

分割パルス増幅の分割数スケーリングの検討

白川晃 研究室 吉澤和希

1 序論

レーザー(Laser)とは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation(誘導放出による光増幅放射)の頭文字をとったものであり、指向性と集束性に優れたほぼ単一波長の電磁波(コヒーレント光)を発生させる装置である。また、その中でもファイバーはその構造から高冷却性能、高ビーム品質、高利得等の性能を発揮することができ、ファイバーレーザーは高平均出力レーザーに適していると言える。しかし、高いピークパワーを持つパルスをファイバーによって増幅させる場合は非線形効果やファイバー自体の損傷が問題になってくる。このような問題を解決する手法として、パルスを増幅前に一度低ピークパワー化することでこれらの問題を抑制する、チャープパルス増幅や分割パルス増幅が挙げられる。

本研究では、先行研究であった2分割での分割パルス増幅とチャープパルス増幅を用いた高エネルギー超短パルスの発生[1]の結果を踏まえ、分割パルス増幅の分割数を4に増やし、さらなる超短パルスの高エネルギー化を図る。

2 原理

2.1 チャープパルス増幅

チャープパルス増幅のシステム構成を図 2.1 に示す。CPA は、共振器から出射されたレーザー光のパルス幅を、チャープファイバーブラッググレーティング(CFBG)や回折格子などのパルス

ストレッチャーで遅延路分散を与え、一旦パルスを延伸し、非線形効果を抑制した上で、再びCFBG や回折格子などを使ったパルスコンプレッサーでパルスストレッチャーで与えた分散の逆符号の分散を与え、パルスを圧縮し、高出力の超短パルスを得る。

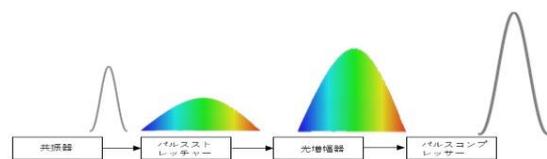


図 2.1 チャープパルス増幅のシステム構成

2.2 分割パルス増幅

分割パルス増幅(DPA)の基本的なシステムの構成を図 2.2 に示す。DPA は、発振器から出されたパルスをパルス分割器によって1つのパルスを複数個のパルスに分割し、分割されたそれぞれのパルスを非線形効果が問題にならない程度まで増幅したあと、パルス結合器によって再びパルスを1つにして高出力超短パルスを得る。[2]パルス分割器において、パルスは偏光状態によって分割され、p 偏光、s 偏光によりそれぞれ異なる経路を進行する。

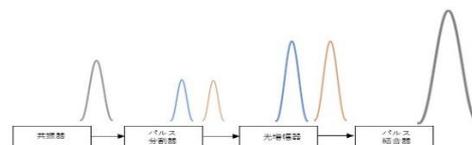


図 2.2 分割パルス増幅法のシステム構成
パルスを分割、再結合する手段として、薄膜偏光

子(TFP)を用いる場合がある。TFPを用いたパルス分割器、結合器の模式図を図に示す。まず入射されたパルスの偏光成分の p 偏光と s 偏光の比を任意で決め、1/2 波長板(HWP)で調整する。このパルスの p 偏光成分は TFP を透過し、1st パルスとなる。一方、TFP で反射した s 偏光成分は、図のミラーで反射する方向に遅延路を辿り、合計 1/4 波長板(QWP)を 4 回透過する。4 回透過した s 偏光成分は、再び TFP で反射され 2nd パルスとなる。このとき、2nd パルスは 1st パルスに対して

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \quad (2.1)$$

だけ遅れが生じる。ここで、L は遅延路におけるミラー間の距離、c は光速度である。

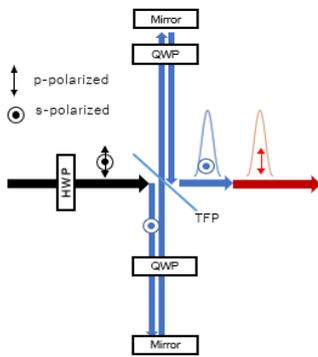


図 2.3 パルスの分割

また、結合器でパルスを再結合する際のパルスの模式図を図 2.4 に示す。

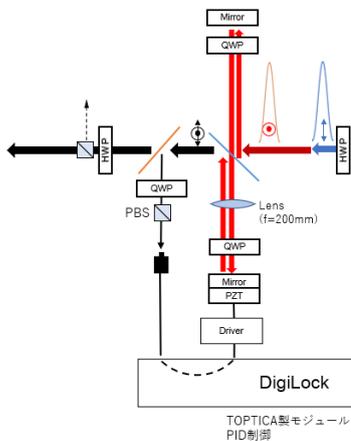


図 2.4 パルスの再結合

結合器は図 2.4 のような構成になっており、

HWP により 1st パルスと 2nd パルスの偏光を変え、PZT への正弦的な印加電圧によるパルス同士の時間的干渉縞をフォトディテクターとオシロスコープで検出し、それを用いて、PID 制御によって分割する際の遅延路長と結合する際の遅延路長を一致させ、位相をロックしている。

