

分割パルスファイバー増幅における結合効率の研究

先進理工学専攻 白川 晃 研究室 岩田 興治

序論

高出力レーザーの実現のカギは冷却性能にある。ファイバーを用いたレーザーは、高い冷却性を持ち、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全体をコンパクトにすることが可能である。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。また、超短パルスレーザーの出力限界を定める非線形性に関しては、誘導ラマン散乱と自己位相変調が問題となる。非線形性の閾値上昇のためにはラージモードエリアファイバーが使われるが、この場合横モード品質が問題となる。非線形性はパルスの尖塔出力に応じて生じる為、尖塔出力を下げることでパルスファイバーレーザーの限界を超えることが可能である。現在、増幅時に超短パルスの尖塔出力を下げる手法として CPA(チャープパルス増幅)[1]が一般的である。CPA を用いると、パルスは分散によるチャープにより時間軸上で引き伸ばされる。引き伸ばされたパルスはスペクトルをそのままに増幅し、元の波形に戻るよう圧縮される。この技術により、増幅媒質中のパルスの尖塔出力を抑え、非線形効果を避けてパルスのエネルギーを増大することが可能となる。しかしながら、CPA は回折格子対を使用することから、回折格子の効率と回折格子を作製できる大きさによるパルスの延伸パルス幅の制限がある。これにより CPA を用いた超短パルスの高尖塔出力化には限界がある。この問題を DPA(Divided Pulse Amplification)と呼ばれる「分割パルス増幅」の技術を用いて解決することができる[2]。具体的には、DPA と CPA は組み合わせで CPA 単体での出力限界を超えた高強度のパルスを得る。CPA の限界までパルスの尖塔出力を下げたとき、パルスの尖塔出力はそれ以上上げることができないが、さらに DPA を行うことで実質 CPA 単体での限界を超えたパルス幅の引き延ばしが可能となり、尖塔出力を下げるができる。DPA を考える際に重要となるのがパルスの結合効率である。この結合効率が DPA 全体の効率を決めるからである。こういった中で、DPA の結合効率の上限を知ることは非常に重要である。本研究で DPA において超短パルスレーザーの非線形性が結合効率に与える影響を評価できる手法を開発し、結合効率の上限の算出を行った。

分割パルス増幅の原理

パルスの増幅器について考える。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。この技術は、パルスが増幅媒質を伝搬する際の尖塔出力を抑えることで、非線形効果を避けてパルスの強度を大きくすることが可能である。だが、CPA における超短パルスの引き伸ばしと圧縮を高効率で行うのは難しく、また回折格子の大きさによる引き延ばすパルス幅の限界や実験系の大型化などの問題がある。このような問題の中、パルスの高出力化には今現在も興味が集まっている。

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)と呼ばれる技術がある[2]。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 個のそれぞれ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パルスとなる。パルスを分割することで、パルスの尖塔出力を下

げる。これにより、CPA と同様の理由から高強度のパルスを得ることができる。DPA の中で重要となるのが、パルスを分割、再結合することである。

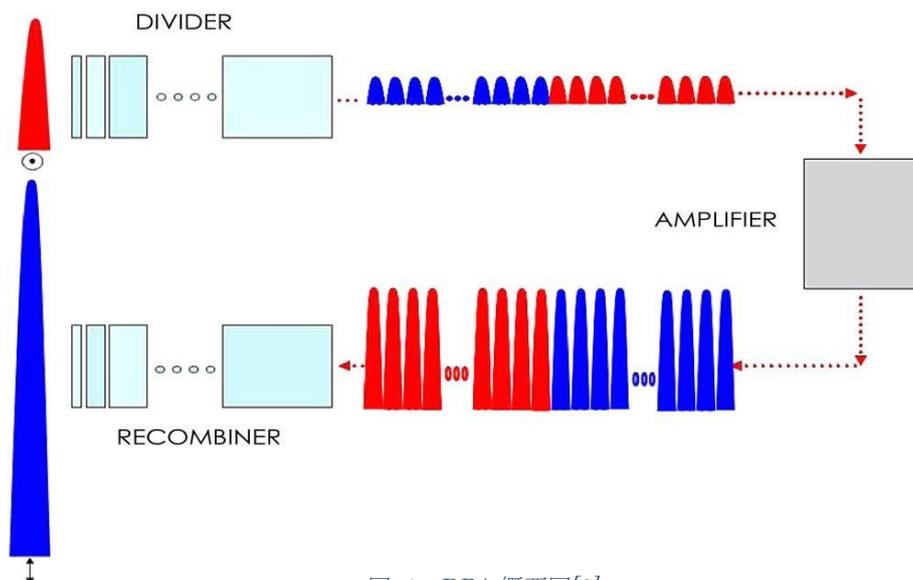


図 1 DPA 概要図[2]

