

超高速微細加工に適した高出力紫外レーザーパルスの発生

・スイッチング技術の開発

大阪大学 レーザー科学研究所

助教 椿本 孝治

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016210)

キーワード：高出力紫外レーザー，ピコ秒レーザー，高速スイッチング，コヒーレント結合

1. 研究の目的と背景

ファイバーレーザー技術の目覚ましい進展により、単一横モードでありながら平均出力 10kW を超えるような連続発振レーザーが市販されており、溶接や切断といった加工分野では安定性やビーム品質が優れるファイバーレーザーが用いられるようになってきている。一方で、微細加工分野においては、加工の精度向上のために熱変性の少ないサブナノ秒以下の短パルスレーザーが求められており、加工速度の向上のための高出力化が盛んに進められている。しかしながら、ファイバーレーザーは、パルス動作には課題があり、1パルスあたりのエネルギーが非線形効果や光学素子の端面ダメージにより制限される。そのため、高出力化には、高繰り返し化が必要であり、数百 kHz から数 MHz で動作させることになる。

レーザー加工機側からの要求として、加工条件の最適化や加工速度の向上および加工領域の拡大のため、レーザーパルスの高速 ON/OFF スwitching、パルス列の強度制御やパルス幅制御が求められている¹⁾。しかしながら、レーザーの高出力化、高繰り返し化は、安定的なレーザーパルス制御を難しくしている。kW を超えるようなパルスレーザー装置では、高出力化には多段の増幅器を用いることになる。装置の前方段でパルスのスイッチングや強度変調を行う場合、後方段に配置されたパワー増幅器の利得が不

安定化し、出力が変動する。また、エネルギーの取り出しを停止することによる熱の蓄積が、最悪の場合、増幅器の破壊をもたらす。これを避けるために、最終段でスイッチングや強度変調を行う場合、kW を超える高出力、MHz に達する高繰り返しに使えるスイッチング素子が存在していない。

このような問題から、レーザーの高出力化、高繰り返し化とともに、安定で高速なレーザーパルス列整形技術の実現が切望されている。本研究では、高出力高繰り返し紫外パルスレーザーに対して適用可能な高速スイッチング技術の確立を目的とした。

スイッチング方法には、コヒーレントビーム結合 (Coherent Beam Combining: CBC²⁾) を応用する。CBC は、複数のレーザー光を束ね、ひとつのビームとして取り扱えるようにする技術である。この原理をパワーレーザーに応用することにより、レーザーの安定動作を実現しながら高速にスイッチング、および強度変調を行うことが可能となる。CBC を利用した高速スイッチング、強度変調の原理は、2本のビームを同軸に重ね合わせて、位相差を制御することによる強度変調である。この方法では、増幅器出力までは強度変調を行わないため、増幅器の安定動作が可能である。また増幅後に強度変調器を挿入しないことから高出力レーザーにも対応することが可能である。

