

# 分割パルスファイバー増幅 による超短パルスの高エネルギー化

白川 (晃) 研究室 徐エイ

## 研究背景

レーザーは媒体によっていくつかの種類に分けられる。固体レーザー、液体レーザー、気体レーザー、半導体レーザー、自由電子レーザーなどである。それらの技術に伴い、レーザーの応用分野も、情報・通信 (DVD、光ファイバー)、医療 (レーザーメス)、加工 (レーザー加工機)、科学 (計測、核融合) などへ広がっている。現状の上で、われわれはレーザーの高出力化研究に注目させた。ただし、レーザーの高エネルギー化を実現するのは簡単ではない。レーザーを増幅する際、非常に大きい熱を生じるため、冷却性が優れた増幅媒質を要求される。ファイバーの表面積と体積の比が非常に大きいので、放熱性が優れている。また、ファイバーが低損失、高利得、高ビーム品質、コンパクトの特徴を持っている。しかしコア径が小さいために、光増幅器の出力を大きくしすぎると、誘導ラマン散乱や誘導ブリュアン散乱などの非線形効果により信号波形劣化が発生する [1]。また、高いピークパワーを持つパルスを増幅するとき、利得媒質内の伝搬により非線形位相シフトを生じ、スペクトルの広帯域化やパルスの歪み、増幅器内の光損傷も引き起こす。これらの非線形光学効果の抑制については、これまで多くの研究がなされている。例えば、CPA (チャープパルス増幅) という技術がよく使われてきた。その他、ごく最近 DPA (divided pulse amplification) という、「分割パルス増幅」の技術が提案された。本研究では、「分割パルスファイバー増幅による超短パルスの高エネルギー化」を目指している。

## 原理

### DPA について

超短パルス増幅における非線形効果を避ける新しい手法として、分割パルス増幅 (DPA) という技術が提案された。分割パルス増幅の概念図を図 1 で示す。まず、一つのパルスが分割器へ入射され、N 個のコピーパルスになる。この分割操作によって、パルスのピークパワーを低くして増幅媒質へ入射する。分割パルスは増幅媒質で増幅されて、結合器に入射する。結合器は分割器の逆の仕組みを持ち、分割パルスが結合され、一つの高エネルギーを持つパルスになる。

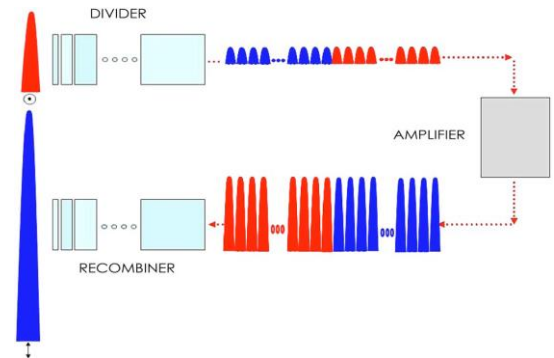


図 1、分割パルス増幅の概念図

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。

### 分割器について

研究で用いたパルス分割器 (また結合器) は、図

2 で示す。パルスはまず半波長板(HWP)を通過し、45度の入射角を持ち、薄膜ポラライザ(TFP)へ入射して分離されて、P偏光とS偏光になる。P偏光はそのまま通り抜けていくが、S偏光は反射される。反射されたS偏光は1/4波長板(QWP)を一回通過し、ミラーより反射されてもう一回QWPを通過する。ところで、S偏光がQWPを二回通過するので、S偏光からP偏光になり、TFPを通り抜ける。ミラーの間の距離を  $L$  としたとき、この二つのパルスは光路差分の時間差、

$$\Delta t = 2L/c \quad \text{式 1}$$

である。ここで、早いパルスが1stパルスとして、遅いパルスが2ndパルスとする。

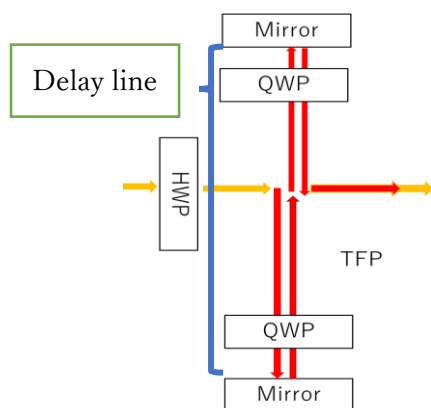


図2、パルス分割器(また結合器)

