

全正常分散ファイバーレーザーの開発と

パルス圧縮

白川晃研究室 与儀安史

1. 序論

ファイバーレーザーは導波路構造を持つことから高利得であることや表面積が非常に大きいことから冷却性能に優れているといった利点があるが、高尖頭出力によるファイバー端面の破壊が起きる欠点もある。

本研究室では分割パルス増幅やマルチコアファイバー増幅の研究を行っている。先行研究ではマルチコアファイバー増幅のためのシード光源として、利得媒質に Yb^{3+} 添加ファイバーを使用した全正常分散モード同期ファイバーレーザー(ANDiFL)を作製していた。ANDiFLは共振器内で分散補償を行わないため出力制限を回避でき、共振器内ではパルスがチャープされているためピークパワーを抑えられ高エネルギー化が可能である。

本研究では、先行研究[1]で作製されていたANDiFLの構成を検討し、より安定でノイズの少ないパルスレーザーとなるように開発した。また回折格子対を用いたパルス圧縮にも挑戦した。

2. 原理

2.1 レーザー共振器とモード同期

レーザーには大別して連続波(CW)発振とパルス発振がある。CW発振は一定のパワーが出力され続けるものである。パルス発振は有限な時間幅にエネルギーが集中しているものである。もっとも簡単なレーザー共振器は図 2.1.1 のような、外部からエネルギーを加え反転分布している媒質とそれを挟むように2枚の鏡を置いた構成のファブリペロー共振器といわれる。

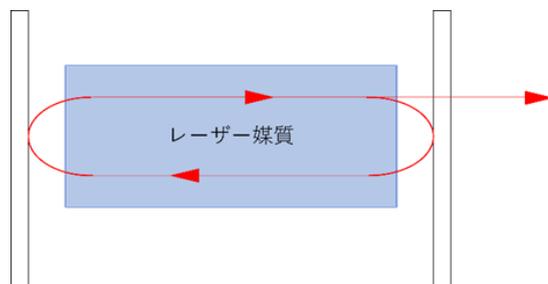


図 2.1.1 基本的なレーザー共振器

反転分布しているレーザー媒質から光が放出されると、両側の鏡によって共振器を往復する光が現れる。共振器を往復するたびに利得媒質によって位相のそろった光が増幅され、位相のそろっていない光は打ち消される。片側の鏡を部分反射鏡とすることで、共振器内で往復し位相のそろったレーザー光を取り出すことができる。

パルス発振は受動モード同期や能動モード同期などのモード同期によって得られる。

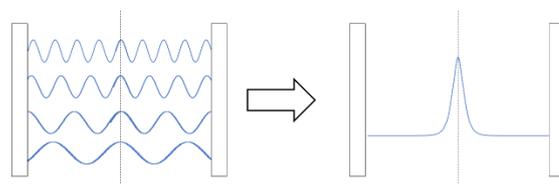


図 2.1.2 モード同期の概念図

周波数軸上でレーザー媒質の利得に広がりがある場合、図 2.1.2 のように共振器内では複数の周波数で発振する。これを多モード発振という。それらの位相がそろった部分でパルスが生成され、共振器を1周するごとに部分反射鏡から外へ出るためパルス列が生成される。しかし時間とともに位相は変化しやすく、モードごとの位相関係を何らかの方法で固定する必要がある。能動モード同期では、機械的なシャッターを導入するなどして直接損失を与えることによりモード同期を得る。受動モード同期では、損失を与える物質として可飽和吸収体を共振器内に組み込む。

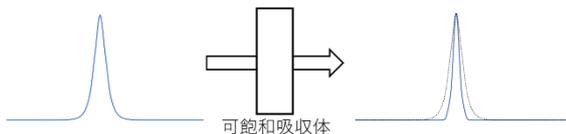


図 2.1.3 可飽和吸収の概念図

可飽和吸収体とは図 2.1.3 のように弱い光は吸収し、強い光は吸収飽和を起こすことでそのまま通す物質である。ファイバーレーザーにおいては、非線形偏波回転と呼ばれるファイバー内での偏光変化と組み合わせて偏光素子を可飽和吸収体とすることもできる[2]。可飽和吸収体の回復時間が、光が共振器内を1周する時間より短い媒質であれば受動モード同期を得ることができる。

