

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高速レーザードライエッチング法の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年 10月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社メガオプト

目次

	ページ
1 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的および目標	3
1-2 研究体制	6
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
2 成果内容	10
2-1 光源構成	10
2-2 ファイバ発振器	11
2-3 ファイバ増幅器	16
2-4 波長変換システム	20
3 全体総括	23
3-1 目標・実績の比較による達成度検証	23
3-2 まとめ	24
参考文献	25
専門用語集	26

1 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 背景

電子配線技術でのプリント基板の高集積化、電子部品の小型化に伴い、加工の微細化が要求されている。微細加工は比較的加工しやすい材料ではすでにミクロンオーダーの直接加工が実現されているが、現在から将来にかけて必要な加工対象の中には難加工性の材料も含まれており、また、ミクロンオーダー以下の精度が必要な場合には、機械・電氣的な従来手法では精度上の限界がある。また機械加工の場合、加工されたワークをそのまま次のプロセスに回すことができなく、納期が長期化する。加工後のワークに洗浄過程が必要になるわけだが、ここで使用されるケミカルは環境負荷が大きく、しかも大量に使用されるために環境保全上のリスクとみなされている上、コストの面でも不利となる。さらに、機能性を付加した複合材料では、物性が異なる複数の材料が近接して配置されているため、良好な加工条件を見いだすことが困難である。従って、次世代の微細加工は、波長、空間特性、時間特性ともに緻密に制御されたレーザー光を用いるドライプロセスが必要不可欠である。

レーザーを用いた微細加工のポイントは、短波長レーザーを利用した光子エネルギーによる材料の原子間結合の直接切断、すなわちアブレーション加工にある。機械的な手法に限界があるのは、単に加工作具のサイズだけではなく、加工の物理が関係している。機械的手法による切削加工はせん断によるものであり、いわば加工作具により物質を機械的に「はぎ取る」ことになるため、工具が持つ精度以上の加工精度は得られない。レーザーを用いた加工の場合でも光子1個が持つエネルギーが対象材料の原子間結合エネルギーを下回る場合、吸収-溶融-蒸散というプロセスをたどるため、熱的な影響を避けられず、加工部位周辺に熱だれなど溶融による影響が残り、精度は高くない。これに対し、原子間結合を切断できる高エネルギー光子すなわち短波長レーザーを用いると、溶融過程を経由せずに昇華するため非熱加工となり、切削面はビーム形状またはその移動包絡線で決まる平滑な面となり、切削面のみならず周囲への熱だれは発生しない。また切りくずが残らないため、基本的に洗浄過程が不要なドライプロセスとなる。

今回共同で申請している日星電気株式会社はフッ素樹脂とガラスを製品群の中に多く使用している。同社が取り扱う製品はパソコンや携帯電話に搭載されるアンテナやケーブルがある。また医療用の高機能部材なども新規に開発している。これらは最終製品の高性能化にともない、サブミリ単位まで小型化が著しく進んでいるが、その加工はすでに従来方法の限界に達している。レーザーによる加工においても、ガラスやフッ素樹脂の非熱加工に適した短波長光源がないことが原因の一つである。フッ素樹脂はC-F結合、ガラスはその主成分であるシリケートの中にSi-O結合が含まれており、いずれも結合エネルギーが比較的高い材料である。結合エネルギーの高い結合を昇華させるためのレーザー波長は通常深紫外領域にあり、これらを微細加工するためには波長300nm以下のレーザーが必要である。

表1 産業用紫外レーザー（媒質の項目、数字はそれぞれ高調波の次数を表す）

種別	媒質	波長(nm)	加工性	品質	コスト	実用化	備考
エキシマ	ArF	193	◎	△	△	◎	代替がないので使われてきた
ガス	Ar イオン	244/257	◎	◎	×	○	一般的でない
固体	Nd 3 ω	355	△	○	○	◎	ガラス・フッ素樹脂は熱加工
〃	Nd 4 ω	266	○	○	○	△	実用的な運用実績なし
ファイバ	Yb 4 ω	257	◎	◎	◎	?	本件の目標

紫外レーザーはすでにエキシマレーザーや Ar イオンレーザーなどのガスレーザー、固体レーザーの波長変換などにより達成されており、一部のレーザーは産業用として使われている（表 1）。しかしながら、ガスレーザーは危険なガスを利用する上にガスの交換が必要であり、ランニングコストが高いために、高付加価値の半導体製造バッチプロセスなど以外には適用できない。一方、固体レーザーの波長変換による紫外レーザーはビーム品質が高く、良好な集光性が得られるが、現在のところ加工に耐えうる実用的性能を持つのはネオジミウム (Nd) イオンを活性イオンとして用いたレーザーの第三高調波 (355nm) が最短波長である。この波長は、フッ素樹脂を構成する C-C, C-F 結合、シリケートガラスの主成分である Si-O 結合は全く切断できないことがわかっている。ガラスをターゲットにした場合、Si-O 結合が切れることは重要であり、波長 260nm 以下の短波長レーザーが必要不可欠である。

本開発では、基本光源としてファイバレーザーを開発する。ファイバレーザーは、これまでのレーザー光源と一線を画す高い安定性、効率、耐久性、耐環境性から次世代の産業用光源のホープであり、連続波では、すでに kW を超える高出力の加工用に導入が進んでいる。その一方、パルス化は遅れており、波長変換された可視レーザーもリリースされているものの、深紫外線を発生する加工用ファイバレーザーの実用化はなされていない。これらの技術動向に対して、株式会社メガオプトでは、パルスファイバ技術と独自の非線形結晶の利用法により、紫外光が得られるファイバレーザーとして、低出力ながら 24 時間連続運転と長期間メンテフリーの産業用レーザーとしての仕様を満たした最先端半導体検査用光源の開発に世界に先駆け成功している。本開発では、微細加工におけるユーザーの切実な希望を満たし、より高度な加工精度を実現するために、株式会社メガオプトのファイバレーザーと波長変換に関する技術とノウハウを高度化する。

高いスループットの加工を実現するためには平均出力のみならずピークパワーのあるパルスを生成することが重要である。一般的にファイバはパルスに向かないと言われているが、高繰り返し、短パルスの動作領域ではファイバの持つ高利得の特徴を活かして、高性能を達成できる。さらに高出力ファイバレーザーで一般的なイッテルビウム (Yb) を活性イオンとして添加したファイバは、固体レーザーで一般的な Nd レーザーと比べ、より短波長で発振させることができる。第四高調波における波長では Nd 固体レーザーが 266nm に対し、Yb ファイバレーザーは 260nm 以下が可能である。260nm を境にしたこのわずかな数 nm の違いが、特にガラス加工にとって大きな影響を与えることは前記の通りである。しかしながら、技術動向として、ファイバレーザーをベースとした光源開発は着目されているものの、その技術的難易度から第三高調波までを目標としているものに限られている。第四高調波に相当する光子エネルギーは、第二高調波光を使用した材料の 2 光子吸収過程より得ることも可能である。第三次非線形過程である 2 光子吸収には高い光強度を入射する必要があり、その手法として超短パルスの高いピークパワーを用いる方法が挙げられる。通常、この方法にはフェムト秒からピコ秒のパルス幅で発振するモードロックレーザーが使用され、加工用の固体レーザーではピコ秒発振の Nd レーザーが挙げられる。しかし、その機械的に不安定な発振特性から実用化の域には至ってなく、また、その第二高調波光より得られる 2 光子吸収過程での光子エネルギーは波長 266nm に相当し、同技術を使用した Yb ファイバレーザーの光子エネルギー (波長 260nm 以下に相当) よりも下回る結果となる。

そこで本研究開発では、波長 1030nm で発振する Yb ファイバレーザー (発振器・増幅器) を新規開発し、ナノ秒及びピコ秒パルス幅でのファイバ増幅技術を確立するとともに、高効率な波長変換技術 (第二高調波・第四高調波) との組み合わせで、波長 260nm 以下に相当する光子エネルギーでのガラス・フッ素樹脂微細加工を実現させる。

