

# 分割パルスファイバー増幅およびチャープパルス増幅による 高エネルギー超短パルス増幅特性

白川研究室 興石(杉本) 洸太

## 1 序論

ファイバーレーザーは高平均出力動作に非常に適している。それは利得媒質として用いる光ファイバーの表面積/体積比が大きく、冷却性能に優れているからである。さらに、シリカガラスで作られた光ファイバーは光を低損失で伝搬させることができる上に、利得媒質であると同時に導波路でもあるので、レーザーの横モードを制御できることや、長い距離に渡って相互作用が働くことによる、高ビーム品質、高利得といった利点もある。また、一般にファイバーレーザーはバルク形状の利得媒質を用いた共振器などに比べて配置の自由度が高く、光ファイバーを巻けば占有面積を小さくすることができる。

しかしながら、超短パルスレーザーが光ファイバーを伝搬する際には、空間的にも非常に狭く(典型的なシングルモードファイバーのコア径は10  $\mu\text{m}$  程度)、時間的にも非常に短い領域に高エネルギーを閉じ込めることにより誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱などといった非線形効果によるパルスの品質劣化 [1] やファイバーの損傷などが引き起こされ、問題となる。

これらの問題を抑制するためにチャープパルス増幅 (CPA) [2] と呼ばれる手法が用いられてきた。しかしこれにも回折格子等の素子の大きさやコストの観点からエネルギースケーリングの限界がある。そこで近年では新たなアプローチとして分割パルス増幅 [3] などの時間領域でのパルス結合が研究されている。

DPA では、1つのパルスを複数のパルスレプリ

カに分割し、増幅、および再結合させることでエネルギーおよびパワーの拡大を図っている。パルスレプリカどうしを再結合させる際には、それらの間の各種パラメータが整合していることが重要である。例えば、利得が飽和してパルスレプリカの間で増幅率が異なる場合、クラマース・クローニツヒの関係から受ける位相シフトも異なり、これが結合効率の低下を招くことが考えられる。本研究では、このような非線形光学効果が DPA の結合効率に与える影響を定量的に調査することを目的として実験を行なった。

## 2 原理

### 2.1 チャープパルス増幅

チャープパルス増幅 (CPA) の概念図を図 1 に示した。CPA は、パルスの延伸、増幅、分散補償の3段階に分けられる。初めに、シードパルスをストレッチャーにより時間的に延伸する。次にこの延伸されたパルスをファイバー増幅器で増幅するが、

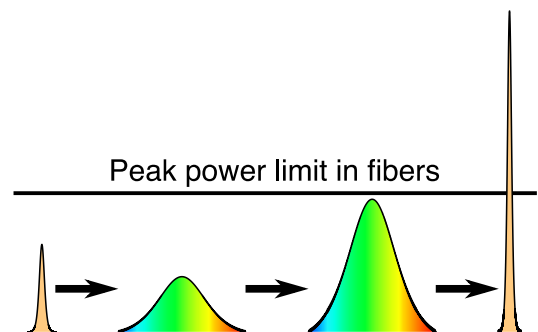


図 1 チャープパルス増幅の概念図。

この時ピークパワーがファイバー内のパワー限界を上回らないようにする．そして最後に分散補償によりパルスを再び圧縮することで，ファイバーのパワー限界を超えた高ピークパワー超短パルスを得ることができる．

分散を与える素子としては，回折格子やブラッグ回折格子などが用いられる．

## 2.2 分割パルス増幅

分割パルス増幅 (DPA) の概念図を図 2 に示した．DPA では，パルスを直交した偏光成分に分割する． $N$  個の分割器により，1つのパルスは  $2^N$  個に分割される．分割によりピークパワーの低下したパルスを増幅し，自由空間上で再結合させることでファイバーにおける非線形光学効果や損傷を抑制して高エネルギー・高ピークパワーパルスを得ることができる．

