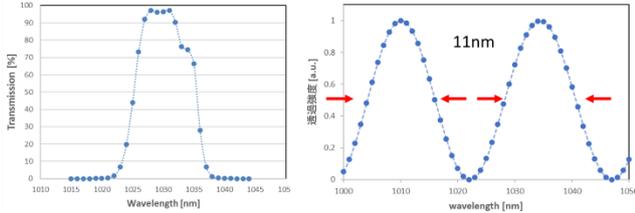


図7 (a)BPF (b)BRFの透過特性

BPF (バンドパスフィルター) は半値全幅で10nmの透過幅を持つ。誘電体多層膜を用いている。BRF (複屈折フィルター) はクォーツを媒質としたものを用いた。屈折率は $n_o = 1.67455$, $n_e = 1.68313$, 厚み $d = 5\text{mm}$, 透過幅は約11nmであることが計算により求められた。

3 実験結果

3.1 二つのフィルターを用いたモード同期

BPFとBRFを用いて図8のように繰り返し周波数およそ25.8MHzでモード同期を達成した。それぞれの入力パワー, 出力パワーを表1に示す。

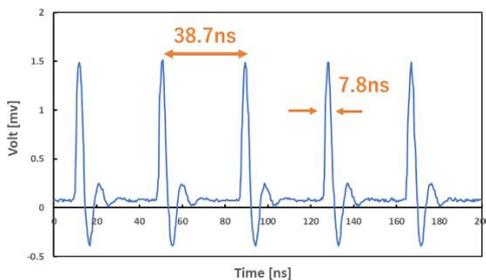


図8 モード同期時の時間波形

表1 モード同期時のパワー

	入力 [mW]	出力 [mW]
BPF	455	190
BRF	390	140

また、得られたスペクトルを図9に、自己相関波形を図10に示す。

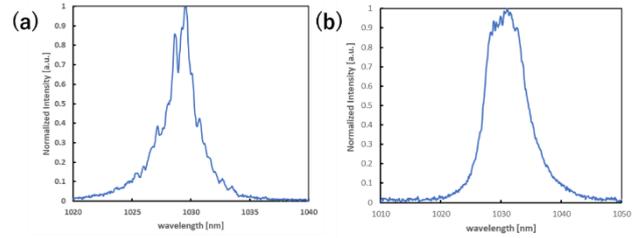


図9 スペクトル(a)BPF (b)BRF 挿入時

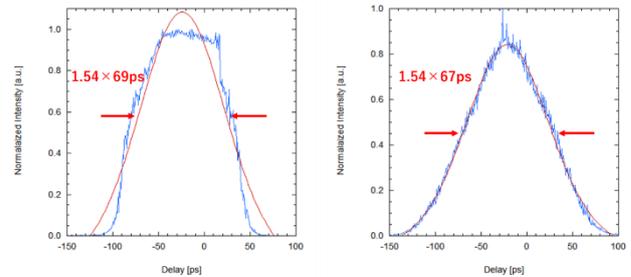


図10 自己相関波形 (a)BPF (b)BRF 挿入時

スペクトル幅は半値全幅で(a)2.12nm(b)7.5nm、パルス幅は(a)69ps (b)67psであった。BRFを用いたほうがスペクトルが広がり、パルス幅が短くなることが確認できた。このとき、(b)に小さなコヒーレントスパイクが立っているのが分かる。このため、完全なパルスを得られるようにコヒーレントスパイクの立たないようなアライメントを再度行った。