1-1-2 目的

微細切削加工は高密度、高精度な製品群やサービスのみならず、ナノテクノロジーなど先端的研究分野を支えるバックグラウンドを形成しており、今後とも世界をリードするのに必要な要素技術である。その中でもガラス・フッ素樹脂といった素材は結合エネルギーが高く、レーザーを用いても加工断面及び周辺に切削くずが残る、加工がしにくい素材である。しかし、ファイバレーザーと非線形波長変換を応用した波長 260nm 以下のレーザーを用いることで、「クリーン」で微細な加工が可能となる。例えば、携帯電話メーカーでは、次世代携帯デバイスの内部配線は大容量化への対応から、数 10 本の電線の代わりにフッ素樹脂の光導波路の導入が検討されている。また、医療用のカテーテルの表面にマイクロマーキングすることが可能となれば、治療中の患者の負荷を大幅に軽減できる。このように微細な加工が通信、医療の他、セキュリティ、マイクロエレクトロニクスなどに大きな可能性を与えることになる。これを実現する光源と加工システムの構築、及びその評価を本研究の目的とする。本研究の目標は、「ガラス・フッ素樹脂微細加工用、平均出力 2W 以上、波長 260nm 以下のファイバレーザーシステムの開発・実用化」とし、20W クラスの 1030nm ファイバパルスレーザーの構築と、それを用いた波長 260nm 以下の高効率、紫外線発生の実証・最適化を主な目的とする。ファイバレーザーの出力特性及び出力安定性、UV 光学系の運用寿命を延ばすための結晶運用環境及び使用方法の最適化を行い、実用化レベルまでその性能の完成度を高めることを最重要課題とする。

1-1-3 概要

①ファイバ増幅器の開発

集光特性の優れた高輝度レーザーとしては現在最も効率が高く、機械的安定性、耐久性に優れており、産業応用に最も適しているファイバレーザーをパルスモードで発振させ、さらにファイバ増幅器で 20W まで出力を増幅する。発振器側の波長及びパルス幅、繰り返しのパラメータ変化に応じて、自然放出光や非線形効果を可能な限り抑制する構成とパラメータを丁寧に探る。特に、大出力に増幅されるファイバパワーアンプ段は、非線形によるスペクトル拡がり、パルス波形崩壊に加え、プロファイル制御も重要であることから、コア径やファイバ長などについて計算と実験的な結果の摺り合わせが必要となる。さらに、外部の温度変化に対しても安定した増幅が得られるような装置の製造プロセスを確立させる。

②波長変換システムの開発

赤外で発振するレーザーから、環境をマネジメントした波長変換システムにより、波長 260nm 以下、2W 以上の深紫外光を発生させる。出力・安定度の高い UV 光を発生させるための結晶の選定、集光パラメータの最適化を行う。特に、UV 領域で使用される光学素子及び結晶は、高エネルギーの光子に常に晒されるため、素子自体の劣化に加え、環境に存在するガスや不純物の析出などによる性能低下が起りやすく、長時間連続運転を実現するためには、これを抑制した環境の最適化が必要となる。レーザー側の波長及びパルス幅、繰り返しのパラメータ変化に応じた適正な動作点を探るとともに、安定性やビーム品質の評価を行い、装置を実用化レベルの性能までに仕上げることを課題とする。

1-1-4 計画内容

①ファイバ増幅器の開発（実施：株式会社メガオプト、日星電気株式会社）

①-1 ナノ秒・ファイバ増幅器の開発

波長 1030nm、パルス幅数 ns 程度、繰り返し数 100kHz 以上の電気パルス制御・光パルスファイバ発振器を開発する。多段増幅により平均出力 20W 以上を実現する。各増幅段で出力特性（平均出力、スペクトル、パルス波形）を詳細に測定し、得られたデータを装置構成にフィードバックし、最適化を行う。また、波長 1064nm の増幅特性との比較検証を行う。

①-2 ピコ秒・ファイバ増幅器の開発

上記装置の発振器部において、電気パルス制御により 500ps 以下の光パルスを発生させる。繰り返し数を変化さ

せることにより、ピーク出力を制御し、多段増幅により平均出力 20W 以上を実現する。各増幅段で出力特性（平均出力、スペクトル、パルス波形）を詳細に測定し、得られたデータを装置構成にフィードバックし、最適化を行う。また、波長 1064nm の増幅特性との比較検証を行う。目標とする最小パルス幅を 100ps 程度かそれ以上と設定し、既存のモードロック方式・短パルスレーザーの弱点である出力不安定性を同方法の採用により解消する。

① - 3 改良・装置化

ファイバ部の各部ユニット化を検討し、最終的な装置への組み込みがスムーズになるような設計を行う。各ファイバコンポーネント間及びファイバユニット間での偏光消光比を測定し、得られたデータを装置にフィードバックし、最適化するようなシステムを構成する。ファイバ増幅器のビームプロファイル・ビーム品質 (M²) を測定し、ファイバのマネジメント方法を最適化する。1030nm 及び 1064nm の両波長における出力安定性の試験を通して、増幅器の最終的な評価を行う。また、波長が 1030nm から 1064nm の間の範囲で、ある程度波長可変である装置、或いは、発振器及び前置増幅器を入れ替えるだけで使用できる主増幅器を開発し、パルス特性の可変性も加えたパラメーターの自由度の高い増幅器を開発し、上記同様の評価を行う。さらに、継続実施されているファイバコンポーネント開発により得られたものを搭載し、その評価を行う。

②波長変換システムの開発（実施：株式会社メガオプト）

②- 1 第二高調波発生ステージの開発

上記レーザー光の波長変換により、出力 5W 以上の第二高調波を発生させる。入出力特性とビームプロファイルを測定し、理論ビーム伝播との比較を行うとともに、パルス特性及び波長の変化に応じた最適な非線形光学結晶の使用条件を得る。

②- 2 第四高調波発生ステージの開発

上記レーザー光の波長変換により、出力 2W 以上、波長 260nm 以下の第四高調波を発生させる。入出力特性とビームプロファイルを測定し、理論ビーム伝播との比較を行うとともに、パルス特性及び波長の変化に応じた最適な非線形光学結晶の使用条件を得る。

②- 3 改良・装置化

第四高調波のビーム品質 (M²) を測定し、必要な場合、波長変換スキームの改良を試みる。測定したビームプロファイルから、真円度 90%以上を得るような補正レンズの構成を検証する。長期間連続運用するための深紫外線に対する光学素子の使用方法を確立する。最終的に、装置の出力安定性を測定し、その実用性を評価する。

1- 2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

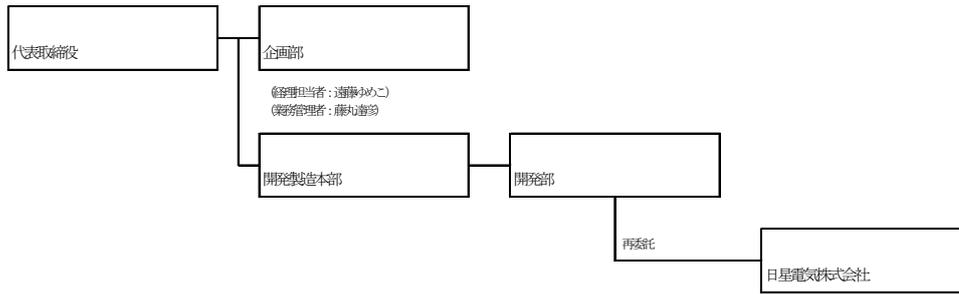
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

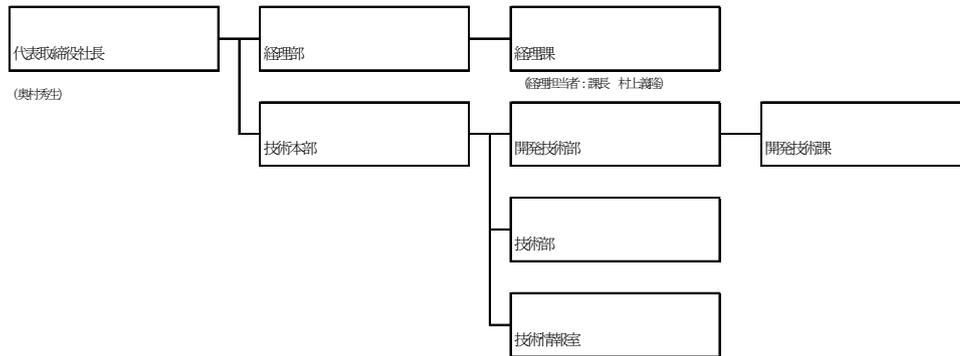
1. 事業管理機関

[株式会社メガオプト]



2. 再委託先

[日星電気株式会社]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 株式会社メガオプト

1. 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
宮田 憲太郎	開発製造本部 開発部 研究員	③
森脇 泰子	開発統括室 主任	③

2. 研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
宮田 憲太郎 (再)	開発製造本部 開発部 研究員	①②
篠崎 琢也	開発製造本部 開発部 副部長	①②
中西 康之	開発製造本部 開発部 課長代理	①②
後野 康弘	開発製造本部 開発部 係長	①②
酒井 敬益	開発製造本部 開発部 研究員	①②
松本 太成	開発製造本部 開発部 研究員	①②

【再委託先】

(研究員)

日星電気株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
奥村 秀生	代表取締役社長	①
松井 理行	技術本部 開発技術部 部長	①
小松 隆宏	技術本部 開発技術部 開発技術課 課長	①
西川 慎二	技術本部 開発技術部 開発技術課 主任	①