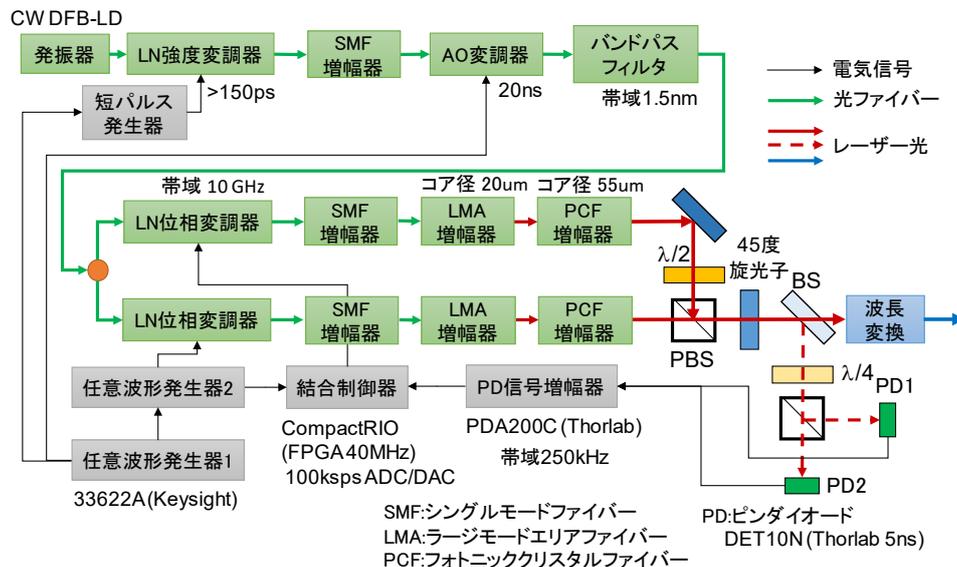


図 1 実験用レーザーシステムのブロックダイアグラム

2. 実験方法

2.1 実験装置³⁾

図1に高速スイッチング実験に用いたレーザーシステムのブロックダイアグラムを示す。レーザーの発振器には波長 1040nm、連続発振 (CW) の DFB 半導体レーザー (LD) を使用した。発振器から出力されたレーザー光は、LiNbO₃ (LN) 強度変調器により、繰り返し 10MHz (最大)、パルス幅 150ps (最短) のパルス列に切り出す。次に、平均出力 10mW までシングルモードファイバー (SMF) 増幅器で増幅し、音響光学変調器 (AO) とバンドパスフィルターを通すことでパルスの SN 比を向上させた。その後、ファイバーカップラにより 2 ビームに分岐した。分岐したレーザー光を、LN 位相変調器と 3 段のファイバー増幅器を使って、1 ビームあたり平均出力 30W まで増幅した後、それぞれの偏光方向が直交するように半波長板を使って調整し、偏光ビームスプリッター (PBS) により、再び 1 ビームに合成した。最後に、非線形結晶を使って波長変換を行い、紫外 (347nm) 光を発生させた。2 倍高調波発生には、長さ 20mm の LBO 結晶 (Type-I)、3 倍高調波には、長さ 20mm の LBO 結晶 (Type-II) を使用した。

2.2 コヒーレント結合制御

偏光が直交する 2 ビームを合成した場合、2 ビーム間の位相差により、合成後の偏光状態が変化する。図1の装置では、2 つのビームが異なる増幅光路をとるため、位相差は常に変動し、偏光状態はランダムとなる。スイッチングのためには、位相差を検出し、偏光状態を制御する必要がある。

位相差を検出するために、合成後のビームの一部を取り出し、1/4 波長板を使って片方のビームに $\pi/2$ の位相遅れを追加したあとで、PBS により縦横の偏光成分に分離してピンダイオード (PD1, PD2) で検出する。図2にそれぞれの PD で検出されるレーザー強度と位相差の関係をグラフで示す。このグラフから、合成後の偏光が直線となるのは、位相差が 0 又は $\pm\pi$ なので、2 つの PD の検出値が一致する状態であることがわかる。位相差は、2 つの PD の検出値の差のアークサインから求めることができるが、図2に示すように、一つの検出値差から二つの解が得られる。実際の制御では、位相差が $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲

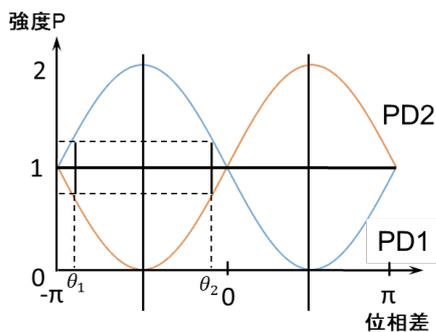


図2 検出される強度と位相差の関係

にあるものとして、図2の θ_2 を採用するようにしている。

一連の処理を図1に示す結合制御器で計算し、LN 位相変調器を使って位相差にフィードバック制御を行うことで合成後の偏光を一定に保つ (位相差ロック)。

2.3 高速スイッチング・パルス列制御

非線形結晶を使った波長変換では、レーザーの入射角、波長、偏光によって変換効率が大きく変化する。高効率な波長変換を行うためには、①基本波、および高調波の位相が揃っていること (位相整合)、②基本波と高調波の偏光方向が特定の方向であることが求められる。①については、結晶軸とレーザーの入射方向で決まる。②は結晶に入射するレーザーの偏光に依存する。つまり、レーザーの偏光を最も変換効率が低くなる状態から、最も高くなる状態へ変化させることで、スイッチング動作を行うことが可能となる。図3に示すように、波長変換したいパルス数に相当する幅の電気信号を、図1の LN 位相変調器に印加し、合成後のレーザーの偏光方向を瞬時に 90 度回転させる。これにより、スイッチング動作が行われる。