本研究に用いられた分割器を図 2 に示す。HWP はパルスの偏波成分がポライザー(TFP)に対して 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 S 波は QWP を通り、ミラーに反射され、再び QWP を通る。この過程で、S 波は QWP を二回通ることになるので、S 波から P 波となる。P 波は TFP を通り抜け、先と同じ機構を通ることで S 波となり TFP で反射される。跳ね返った P 波は TFP に反射される。ミラーとミラーの距離を L とした時、この二つのパルスは光路差分の時間差、 $\Delta t = 2L/c$ 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。この、分割を行うミラー対のことを、今後はアーム、もしくは遅延路と呼ぶことにする。図 2 中の青色の矢印と、赤色の矢印は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青色で 1st Pulse、反射したパルスを赤色で 2nd Pulse としている。

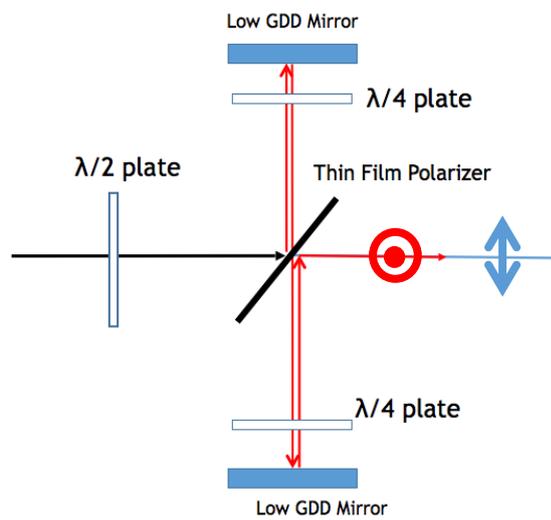


図 2 分割器概要

パルスの結合時、それぞれのパルスが分割時のように同一エネルギーである必要がある。増幅器内で 1st, 2nd パルス間での利得の競合がある場合、それぞれのパルスは同一でなくなってしまう。同一でない場合、パルスの結合が成功しても効率が大幅に減少する。この問題を解決するためには、増幅後の出力パルスエネルギーを同一にする必要がある。そのためには分割器での 1st, 2nd パルスのエネルギーバランスを 1:1 でなく、2nd パルスにエネルギーの比重を置くことでエネルギーをそろえることが可能である。また、増幅に従って 1 次の位相シフトが生じた場合には図 2 のミラーに PZT 素子をマウントすることで制御する

ことが可能である。結合器へマウントした PZT 素子にはフォトディテクターで検出した誤差信号から DigiLock を用いた PID 制御により PZT へ電圧を与えてミラー間隔をロックする。これによりパルスの最大出力を得る。