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社メガオプト

(経理担当者) 企画部 遠藤 ゆめこ

(業務管理者) 企画部 藤丸 達彦

(再委託先)

日星電気株式会社

(経理担当者) 経理部 経理課 課長 村上 義隆

(業務管理者) 代表取締役社長 奥村 秀生

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
和田 智之	独立行政法人理化学研究所 光グリーンテクノロジー特別研究ユニット ユニットリーダー	アドバイザー

(5) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望する。

(6) その他

なし

1-3 成果概要

①ファイバ増幅器の開発

1030nm の波長帯で平均出力 20W以上を安定的に、且高性能で得ることに成功した。前回の予算事業と比較し、波長を 30nm 以上短くすることに成功すると共に、ファイバ増幅器段数を計 4 段から 3 段へ簡略化、発振器並びに増幅器でのパルス可変性の大幅拡張、装置組み込みのためのユニット化、新たな光パルス発生システムの開発等、極めて大きな成果をあげている。前回問題となった最終増幅器における最大 20W 以上の平均出力から 14Wへの出力低下を克服し、本格的実用化に大きく近づいた。

① 1. ナノ秒・ファイバ増幅器の開発

・LD直接変調方式により得られた波長 1030nm 近傍でパルス繰返し周波数 50kHz, 100kHz, 500kHz, 1MHz 及びパルス幅約 100ns, 50ns, 10ns, 5ns でそれぞれ発振する発振器出力を 2 段の前置増幅器により 100mW以上まで増幅させることに成功。デューティ比を固定しながら、繰返し周波数とパルス幅は 50kHz～1MHz 及び 5ns～100ns まで自由に可変である増幅器を開発した。さらに、波長範囲は LD の温度を 20℃～45℃まで調整することにより 1025nm～1034nm までスムーズに可変であり、一方、FBG でスペクトルをロックすることで狭線化を実現し、パラメーターの自由度は数値目標を大きく上回った。

・上記の発振器及び前置増幅器を最終段のファイバ増幅器（主増幅器）に接続することにより、繰返し 100kHz～1MHz の周波数（100kHz, 500kHz, 1MHz で実施）にて 1025nm～1034nm の波長範囲における 20W以上の平均出力を得た。最大平均出力は 24Wであり、実用出力で数値目標を上回っており、目標は完全に達成された。

①-2. ピコ秒・ファイバ増幅器の開発

・LDの緩和振動を利用することにより 150ps 程度のパルス出力を発生させ、前置増幅器及び最終増幅器を通して平均出力 20W 以上の増幅光を得ることに成功した。

・上記の方法とは別に、外部変調方式よりさらに短い 100ps 程度の光信号を得るシステムを開発した。120ps の電気パルスを発生させ、広帯域 RF アンプにて増幅後、LiNbO₃変調器にて CW のシード LD を振幅変調させることにより、繰返し数 50MHz、パルス幅 120ps を発生させることに成功した。同システムは 1030nm 帯から 1064nm 帯で使用可能である。最終増幅器により 1030nm 近傍の波長領域にて最大平均出力 23W を達成し、目標は完全に達成された。

①-3. 改良・装置化

・装置組み込みを想定し、パッチコードにて自由に取り外し及び組み替え可能な 1030nm 発振器及び前置増幅器、1064nm 発振器及び前置増幅器、さらに両波長に対応可能なピコ秒発生システムを開発した。

・最終段のファイバ増幅器は、1030nm 及び 1064nm の発振器及び前置増幅器とファイバ融着接続することにより、両波長において 20W 以上の平均出力を得ることが可能なものを開発した。

・ファイバコンポーネントの開発として、コア径 105 μ m・クラッド径 125 μ m ファイバを結合した 10W 以上の LD を製作し、5000 時間以上の長期安定運転に成功した。また、同ファイバ 6 本をシングルモードファイバ 1 本とバンドルし、出力ポートがダブルクラッドのコア径 25 μ m・クラッド径 250 μ m のファイバである (6+1) x1 コンバイナーを製作した。昨年度の 85% の伝送効率から 93% 以上に引き上げ、目標値である 90% 以上を達成した。

②波長変換システムの開発

ファイバレーザーシステムにおける 1060nm 帯から 1030nm 帯へのアップグレードに対応し、波長変換ステージでは第二高調波及び第四高調波ステージの再検証を行った。結果、第二高調波ステージでは前回の最大平均出力である 4.6W を 2 倍程上回る 9W 以上の最大平均出力を記録した。第四高調波においては 260nm 以下の目標波長を得ることができたが、出力においては期間内に数値目標を達成することはできなかった。

②-1. 第二高調波発生ステージの開発

・今回新たに開発された 1030nm ファイバ増幅器の波長変換に対する最適な非線形光学結晶を位相整合条件及び非線形光学特性の詳細な検討より行った。

・最適な非線形光学結晶を選定し、最適集光条件を得ると同時に、高い変換効率を得るために必要なパルス及びスペクトルの条件を理論及び実験的に見出した。その結果、最大平均出力 9.2W、最大変換効率 50% 程度の波長 516nm の第二高調波発生に成功した。

②-2. 第四高調波発生ステージの開発

・第二高調波ステージと同様に 1030nm の第二高調波を入力とした場合の最適な非線形光学結晶の選定を行った。

・波長 258nm の第四高調波発生に成功し、目標である波長 260nm 以下のレーザー光を得た。しかしながら、本事業期間内においてシステムを最適化することができず、得られた平均出力は 0.1W に留まり、レーザー出力の数値目標である 2W 以上を達成することができなかった。入力である波長 516nm の第二高調波からはその数値目標を達成するために十分な出力が得られており、継続的に実施することにより達成可能である。

②-3. 改良・装置化

・プロト機製作に向けて、新たなレーザーヘッドの設計を行った。前回設計した結晶トラッキングシステムを手動から自動に改良し、連続運転可能とした。③-2 における原理実証が終了次第、製作可能である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社メガオプト

開発統括室 森脇泰子

Tel. 048-468-3291, FAX. 048-468-3292

企画部 藤丸竜彦

Tel. 048-469-3377, FAX. 048-469-3332

2 成果内容

2-1 光源構成

ファイバレーザは利得が高く、増幅率を高く取ることが容易である。しかしながら一方で非線形が出やすいため、共振器を組んで高ピークパルスが発生させることには問題が生じることが多い。これらのことから、高出力のファイバレーザは発振器から、よく制御された低出力のパルスが発生させ、これを高利得のファイバ増幅器数段を通すことにより増幅する、マスターオシレーター・パワーアンプファイア (MOPA) 形式のレーザを構築されることが多い。MOPA 形式によってメガワットを超えるピークパワーで狭線幅のパルスレーザなどが全ファイバで実現している¹⁾²⁾。これらの例は特殊なファイバや、高いハンドリングパワーを持つデバイス類などを使用しており、共通項が必ずしも多くはないが、ファイバレーザではこの形式の持つ優位性があることがわかる。一方パルスファイバレーザを基本波として UV を発生している例は多くはないが、例えばナノ秒であれば 1060nm を基本波とする第五高調波までを発生している報告例はある³⁾。しかしながらこの例では発振器として数 10kHz の繰り返し周波数で動作する受動 Q スイッチタイプの固体レーザを使用しており、純粋なファイバレーザとは若干異なる。固体レーザはパルスと CW の消光比、偏光消光比、スペクトル特性、良好なパルス形状などファイバレーザでは従来達成することが容易でなかったいくつかの特性について、比較的容易に達成できるからである。

本開発では基本波部分はオールファイバで MOPA 形式を実現し、目標としている UV 光の仕様からファイバレーザに求められる仕様を考えると、最終的な出力は平均 20W、ピーク出力おおむね 10kW 以上、線幅 0.2nm 程度と考えられる。ここに含まれない数値として、シグナルと増幅自然放出光の比や、偏光消光比、パルス消光比があるが、これらも適宜クリアされる必要がある。増幅器の項にも記すが、特にパルスの増幅器では、パルスとパルス間に時間があり、この間に励起された光はレーザ上準位に蓄積された高い反転分布が形成されている。このため ASE が成長したり、不要なレーザ発振を起こして効率を下げ、場合によってはレーザ素子の損傷を引き起こす懸念がある。このためアンプは比較的低利得のものを複数接続する。前回の予算事業では、1 段あたり 10~15dB の利得を持たせ、また発振器出力が 0.1mW オーダーになることを想定し、これからレーザの最終目標出力 20W を前提にしてトータル 43dB から 3~4 段の増幅器が必要と検討した。しかしながら、近年、パルス用ファイバコンポーネントの品質向上により、一段あたり 20dB 相当の増幅が可能と考えられ、本事業では増幅段数を 2~3 段に収め、よりシンプルで安価なシステムの開発を試みた。表 2-1 に前回の予算事業と本事業の想定する増幅度の違いを示す。表には波長変換ステージにおける出力を、それぞれのステージの効率を見込んで追加した。