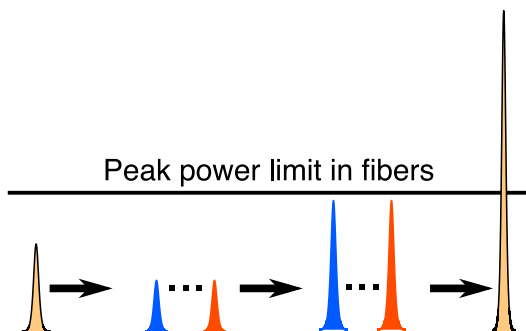


図 2 分割パルス増幅の概念図．

## 3 実験

### 3.1 実験系概要

光源として，全正常分散 (ANDi) 型モード同期発振器によるパルスを用いた．非線形偏波回転によりモード同期を得ており，中心波長 1030 nm，帯域幅およそ 9.5 nm，繰り返し周波数 20 MHz のパルスが出力された．発振器より出力されたパルスのスペクトルを図 3 に示した．

続いて，ポッケルスセルを用いてパルスを一定の間隔で間引くことにより繰り返し周波数を 400 kHz

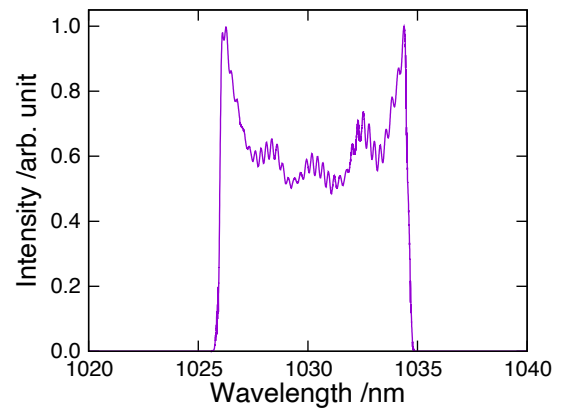


図 3 発振器出力スペクトル．

あるいは 200 kHz に低下させた．これには増幅後のパルスエネルギーを高める狙いがある．

パルスの延伸には体積ブラッグ回折格子 (VBG) を用いた．VBG により，パルス幅はおよそ 450 ps まで延伸された．

偏波保持型 Yb 添加ファイバーにて前置増幅した後，図 4 のような系で分割パルス増幅を行なった．増幅器には長さ 0.7 m，コア径 10  $\mu\text{m}$ ，飽和エネルギー 29.1  $\mu\text{J}$  の偏波保持型 Yb 添加ファイバーを用いており，これを中心波長 975 nm のファイバー結合型レーザーダイオード (LD) により前方から励起した．増幅器前のバンドパスフィルタ (BPF) には前置増幅器による ASE を遮断する役割がある．

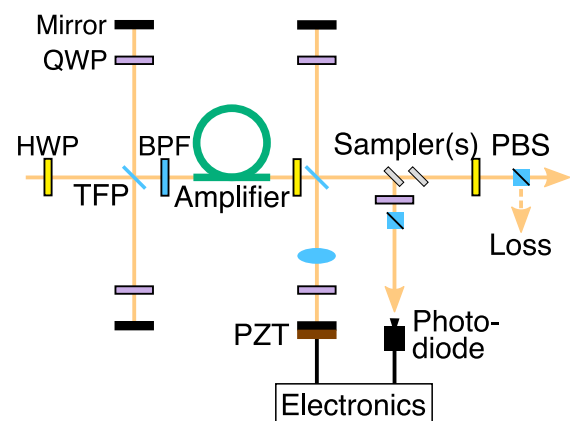


図 4 分割パルス増幅のセットアップ．

増幅器の前後に配置された遅延路によりパルスは分割および結合される．遅延路は薄膜偏光子

(TFP), 1/4 波長板 (QWP), 低群遅延分散鏡から構成されており, その長さは往復で 0.8 m である. 2 分割されたパルスをおシロスコープで観測した結果を図 5 に示した. 長さ 0.8 m の遅延路による 2.6 ns 相当の時間遅延を以ってパルス幅およそ 450 ps のパルスを明確に分割できたことを確認した. また, 大きくチャープしていることでスペクトルの構造が時間強度波形にも反映されていることも確認された. パルスレプリカどうしのパワーバランスは, 分割器遅延路の前に置かれた 1/2 波長板 (HWP) により入射する直線偏光の偏光方向を変えることで調整できる. 理想的には等分されるべきであるが, 実際に結合効率が最大となる分割比は必ずしもそうではない. これはパルスレプリカ間で増幅器のファイバーへの結合効率が異なることや利得飽和時には増幅率が異なることが原因である. したがってその時々で結合効率が最大となるような分割比で実験を行った.