実験装置

本研究での実験系概要を図 3 に示す。

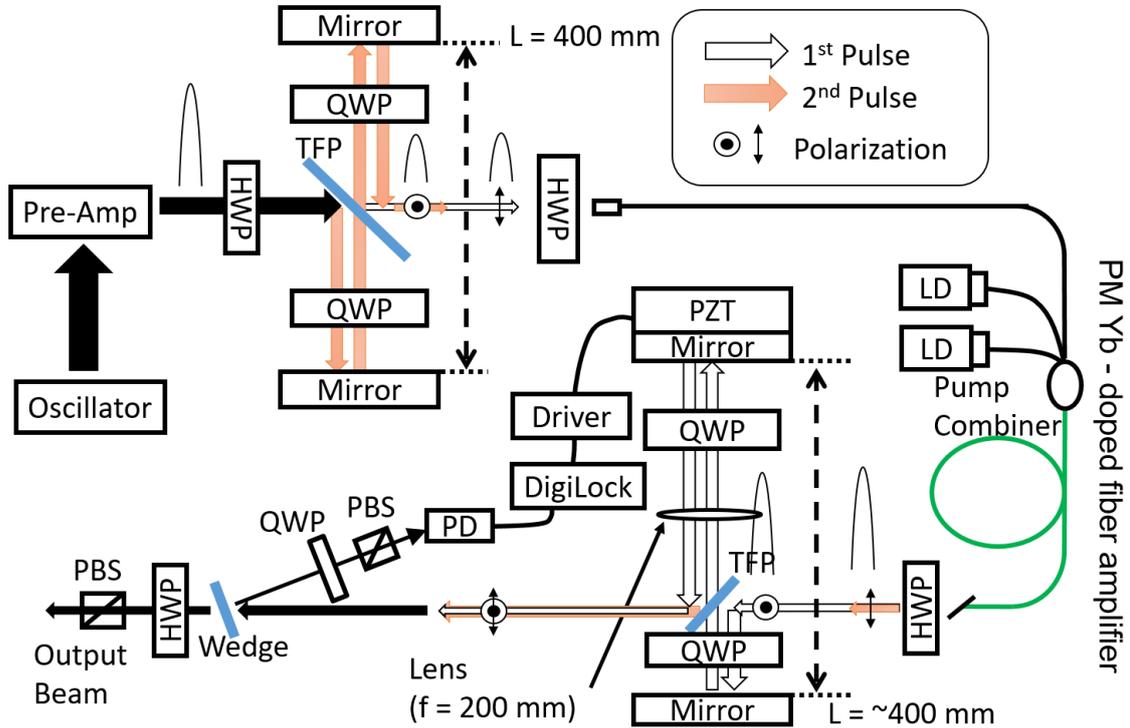


図 3 実験系概要図

共振器には全正常分散型モード同期共振器を使用した。共振器に使用したシングルモード Yb 添加ファイバーは、コア径 = $6 \mu\text{m}$ 、 $NA = 0.11$ 、 $MFD = 7.5 \mu\text{m}$ 、 $\alpha = 250 \text{ dB/m @ } 975 \text{ nm}$ 、クラッド径 = $125 \mu\text{m}$ である。励起パワーは 450 mW パルスのエネルギーは 2.7 nJ で、パルス幅は 40 ps 、繰り返し周波数は 20 MHz 、中心波長は 1030 nm である。前置増幅器にはコア径 = $6 \mu\text{m}$ 、 $NA = 0.11$ 、 $MFD = 7.5 \mu\text{m}$ 、 $\alpha = 250 \text{ dB/m @ } 975 \text{ nm}$ 、クラッド径 = $125 \mu\text{m}$ の偏波保持 Yb 添加ファイバーを利得媒質として使った。前置増幅後パルスエネルギーを 13.7 nJ まで増幅した。分割器には、上述したように、ミラー対を用いてパルスを分割した。ミラー対の間隔は 400 mm である。この時のパルスの遅延時間は $\Delta t = 2L/c = 2.6 \text{ ns}$ となる。パルス幅が 40 ps であるから、パルスの分割にはパルスの裾が重ならない十分な遅延時間を与えられている。分割器前にはアイソレーターを設置し、前置増幅器への戻り光を防いでいる。主増幅器はすべて偏波保持ファイバーを使用しており、利得媒質には Yb 添加ファイバーを用いた。ファイバー長は 1.8 m 、 MFD は $6 \mu\text{m}$ 、コア $NA=0.15$ 、クラッド径 $125 \mu\text{m}$ 、クラッド $NA=0.48$ 、吸収係数は 976 nm で $\alpha = 2.6 \text{ dB/m}$ である。主増幅器の LD にはそれぞれ同じ直流源から直列に接続されている。本 LD はファイバーカップルド LD で中心波長が 975 nm 、ファイバーのコア径は $110 \mu\text{m}$ 、 $NA=0.13$ である。その後結合器を設置した。ミラー対の間隔は分割器と同一の 400 mm である。分割器と違い、モードマッチングの為にミラー対の間には $f = 200 \text{ mm}$ のレンズを挿入している。また、パルスのもつ 1 次の位相シフトを補償し、能動的な結合を可能とする為にミラー対の片方は PZT 素子をマウントしている。PZT 素子にかかる電圧によりミラー対の間隔を変えることができる。フォトダイオードを使ってウェッジではじいた参照光を検出し、フィードバック

制御を行っている。フォトダイオードは Digilock と接続しており、検出される誤差信号を用いて複雑な回路を必要とせずに最適なミラー対間隔を決定できる。また、1st 2nd 双方のパルスが同一の光路を通るよう、ミラー対の調整が必要である。