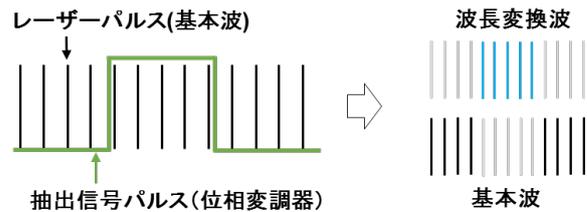


図3 パルス列のスイッチング方法

3. 実験成果

3.1 短パルスの発生



図4 CWLD から切り出したシードパルス

パルス幅 50ps のレーザー光を発生させるために、200ps、1V の電気パルスが発生する電子回路を製作した。これをファブリーペロー (FP) タイプの半導体レーザー (LD) に組み込み、利得スイッチによる短パルス発生を試みたが、最短で 170ps のパルスまでしか得ることができなかった。これは、電気パルスの電圧が低いこともある

が、用いた LD の特性によるところが大きい。50ps 以下のパルス発生には、DFB タイプのより高出力な LD を選定する必要がある。また、利得スイッチによる短パルス発生では、発生したレーザー光が周波数チャープしており、バンド幅が 1nm ほどに広がるため、ビーム結合での結合効率が大きく低下した。そのため、本研究では、狭線幅の CWLD の出力を強度変調器で 150ps のパルス列に切り出して使った (図 4 参照)。

3・2 ビーム結合の安定性評価

発振器直後で分岐されたビームは異なる光路を通過してくるため、ビーム間の位相差は常に変動している。空気中の伝播では、空気の揺らぎにより変動するが、大きく離

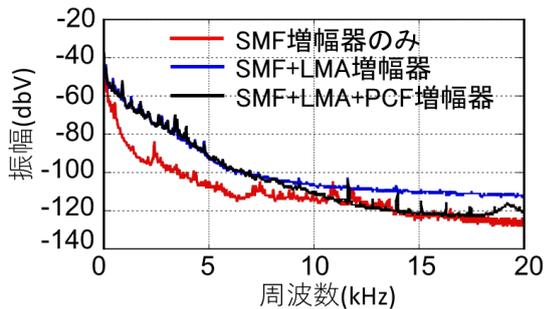


図 5 各増幅器出力後の位相差変動

れた空間ではないため、その周波数は 100Hz 程度とそれほど速くない。一方で、ファイバーを通過してくる場合は異なる空間を伝播することになり、位相差の変動は 1kHz を超えてくるため、高速な位相ロックフィードバックが必要となる⁴⁾。

ビーム結合の安定性を評価するために、結合後のレーザー光に PBS を挿入し、偏光状態を計測した。図 5 は、位相ロックをしていない状態で PBS を通過したレーザー光をピンダイオードで計測し、パワースペクトルを取ったものである。つまり、ビーム間の位相差変動の周波数分解となる。なお、レーザーのパルス幅は 10ns、繰り返しは

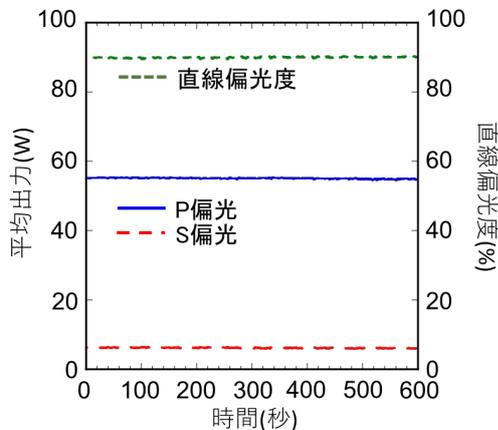


図 6 2 ビーム結合後の直線偏光度の時間特性

1MHz である。この図から、LMA 増幅器により位相差変動が大きく増加していることがわかる。PCF 増幅器後では逆に 10kHz 以上の変動が抑制されている。LMA は、PCF に比べて N.A. が大きく、ファイバー長が長いいため、位相差変動が大きくなったものと考えられる。