2.2 ANDiFL の概要

一般的な超短パルスモード同期レーザーでは正常分散の補償のために回折格子対などの異常分散媒質を使用して分散補償してソリトンパルスを生成する。これらの異常分散媒質はレーザーの性能を大きく制限するものであり、共振器内に異常分散媒質が存在しないことが望まれる。全正常分散モード同期ファイバーレーザー(ANDiFL)は共振器内で分散補償を行わないファイバーレーザーであり、群速度分散や自己位相変調の影響を受けてチャープされたパルスが生成される。

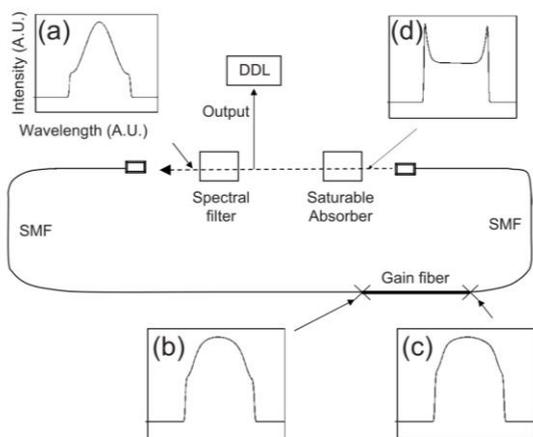


図 2.2.1 共振器内部のスペクトル形状[3]

図 2.8.1 は ANDiFL での解析結果である[3]。ガウス型の透過スペクトルフィルタによって切り取られたパルス(a)は SMF 内を通過することで自己位相

変調によってスペクトル幅が広がる(b)。利得ファイバーで増幅され(c)、最終的には(d)のようなスペクトル形状となる。このスペクトル形状は ANDiFL で見られる特徴的な形状であり、両端が立ち上がっていて猫の耳のように見えることから cat ear 型ともいわれる。

共振器内部でのパルス幅の解析結果を示す。

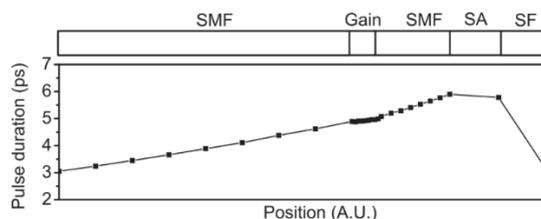


図 2.8.2 共振器内部のパルス幅[3]

正常分散媒質のみで構成されているため、共振器内部で大きくチャープされている。SMF、利得ファイバーでチャープされ、スペクトルフィルタによってパルス幅は短くなり、図 2.8.2 の両端でパルス幅が一致するようになっている。

3. 実験

3.1 先行研究の検討, 改善

本研究では先行研究で作製されていた ANDiFL を検討し、改良・最適化した。以下に先行研究での実験図と得られた結果を示す。

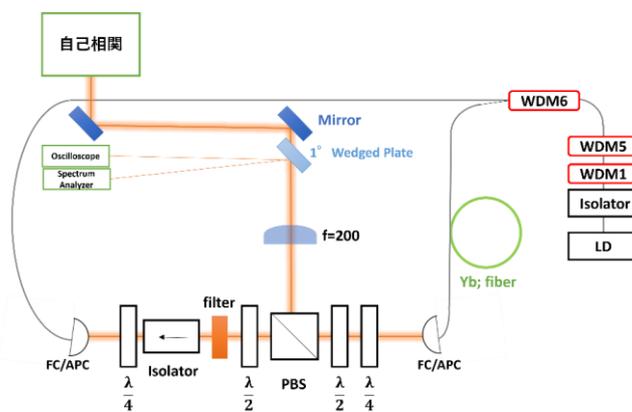


図 3.1.1 先行研究での実験図[1]

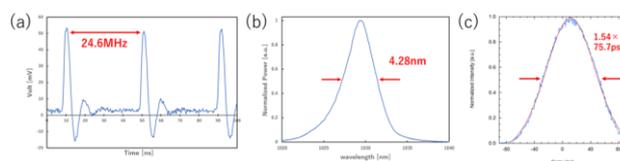


図 3.1.2 先行研究での(a)時間波形
(b)スペクトル波形(c)自己相関波形[1]

先行研究ではスペクトルフィルタに透過幅 11 nm の複屈折フィルタを使用していたが、スペクトル広がり は 4.28 nm と透過幅より狭く、またパルス幅は約 75 ps と非常に大きなものとなっていた。