パルスのロック

分割と同様の理由から、パルスの結合を行うためには、ミラーのアライメントをし、結合器から出力された 1st, 2nd 双方のパルスが同一の光路を通る必要がある。この状態で結合器の PZT 素子へ正弦波電圧を与えると、フォトディテクターでは図 4 の青線で見える縞を確認できる。これは、二つのパルスが、同位相および反位相状態を繰り返していることを表している。この縞の鮮明度から結合効率を算出したが、この結合効率には、光学素子による損失は含まれていない。線形のロスミラー対通過後で 89%であった。パルスのロックには Digilock を用いた PID 制御をしており、上述した鮮明度

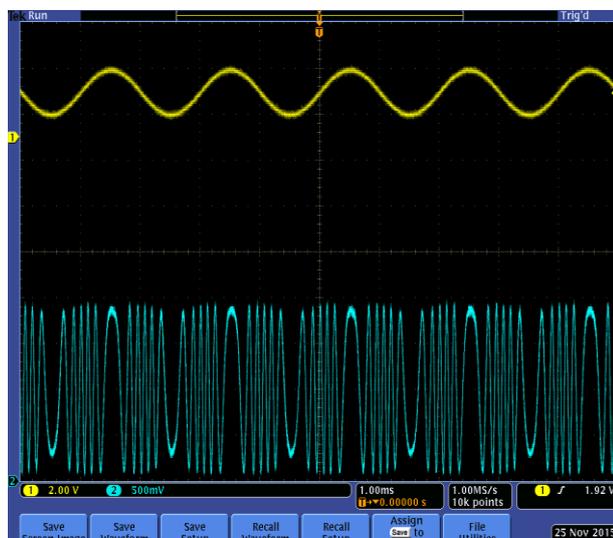


図 4 フォトディテクターへかけた電圧(黄)と鮮明度(青)

の間でロックをかけている。これは、参照光は QWP を、出力光は HWP をつかって結合パルスを取り出しているためである。HWP は P 波と S 波(1st と 2nd パルス)の間に π の位相差を与え、QWP は $\pi/2$ の位相差を与える。つまり、二つの波長版から出力されるパルスの間には実質 $\pi/2$ の位相差があることになる。ここで、参照光に注目すると、図中青線の鮮明度の山から山、もしくは谷から谷はパルスの結合と遅延路の変化によって 1st, 2nd パルス間の位相差が 2π 回っていることを表していることがわかる。山から谷の間は位相が π 回っているから、この中間の $\pi/2$ でロックをかける。すると、参照光と、出力光の間には実質 $\pi/2$ の位相差がある為、 $\lambda/2$ 板と PBS で組み合わせた出力ポートからは、参照光における青線の山、もしくは谷が出力されることとなる。山の時のパルスも谷の時のパルスも、広義には結合パルスと呼べるが、本研究では基本的に山の時のパルスを結合パルスとしている。この干渉縞から観測される大きな構造(結合の揺れ)はフォトディテクター入射時の 1st, 2nd パルスのビームの軸がずれていることが原因である。最適なアライメントがなされるとこの大きな山なり構造は観測されず、それぞれの山、もしくは谷が平坦になる。

結合実験結果

主増幅器にて 6.5 W 励起したパルスのスペクトルと FROG[3]から再構築したスペクトルと時間波形を図 5 に示す。

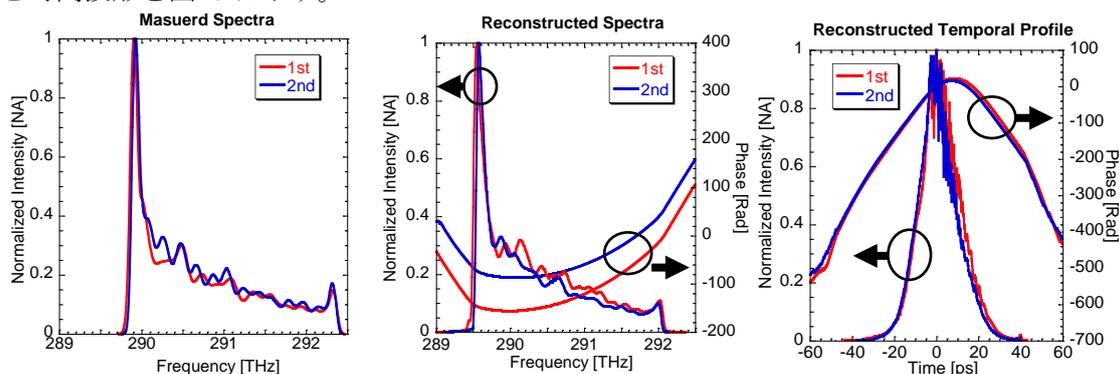


図 5 OSA でのスペクトル(左)、FROG から再構築したスペクトル(中)と時間波形(右)