*QWP: Quarter-wave plate, HWP: Half-wave plate, TFP: Thin-Film Polarizer* 黄色矢印と、赤色の矢印はそれぞれ分割したパルスのそれぞれを表している。TFPを透過したパルスを黄色で1stパルス、反射したパルスを赤色で2ndパルスである。

分割されたパルスをそのまま利得光ファイバーで増幅する。その後、増幅された分割パルスを結合器で結合させる。分割されたパルスが結合器を

入射前に、半波長板で、1stパルスと2ndパルスの偏光状態を逆

にさせる。結合器のミラー間距離を調整することで、時間遅れが変化される。この時間遅れが分割器で生じた時間遅れと等しい時、分割されたパルスが結合でき一つのパルスになる。

### パルス圧縮について

回折格子対はモードロックレーザー共振器内の分散補償素子やCPAレーザーシステムのパルス圧縮器に用いられることが多い。回折格子対は正のチャープを持つパルスに対して異常群速度分散を与え、パルスを圧縮する。パルスが回折格子対を通過する様子が図14で示す。パルスは、平行な回折格子対の一方に入射する。周波数が異なる成分がそれぞれの回折角で回折される。図3の様に、回折格子対を通過するとき、波長が長い方の赤い線の光路が青い線より長い。正のチャープのパルス前端にある長波長成分が遅くなり、後端にある短波長成分が早くなることで、パルスが圧縮される。ただし、パルスのスペクトル成分が空間的に分散されてしまう。このため、一般的には光を反射させ回折格子対を通して元に戻す。

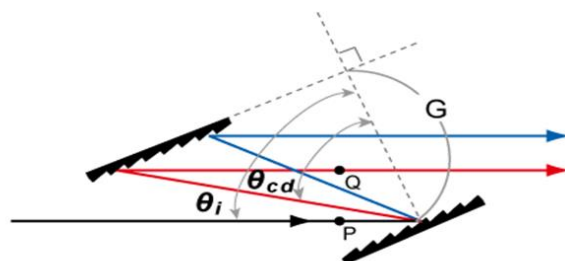


図3、回折格子対

赤,青の線が波長が異なる成分である。 $\theta_i$ が入射角であり、 $\theta_{cd}$ が回折角である。 $G$ は回折格子間の垂直距離である。

## 実験

実験の配置図は、図 4 で示す。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、メインアンプから構築されている。

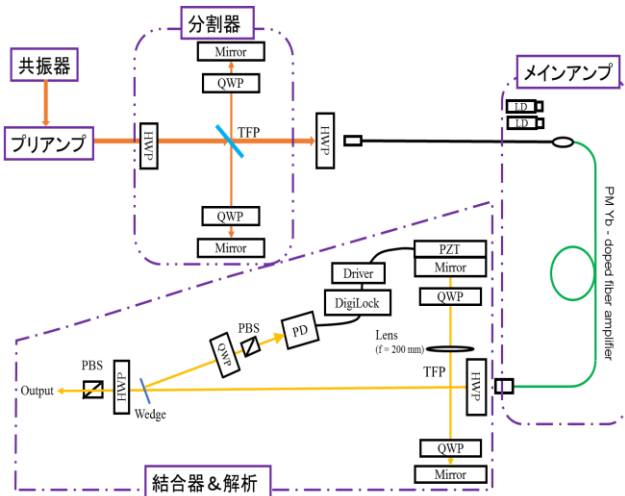


図 4、実験配置図

リング状全正常分散型モード同期共振器が発信器として使用されている。ファイバーが長さ 0.5 m の SMF (HI-1060) であり、励起には、波長 980 nm の励起 LD を使用し、ポンプパワーは 350 mW であった。中心波長 1030 nm 付近、モードロック発振時の帯域幅は約 10 nm で、パルス幅 40 ps でパルスエネルギー $\sim$ 2.7 nJ のパルスが生成された。繰り返し周波数は 20 MHz となる。