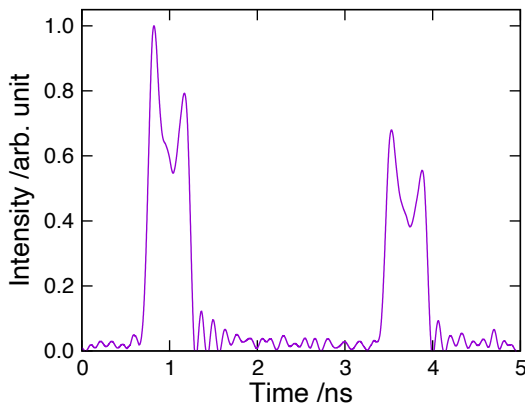


図 5 オシロスコープで観測した 2 分割パルス.

### 3.2 結合のロック

パルスレプリカどうしを再結合させるにあたってはそれらの時間軸での重なりが非常に重要である. そこで図 4 のように結合後のパルスの一部を取り出して結合器の遅延路長にフィードバックをかけた. ミラーのマウントされた piezo 素子 (PZT) に図 6 上部のような正弦波形状の電圧を印加すると, それに伴った遅延路長の変化によりフォトダイオードでは図 6 下部のような時間的干渉縞が観測

された. フィードバック光と出力光の間には  $\pi/2$  の位相差があるので, フォトダイオードで検出される光強度をこの時間的干渉縞の平均値でロックすることで最大の効率で出力することができる.

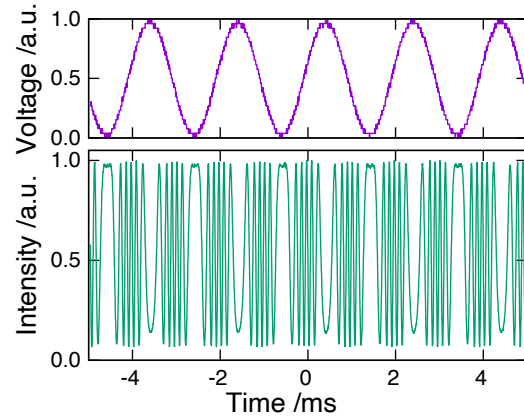


図 6 遅延路長を周期的に変化させた際の時間的干渉縞.

### 3.3 結合効率

DPA の結合効率として, 2 つの指標を考えた.

まず 1 つ目は, 明瞭度 (ビジビリティ)  $\eta_v$  である. これは図 6 のように遅延路長を変動させた時に観測される時間的干渉縞から計算される.  $\eta_v$  はフィードバック信号の最大強度を  $I_{\max}$ , 最小強度を  $I_{\min}$  として,

$$\eta_v = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

と計算される. この指標  $\eta_v$  では開口の小さいフォトダイオードの信号によって計算されるため, ビームサイズの不整合などから生じる波面の差異などは含まれず, その時の結合効率の上限を与える.

2 つ目は, パワー加算効率 ( $\eta_p$ ) である. これは増幅後の分割パルスパルスのパワーの和に対する結合パルスパワーの比で計算される. 結合パルスパワーを  $P_{\text{com}}$ ,  $N$  個に分割され, 増幅された時のそれぞれのパルスパワーを  $P_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) とすると,  $\eta_p$  は

$$\eta_p = \frac{P_{\text{com}}}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (2)$$

のように求められる。この指標は素子の損失やビームの差異などあらゆる要素を含んでおり、DPAの実用的な結合効率を与える。

VBGによりチャープさせた場合（パルス幅～450 ps）および VBG によるチャープを用いなかった場合（パルス幅～16ps）の出力パルスエネルギーに対する結合効率を図 7 に示した。