FROG によって得た電界情報と位相情報を組み合わせ、結合パルスを求めた。FROG の結果による振幅、位相の情報を $A(\omega) = |A(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}$ とする。結合効率の算出に当たり、 φ の情報が重要となる。ここで、 $\varphi(\omega)$ を多項式でのフィッティングを行い、0 次、1 次、2 次、3 次、4 次、 \dots 、 n 次の位相項と、低次から高次の位相情報を求める。求めた位相情報から、位相の絶対値である 0 次の位相項と線形変化を表す 1 次の位相項を除く。これは、0 次の位相項は結合器、分割器の遅延路を制御可能であることと、結合器に PZT 素子を使っているため、一次の位相の線形変化も補償可能であるからである。これら高次の項を θ' とすると、高次の位相情報を除いた FROG の結果は $A(\omega)' = |A(\omega)|e^{i\varphi(\omega)'}$ となる。1st パルスの FROG 結果を A_{1st} 、2nd パルスを B_{2nd} とし、それぞれ同様の処理を行うと $A(\omega)'_{1st} = |A(\omega)|e^{i\varphi(\omega)'_{1st}}$ 、 $B(\omega)'_{2nd} = |B(\omega)|e^{i\varphi(\omega)'_{2nd}}$ となる。1st, 2nd それぞれのパルスを複素平面上で足し合わせたものを $ADD(\omega) = A(\omega)'_{1st} + B(\omega)'_{2nd}$ とする。複素平面上で引きあつたときのもはロス $SUP(\omega) = |A(\omega)'_{1st} - B(\omega)'_{2nd}|$ とする。それぞれを振幅と位相情報に戻し、振幅を 2 乗し強度にしたものを結合パルスとしている。結合効率は、パルスのエネルギーをもとに

$$\text{Combining Efficiency}_{\text{Calculated}} (\%) = \frac{\int ADD(\omega)_{\text{intensity}} d\omega}{\int ADD(\omega)_{\text{intensity}} d\omega + \int SUP(\omega)_{\text{intensity}} d\omega} \quad \text{数式 1}$$

としている。

また、実験時の結合効率はフォトディテクターの縞(エラー! 参照元が見つかりません。)から結合効率を以下のように算出している。

$$\text{Combining Efficiency}_{\text{Experimental}} (\%) = \frac{I_{\text{MAX}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}} \quad \text{数式 2}$$

次に、ロックした際の結合パルススペクトルと計算によって求められた結合パルスのスペクトル、最後にそれぞれのエネルギーにおける結合効率を図 6 示す。

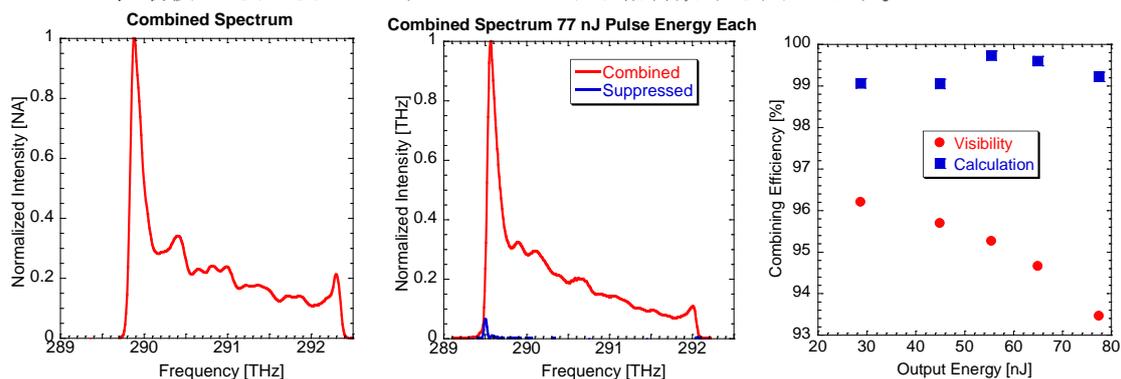


図 6 OSA での結合パルススペクトル(左)、FROG から計算した結合パルスとロスとなったパルスのスペクトル(中)、エネルギー対鮮明度から算出した結合効率と計算による結合効率(右)

