

波長 2 μm 帯ナノ秒/フェムト秒光パルス増幅器の開発 および加工応用

電気通信大学 レーザー新世代研究センター
准教授 戸倉川 正樹
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017221)

キーワード：加工用ナノ秒/フェムト秒レーザー，レーザー加工，2 μm レーザー

1. 研究の目的と背景

レーザー加工は従来の切削加工では不可能な精度、速度、自由度を可能とし、航空機、自動車、医療機器、スマートフォンなど最先端のものづくりの現場において必要不可欠な存在となっている。近年、我が国の製造業は依然として高い国際競争力を維持してはいるものの、北米、アジア、ヨーロッパとの競争は激化している。またレーザー加工機の心臓部であるレーザー装置については、我が国は CO₂ レーザーにおいては依然として世界トップの技術を有しているが、近年ファイバーレーザーや固体レーザーへの置き換えが進み、海外の後塵を拝している。我が国が製造業において高い国際競争力を維持し発展を続けていくには、より高付加価値な製品を提供していくことが必要であり、レーザー装置や加工技術はそのための基幹技術となる。

現在高精度なレーザー加工には主として高出力・高効率・高集光性を有した波長 1 μm 帯 Yb レーザーやその高調波が用いられているが、従来とは異なる性質を有す新材料開発も日々進められており、対象物質や目的に応じて最適なレーザー波長を選択することは有効であり、その為の新しい光源技術が必要とされている。例えば短波長では我が国は青色(400-460 nm) LD の独自の技術を有しており、最近ではファイバー結合型の 200 W 以上の製品が開発されている。銅材は古くからある材料であるが今後電気自動車のモーターなどの部材として一層の需要の高まりが予想されるが、Yb レーザーでは吸収が弱く加工が難しいが 600 nm 付近から急激に吸収が増加するため高出力な青色 LD により加工が可能と考えられる。長波長においても国内企業より Er:ZBLAN ファイバーを利用した波長 2.8 μm 帯で動作可能な 20 W 近い高出力のファイバーレーザーが市販化されており、同じく Yb レーザーでは難しいガラスや樹脂の加工応用に利用可能である。

長波長帯のレーザーの中でも特に波長 2 μm 帯 Tm レーザーが世界で大きな注目を集めている。応用面からみると 2 μm 光は前述の 2.8 μm 光と同様に線形吸収によるポリマー材料の加工が可能であり、2 光子吸収を用いたシリコンウェハなどの 3 次元微細加工への応用も期待される。医療応用においては生体組織に対して適切な侵入深度の下、血液の凝固も作用を伴う、精密で出血の少ない手術への応用が期待されている¹⁾。また実用性を考えると、Tm レー

ザーは 0.8 μm 帯のレーザーダイオードによる直接励起によって、交差緩和過程をとらなう量子効率 2 の高効率・高出力なレーザー動作が可能である(連続発振ファイバーレーザーでは平均出力 1 kW が 2010 年に報告されている²⁾)。また扱いやすいシリカファイバー中を低損失に伝搬可能で空冷動作も可能であり、現在主流の Yb ファイバーレーザーと同様にコンパクトでメンテナンス性に優れた光源とすることが可能である。

本研究ではナノ秒/フェムト秒領域での高エネルギーな波長 2 μm 帯パルス光源による加工応用を目指した。当初の研究計画ではタイトルにある通り増幅器により高エネルギー化を果たし、加工実験を実施する予定であったが、増幅用レーザー結晶の製造過程において問題が生じてしまったため、扱いやすいファイバー発振器からの高エネルギーパルスの直接発生、それを用いた加工応用へと切り替え、フェムト/ナノ秒高エネルギーファイバーレーザーの開発を進めた。本稿ではその詳細と将来展望について報告する。