フィルタの帯域が最適でないと考え、透過幅 3 nm のバンドパスフィルタ(BPF)を使用し、また利得媒質長やファイバー長を調節しながら実験を行った。

3.2 透過幅 3 nm の BPF 使用時の結果

透過幅 3 nm の BPF を設置した実験図を示す。

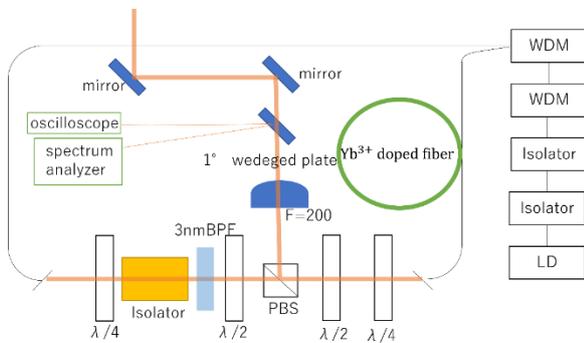


図 3.2.1 透過幅 3 nm の BPF を使用した実験図

LD に 645.1 mA の電流を入力し、波長板を調節したところモード同期を得られた。得られたスペクトル波形と時間波形を図 3.2.2 に示す。

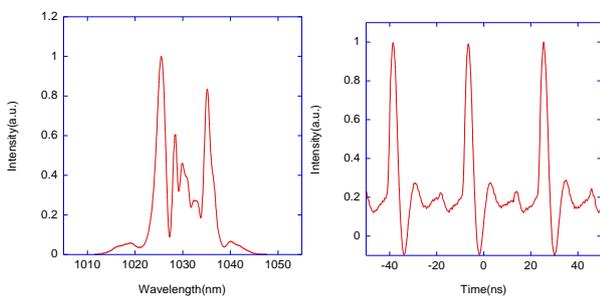


図 3.2.2 3 nmBPF 使用時のスペクトル波形と時間波形

スペクトル幅は半値全幅で 10 nm に広がっていた。繰り返し周波数は 31.6 MHz に増加した。これはインライン BPF の付け外しなどで融着を何度か行ったためである。平均出力は 40mW 程度であった。ま