表 2-1 ファイバレーザ各段の出力

	平均出力		増幅度/効率	
	前回	本事業	前回	本事業
発振器	0.1mW	0.1-1mW	-	-
増幅器 1	5mW	10mW	17dB	10-20dB
増幅器 2	100mW	100mW	13dB	10-20dB
増幅器 3	2W	-	13dB	-
増幅器 4	20W	20W	10dB	20-23dB
増幅器全増幅度			53dB	50-53dB
第二高調波	10W	10W		50%
第四高調波	2W	2W		20%
波長変換全効率				10%

図 2-1 に本事業での開発光源の構成を示す。増幅器 2 までは出力が十分低いため、シングルモード (SM) ファイバ結合された LD で励起された、コア励起の増幅が有効である (プリアンプ 1、2)。一方、増幅器 3 以降 (増幅器 3 は本事業では使用しないため、図 2-1 では省略する) は高い信号出力を要求されるため、励起にも高出力が

要求される。従って、増幅器 3 と 4 はマルチモード (MM) ファイバ結合の高出力 LD で励起するためのファイバ結合器を経由した励起システムを要求されると考えられる。前 2 段と後 2 段は作りが異なるため、以降では前段 2 つを前置増幅器、後段 2 段を主増幅器、或いはそれぞれプリアンプ 1、プリアンプ 2 及びパワーアンプと称することにする。

なお、波長については可能な限り短くした方が非熱加工を行う上では有利だが、前回は 1060nm 付近以外を対象にしたファイバ部品は特殊であり、高価であること、入手までのリードタイムの長いこと、特殊部品であるゆえの耐久性や実績の欠如ということから、ファイバレーザの波長を 1060nm とした。しかしながら、現在、部品の価格及びリードタイム共に、1030nm 用もほとんど変わらなく、もはや特殊備品であるという認識ではなくなった。本事業では当初の目標であった 1030nm の光への波長変更を行い、データが蓄積されていない耐久性や実績については本事業での開発にて検証することとなった。性能の観点からは、Yb ファイバレーザが発生する利得は 1030nm の方がより高く、本質的に 1060nm のレーザと同等または優れた性質を発揮するものと予測される。開発のポイントとしては、1030nm 帯は 1060nm 帯に比べて非常に強い自己吸収があるために、理論設計はより複雑なものとなるため、実験にてゲインファイバ長を詳細に検討する必要がある。なお、最終出力は制御された直線偏光が必要であるため、特に注記のない限り、信号光が伝搬するファイバおよびデバイスには偏光保存するタイプが用いられた。

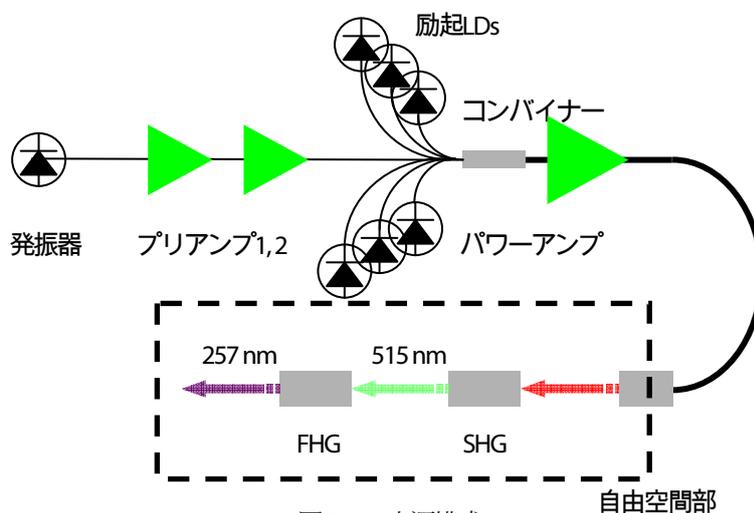


図 2-1 光源構成

2-2 ファイバ発振器

1030nm 及び 1060nm 付近で発振するナノ秒クラスのパルス幅を持つパルス発振器として、様々な方法が考案されている。現在おおまかに分けて、①ファイバレーザの共振器にパルス発振させるための素子 (Q スイッチ) を挿入する方法、②連続波で発振するファイバレーザまたはレーザダイオード (LD) の後段に、例えば強度変調器を挿入し、光を切り出す方法、③ LD への注入電流を変調し、LD から直接パルスを取り出す方法が考えられる。これらの方法の有利点と欠点を比較したものを表 2-2 に示す。ここでは目標値として 1MHz の繰り返し、パルス幅数 ns、デューティ比 1:1000 程度を前提としている。

今回必要な仕様を完全に満たせるのは外部変調か直接変調による方法だが、外部変調はシステムが複雑になる上に、出力が小さいためにより多くの増幅器を必要とする可能性がある。直接変調は性能的な優位性に加え、使用される材料が他の方法に比べて少なく、コスト面でも有利であるため、前回の予算事業では直接変調による方法のみを採用したが、本事業はパルス制御及びスペクトル制御に優れる部変調方式も取り入れた。

表2-2 ナノ秒パルス発生の方法比較

	Q スイッチ	外部変調	直接変調
繰り返し周波数	△ ^{*1}	◎	○
スペクトル	○ (～0.2 nm)	◎ (0.1 nm 以下)	△
パルス幅	△ ^{*2}	◎	○
出力	◎	△ (0.05 mW)	○ (1mW)
システム	△ ^{*3}	△ ^{*4}	◎
コスト	○	×	◎

^{*1} 1 MHz はドライバの立上りからして困難、

^{*2} 共振器の利得と共振器長によるが、通常数10²~100 ns、

^{*3} 損失の大きいQ スイッチと、RF ドライバが必要、

^{*4} 外部変調器とバイアスコントローラが必要

直接変調に用いた LD はシングルモード (SM) ファイバ結合した 1030nm 帯で発振する LD である。デューティ比 0.5% に設定したデジタル制御の矩形波電気パルス入力から、100MHz 帯域 LD 駆動電源で同 LD (TEC 設定温度 25℃) を発光させ、図 2-2 のような光パルスが得られた。電気パルス発生源は LD 駆動電源に対応し、最大 100MHz の周波数まで可能であり、立上り/立下りも 4ns 程度である。ここで、LD にかけるバイアス電流は LD の CW 発振閾値をわずかに下回る 50mA に設定し、駆動パルス電圧は 760mV、実効的に 658mA のパルス電流を LD に流している。駆動回路に含まれるバイアスティーを通し、バイアス電流を CW 発振する手前まで流すことにより、パルスの急激な立上りを抑え、光パルスのオーバーシュートを最大限に抑えている。結果、図 2-2(a) よりパルス幅 5.5ns、8.6ns、48ns、97ns の非常に綺麗な光パルス波形が得られたことが見て取れる。一方、図 2-2(b) は図 2-2(a) の時間スケールを拡大した図 (緑線、赤線はスケールを 1/10 にしてある) であり、パルス間隔 1000ns、2002ns、10013ns、20033ns より、周波数 1MHz、500kHz、100kHz、50kHz を読み取ることができる。