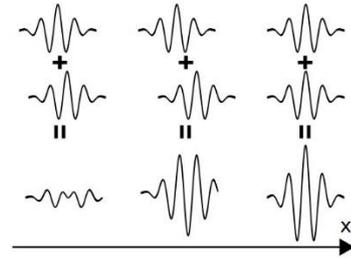


図 2.5 パルスのビーム結合

上にパルスがビーム結合する様子を示した図 2.5 を載せる。パルスの結合は波の重なりであるので、遅延路によってパルス同士の位相がずれてしまうと結合効率が低下してしまう。左 2 つは位相の異なるパルス同士の結合を表しており、右の理想的なパルスの重なりにより結合されたパルスと比べると大きく結合効率が下がっていることが分かる。故に、パルスの結合にはパルスの位相の一致、すなわち分割器と結合器の遅延路の一致が重要である。

2.3 LOCSET

LOCSET 法[3]は、外部参照ビームを必要としない最初のフェーズのアレイロックシステムであり、自己参照型 LOCSET と自己同期型 LOCSET がある。これらの技術では、アレイ素子(パルス)に固有の RF(Radio Frequency)周波数で位相変調を行い、個々のパルスが重なり合う際の干渉によって発生する RF ビートによって生み出される個々の位相変調されたパルスの位相誤差信号を使う。その位相誤差信号は各素子ごとに LiNbO3 位相変調器にフィードバックされ、その素子の位相誤差を最小にすることで、位相ロックを達成する。以下に、LOCSET の基本理論を提示する。

無変調場と位相変調場が平面波、同一偏波であると仮定すると、無変調素子光場 $E_u(t)$, i 番目のアレイ素子光場 $E_i(t)$ は以下ようになる。

$$E_u(t) = E_{u0} \cdot \cos(\omega_L \cdot t + \varphi_u) \quad (2.2)$$

$$E_i(t) = E_{i0} \cdot \cos(\omega_L \cdot t + \varphi_i + \beta_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t)) \quad (2.3)$$

ここで、 E_{u0} 、 E_{i0} はそれぞれ非変調素子と第*i*位位相変調素子の電界振幅、 ω_L はレーザー周波数、 φ_u 、 φ_i はそれぞれ非変調素子と*i*番目のアレイ素子の光位相、 β_i は*i*番目のアレイ素子の位相変調振幅、 ω_i は*i*番目のアレイ素子のRF変調周波数を表す。

光検出器上で重なった光電場によって光検出器に流れる光電流を3つの項に分けると、無変調電場の自己ビート電流項、無変調電場と位相変調電場のビートによる光電流項、位相変調電場同士のビートによる交流光電流項はそれぞれ以下のようになる。

$$i_{u2}(t) = R_{PD} \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot E_u^2(t) \quad (2.4)$$

$$i_{uj}(t) = R_{PD} \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot 2 \cdot E_u(t) \cdot \sum_{j=1}^N E_j(t) \quad (2.5)$$

$$i_{ij}(t) = R_{PD} \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \left(\sum_{i=1}^N E_i(t) \right) \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N E_j(t) \right) \quad (2.6)$$

R_{PD} 、 A はそれぞれ光検出器の応答性、面積。

このとき、先の式(2.2)(2.3)をこれらに代入し、光検出器が追従できない光周波数項を無視すると無変調電場の自己ビート電流項(式2.4)はRF周波数による振動項を持たず、これより先の議論に不適である。

また、ここで無変調光に対する*i*番目の光の位相誤差信号 S_{uic} は

$$S_{uic} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau i_{PD}(t) \cdot \sin(\omega_c \cdot t) \cdot dt \quad (2.6)$$

で表され、これに式(2.5),(2.6)を代入し、すべての*lj*について $\omega_c = \omega_i$ 、 $\tau \gg 2\pi/|(\omega_i - \omega_j)|$ とすると、*i*番目の光の位相制御信号は

$$S_{SRI} = R_{PD} \cdot \sqrt{P_i} \cdot J_1(\beta_i) \left(\begin{array}{l} \sqrt{P_u} \sin(\varphi_u - \varphi_i) \\ + \sum_{j=1}^N \sqrt{P_j} \cdot J_0(\beta_j) \cdot \sin(\varphi_j - \varphi_i) \end{array} \right) \quad (2.7)$$