共振器からのパルスがプリアンプで増幅される。プリアンプから出たパルスが、分割器へ入射し、分割され、メインアンプへ入射する。メインアンプには長さ 1.8 m のシングルモード Yb 添加ファイバーが使用されている。メインアンプインプット側のファイバーと Pump Combiner から Yb 添加ファイバーまで使用しているファイバーは PANDA-fiber を使用している。このため、入力と出力の偏波状態は保持される。測定において、励起パワーがそれぞれ 2.30W、3.34W、4.38W、5.42W、6.46W

の状態ではパルスのエネルギーと結合率などを測定した。増幅されたパルスが結合器で結合する。1st パルスと 2nd パルスの伝搬距離が違うため、モードマッチングのため、レンズを結合器のディレイラインに入れた。出力されたパルスが高エネルギーなので、パルスの測定用の実験装置を保護するため、ウェッジを用いた。ウェッジ板を用いて減光した。ウェッジ板より反射された光を、パルスの測定で使用した。

## 結果

発振器よりの出力パルススペクトルは、図 5 であった、出力パルスのエネルギーが 2.7 nJ で、中心波長 1030nm、帯域幅 10nm であった。

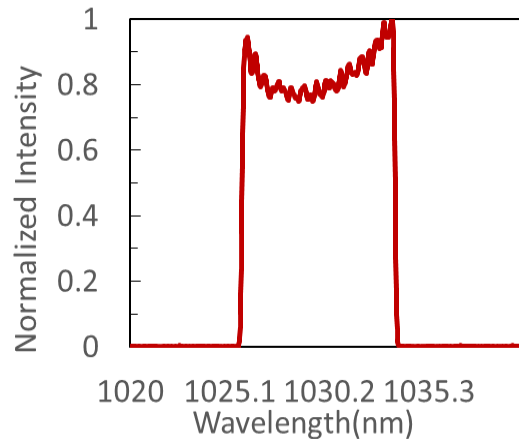
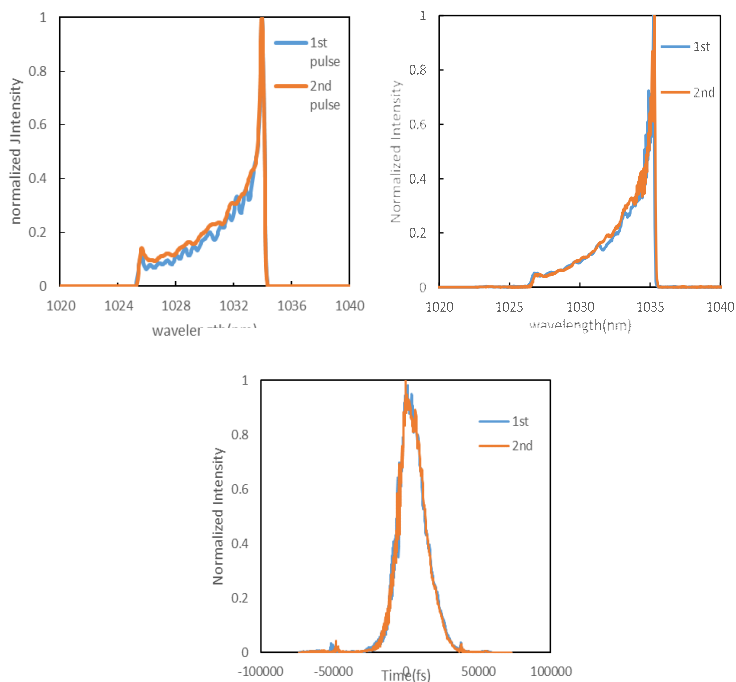


