

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20602

研究課題名(和文)超広帯域増幅手法による高強度数サイクルレーザーを用いた大電荷レーザー航跡場加速

研究課題名(英文)High charge lase wakefield acceleration using high intensity few-cycle laser by ultra-wide band amplification

研究代表者

荻野 純平(Ogino, Jumpei)

大阪大学・レーザー科学研究所・特任助教(常勤)

研究者番号：90821869

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):レーザー航跡場加速は、加速勾配が高周波加速器と比較して高いことから、その装置サイズを大幅にコンパクト化できるとして期待されている。しかしながら、レーザー航跡場加速は、加速される電荷量が少なく、数fs級のレーザーを用いることで大電荷の加速が可能であること報告されているが、数fs級のレーザーは超広帯域のレーザーであり、レーザー加速に必要なレベルまで増幅する手法が確立されていないのが現状である。本研究では、分光学と非線形光学を組み合わせた新しいレーザー増幅手法として超広帯域周波数領光パラメトリック増幅を提案し、その増幅帯域が同じ結晶を用いても従来増幅手法の2倍以上となることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超広帯域光である数サイクルレーザーを増幅する手法の提案を行った。数10mJ級の数サイクルレーザーの実現が期待できることから、レーザー航跡場加速の実用化に向けて大きな一歩を得たと考えている。また、このようなレーザーはレーザー航跡場加速に限らず、高密度科学や高次高調波発生、医療、産業応用などの幅広い分野において新領域を開拓するきっかけとなると考えている。さらに、本研究では、本増幅手法のスケールアップに関する要素技術の開発に成功しており、将来的にはテラワットを超え、エクサワットに迫るピーク出力のレーザー装置の実現に資することが可能であると考えている。

研究成果の概要(英文):The laser wakefield acceleration has a higher acceleration gradient than that of RF accelerators. Therefore, it is expected that the size of the device can be greatly reduced. However, the amount of charge accelerated by laser wakefield acceleration is small. It has been reported that a laser with a pulse width of several fs can be used to accelerate a large amount of charge. However, it has not yet been established how to amplify the pulse width of a few fs laser to the level required for laser acceleration. In this study, we propose a new laser amplification method based on a combination of spectroscopy and nonlinear optics, called ultrawideband frequency-domain optical parametric amplification, and show that its amplification bandwidth is more than twice that of the previous amplification method using the same crystal.

研究分野：レーザー

キーワード：レーザー航跡場加速 数サイクルレーザー 非線形光学 光パラメトリック増幅 分光学

1. 研究開始当初の背景

レーザー航跡場加速 (laser wakefield acceleration: LWFA) は、加速勾配が高周波加速器と比較して高いことから、その装置サイズを大幅にコンパクト化できるとして期待されている。しかしながら、加速される電荷量が高周波加速器に比べ少ないことが課題である。数サイクルレーザーと呼ばれる数 fs 級の極短パルスレーザーを用いることで、電荷量が増加するという計算結果が報告されているが、数サイクルレーザーは、中心波長を 800 nm とすると波長帯域が 350 nm を超えるような超広帯域であり、レーザー航跡場加速に求められるエネルギーレベルまで増幅する技術はいまだ未開拓であり基礎技術の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、世界に先駆け、数サイクルレーザーによるレーザー航跡場加速の実証を具体化するべく、分光学と非線形光学を組み合わせた革新的な超広帯域増幅手法を提案し、その高エネルギー化に関するの要素技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

高エネルギーの超広帯域光を実現するために、分光学と非線形光学を組み合わせた新しい超広帯域増幅手法として、超広帯域周波数領域 OPA (optical parametric amplification) を提案する。