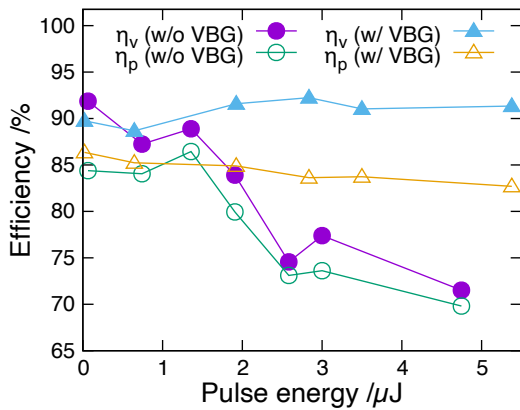


図 7 出力パルスエネルギーに対する結合効率。

VBG を用いなかった場合には、出力パルスエネルギーが高くなるに従って  $\eta_v, \eta_p$  ともに低下した。一方で、VBG によりパルス幅をおよそ 450 ps まで延伸させて DPA を行った場合には、 $\eta_v$  はおよそ 90%， $\eta_p$  はおよそ 85% で維持された。

この結合効率の低下の主な原因として自己位相変調 (SPM) が挙げられる。図 8 は、VBG を用いた場合と用いなかった場合の DPA における最大出力時のスペクトルを表している。スペクトルアナライザーへの入射強度が異なるので、強度は比較できない。VBG を用いなかった場合には、SPM によるスペクトル拡がりが見られたが、VBG によるパルスの延伸でこれを抑制することができた。

SPM が起きたとしても、パルスレプリカどうしで同等の SPM が起きているならば結合効率には影響しないはずである。しかし、強度の差や偏波保持ファイバーの軸間の有効屈折率の差などによりパルスレプリカ間で異なる SPM が生じ、これが結合効率を大きく低下させたと考えられる。

得られた出力パルスエネルギーは最大で 5.40 μJ

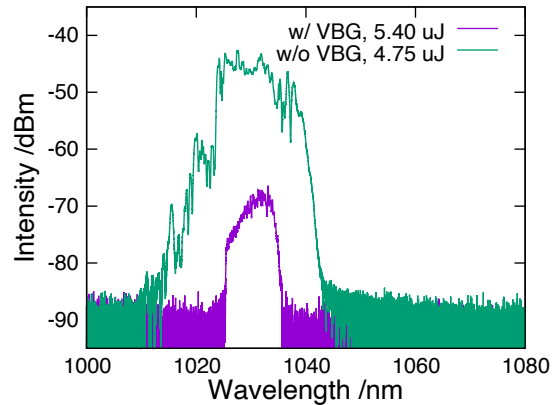


図 8 出力パルスエネルギーに対する結合効率。

であり、ファイバー増幅器の飽和エネルギー 29.1 μJ には達していない。これ以上のパルスエネルギーを得ようと励起強度を高くすると図 9 のように増幅器において発振してしまい、DPA の特性評価はできなかった。

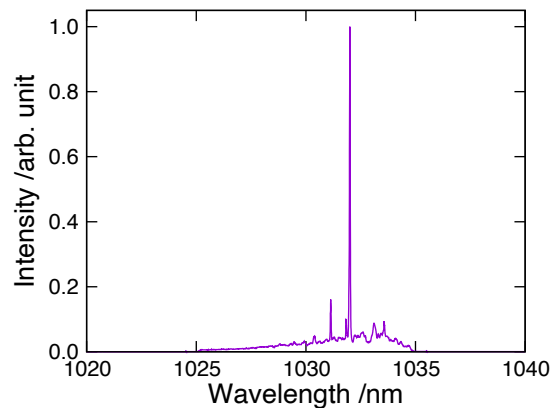


図 9 増幅器における寄生発振。

### 3.4 分散補償

図 10 に示したような格子密度 1750 lines/mm 回折格子対、ブレイズ波長 1050 nm の回折格子対を用いて分散補償を試みた。VBG による大きなチャープを補償するような負分散を与えるためには回折格子対およびミラーを往復する光の伝搬距離を数 m 程度と長くせねばならなかった。光の伝搬距離が長くなるとビームは拡がり、正常に回折格子対を往復できなくなってしまう。ビームの拡がりの影響はその径が大きいほど抑制できるので、焦点距離が 125 mm と -50 mm のレンズを用いて