図 6 に結合後の平均出力と直線偏光度の時間変化を示す。レーザーの波長 1040nm、パルス幅 150ps、繰り返し周波数は 5MHz、1 ビームあたりの平均出力は約 30W とした。結合後出力は 60W、変動係数は 0.4%と、時間的に非常に安定している。直線偏光度は平均 90%、変動係数 0.2%が得られ、安定に結合できていることがわかった。

3・3 3 倍高調波発生

図 7 に発生した 3 倍高調波 (347nm) の平均出力の時間推移を示す。基本波出力は約 58W、パルス幅 150ps、繰り返し 5MHz である。3 倍高調波の平均出力は 20W、変換効率は直線偏光度を考慮すると、38%であった。3 倍高調波の発生は、焦点距離 508mm のレンズで 2 つの結晶の中間に集光して行った。集光強度は約 55MW/cm² となった。同様に、繰り返しを 10MHz とした場合、3 倍高調波の平均出力は、11W、変換効率は 20%であった。

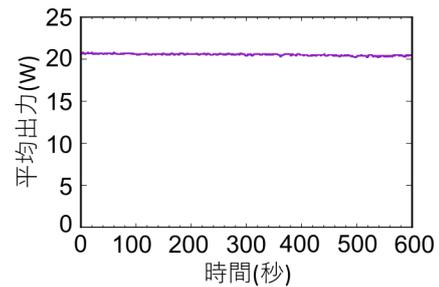


図 7 3 倍高調波 (347nm) の平均出力

3・4 高速スイッチング動作

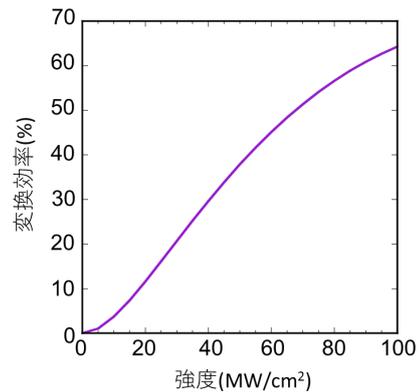


図 8 3 倍高調波変換効率の計算結果

図 6 に示したように、基本波での直線偏光度は 90% であり、これからスイッチングを行うと ON/OFF の SN 比は、10:1 となる。加工用のレーザー装置としては十分な SN 比とはいえない。図 8 はこの研究で採用した波長変換結晶を使った場合に得られる 3 倍高調波の変換効率を計

算により求めたものである。ただし、集光による影響は無視している。今、ON時に50MW/cm²、OFF時に5MW/cm²の入射強度であるとする、図8から、変換効率は38%から1%に変化するので、最終的なSN比は380:1となり、波長変換をすることで大きくSN比が改善される。

図9に3倍高調波光のスイッチングを行ったときのオ

ものと考えられる。また、FPGAに対して外部からの同期信号を入力できないため、レーザーの周波数とずれが生じ、制御の最適化が完全におこなえないことも原因となっている。今後、制御系の高速化と同期が必要である。