2. フェムト秒高エネルギーファイバーレーザーの開発

ファイバーレーザーはその導波路構造と長い有効作用長から非常に高い利得が得られ、高効率で高出力なレーザー動作が可能であるが、同時に強い非線形光学効果も発生し、高エネルギーなフェムト秒パルス動作は困難であった。近年これを克服すべく、共振器の分散値を制御し全正常分散としたモード同期ファイバーレーザーが開発され、波長 1 μm 帯では大口径 Yb ファイバー技術とともに 1 μJ 以上のパルスエネルギーが実現されており、Ti:Al₂O₃ レーザーを超える高ピークパワー動作が実現されている。全正常分散レーザーでは光パルスは常に正チャープしており、瞬時光強度を抑制している。またパラボリック形状のパルスを形成すると強い非線形光学効果(B 積分値 $\gg \pi$)を受けても高次分散の発生を抑制できる。しかし波長 2 μm 帯では一般的なシリカファイバーは材料分散によって大きな異常分散を有しており、上述の全正常分散動作は難しかった。

本研究ではシリカガラスではなくフッ化物ガラス ZBLAN(ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) ファイバーを利用することによって、波長 2 μm 帯での全正常分散モード同期動作を実現し、高エネルギー動作を可能としフェムト秒レーザー加工を行うことを目的とした。

本研究で利用している ZBLAN ファイバーの特徴について述べると、ZBLAN ファイバーは波長 $\sim 4\ \mu\text{m}$ 帯まで光を透過できることから $\sim 3\ \mu\text{m}$ 帯中赤外レーザーに使用され、またフォノンエネルギーが低いことから可視域の Pr や Er 添加ファイバーレーザーにも利用されてきた。機械強度が低く潮解性を有していることから、取り扱いが難しいと考えられてきたが、近年その品質も改善し、製品への利用もなされるようになってきている。本研究において特に重要な特徴は、その分散特性であり図 1 に示すように ZBLAN ファイバーは波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯でシリカガラスに比べて遥かに小さな材料分散を示し、コアの開口数を 0.2 程度と仮定すると、ファイバーコア径を直径 $\sim 6.4\ \mu\text{m}$ 以下とすることによって、構造分散によってトータルの分散値を正常分散とすることが可能となる。

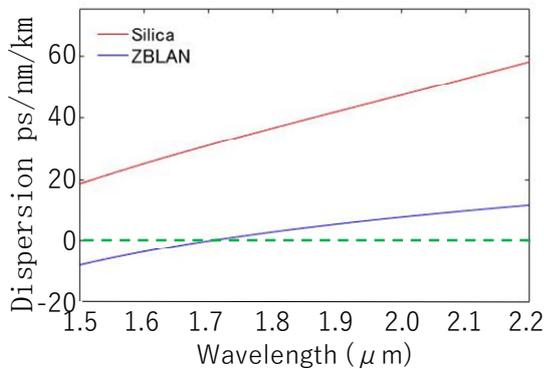


図 1. シリカガラスと ZBLAN ガラスの材料分散の比較

実験装置の概略を図 2 に示す。共振器は図中半時計周りのリング共振器を採用した。利得ファイバーには長さ $1.3\ \text{m}$ 、Tm 添加濃度 $10,000\ \text{ppm}$ 、コア径 $6.2\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 、NA 0.2 の Tm:ZBLAN ファイバーを採用し、計算値で $19040\pm 6160\ \text{fs}^2$ の正常分散を有している。実効的なモード径は $7.4\ \mu\text{m}$ であり一般的なシングルモードファイバーと同程度である。両端面には熱的影響を緩和するため同コアサイズ、NA を有する無添加 ZBLAN ファイバーを機械的に接合し(接合損失 $\sim 0.3\text{dB loss}$)、その端面はアングル

