

分割パルス増幅のための

1030nm ファイバー増幅器の最適化

白川(晃)研究室 岩田ワレス興治

研究背景

高出力レーザーの実現の筋道の一つは冷却性能にある。同質量で冷却効率の良い形状の一つであるファイバーを用いたレーザーは、次のような特徴を持つ。まず先に挙げたように、高い冷却性を持っている。これは体積と表面積の比からわかる。また、媒質となるファイバーの構造を自由に定める事ができ、さらにそれ自体がレーザーの通り道である導波路であることから、相互作用長が長く、高利得であることが挙げられる。さらに、ファイバーの材料としてシリカガラスを用いていることから、低損失であることが言える。最後に、ファイバーそれ自体が軽いことから、軽量、曲げることが出来るのでコンパクトである。だが、ファイバーレーザー最大の欠点は、誘導ラマン散乱と誘導ブルリアン散乱に代表される高い非線形性である。この問題を本研究では DPA(Divided Pulse Amplification)と呼ばれる「分割パルス増幅」の技術を用いて超短パルスレーザーの高出力化を実現する為に、1030nm ファイバー増幅器の最適化を行った。

原理

分割パルス増幅について

非線形位相シフトが大きくなると、パルスはスペクトル、時間的に崩れやすくなる。解決策として、一つとしてチャープパルス増幅(CPA)が挙げられる。

CPA と違った、超短パルスの増幅の際に発生する非線形性効果避けるための新しい手法として、分割パルス増幅または Divided-Pulse Amplification(DPA)(Figure 1)と呼ばれる技術がある。まず、一つのパルスを N 個の同じパルスに分割する。この際、 N 個のパルスは時間軸上で重なり合わないようにする。これらの分割されたパルスは増幅され、再結合することで最終的に一つの高強度のパルスとなる。[1]

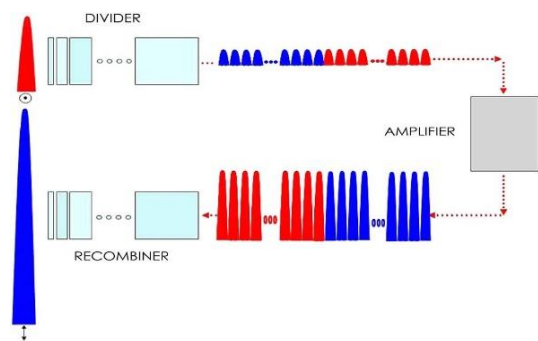


Figure 1 DPA 概要

オリジナルパルスは N 個のコピーに分割され、増幅された後、コヒーレントに結合されることで、最終的には高強度のパルスとなる。図における青色と赤色のパルスは偏光が直交している事を表している。分割・結合器はそれぞれが偏光面に対して結

晶軸が45度になるよう配置する。これにより、DPAの入カパルスと出カパルスは直交する。

本研究に用いられた分割・結合器は次の(Figure 2 分割・結合器の概要)に示す。HWPはパルスの偏波成分がS波、P波それぞれ1:1になるよう偏光状態を変える。TFPには、パルスが45度の角度で入射する。それにより、TFPをそのまま通り抜ける偏光P波、跳ね返されるS波に分かれる。反射したP波はQWPを通り、GDDミラーに反射され、再びQWPを通る。この過程で、P波はQWPを二回通ることになるので、P波からS波となる。S波はTFPを通り抜け、先と同じ機構を通ることでP波となり跳ね返る。跳ね返ったP波はTFPに反射される。鏡と鏡の距離をLとした時、この二つのパルスは光路差分の時間差、

$$\Delta t = c/2L$$

離れたパルスとなる。ここで、分割後の二つのパルスはそれぞれ直交した状態で出射される。今後、先に分割・結合器から出射されたパルスをFirst pulse、次に出射されたパルスをSecond pulseと呼ぶ。

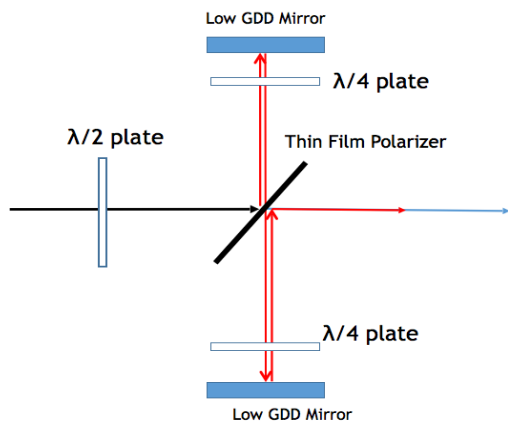


Figure 2 分割・結合器の概要

青色の矢印と、赤色の矢印は分割された後の2つのパルスを表している。TFPを透過したパルスは青色でFirst Pulse、反射したパルスは赤色でSecond Pulseである。