3.2 安定パルスの生成

最終的に得られたスペクトルを図11に、自己相関波形を図12に示す。

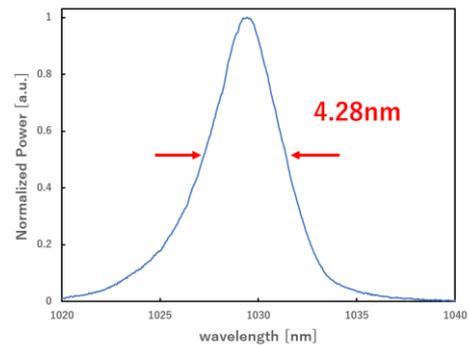


図11 スペクトル

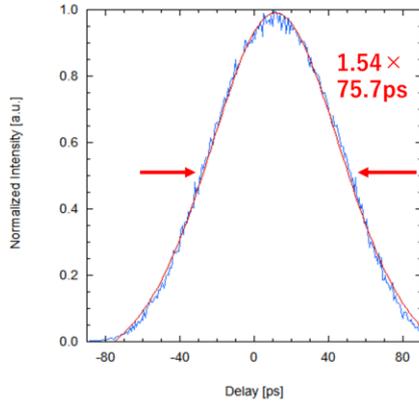


図 12 自己相関波形

図 12 に示すようにコヒーレントスパイクのないコヒーレントなシングルパルスであることが確認できたが、スペクトル幅の広がりは少ない。このとき入力パワー: 534mW, 出力パワー : 106mW, エネルギー : 4.3nJ であった。

本研究で作製したモード同期パルスは一般的な ANDiFL と比べて非常に強い出力, 高エネルギーなものである。同一アライメントでパワーとパルス幅を見ると, 図 13 のようになることが分かった。

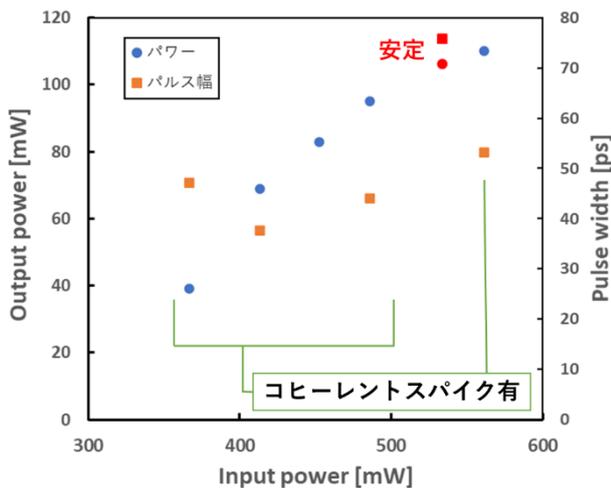


図 13 パワー・パルス幅特性

コヒーレントスパイクはいずれも図 10(b)の波形のようにわずかな大きさのものである。出力パワーは入力パワーが上がっていくにつれて飽和しているような形を取った。パルス幅には入力パワーによる関係性は見られなかった。

5 まとめ

本研究では ANDi 共振器の作製を行い, フィルターや WDM について検討を行った。共振器を組み, 100mW~200mW 出力のモード同期を達成した。シングルパルスであることも確認できた。しかし, ANDiFL としてこれは想定以上に大きな出力であり, また, スペクトルも一般的な ANDiFL のものとは違うことから, 通常の ANDiFL とはまた特性の違う共振器が得られている可能性もある。原理の追究が求められる。

現状の問題点は, 一般的な ANDiFL に比べてスペクトル幅が狭いことである。モード同期を安定させればこちらも改善すると考えているため, 波長板の組み合わせをさらに試していく。さらに, 分散補償を用いてパルス圧縮にも挑戦したい。

また, 高エネルギー動作の解明をすることも今後の課題である。これらを改善したのち, self-similar 型共振器に発展させていきたい。

6 参考文献

- [1] R. H. Stolen, J. Botineau, and A. Ashkin, "Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers," *Opt. Lett.* **7**, 512-514 (1982)
- [2] Andy Chong, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser", *Optics Express* **14.21**, 10095-10100(2006)
- [3] 山中紀幸, 芦原聡, "正常分散型モード同期 Yb ファイバーレーザーの開発とその動作解析," 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集(2015)