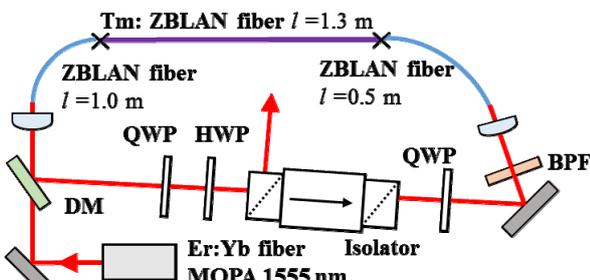


図 2. 全正常分散 Tm:ZBLAN ファイバーレーザー実験図

研磨されておりフレネル反射による寄生発振も抑制している。励起光源には $1.55\ \mu\text{m}$ の Er:Y fiber laser を用いたが $800\ \text{nm}$ 帯の LD を用いることも可能である。自由空間中には $\lambda/4$ 板、 $\lambda/2$ 板、アイソレータ (PBS-FR-PBS)、 $\lambda/4$ 波長板を挿入し、波長板の角度を調整することによって非線形偏波回転による変調機構が発生しパルス発振が得られる。このとき全正常分散レーザーではソリトンパルスとしての定常状態が存在しないため、バンドパスフィルター(中心波長 $1870\ \text{nm}$ 、バンド幅 $35\ \text{nm}$ 、最大透過率 84%)を用いることによって、共振器一周毎のスペクトル形状を定常化し、安定したモード同期発振を得ることが可能となる。レーザー出力はアイソレータの入力側の PBS より取り出しており、その出力特性を図 3 に示す。励起出力が $270\ \text{mW}$ を超えたところからモード同期発振が得られ、出力は励起光とともに増加し、励起出力 $410\ \text{mW}$ 時に最大出力 $64\ \text{mW}$ において図 4 に示す最大スペクトル幅

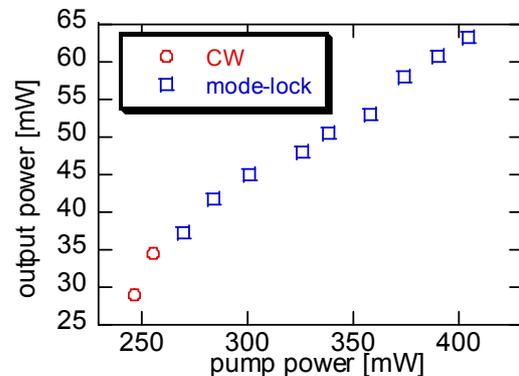


図 3. 全正常分 ZBLAN ファイバーレーザー出力特性

$80\ \text{nm}$ が得られた。このときスペクトル形状は cat ear(猫の耳)型と呼ばれる全正常分散モード同期レーザーの特徴を示した。これ以上励起出力を上げるとモード同期発振が不安定となってしまった。繰り返し周波数は $75\ \text{MHz}$ でありパルスエネルギーは $0.9\ \text{nJ}$ である。最大出力時に測定された自己相関波形を図 5(a) に示す。