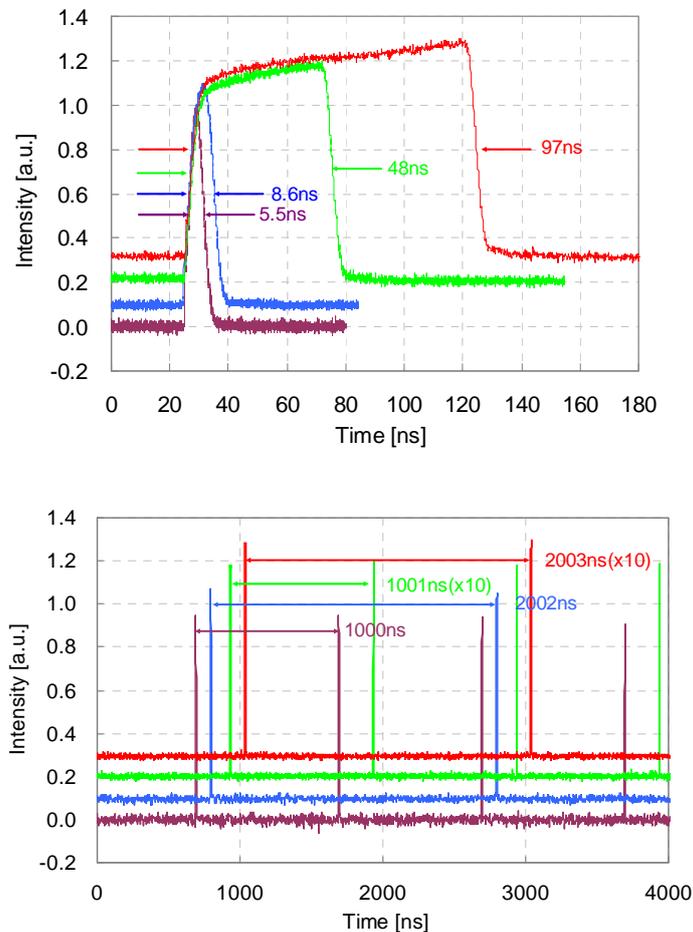


図2-2 発振器からの光パルス a) パルス幅、b) パルス繰り返し

光出力のパルス幅は、駆動回路の電気パルス幅にほぼ一致していたが、パルス幅が 10ns を下回ると、ピーク高さが減少した。これは LD ドライバ及びトリガー源ともに電流パルスの立上り時間が 4ns 程度であり、所定のパルス高さに達する前にパルスの立下りが発生するためと考えられる。ちなみに、今回用いた LD のシグナル変調帯域は 200MHz であり、典型的な立上り/立下りは 2ns 程度と電気パルス発生源及び LD 駆動電源と比べていずれも上回るため、この現象は LD の特性による制約ではないことがわかる。LD が持つ帯域を考えると、同方法より安定的に光出力が得られる最小パルス幅は 5ns 程度と考えられる。このデューティ比において測定された LD の平均出力は 1MHz、500kHz、100kHz、50kHz においてそれぞれ 1.13mW、1.17mW、1.35mW、1.39mW であり、このステージにて必要な平均出力が得られたことがわかる（表 2-1 参照）。それぞれのピーク出力は、5.5ns 及び 8.6ns のパルスはガウシアン波形、他 2 波形は矩形波を仮定し、おおよそ 0.3~0.4W のピーク出力が算出でき、これは当初の LD の連続波発振出力に対して十分上回る高い出力であり、パルス用 LD の特性がうまく活かされていることがわかった。

図 2-3 は本事業で使用した 1030nm 帯 LD を設定温度 25°C にて CW 発振させ、FBG でロックしたスペクトルである。サイドモードを -20dB 以下で十分に抑制するため、注入電流は 480mA とした。発振の中心波長は 1032.458nm、線幅は半値で約 9pm であった。ここで用いた光スペクトラムアナライザの波長分解能が約 10pm であることから、ほぼ波長分解能で制限される線幅が得られていることがわかる。

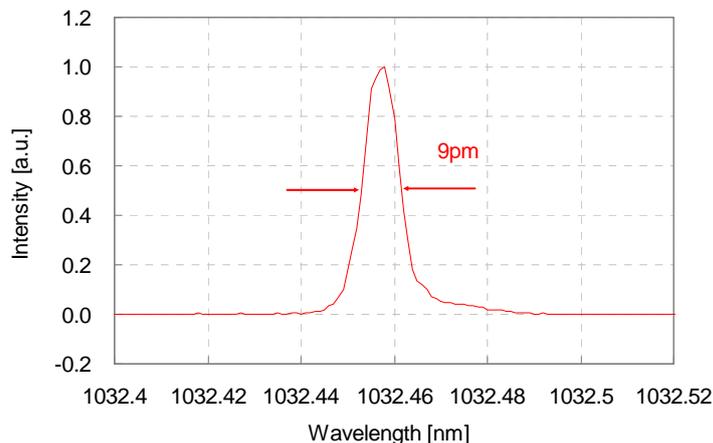


図 2-3 CW 発振 LD の光スペクトル

ナノ秒オーダーの光パルス発振には、注入電流パルスの印加時間が、光が共振器内で成長する時間に比べて短く、従ってパルスの時間内では FBG でのスペクトルのロックが十分ではないために発振波長が不安定化する傾向がある。このことはメーカー問わず、同 LD のタイプの本質的な特長とも考えられる。応用においてスペクトルの要求が厳しくない場合、FBG 無しで用いられることがあるが、そのような場合は逆に、LD の温度調整による発振波長のチューニングが可能となる。本事業では、ファイバレーザ単体の実用化の開発要素も含まれていることから、意図的に FBG でのスペクトルロックを避けたオペレーションも試みている。図 2-4 に温度同調による LD 発振波長の可変性を示す。中心波長 1025nm~1034nm でチューニング可能な発振が得られることがわかる。スペクトル幅はおおよそ半値全幅で 0.5nm~1nm と広く、ショット間でのスペクトル形状の変化が観測された。

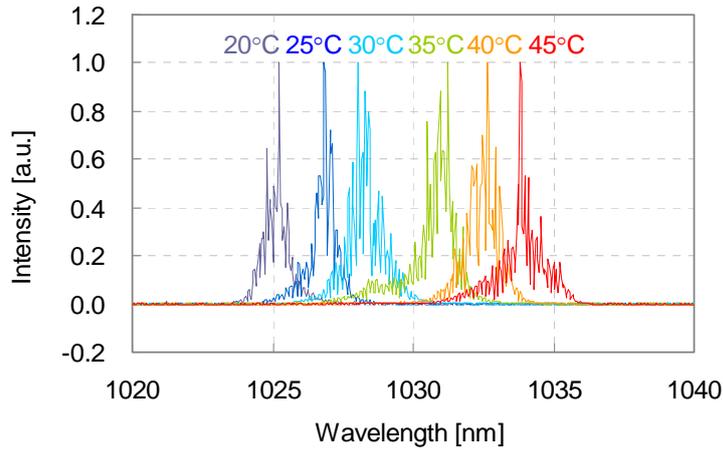


図2-4 パルス発振LDの光スペクトル

スペクトルのロックを安定して行うためには、LD 並びに FBG の温度制御が重要となってくる。同 LD の温度を 38.5°C に設定し、CW 閾値よりわずかに上げたバイアス電流にてスペクトルロックさせた際のパルス発振の様子を図 2-5 に示す。数本の縦モードが同時に発振しているが、全体のエンベロープでスペクトル幅約 0.1nm を形成し、狭線化に成功している。

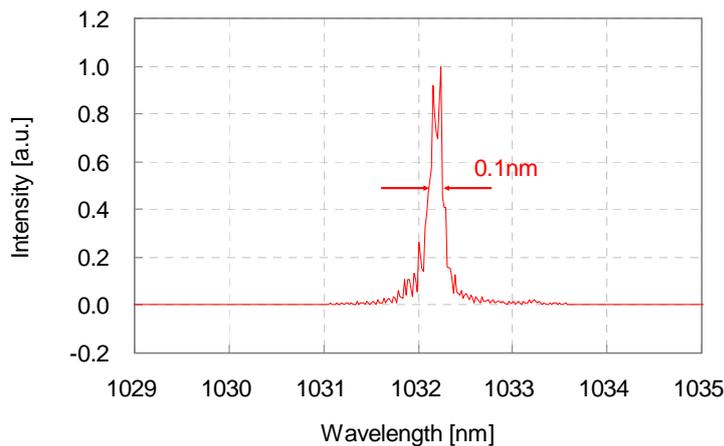


図2-5 パルス発振LDをFBGでロックした光スペクトル

一方、ナノ秒以下のパルスが発生する方法として通常用いられるのはモード同期である。モード同期にも大別して2通りある。モード同期には光が共振器を1往復する間に定期的な強度変調が導入される必要があるが、これを光強度に対して非線形な反射率や透過率を示す素子を共振器内部に用いて、共振器の内部に存在する光強度の摂動を積極的に用い、これを増強することでパルスの急峻化をするのが受動モード同期である。例えば共振器の内部に可飽和半導体ミラー (SESAM) の用に強度依存の非線形吸収を持つ帰還素子を挿入することにより、共振器内部の出力摂動または出力ノイズからピークの高い部分が選択的に成長して短パルスを形成する。一方、音響光学 (AO) 素子などの高速な強度変調器を用いて外部の電気信号で制御するのが能動モード同期である。モード同期を行うための専用強度変調器としての AO モードロッカーも市販されている。これと必ずしも原理を同じくしないが、音響光学波長可変フィルター (AOTF) などの周波数シフトを共振器の内部に挿入した場合にもモード同期が起きることが実証されている^{4), 5)}。この AOTF を搭載したモード同期ファイバレーザについては、前回までの開発において原理実証済みである⁶⁾。

一方、ピコ秒クラスのパルス幅を LD 直接変調或いは外部変調により出力することも技術的に可能である。前回は実施しなかったが、本事業ではナノ秒パルスの発生方法と基本的には同じ構成にてピコ秒発生を試みている。

用いた方式は、立上り/立下りの早いパルス駆動電源を使用した LD のゲインスイッチング、広帯域の強度変調器を使用した外部変調によるものである。一般的にモード同期はシステムが機械的に非常に敏感であるために、わずかな外乱等で同期が外れることや出力の不安定性が引き起こされることが良く知られている。それに対して今回採用した方法は、基本的には光特性が電気制御に依存し、高度な電気制御技術より安定したピコ秒発生が可能になる。パルス幅及びパルス繰返し周波数は可変であり、応用に必要な時間特性が得られ易いという利点もあり、より実用的である。