図 5、発信器出力スペクトル

図 6 は励起パワー $\sim$ 2.3w のパルス測定結果となる。図 a はスペクトルアナライザより得られたスペクトルである。図 b は FROG で再構築したパルスのスペクトルであり、図 c は再構築したパルス時間波形である。スペクトルアナライザで測定したスペクトルと FROG で再構築したパルスのスペクトルがほぼ同じ形をしている。

(c)

図 6、励起パワー $\sim$ 2.3w の実験結果



結合効率としてビジビリティを測定した。ビジビリティと出力パルスエネルギーの関係図を図7で示す。非飽和増幅状態で、出力パルスのエネルギーの増加に伴い、結合率が低下することを確認した。

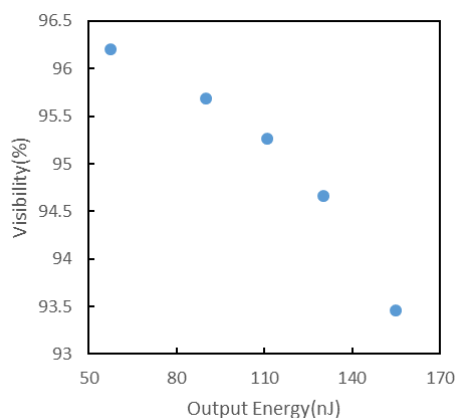


図7、結合効率と出力エネルギー

回折格子対を用いて、結合したパルスの圧縮を行った。励起パワー3.34wの結果は図8で示す。図aは、圧縮前のパルスの時間波形で、図bが圧縮後のパルスの時間波形である。回折格子対の距離が約16センチであった。

回折格子対の距離が約16センチであった。

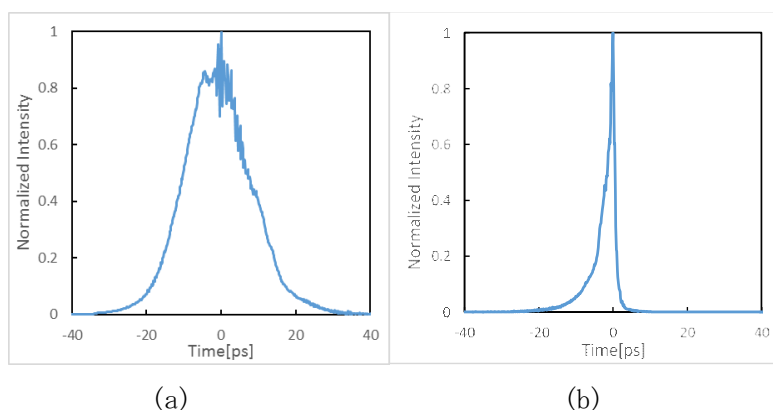


図8、回折格子対によりパルスの圧縮

## まとめと今後の展望

分割パルス増幅器(DPA)の構築、FROGを用いたスペクトル計測、出力パルスの結合率などの測定を行った。最大96.2%の結合率、エネルギー57.5nJの出力パルスを得られた。また、非飽和増幅状態で、結合率が出力パルスエネルギーの増加に伴い低下していくの結果が得られた。結合器の光学系の熱レンズにパワー依存性があるため、これが熱レンズによりモードミスマッチの可能性があると考えられる。また、パルスのエネルギー差において、パルスシェイピングによって増幅後のパルスのエネルギー差を抑制できたことが確認した。

今後の目標として、まず、出力高エネルギー化のためパルスの結合効率の向上が必要である。モードマッチの向上が解決方法の一つと考えられる。また、メインアンプ飽和増幅時の測定、パルスの圧縮、分割数の増加なども今後の目標である。

## 参考文献

[1]G. P. Agrawal, 「非線形ファイバー光学(原書第2版)」, 吉岡書店(1997).