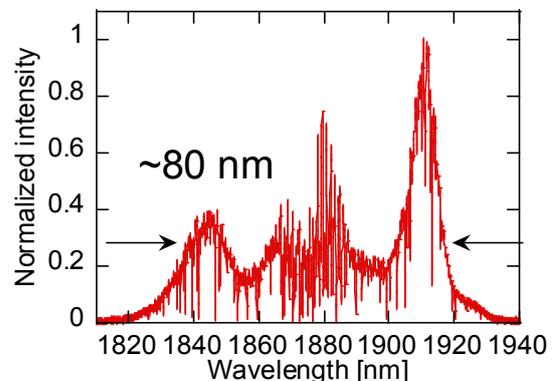


図 4. モード同期発振スペクトル

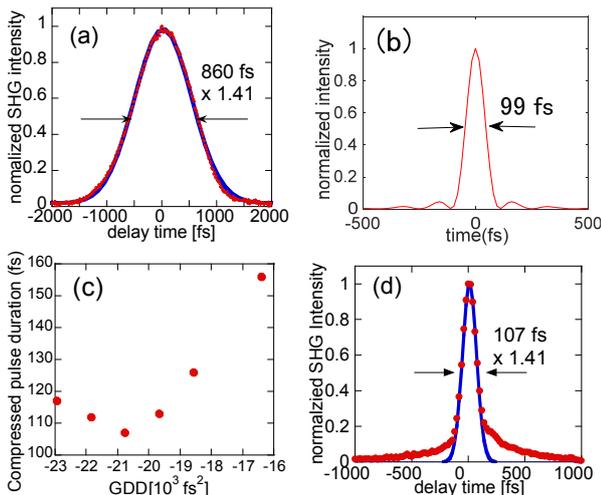


図 5. (a)共振器からの直接出力の自己相関波形。(b) スペクトルから換算されるフーリエ限界パルス。(c)分散補償量と圧縮パルス幅。(d)圧縮後の最短パルス幅

パルス幅は 860 fs と見積もられ、スペクトルから換算されるフーリエ限界パルス幅の 99 fs[図 5(b)]よりも長く、チャープしている事がわかる。より短いパルスを得るために、反射型の回折格子を用いて外部圧縮を試みたところ、図 5(c)に示すようにパルス幅の可変性が得られ、補償分散量を -21000fs^2 としたとき最短パルス幅 107 fs が得られた[図 5(d)]。ピーク光強度は数 kW 程度と見積もられる。

本研究成果は波長 $2\mu\text{m}$ 帯で初となる全正常分散モード同期レーザー動作である³⁾。得られているパルスエネルギーは約 1 nJ と未だ低いが、これは使用しているファイバーの分散量が小さすぎるためである。数値計算により分散量を最適化すれば同構成のレーザーより 10 nJ 以上の出力を得られることが分かった。また現在は偏波保持型 Tm 添加ダブルクラッド Tm:ZBLAN ファイバーを用いた全正常分散型の Mamyshev 発振器の開発に取り組んでいる。Mamyshev 発振器が実現できれば 100 nJ 以上のパルスエネルギーを有したフェムト秒パルスの共振器からの直接発生が見込まれる。ピーク光強度 100 kW 以上が期待され、そのような光源は増幅器なしでポリマー材やシリコン材料のレーザー加工に利用可能と考えられる。

3. ナノ秒高エネルギーファイバーレーザーの開発

加工対象物や加工内容によっては、パルス幅はナノ秒でも十分であり、より高いパルスエネルギーを有していることが求められる。Q スイッチレーザーはモード同期レーザーに比べて遥かに高いパルスエネルギーを得ることを可能とするが、共振器長の長いファイバーレーザーでは得られるパルス幅は数十 ns に制限されてきた。本研究では音響光学変調器(AOM)の一回折光を利用して、共振器中の寄生発振を抑制し、より高い利得のもと非線形光学効果も利用することによって、パルス幅数ナノ秒の Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