周波数領域増幅は、2つの凸レンズ(または凹面鏡)を焦点距離の和に等しい距離にアフォーカル配置し、最初のレンズの前焦平面と2番目のレンズの後焦平面に回折格子を配置する 4-f 系の構成であり、最初の回折格子に入射したパルスは、最初のレンズの後焦平面(フーリエ面)近傍でこの系の分光周波数分解能の逆程度まで伸長される。この分光フーリエ面近傍で増幅を行えば、単純な構成でパルス伸張、増幅、圧縮を兼ね備えた構造をとることが可能であり、CPA 法よりコンパクト化が可能な手法である(図 1)。さらに、周波数領域増幅ではフーリエ面(増幅位置)で入射パルスが分光されているため、ここに非線形結晶を配置してそれぞれの波長に対して位相整合条件が最適角度で励起光を入射させることができれば、通常の OPA に比べより広帯域の増幅が可能であると考えた(図 2)。さらに、本増幅手法を高エネルギー化するためには、出射側回折格子のレーザー損傷を避ける手法の開発が必要不可欠である。4-f 系を拡大系とし、出射側の回折格子でのレーザー強度を低下させ、損傷を避ける手法を考案した。さらに、高エネルギー化を実現するためには、1段の OPA では利得が十分でないことが想定されるため、多段の増幅手法の実証も行った。

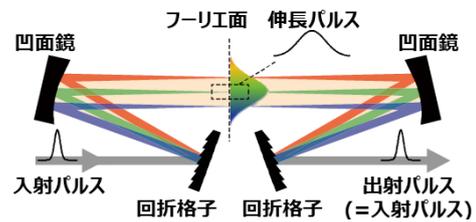


図 1 周波数領域増幅

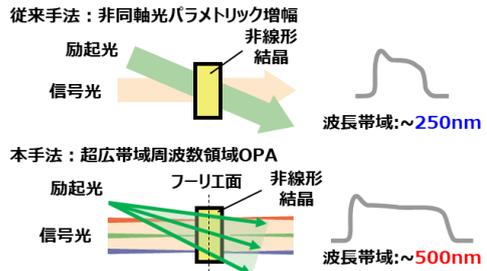


図 2 非同軸 OPA と超広帯域周波数領域 OPA の違い

4. 研究成果

(1) 超広帯域周波数領域 OPA

本研究で提案する、超広帯域周波数領域 OPA の要である周波数領域でのレーザーパルスの特性を明らかにするために、その基礎特性である周波数領域でのパルス幅を理論的及び実験的に明らかにした。また、超広帯域周波数領域 OPA の増幅特性として重要となる波長に対する増幅利得(増幅帯域幅)の算出を行った。回折格子と、結像系による 4-f 系において、入射したパルスは回折格子で波長分散され、集光系によりフーリエ面に分光されて結像される。入射したパルスはフーリエ面で、空間的にも、時間的にも分散される。このことを、理論計算および相互相関法によるパルス計測によって実証した。図 3 に、時間・空間分散パルスの概念図を示す。フーリエ面でのパルス幅は、

$$\tau_{FP} = \frac{\lambda_c D_{in}}{dc \cos \alpha_{in}} \cdot 1$$

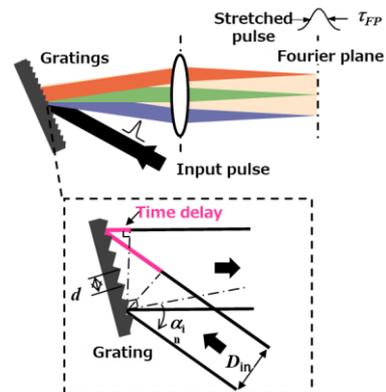


図 3 時間空間分散パルスの概念図

で与えられる。ただし、 λ_c は入射レーザーの中心波長、 D_{in} は入射ビーム径、 d は回折格子の溝間隔、 c は光速、 α_{in} は回折格子への入射角である。入射するレーザーの波長を $\lambda_c = 1065 \text{ nm}$ 、入射ビーム径 $D_{in} = 3.7 \text{ mm}$ 、 8.1 mm 、入射角 $\alpha_{in} = 24 \text{ deg}$ とすると、フーリエ面でのパルス幅はそれぞれ、 5.0 ps 、 10.9 ps と見積もられる。図4に、2倍高調波相互相関法を用いた時間幅測定系を構築して測定を行った結果を示す。実験値と計算値は良い一致を示している。