図 2-6 にゲインスイッチングにより得られたピコ秒光パルスを示す。10GHz 以上の帯域を持つオシロスコープと InGaAs ディテクターを使用してパルス幅は 150ps と測定され、LD に流される電気パルスのそれより短いことがわかり、緩和振動による発生ということがわかった。実際、同電源をナノ秒発生器として使用した際の光パルス立上り部分に、オーバーシュートの光発振が見られたが、それは同現象によるものと考えられる。遅延回路の微調整により、その時間部分のみを切り取ることで、このようなパルスが得られた。パルス繰返し周波数を 2.4MHz に設定した際、平均出力は約 0.1mW 得られ、ナノ秒パルス発生時よりは出力が低下するが、シード光としては十分な出力を持つことがわかる。また、前述の通りパルス繰返し周波数は可変であるということが同方法を用いたピコ秒発生の一つの利点でもあるが、本事業で用いた電源構成では、周波数を変えると内部抵抗のバランスがわずかに変化し、遅延回路の再調整が必要になった。高周波 RF 或いは短パルスの励起による方法ではそのような問題は基本的に現れないと考えられる。

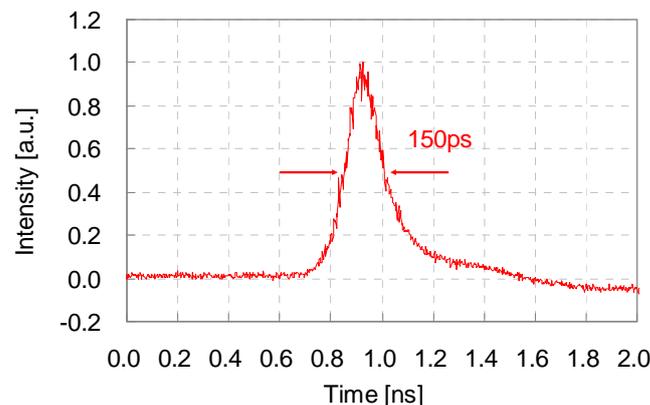


図 2-6 ゲインスイッチングによるピコ秒発生の様子

LD 外部変調により、1030nm 帯でさらに短い光パルスの発生に成功している (図 2-7)。ここで取得された 115ps という短パルスは、変調器にかけた電気パルスとほぼ同じ幅である。この電気パルスの振幅は、今回用いた LiNbO_3 光導波路型強度変調器の半波長電圧に必要な 2.5V 程度である。変調器にかけるパルス電圧が半波長電圧の振幅より超えると、パルス幅が広がる現象が観測された。これは変調器の線形応答が崩れることが影響していると考えられる。今回の実験では、デューティ比をナノ秒発生器と同様に 0.5% とするため、繰返し周波数は 50MHz に設定した。結果、150mA で CW 発振させた 1030nm 帯 LD を変調器に入力することにより、65 μ W の平均出力を得た。使用した変調器はスペック通り 30dB 以上の消光比があると測定され、10% 程度の CW 成分が含まれることがわかった。CW 成分が大きいと加工において光出力の一部が熱成分となり、良好な加工品質が得られない。また、同成分は波長変換においてほとんど変換されないため、最小限に抑えることが重要となる。現在では、高消光比モデルとして 40dB 近くの特性を持つ変調器も市販されてきており、それらを使用することより同システムの更なる性能向上が期待できる。

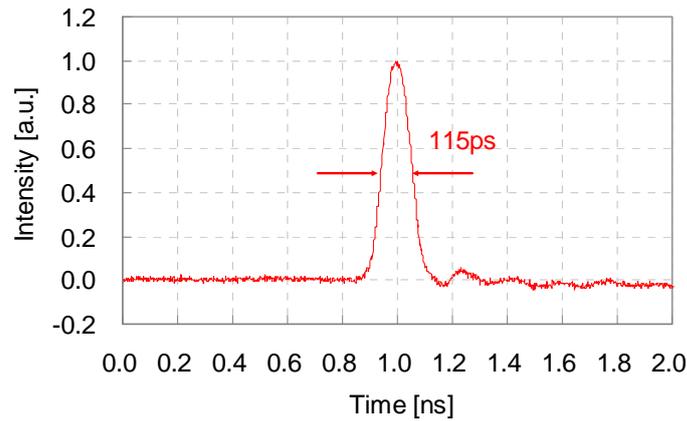


図 2-7 外部変調によるピコ秒発生の様子

以上、LD 直接変調より平均出力約 1mW、パルス幅 5~100ns、繰返し数 50kHz~1MHz、ピーク出力 0.3~0.4W を取得し、さらに LD ゲインスイッチングと外部変調システムより、100ps 程度の光パルスを得ることができた。ピコ秒パルスの平均出力はナノ秒発振器と比べて一桁程落ちるが、プリアンプの高い利得にて十分カバーできる。モードロック発振器の代替として、十分な特性を持つことがわかった。これらのナノ秒及びピコ秒パルス発生システムは 1030nm 或いは 1060nm 帯 LD より構成され、LD の温度とバイアス電流の調整により、波長チューニング或いは FBG でのスペクトルロックによる狭線幅化が可能である。

2-3 ファイバ増幅器

パルスの増幅器は連続波と異なり、パルスとパルス間にシグナルが入力されない時間帯が存在する。このパルス間における自然放光の増幅やレーザー発振は効率の減少のみならず、レーザーを構成する素子を損傷することにもつながるために避けるべきである。特に繰り返しが低くなるにつれ、ASE は増える傾向がある。これらを防ぐために増幅器の多段化が必要となる。多段化するメリットは、1 段あたりの利得を下げることにより不要な ASE、レーザー発振を妨げることに加え、アンプとアンプの間に適当な素子を入れ、システム全体の安全性、安定性、求められる仕様を確保することができることである。低出力の増幅段であれば、市販のインラインアイソレータをアンプ間に容易に挿入でき、これにより、連鎖的な損傷を回避することができる。

本章の冒頭で議論したように、発振器の出力と、想定できる 1 段あたりの利得から考えるとプリアンプは 2 段で構成すればよく、シングルモード伝搬であるので、シングルモード LD でコアを直接励起する方式を採用ことにした。アイソレータ、WDM、利得ファイバ、SM-LD、バンドパスフィルターをそれぞれスプライス接続して増幅器 1 段目を構成した。ゲインファイバの長さを最適化することにより、励起 LD に 500mA の電流を流した際、34mW の増幅光が得られた。光出力は線形に増加し、飽和などの特性は観察されなかった。このアンプでの実効増幅度（アイソレータなどの損失を含めた増幅度）は 14dB であり、十分な増幅及び出力が得られるがわかる。この段階において、特にパルスの時間及びスペクトル特性に影響は見られなかった。以降の実験において、プリアンプ一段目の LD 電流値は 500mA で固定することにした。

次に、2 段目の増幅器を一段目と同様に構成した結果、100mW を大きく超える出力が最終段のアイソレータ後に測定された。パワーアンプを適切に動作させるため、タップカップラーを設置して光出力をモニターすると同時に、偏光ビームスプリッター (PBS) を新たに設けて余分な偏光成分を排除した。図 2-8 にデューティ比 0.5%、パルス繰返し周波数 50kHz、100kHz、500kHz、1MHz に設定した場合の励起 LD 出力に対するシグナル出力をプロットしたものを示す。

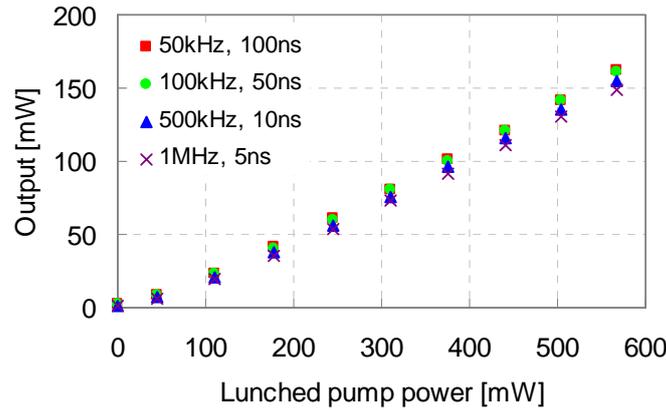


図2-8 プリアンプ2段目の入出力特性

各パルス繰り返し周波数で同様の入出力特性が得られ、このステージにおいても光出力は線形に増加し、飽和は見られなかった。最大出力は162mWと想定を上回るパワーが確保できた。一段目のバンドパスフィルター後からの実効的な増幅率は7dB弱とそこまで大きいものではないが、今回のパワーアンプにシードするシグナルの大きさとして十分と考えられる。