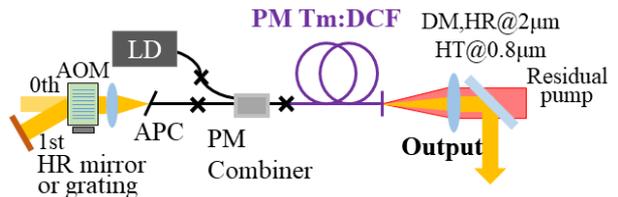


図 6. 波長可変ナノ秒 Q スイッチレーザー概略

開発したレーザー装置概要を図 6 に示す。共振器はフアブリーペロー型であり、利得ファイバーは偏波保持型ダブルクラッド Tm 添加シリカファイバー(コア径 $10\mu\text{m}$, クラッド径 $130\mu\text{m}$) が用いられ、波長 793 nm マルチモード LD によって偏波保持励起コンバイナーを通して励起されている。励起コンバイナーの片短面には APC コネクタを取り付けた PM ファイバーを融着しフレネル反射による寄生発振を抑制している。APC からの出射光を非球面レンズでコリメートし音響光学変調器(AOM)を用いて AOM が ON 時に 1 次回折光がファイバーへ再結合され、Q スイッチレーザー動作に必要な変調を与えている。利得ファイバーのもう一方の端面は垂直にクリーブされ、フレネル反射による約 3.6%反射の取り出しポートとして使用されている。このとき出力にはわずかなら残存励起光が含まれているためダイクロイックミラーによって分離している。ここで AOM の 1 次回折光を用いる利点について説明すると、(i) 0 次回折光を利用する場合と比較し、AOM で回折されなかった透過成分がファイバーに再結合されないため、損失変調深さを大きくでき、より強く寄生発振を抑制可能である。よって多くの非飽和利得、すなわち短パルス性と高エネルギー性を得ることを可能としている。(ii) AOM は偏光依存の回折効率と周波数シフトを与えるため、軸を偏波ファイバーの軸と合わせることによって直線偏光の縦モードフリー出力が得られる。(iii) 増幅自然放出光(ASE)が発生した場合でも ASE は図中左側の AOM 側に抜けるため、パルスの出力から分離できる。

励起出力を 4W と固定し AOM の繰り返し周波数を 1kHz-100kHz と変化させたときに得られたパルスエネルギーと平均出力、パルス幅とピーク光強度の関係をそれぞれ図 7、図 8 に示す。平均出力は 20 kHz 以上では約 500 mW で一定となり、20 kHz 以下から緩やかに減少し、3 kHz あたりから減少が大きくなっている。これは Tm の上

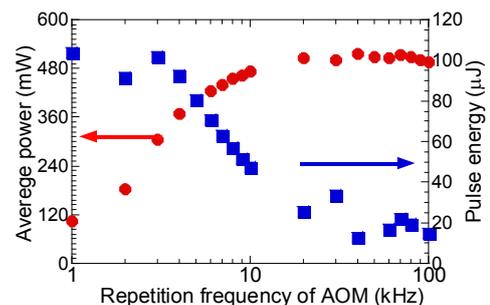


図 7. 平均出力とパルスエネルギーの繰り返し周波数依存性

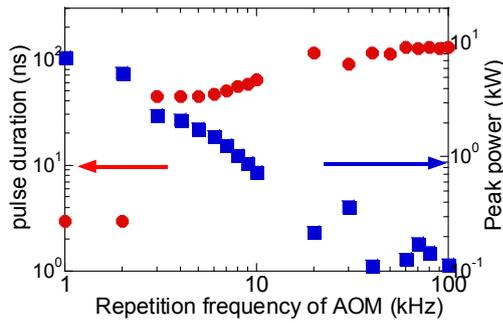


図 8. パルス幅とピーク光強度の繰り返し周波数依存性

準位寿命が $\sim 300 \mu\text{s}$ と短いことから誘導放出以外でのエネルギー消費が増加するためと考えられる。また同様の理由で繰り返し周波数を低下させていくと 3 kHz まではパルスエネルギーは上昇し、1 kHz の時に最大パルスエネルギー約 105 μJ 、パルス幅 $\sim 3 \text{ ns}$ が得られた。このパルスはサブパルス構造を有しており(図 9)、光強度はエネルギーをパルス幅で割った値とは大きく異なり、約 7.5 kW と