小信号利得について

Yb添加ファイバーの光増幅では、Yb³⁺イオンを励起光によって励起する。そのうち、上準位にある電子の誘導放出でシード光を増幅する。このファイバーにおける利得Gは以下のように求められる。

$$G = \exp\left(\frac{\{\sigma_e(\lambda_L) + \sigma_a(\lambda_L)\}\phi_P\tau P_{abs}}{A_{core}h\nu_P} - \sigma_a(\lambda_L)NL\right)$$

$$= 4.34\left(\frac{\{\sigma_e(\lambda_L) + \sigma_a(\lambda_L)\}\phi_P\tau P_{abs}}{A_{core}h\nu_P} - \sigma_a(\lambda_L)NL\right)[dB]$$

なお、このときの利得は、ファイバーの伝搬損失に関しては考慮していない。

計算によって求められた利得を表すグラフを(Figure 3)に示す。[2]

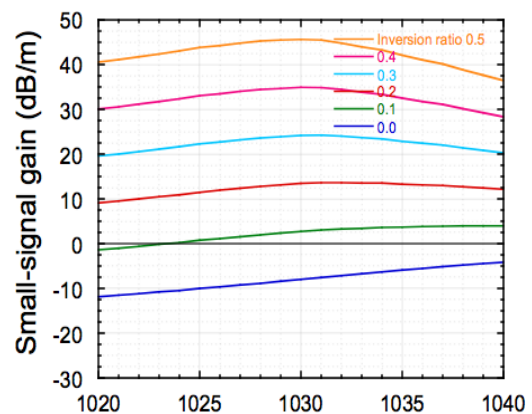


Figure 3 小信号利得スペクトル

本研究で使用している信号波長は1025~1035nmである。図より、低い反転分布率をもつときには長波長側と短波長側で約5 dBの利得の差があることが読み取れる。

実験

実験装置は全正常分散型モード同期共振器、プリアンプ、分割・結合器、メインアンプであり。それぞれを以下で説明する。

全正常分散型モード同期共振器

共振器にはリング型共振器である全正常分散型モード同期共振器を使っており、内部に波長フィルターと Yb 添加ファイバー (0.5 m) が使用されている。チャープと波長フィルターによるスペクトルの翼部分の除去を繰り返す。増幅において理想的であることが特徴である。共振器の具体的な図を (Figure 4) とする。共振器からはプリアンプに接続している。

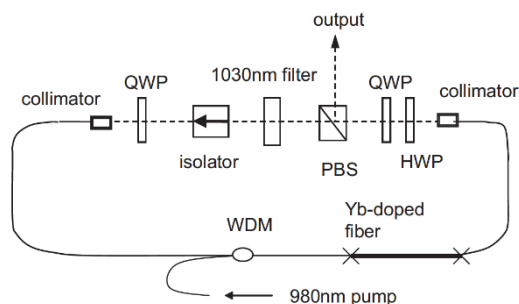


Figure 4 全正常分散型モード同期共振[3]

WDM: Wavelength Division Multiplex, HWP: Half Wave Plate, QWP: Quarter Wave Plate,