この段階においてスペクトル形状は発振器とほぼ変わらないものが得られたが（スペクトルの拡がり観測されなかった）、長いパルスの増幅においてパルス形状に大きな違いが現れた。図2-9に励起LD電流値の上昇に伴うシグナル光100nsパルスの形状変化の様子を示す。高い電流値にて“パルスの先細り”現象が見て取れる。一般的に増幅器の蓄積エネルギーと比較して入力エネルギーが大きく飽和増幅領域にあると、パルスの先頭がより増幅され、後がわは増幅度が低くなる現象が見られる。飽和領域では小信号利得領域と異なり、反転分布がダイナミックに変化するため、パルスの先頭部分で高い利得を持っていた利得媒質が、無視できないエネルギーを取り出したために、反転分布量の変動が無視できず、パルス後半は利得が減じてしまいエネルギーを取り出せないためと解釈できる。従って、パルス波形は変化するが、入力に対してアンプが飽和領域で動作していることが、この結果からわかる。このことは、増幅器がこの入力パワーにおいては十分なエネルギーを取り出されていることと同義であり、ASEの異常な増幅や、レーザー発振などが発生しにくいことを物語っており、レーザーの安定、安全な動作の上で重要である。

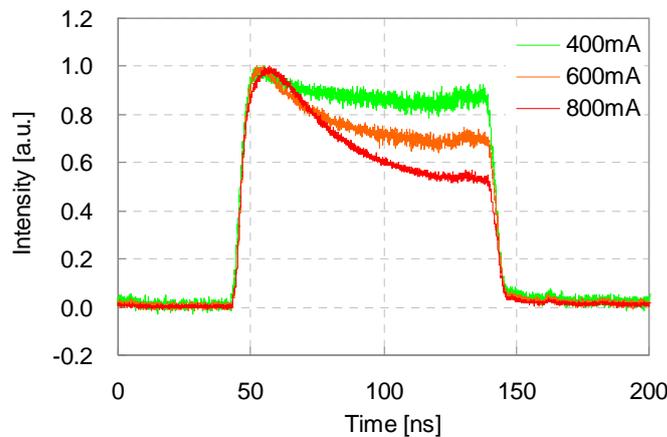


図2-9 プリアンプ2段目の増幅によるパルス形状変化

前回の予算事業では、パワーアンプもプリアンプと同様に、ASEやレーザー発振を抑制した構成とする必要があるため、多段増幅を採用した。冒頭で議論した利得の議論からパワーアンプも2段構成としている。本事業では

パワーアンプ一段目を省略することにより、ASE はより多く発生すると考えられたが、フィルターを設けるなどして、そのリスクを最小限にした。一方、増幅後の出力が 1W を大きく超えるため、プリアンプと同様の SM-LD を使用したコア励起のタイプではもはや達成できなく、MM-LD を使用したクラッド励起が必要になる。高出力増幅用のコンポーネントと構成として、マルチモードコンバイナー、あるいはポンプコンバイナーと呼ばれる、複数の MM-LD の出力を束ねる素子に、ダブルクラッド (DC) ファイバを組み合わせたものが利用されている。コンバイナーはコアを取り囲む第 1 クラッドと MM ファイバコアを結合するデバイスであり、MM ファイバからの励起光を DC ファイバの第 1 クラッドに導入する。コンバイナーの後に接続された同じく DC の利得ファイバの第 1 クラッドに閉じこめられた励起光が距離の伝搬とともにコアを励起し、励起パワーが順次コアに吸収されていくことにより利得を発生させる仕組みである。標準的な 105 μm コアの MM ファイバに接続された LD は数 W 出力のものが容易に入手でき、現在はシングルストライプなら 10W、マルチストライプまたはマルチチップなら数 10W までが得られる。10W の LD でも通常のコンバイナーを使用すると最大 60W の励起パワーを簡単に得られる。ここでは 10W のものを標準的に使用し、可能ならば出力を拡張することを考えた。

本事業において、前回同様に上記にあるコンバイナーとファイバ結合 MM-LD のコンポーネント開発を試みている。今回、コンバイナーは 1 本の SM ファイバのシグナル入力ポート及び 6 本の 105 μm コア・125 μm クラッド径 MM ファイバの励起光入力ポートを 25 μm コア・250 μm クラッド径ファイバの出力ポートでバンドルしたものを製作した。伝送効率は 92% であり、前回の 85% を上回る結果となった。ファイバ結合 MM-LD は波長 910nm、出力 10W 以上を達成し、5000 時間以上の安定した連続運転に成功した。

パワーアンプでは、このようなコンポーネントを使用して高出力に対応した構成をするわけだが、一般的な 125 ミクロンクラッドのファイバと比べ、250 ミクロンクラッドファイバのクリーブとスプライスは条件が非常にシビアである。大口径用ファイバクリーバーを使用して丁寧にクリーブ後、最適化された放電条件にて融着接続した。利得ファイバには、片端にエンドキャップと呼ばれる、短いコアレスファイバを融着した。これはこのアンプのファイバ出力端面における光強度が大変大きくなることが予想でき、25 μm コアからの出力をそのまま空間に放出する場合、特に耐損傷光強度が弱いことが懸念されるファイバ・空間の境界面でのファイバ損傷を回避するための措置である。コアレスファイバをスプライスした利得ファイバは、コアレスファイバとの融着部分において、シームレスでありながら光の閉じこめがなくなり、利得ファイバの持つ NA に対応した拡がり角でコアレスファイバ内を拡散しながら進み、ファイバ・空間境界面でのビームサイズが大きくなるため損傷を回避しやすくなる。また、端面は角度を付けてクリーブすることにより、端面での反射光がファイバに戻ることを回避できる。コンバイナーの励起入力 6 本すべてのポートに、それぞれファイバ端最大出力 9W の中心波長 915nm の MM ファイバ結合 LD モジュールを接続し、さらにゲインファイバ、エンドキャップと接続。ファイバを固定後、コリメーターを設置し、励起光透過の 2 枚のミラーで 1030nm 光を折り返した。今回得られた典型的な 1030nm 帯の増幅出力を図 2-10 に示す。パルス繰返し周波数 100kHz 以上にて平均出力 20W 以上が達成されたことがわかる。入力約 150~160mW に対して最大約 24.1W が得られた。このステージにおける利得は従って約 22dB と非常に高く、出力値は 100kHz 以上の繰返し周波数にて目標値を上回る結果が得られた。しかしながら、50kHz においてはパルス幅が 100ns と広く設定されているために、非常に強い SBS が観測された。SBS の発生により素子のダメージが懸念されたことから、平均出力 17.6W でそれ以上の増幅は試みなかった。一方、ピコ秒パルスをシードした場合も、同増幅器でほぼ同じ 1030nm 帯増幅特性が得られた (図 2-11)。ナノ秒同様、励起 LD 出力に対して線形に増加し出力飽和は観測されなかった。この測定では、ミラーで反射した残留励起光がある割合で残っていることが考えられるが、残留励起光の拡がり角と検出器の置く位置及びそのアパーチャーの大きさから、増幅光に対して無視できる程度と判断した。

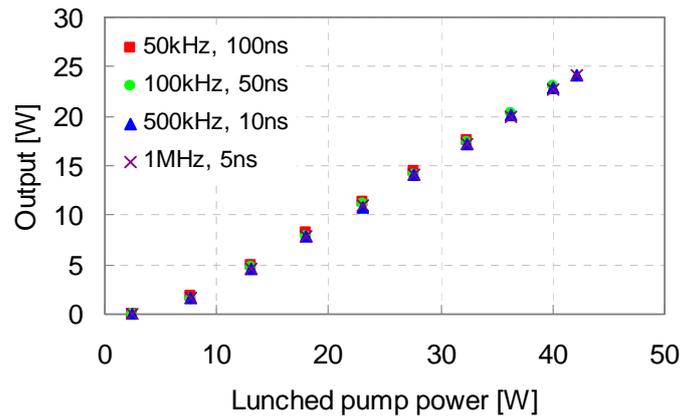


図2-10 ナノ秒・パワーアンプの入出力特性

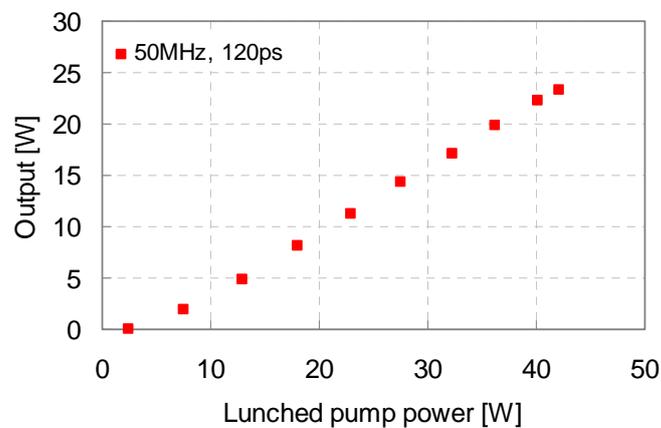


図2-11 ピコ秒・パワーアンプの入出力特性

パワーアンプの 1030nm 帯のスペクトル測定に関しては、期間内に詳細な検討ができなかった。しかしながら、今回、同パワーアンプを使用して、1064nm を平均出力 22.8W、最大ピーク出力 10kW 以上まで増幅させたが、入力スペクトル幅 13pm のシングルピークに対して、増幅後スペクトルを光スペクトラムアナライザで確認する限り、半値全幅の広がり観測されなかった。従って、波長変換においては、スペクトルがサブピークを持たずシングルである限り、パワーアンプのスペクトル幅は入力スペクトル幅とほぼ同等であり、波長変換においては入力スペクトルをいかに制御するかが高い変換効率を得る上で重要な点となった。