たモード同期は非常に安定であり、一定出力のパルス列を観測できた。

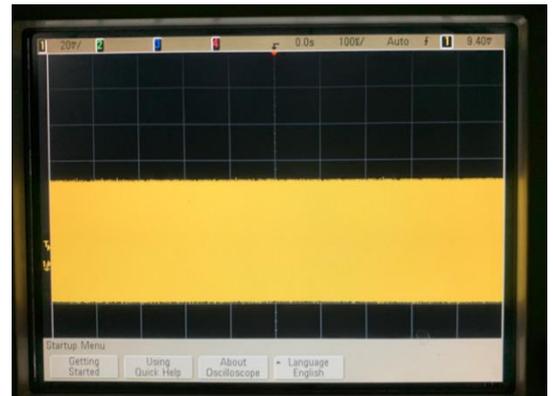


図 3.2.3 測定したパルス列

この時に測定された自己相関波形を示す。

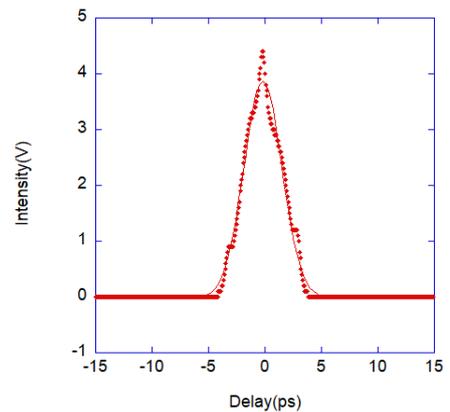


図 3.2.4 測定された自己相関波形

自己相関波形には中心付近に鋭いピーク、コヒーレントスパイクが表れていた。これは中心波長付近に大きな変調が表れているためだと考えられる。

ファイバーによる自己位相変調が大きく寄与しているのだと考え、ファイバー長を調節し、さらに LD の入力電流を下げてコヒーレントスパイクが表れない解が得られた。

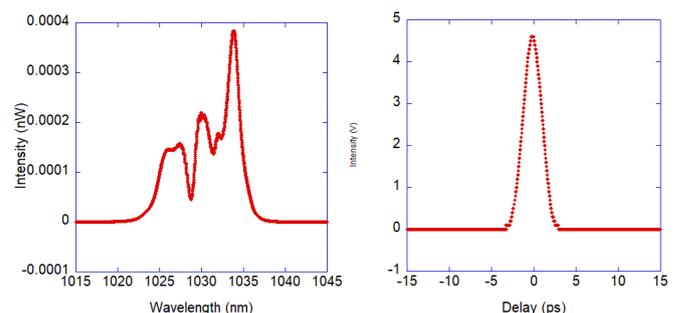


図 3.2.5 コヒーレントスパイクが表れない時の

スペクトル形状と自己相関波形

典型的な ANDiFL のスペクトル形状にはなっていないが、広がり幅は 5 nm で BPF の透過幅よりも広がっていた。この時のパルス幅は約 2 ps となっていた。

3.3 回折格子対による圧縮

チャープしたパルスを短パルス化させるには、回折格子やプリズムを使用したパルス圧縮が有効である。透過型回折格子を用いたパルス圧縮の概略図を示す。

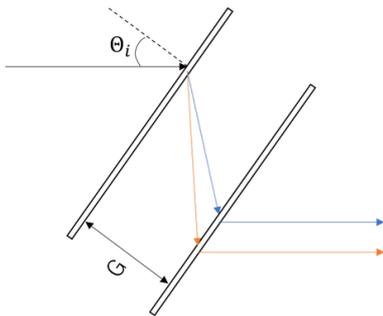


図 3.3.1 透過型回折格子対によるパルス圧縮の概略図

回折格子に入射したパルスが、波長ごとに異なる回折角をもつことによって光路差が生まれ圧縮が行える。

回折格子対を実験系と自己相関計の間に設置した。

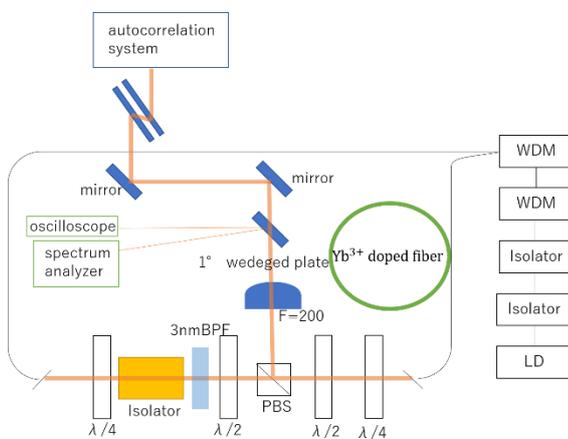


図 3.5.1 回折格子対を設置した実験系
回折格子対の間隔を 4 cm として測定を行った。

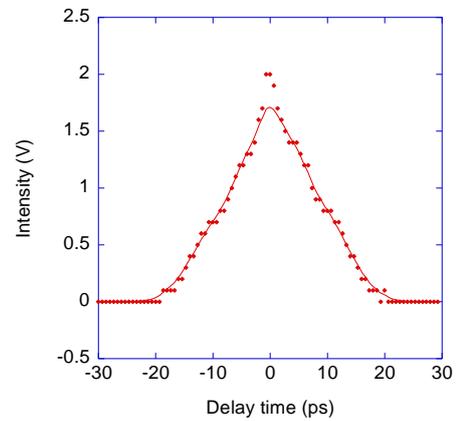


図 3.5.2 回折格子対を使用した測定結果

回折格子対を使用した結果パルス幅は約 13 ps となり、パルス圧縮は達成できなかった。これは回折格子対と自己相関計のアライメントが不十分であったためと考察する。

4. まとめ

BPF や利得ファイバー長などを調節することによりパルス幅は約 80 ps から 2 ps と短パルス化することができた。回折格子による圧縮は不十分であるため、調節を行いさらなる短パルス化を行うことが目標である。

5. 参考文献

- [1] 田中望実, “全正常分散ファイバーレーザーの作製,” 電気通信大学卒業論文, 2021
- [2] Zhi-Bo Liu, Xiao-Qing Yan, Jian-Guo Tian, Wen-Yuan Zhou, and Wei-Ping Zang M. Savage, *Optics Express*, Vol. **15**, No. 20, 13351-13359, 1964
- [3] F. W. Wise, A. Chong, and W. H. Renninger, *Laser & Photonics Reviews*, Vol. **2**, No. 1-2, 58-73, 2008