この自己参照型LOCSETの位相制御信号式(2.7)をフィードバック制御ループで用いることにより、コヒーレントビーム結合をすることができる。

3 設計した実験系

従来の実験系から分割数を2分割から4分割にする上で、次のように設計した。ここで、設計した実験系の概要図を下の図3.1に示す。

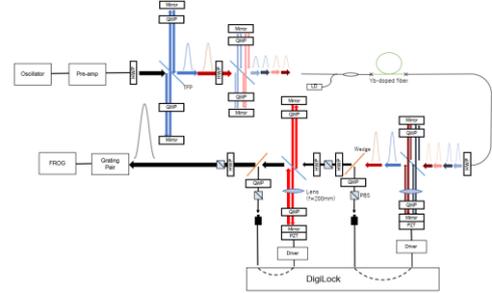


図 3.1 4分割DPA実験系

このとき、1つ目の分割器のミラー間の距離は約40.15cm、2つ目の分割器のミラー間の距離は約20.7cmにした。これは式(2.1)により、4つのパルスが時間的に等間隔となるように設定した。これにより、1分割目の1stパルスと2ndパルスの間の遅延時間 Δt は2.7nsで、2分割目の1stパルスと2ndパルス、2ndパルスと3rdパルス、3rdパルスと4thパルス間の遅延時間 Δt は、1.3nsと計算できた。また、分割直後に観測したパルス列を図3.2に示す。

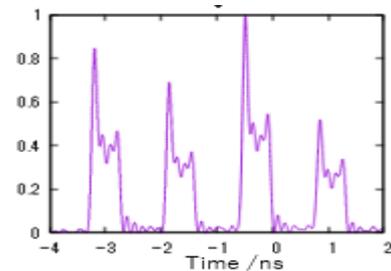


図 3.2 4分割のパルス列

これより、パルス間の遅延時間が約1.3nsであることが確認できた。

4 結合器に関する問題点

従来の実験系を拡張しPID制御によって4分割を再結合する際に、問題が生じた。これは結合器におけるパルスの偏光状態によって説明できる。以下に、結合器の構図とそのときの偏光状態を模式的に表した図3.3,3.4を示す。

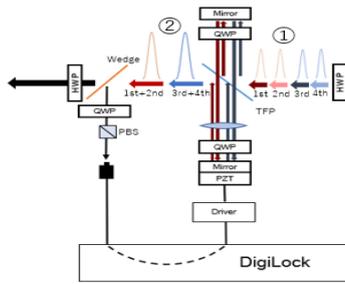


図 3.3 4 分割時再結合器

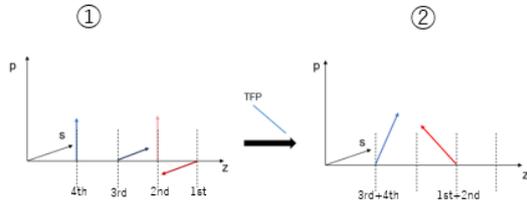


図 3.4 パルスの偏光状態

2 分割の場合にはフォトディテクター前に置かれた PBS によって p 偏光, s 偏光に識別でき、パルスの偏光同士の時間的な干渉縞が検出できたが、4 分割時では、②の偏光状態から分かる通り、PBS を通過する 2 つの直線偏光が直交しているため、偏光同士を識別できず、通過するパルスの強度が一定になってしまい時間的干渉縞が検出できない。よって、時間的干渉縞による PID 制御が機能しなくなってしまう。

5 LOCSET の導入の検討

項目 2.3 で示した、LOCSET を用いた新たな結合手法を検討した。その際に想定された実験系は以下の図 5.1 で示す。

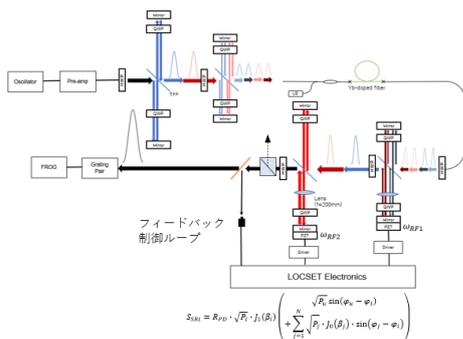


図 5.1 LOCSET 導入した際の実験系

図 5.1 のように、自己参照型 LOCSET 構成を搭載した電子回路を配置し、位相変調器を経て PZT 素子に適切な周波数を与え誤差信号を生成し、それによって発生したパルスを Wedge で一部取り出しフォトディテクターで検出し制御ループを構成させる。

6 まとめ

本研究では、高エネルギー化に向けて従来の DPA の実験系の分割数を 2 分割から 4 分割にすることを検討した。しかし、我々の実験系において従来の手法では結合器でのパルス結合が難しいことが判明した。位相ロックの手法が問題であるため、LOCSET 技術の導入を検討した。今後の展望として、LOCSET 電子モジュールを導入し、4 分割での安定したパルス結合を達成、また、高エネルギー化をしたうえで位相特性の解析や非線形効果が及ぼす結合効率などへの影響を定量的に解析することを目指す。

7 参考文献

- [1] 杉本洸太, 「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の発生」, 2019 年度卒業論文
- [2] M. Kienel, A. Klenke, T. Eidam, S. Hädrich, J. Limpert, and A. Tünnermann, “Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification”, *Optics Letters*, Vol.39, No.4, pp.1049-1052, 2014.
- [3] T. M. Shay, “Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam”, *Optics Express*, Vol.14, No.25, pp.12188-12195, 2006.