ビームの拡大および平行化を試みた。これらのレンズは収差の少ないアクロマティックレンズを用いた。

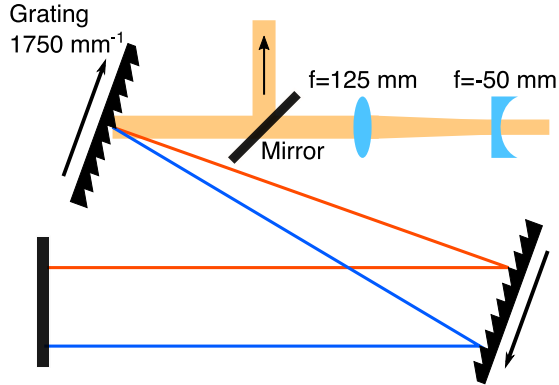


図 10 回折格子対による分散補償。格子密度: 1750 lines/mm, ブレーズ波長: 1050 nm.

しかし、図 10 のような系で適切な分散補償には至らなかった。そこで第 2 の方法として、VBG により分散を補償することを試みた。この時、VBG はプリアンプの前にパルスを延伸したものと同一のものを用いた。VBG に対して一方から光を入射させて正の分散を与えた時、逆の方向から入射させることで絶対値が等しく負の分散を与えることができる。実際には図 11 のような光学系を構築した。それぞれの方向で VBG の直前に QWP を置いて VBG の入射光と反射光とで偏光が 90° 回転するようにしたことで、PBS により往路と復路の光を分別することができた。

VBG の回折効率 は 93% で、プリアンプからメインアンプで増幅された光のうち一部は VBG を透過してしまう。この透過光が再びプリアンプへ入射すると、ループが生じ不本意なパルスの増幅や寄生発振が起こる可能性がある。そこでこれを回避するため、図 11 の VBG の左右にある QWP を 2 枚通ることで偏光が 90° 回転するような配置にした。すなわち、仮に VBG を透過してしまってもこれら 2 枚の QWP と PBS を通ることでこの光はプリアンプではなく発振器方向へ進み、発振器とポッケルセルの間にあるアイソレータでブロックさ

れる。

VBG による分散補償の後、さらに格子密度 1600 lines/mm の透過型回折格子を用いて発振器や増幅器による分散を補償した。その前に置かれた HWP は、回折効率が最大となるような偏光で入射させるための調整に用いられた。

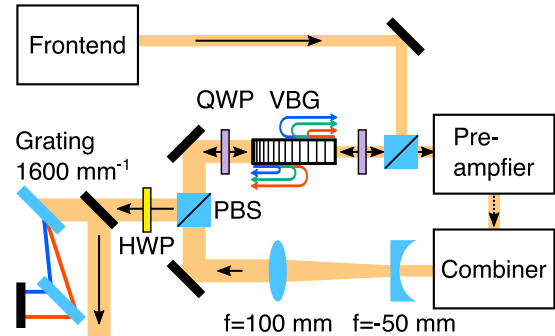


図 11 体積ブラッグ回折格子と透過型回折格子による分散補償。透過型回折格子の格子密度: 1600 lines/mm

図 11 の系で分散補償したパルスを周波数分解光ゲート法 (FROG) により計測、再構築した。FROG により再構築されたパルスの強度波形および位相を図 12 に、スペクトルおよび位相を図 13 に示した。フーリエ限界パルス幅がおおよそ 120 fs であったのに対して、FROG による再構築パルスのパルス幅は 427 fs であった。

図 14 は FROG の直前でスペクトルアナライ

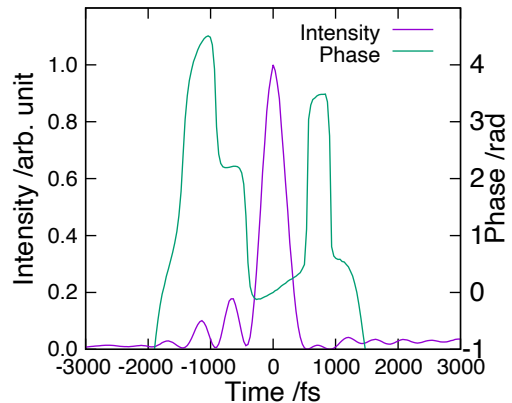


図 12 FROG により再構築されたパルスの強度波形および位相。パルス幅: 427 fs.