なお、繰り返し10MHzにおいても同様のスイッチング特性が得られた。

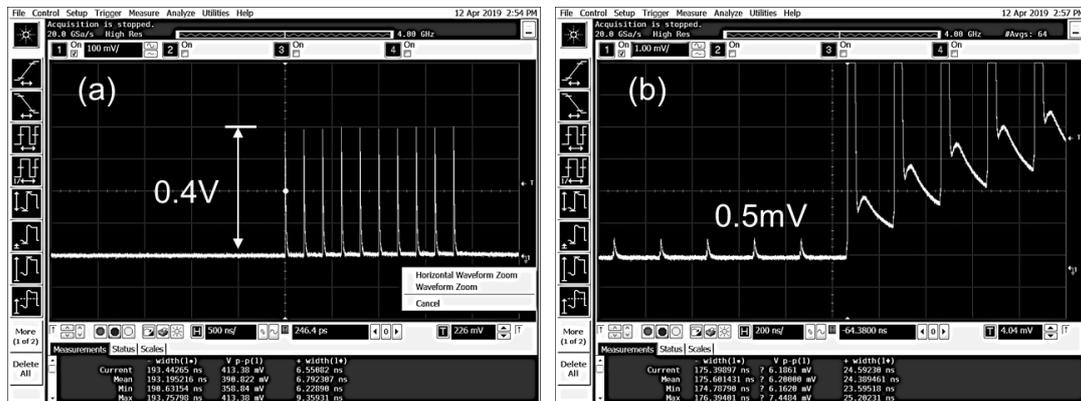


図9 3倍高調波光のパルス列スイッチング動作とSN比
(a)10パルスの切り出し、(b)OFF部分の拡大

シスコプの波形を示す。図9(a)は5MHzの繰り返しパルス列から10パルスのみを切り出した結果であり、(b)はOFF部分を拡大した波形である。スイッチングにおける立上がり、立下り時間は全くない。スイッチングのSN比は、800:1となっており、予測よりも高いSNが得られた。これは、波長変換時に集光をおこなっていることで、球面波による位相整合のずれ、伝播時の強度変化などによって予測よりも変換効率が低下するためである。

図10にパルスの取り出し例を示す。レーザーの繰り返し5MHzに対して、ON/OFFを1kHzで繰り返した。つまり、図10(a)は、1kHzで1パルス出力される状態である。取り出しパルス数が増えてくると、振幅に変調がかかっている。また、(d)では、立ち上がりの遅れが見られる。これは、制御に使っているFPGAでの処理で10μsの遅れが発生することで制御の収束に時間を要している

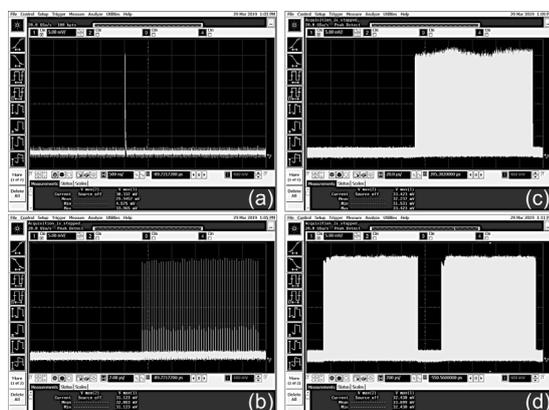


図10 パルスの取り出し例。(a)1パルス、(b)50パルス、(c)500パルス、(d)4000パルス。

4. 結論

本研究では、高出力紫外ピコ秒パルスレーザーを構築するとともに、コヒーレントビーム結合を応用した高速スイッチング技術の開発と原理実証をおこなった。結果として、SN比が800:1の高速なスイッチングを実現した。本技術は、高出力・高繰り返しパルスレーザーでの新たなスイッチング法として期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご支援いただきました公益財団法人天田財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) W. Wiechmann, L. Eyres, J. Morehead, J. Gregg, D. Richard, W. Grossman, "Variable Pulse Duration Laser for Material Processing," J. Laser Micro. Nanoen. 2(1), 64-68 (2007).
- 2) T. Y. Fan, "Laser beam combining for high-power, high-radiance sources," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 11(3), 567-577 (2005).
- 3) K. Tsubakimoto, H. Yoshida, and N. Miyanaga, "600 W green and 300 W UV light generated from an eight-beam, sub-nanosecond fiber laser system," Opt. Lett. 42(17), 3255-3258 (2017).
- 4) Steven J. Augst, T. Y. Fan, and Antonio Sanchez, "Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers," Opt. Lett. 29(5), 474-476 (2004).