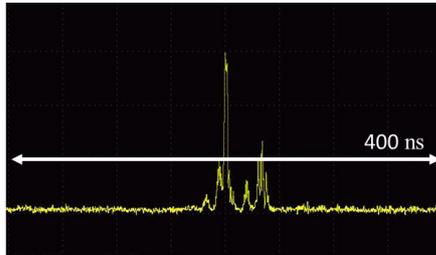


図 9. サブパルス構造を有した時間波形

見積もられた。このパルス幅は今までに報告されている Q スイッチ Tm ファイバーレーザーと比べて一桁小さな値となっている。パルス幅の繰り返し周波数依存性を見てみると、繰り返し周波数 2 kHz から急激な短パルス化が進んでいることがわかる。またこのときのスペクトルを調べると、ピーク光強度の増加とともに広帯域光発生が起こっていることが分かった(図 10)。これと類似の報告が 1 μm 帯 Yb レーザーでされており⁴⁾、共振器中での後方ブリルアン散乱による非線形フィードバックが発生することによって短パルス化が進んだと推定される。先行研究と異なる点として、本研究では波長は 2 μm 帯であり、特殊は非線形ファイバーを利用せず、AOM によって繰り返し周波数を制御した状態で短パルス化を果たしている。現状の問題点として急激な短パルス化の後にピーク強度、パルス幅の

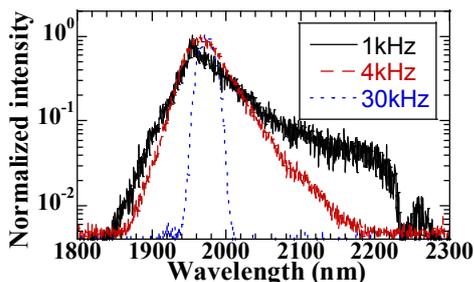


図 10. スペクトルの繰り返し周波数依存

揺らぎが非常に大きくなることがあげられる。これは利得が非線形光学効果の発生する閾値付近となってしまうことが原因と考えられ、励起出力増加させることにより安定化が可能と考えられる。現在ファイバー端面の破壊により励起高強度が制限されているが、出力鏡として Fiber Bragg Grating を採用し、端面にはエンドキャップ処理を施すことによって解決可能と考えられる。また現在回折格子によって波長を制御し、サブパルス構造の少ない短パルス発振や波長可変特性も得られているが、論文化を進めているため本稿ではその詳細は省略させていただく。本レーザーのピーク光強度はポリマー材料のレーザー加工や高非線形光ファイバーを利用した超広帯域光発生に用いるのに十分な値と考えられる。

4. 加工実験

現在開発したナノ秒レーザーを光源としたその場観察可能な加工システムを構築中である(図 11)。加工集光径は約 100 μm としており、最大輝度は $\sim 1 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 、フルエンス $\sim 10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ が見込まれ、加工用のポリマー材やシリコン材を準備している。

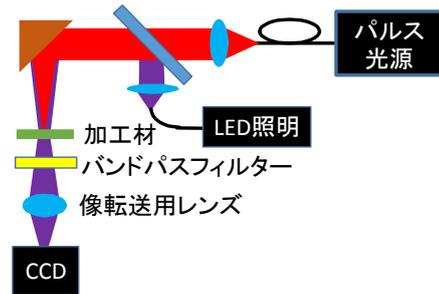


図 11. 製作中のその場観察可能な加工系

5. まとめ

波長 2 μm 帯ナノ秒/フェムト秒光パルスを用いたレーザー加工を行うため、高エネルギー発振器を開発した。フェムト秒領域では $\sim 100 \text{ fs}$ $\sim 1 \text{ nJ}$ 出力を達成し、現在これを 100 nJ まで向上させることを進めている。ナノ秒領域では 100 μJ 以上のパルスエネルギーとパルス幅 $\sim 3 \text{ ns}$ を達成した。現在これらの光源を使用したレーザー加工を行うため、その場観察可能な加工光学系を製作中である。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成のご支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Karsten, S. Lamrini, P. Koopmann, and P. Fuhrberg. InTechOpen. InTech, 01 Feb. 2010. Web.
- 2) T. Ehrenreich et al., SPIE Photonics West 2010 7580, Session 16: Late-Breaking News January, (2010)
- 3) M. Tokurakawa, H. Sagara, and H. Tünnermann, Opt Express, 27 19530-19535 (2019)
- 4) S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor, and V. P. Gapontsev, Opt. Lett. 22, 298-300 (1997)