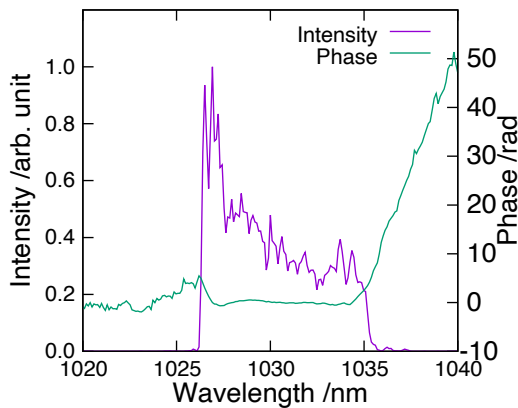


図 13 FROG により再構築されたパルススペクトルおよび位相。

ザーを用いて計測されたスペクトルである。図 13 と比較すると、FROG による再構築パルススペクトルは短波長成分が強くなっており、適切な FROG 計測および再構築ができていないことがわかった。これは VBG を用いた分散補償が不完全であったためであると考えられる。したがって、FROG を用いて分割パルスの結合効率と非線形位相シフトの関係を定量的に評価するには至らなかった。

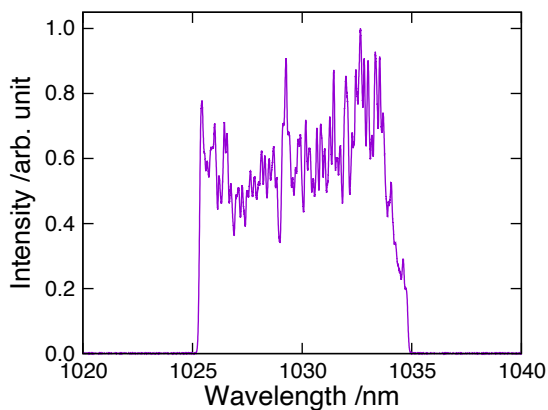


図 14 スペクトルアナライザにより計測された分散補償後のスペクトル。

## 4 結論

### 4.1 まとめ

本研究では、分割パルス増幅における結合効率と利得飽和等の非線形光学効果の関係を定量的に評

価することを目的として、分割パルス増幅およびチャープパルス増幅を併用した増幅実験を行った。出力パルスエネルギーが  $1 \mu\text{J}$  程度を超える高エネルギー状態の DPA では SPM が顕著に現れ、結合効率が低下した。そこで VBG を用いてパルス幅を  $450 \text{ ps}$  程度まで延伸し、ピークパワーを低下させたところ、SPM は抑制され結合効率は  $\eta_p$  でおおよそ 85% 程度に維持された。

FROG によるパルスの再構築を試みたが分散補償が不完全であったために満足に計測を行うことができず、非線形光学効果による位相シフトを定量的に計測することはできなかった。

### 4.2 今後の課題

本研究の目的である DPA における非線形光学効果の影響の定量的な評価を達成するために、以下のことが必要である。

まず、分散補償を最適化し FROG による計測および再構築を行うこと。分散素子をファイバブラッグ回折格子 (FBG) などに置き換えて同様の実験を行うことで今回の分散補償が不完全であった原因を明らかにし、改善する。

次に、さらに出力を増大させること。用いたファイバ増幅器の飽和エネルギーが  $29.1 \mu\text{J}$  であったのに対し、得られた最大のパルスエネルギーは  $5.40 \mu\text{J}$  であった。利得飽和による影響を観測するため、出力を増大させる必要がある。このために、増幅器における発振を防ぐために戻り光のない結合器の構築や、分割数のスケールリングを行う。

### 参考文献

- [1] アグラワール G P, 『非線形ファイバー光学: 原書第 2 版』, 物理学叢書, 吉岡書店 (1997).
- [2] D. Strickland and G. Mourou, *Optics Communications* Vol. **56**, No. 3, pp. 219–221 (1985).
- [3] S. Zhou, F. W. Wise, and D. G. Ouzounov, *Optics Letters* Vol. **32**, No. 7, pp. 871–873 (2007).