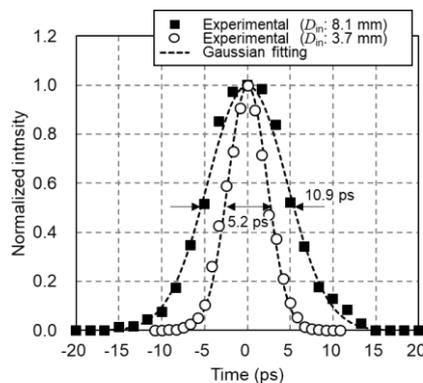


図4 時間・空間分散パルス

超広帯域周波数領域 OPA の増幅特性を明らかにするために、光パラメトリック増幅の計算モデルの構築を行った。図5に、非線形結晶に、BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) を用い、結晶厚み 5 mm 、信号光の結晶軸 (c 軸) に対する角度を 26.4 deg としたときの計算結果を示す。従来の非同軸光パラメトリック増幅では、広帯域の信号光を増幅するために、励起光を信号光に対して数度傾けている（ここでは、励起光の結晶軸に対する角度は 24 deg とした）。それに対して、本手法では、信号光がフーリエ面で空間的に分光されているため、励起光に広がり角（この場合は $\sim 2 \text{ deg}$ 程度）を持たせて励起することで信号光の各波長に対して最適な利得を得ることが可能である。従来手法では、 $750\text{-}950 \text{ nm}$ の 200 nm 程度の帯域に対して利得を得ることが可能であるが、本手法では $750\text{-}1200 \text{ nm}$ の 450 nm 以上の帯域に対して十分な利得を得ることが可能である。本手法では、従来の手法に比べ2倍以上の広帯域の増幅が可能である。ここで重要なのは BBO 結晶を用いて、この増幅帯域幅を達成可能である点である。BBO 結晶は、潮解性がなく、優れた光学特性、機械特性、物理特性から広く使用されている非線形結晶である。特に、一般的な他の結晶に比べ非線形光学定数が高く高い増幅利得を得ることが可能である特徴を有している。しかしながら、増幅帯域は比較的狭く、極短パルスレーザーの増幅では、使いにくい。一方、広帯域を得ることができる結晶は総じて非線形光学定数が低く、潮解性を有する等扱いが難しい傾向がある。本研究で提唱した、超広帯域周波数領域 OPA で、BBO 結晶を用いて極短パルスレーザーで使用可能な増幅帯域幅を高い利得で確保できることを明らかにしたことは、高エネルギーの極短パルスレーザーの実現の大きな一歩と言える。

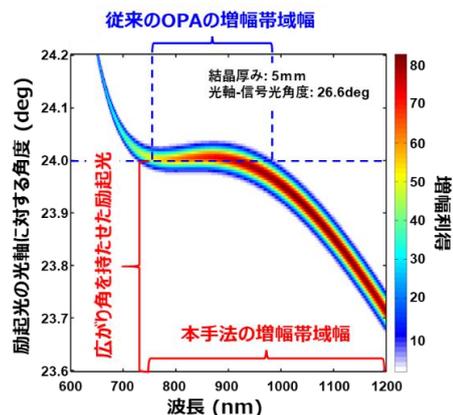


図5 従来の OPA と超広帯域周波数領域 OPA の増幅特性

(2) 高エネルギー化技術の開発

超広帯域周波数領域 OPA では、 $4\text{-}f$ 系を用いることから出射側の回折格子でのビーム径は、入射側と同様である。フーリエ面で増幅を行っているため、出射側の回折格子ではその利得の分だけレーザー強度が上昇することとなる。このため、本手法のさらなる高出力化のためには、出射側回折格子のレーザー損傷を避ける手法の開発が必要不可欠である。

時間・空間分散パルスは、入射側の回折格子によりビーム断面の分散方向に沿って生じる光路差により時間遅延与えることで入射パルスはフーリエ面で時間伸長される。これを出射側の回折格子で同等の光路差による時間遅延でキャンセルすることでパルスを再構築している。よって、この光路差が等しくできれば、各パラメーターは入射側と出射側で同じである必要は無い。そこで、出射側の逆フーリエ変換の際に出射側の回折格子でのレーザー損傷を避けるためにビーム径を拡大する手法を考案した。出射ビームの拡大率に対して、出射側の回折格子の溝間隔、入射角度を調整することで、入射と同様のパルスを再構築可能である。また、本手法では、 $4\text{-}f$ 系の光学配置であるため、フーリエ面は1つであり増幅段は1段となる。さらなる高出力化を目指すには、多段化を行い、総利得を増加させる必要がある。そこで、フーリエ面を後段に結像する光学配置とすることで、増幅段数を増加させる手法を考案し、実証実験を行った。図6に増幅段を2段とし、拡大倍率を2倍にした、本手法の光学配