FROG による計算においては、パルスエネルギーの増加に伴う結合効率の低下がみられなかった。鮮明度測定の実験中、励起パワーの増加に伴い、結合効率の大きな低下がみられたが、これはミラー対間隔のアライメントや、上述したように分割器でパルスのエネルギー比を 1:1 からずらすことによって克服している。パルスを増幅し、1st 2nd それぞれのパルスエネルギーが 28 nJ のとき、鮮明度による結合効率 96% を測定した。増幅器での励起エネルギーを上げ、個々のパルスエネルギーが 78 nJ の時、鮮明度による結合効率は 93% であった。また、1st 2nd パルスを FROG で測定し、位相情報を求めた。それぞれの振幅、位相情報から結合効率 99% を算出した。パルスエネルギーの増加に伴う結合効率の低下は確認できなかったが、実測では 3% 強の結合効率の低下がみられた。これは、光学素子によ

る熱レンズの影響であると考えている。1st パルスが結合器の遅延路を通る際、熱レンズ効果によってモードが変化してしまう。これが 1st パルス、2nd パルス間のモードミスマッチとなる。結合に関して、波面の重なりが重要であることが分かり、モードマッチングに細心の注意を払う必要がある。算出による結合効率が低下しなかったことから、本実験では飽和エネルギーから十分低い状態での増幅であるため、パルスの結合に影響する非線形位相シフトが生じなかったことがわかった。

結論

DPA における非線形性探求の為、分割パルス増幅器の開発を行った。未だ課題が残るものの、共振器の安定化や結合器のミラーとミラー対間隔の最適化、主増幅器へのカップリング、結合器の構築、そして FROG でパルスを測定し、その位相情報から結合効率を算出した。さらに、結合器に PZT 素子をマウントすることでパルス結合の電氣的制御と、増幅器内で生じる 1 次の位相シフトを補償可能にした。また、結合器内の遅延路を変化させることでパルス結合の鮮明度を得、この縞から実験上の結合効率を求めた。

1st 2nd それぞれのパルスエネルギーが 28 nJ のとき、鮮明度による結合効率 96%を測定した。増幅器での励起エネルギーを上げ、個々のパルスエネルギーが 78 nJ の時、鮮明度による結合効率は 93%で結合パルスのエネルギーは 125 nJ であった。結合器の線形ロスが 89%であった為、ここから正味の結合効率は約 83%であることがわかり、これはパルスエネルギーから求められる効率($125 \text{ nJ} / (2 \times 78 \text{ nJ}) = 80\%$)とほぼ一致する。また、1st, 2nd パルスを FROG で測定し、位相情報を求めた。それぞれの振幅、位相情報から結合効率 99%を算出した。再構築されたデータから算出した結果、パルスエネルギーの上昇に伴った結合効率の低下は見られず、横ばいであった。これから飽和エネルギーから十分低い現状の非飽和増幅では、パルスの結合に影響を及ぼすほどの非線形位相シフトが生じていないことがわかった。一方で、縞の鮮明度から求めた結合効率の低下から、結合器内の遅延路での熱レンズによる波面の乱れが生じていると考えられる。

本研究の今後の展望として考えられることは、変調器を用いた低繰り返し周波数化による飽和増幅時の結合効率のダイナミクスの探求や、全正常分散型の共振器を使用していることを利用した、超短パルスを得る為のパルス圧縮が挙げられる。もし、飽和増幅によって結合効率の大きな低下を確認した場合、パルスの分割数の増加を行うことで結合効率の向上を目指す。また、実験中に大きな課題となり、非常に難しく、かつ不安定であったのはパルスの結合に用いている結合器のミラー対のアライメントである。常にこの研究で問題となり、かつ結論に直結するものは波面の一致である。計算による結合効率が 99%であったときに、鮮明度では結合効率の若干の低下が確認した。アライメントの最適化による結合効率のさらなる向上は常に期待できる。

参考文献

- [1] Strickland, Donna, and Gerard Mourou. "Compression of amplified chirped optical pulses." *Optics communications* 55.6 (1985): 447-449.
- [2] Zhou, Shian, Frank W. Wise, and Dimitre G. Ouzounov. "Divided-pulse amplification of ultrashort pulses." *Optics letters* 32.7 (2007): 871-873.
- [3] Trebino, Rick, et al. "Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating." *Review of Scientific Instruments* 68.9 (1997): 3277-3295.