プリアンプ

Yb 添加ファイバー (1 m) でプリアンプとして共振器からのパルスを増幅している。プリアンプからは、光アイソレータをはさみ、分割器へ入射する。

分割・結合器

分割・結合器は (Figure 2) と同じ構造であり、光アイソレータを装置手前に配置している。以下、分割・結合器において HWP を

調整し、分割しない事を Single pulse mode、分割する事を Double pulse mode と呼ぶ。分割器からは、メインアンプへつながる。

メインアンプ

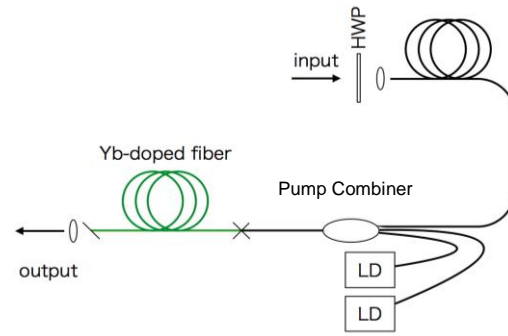


Figure 5 メインアンプ概要

Pump Combiner 前後のシングルモードファイバーは PM ファイバーを使用している。

メインアンプには PM ファイバーの Yb 添加ファイバー (3m) を使用し、以下、励起パワーは 2.3W としている。

Core	10 μm
Clad	1250 μm
NA	0.075
α	4.8 dB/m @976nm

Table 1 Yb 添加ファイバーの詳細

以上の装置と OSA (optical spectrum analyzer) とパワーメーターを用いてスペクトルの測定を行った。

結果

分割・結合器の入力スペクトルは (Figure 6) であった。

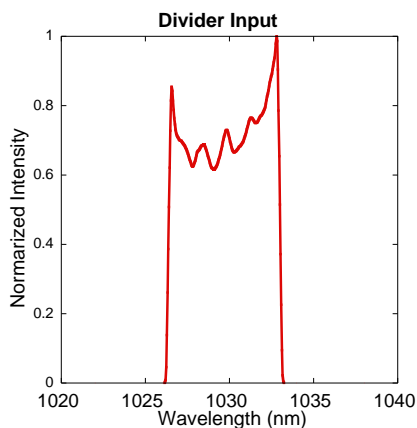


Figure 6 分割器入射スペクトル(13.5 nJ)

メインアンプ後のスペクトル測定の際、将来の励起パワーの上昇を考え、OSA 前に 1° のウェッジを設置している。まず、Single pulse mode でのメインアンプの Yb 添加ファイバー(3 m)でスペクトルの測定を行った。その際、短波長側におけるスペクトルの歪みが確認できたので、長手方向全域にわたる高い反転分布率を得る為にファイバー長を 1 m とした。3 m と 1 m のスペクトルは(Figure 8)であった。ファイバー長 3m のパルスエネルギーは 77.5nJ、1m では 23nJ だった。

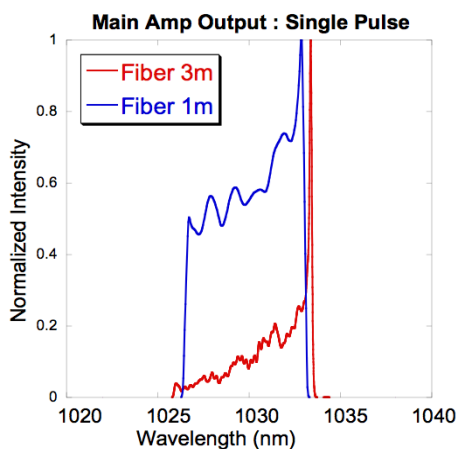


Figure 8 Single pulse のスペクトル
 スペクトルの短波長側の歪を少なくしたこ

とから、DPA に向けて Double pulse mode での First pulse と Second pulse のスペクトルを測定した結果が(Figure 7)である。

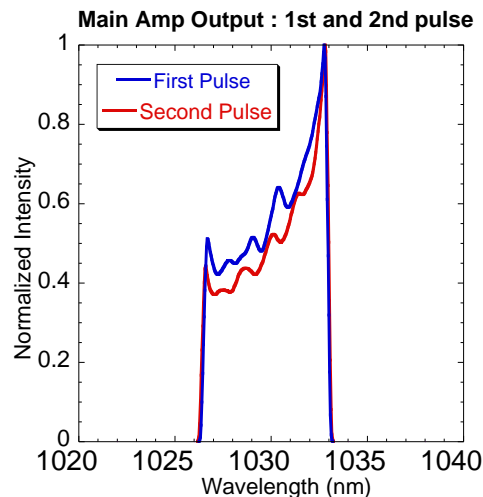


Figure 7 Double pulse でのメインアンプ出力
 First pulse: 12.5 nJ, Second pulse: 16 nJ

まとめ・今後の展望

ファイバー長を変えることで 1030nm ファイバー増幅器による増幅後の大きな歪を抑制することに成功した。しかし、増幅後のパルスエネルギーの低下がみられたので、DPA に向けて分割数の増加などを検討したい。そのためには、位相が揃っている事が必要となるので、FROG を使い評価を行いたい。

参考文献

- [1] Zhou, Shian, Frank W. Wise, and Dimitre G. Ouzounov. "Divided-pulse amplification of ultrashort pulses." *Optics letters* 32.7 (2007): 871-873.
- [2] 陳 明晨, “電気通信大学 修士論文”
- [3] Chong, Andy, et al. "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser." *Optics Express* 14.21 (2006): 10095-10100.