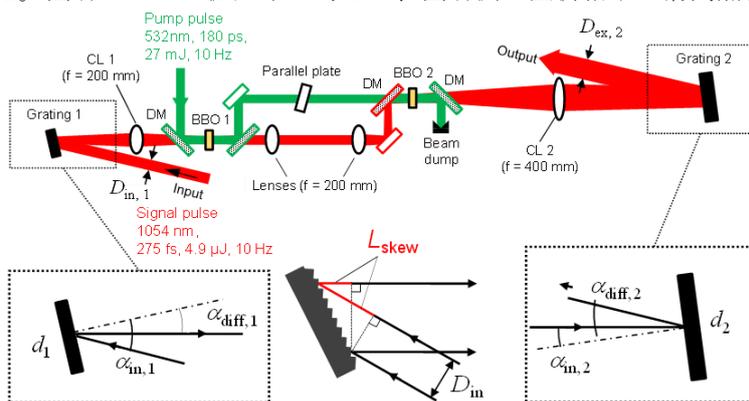


図6 拡大系を用いた多段周波数領域 OPA の構成図 (CL:シリンダリカルレンズ、DM:ダイクロイックミラー)

置を示す。入射側の回折格子の溝間隔 d_1 は $1.7 \mu\text{m}$ 、回折角度 $D_{\text{diff},1}$ は 13° とし、拡大倍率を $M=2$ とすると、出射側の回折格子の溝間隔 d_2 は $3.3 \mu\text{m}$ 、入射角度 $\alpha_{\text{in},2}$ は 13° と見積もられる。図 7(a) に、増幅段を 1 段、2 段とした場合の増幅利得を、図 7(b) に拡大倍率を $M=1,2$ とした場合のパルス波形を示す。多段増幅とすることで、1 段の場合

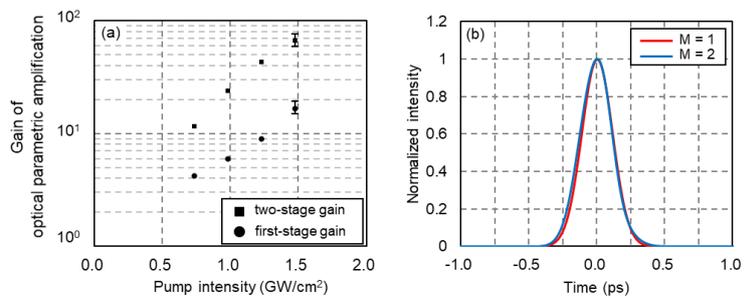


図 7 (a) 多段周波数領域 OPA の増幅特性,
(b) 拡大倍率 1 倍及び 2 倍でのパルス波形

で得られる利得をさらに増加させることが可能であることを実証した。さらに、 4-f 系を拡大系とすることで、出射側の回折格子でビーム径を 2 倍に拡大し、レーザー強度を低下させた状態でパルス波形が再構築されることを明らかにした。以上の、ことから数サイクルレーザーのような超広帯域光をこれまでない高エネルギーまで増幅しうる要素技術の開発に成功している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogino J., Zhaoyang L., Tokita S., Tsubakimoto K., Miyanaga N., Kawanaka J.	4. 巻 38
2. 論文標題 Development two-stage frequency domain optical parametric amplification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100906 ~ 100906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.hedp.2020.100906	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Junpei OGINO, Li ZHAOYANG, Shigeki TOKITA, Koji TSUBAKIMOTO, Noriaki MIYANAGA and Junji KAWANAKA
2. 発表標題 Development of ultra-wideband frequency domain optical parametric amplification
3. 学会等名 Photonics West 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------