図2-12は平均出力20W以上における1030nmパワーアンプのビームプロファイルである。縦2.6mm、横2.1mmと若干縦長ではあるが比較的良好なビームプロファイルが得られたことがわかる。低出力時とプロファイル形状はほぼ変わらないことが今回の測定より判明している。

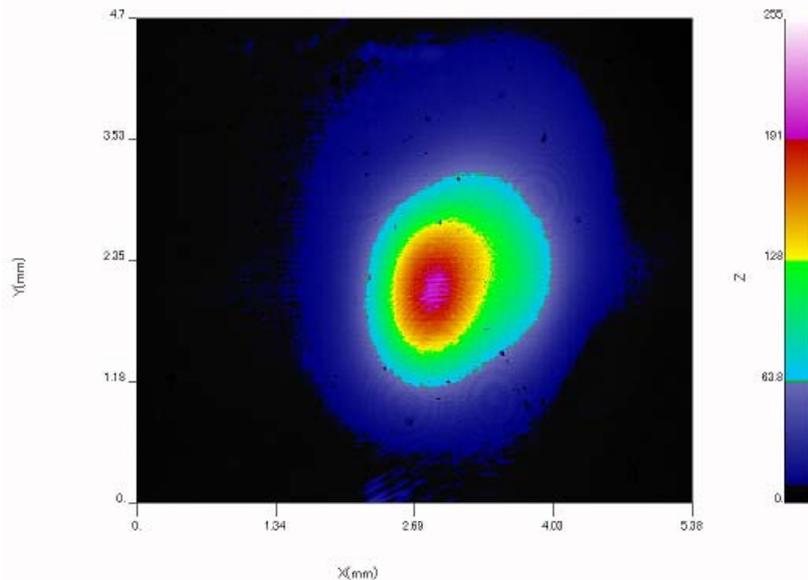


図2-12 平均出力20W以上時のパワーアンプのビームプロファイル

以上のことから、ナノ秒パルス（約 50ns～5ns）及びピコ秒パルス（約 100ps）において平均出力 20W 以上の良質な増幅光が得られたことがわかる。設定したデューティー比 0.5%よりおおよそ 4～5kW 程度のピーク出力が算出され、SHG 波長変換ステージで効率 50%を越えるには十分な大きさと言える。また、このパワーアンプの最初の主なピーク出力制限は SBS であるが、同現象は短パルスでは顕著ではないため、波長変換ステージにおいてピークパワーを稼ぐために、パルス幅を制御する方法がしばしば用いられた。得られた最大ピークパワーは 10kW を越える。今回開発したファイバレーザーは発振器より 1025nm～1034nm の領域で波長可変、また FBG により狭線幅化も可能。パルス繰返し周波数とパルス幅も自由に可変であり、MOPA の特性が十分に活かされている。さらに、1064nm 発振器及びプリアンプと入れ替えるだけでワーアンプは 20W 以上の出力が可能なが実験的に確認され、総合的に非常に幅広い応用に対して適用可能ということが言える。

2-4 波長変換システム

本開発では、空間出力されたパルスは 2 段階の波長変換を経て UV 光となる。それぞれのステージにおける波長変換はいずれも高調波発生となる。非線形光学結晶は従来極めて多くの種類が開発されてきたが、オールマイティな結晶があるわけではなく、用途に応じて最適な材料を決定することで、より良好なパフォーマンスを得ることができる。具体的には、用いられるパワーレベル、出力モード、パルス幅、使用環境に関する条件などにおける最もよい選択肢を用いるということになる。逆に言えば用いられる非線形光学結晶を適切に選択することが光源全体の性能を決めるということもできる。

まず 1060nm の基本波から第二高調波である 530nm の光を得るための代表的な結晶を挙げ、それぞれのこの波長変換に関わるパラメーターの計算を実施した。具体的には、ある温度での結晶角度を計算し、その条件におけるビームの結晶内部でのウォークオフ角度、実効非線形定数、結晶温度、ビーム入射角度、またビーム特性に関する各種許容度を算出している。これらの条件以外にも、結晶の入手容易さや、ハンドリングに影響を与える潮解性、劈開性、さらには毒性などの機械的・化学的特性も選択する上での考慮すべき項目になりうる。

まず、KN (KNbO₃) は酸化物の結晶の中でも非常に高い非線形光学定数を持つが、大型結晶の成長が困難な上に、わずかな水分を吸収して崩壊するため実用的ではない。KTP (KTiOPO₄) は成長法によってわずかに特性が異なるが、いずれも良好な非線形光学特性を示す。しかしながらハイパワーの領域でグレートラッキングと呼ばれる光学損傷が入りやすいとされ、長期的安定動作を見込みにくい。BBO (β -BaB₂O₄) はこれに次ぐ非線形光学定数を持つものの、出力に対する角度許容度が極端に狭いため、集光条件が厳密となる。LBO (LiBO₃) はさらに小さい非線形光学定数を持つが、適用できる条件範囲が比較的広く、残留吸収や耐損傷強度も高いため広く用いられる。

1030nm の SHG 位相整合条件は波長 1060nm の条件とは異なってくるが、基本的には上記の結論をそのまま適用できる。本事業では、LBO が最も実用的であると考え、x 軸における 90 度位相整合条件にて実験を行った。図 2-13 に LBO の位相整合条件を計算した結果をプロットする。

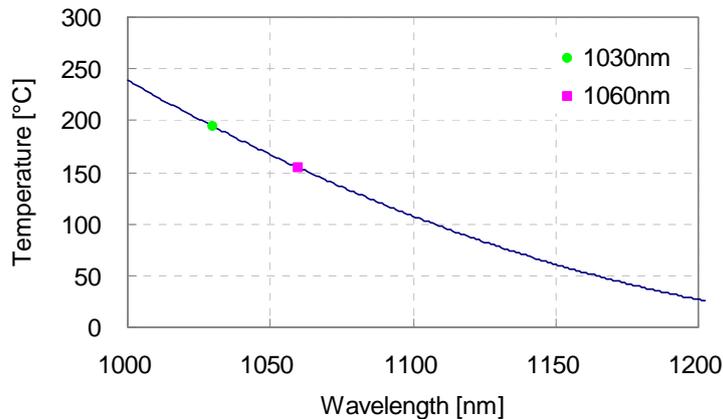


図2-13 LBO の x 軸における 90 度位相整合温度条件

波長 1030nm において 194.2°C で位相整合条件を満たし 1060nm よりも約 40°C 高い。温度許容幅は半値全幅 4.3°C・cm であることがわかる。角度許容幅は 90 度位相整合であるために zx 及び yz 平面に対してそれぞれ 4.2deg・cm^{1/2} 及び 5.3deg・cm^{1/2} と計算でき、適切な結晶長の選択より、タイトな集光条件においても効率を落とすことなく波長変換可能である。一方、波長許容幅は 3.1nm・cm と比較的広く、高出力でスペクトルが広がる傾向があるファイバレーザの波長変換に適している。この条件における有効非線形光学定数は 1060nm とほぼ変わらないと考えてよい。従って、LBO の x 軸方向における 1060nm と 1030nm の波長変換は、結晶温度を同調させるだけで他はほぼ同じ条件で得ることができ、ほぼ同等の変換特性を示すと予測される。

一方、第四高調波発生についても、まず 265nm 発生について同様の検討を行っている。この波長域で使用できる結晶はさらに限定されるが、530nm 発生用結晶と同様に、角度許容度が十分取れる結晶から選ぶと CLBO、ADP、KDP、LB4、BBO (type2)、KBO となる。LB4 は潮解性がなく扱いやすいが非線形光学定数が小さく、入手が困難である。他の結晶はいずれも潮解性を持つため、特殊な取り扱いが必要である。前回は、日本国内で開発され、265nm 近傍の発生に対して優れた性能を発揮した報告がある CLBO を第 1 候補として選択し、最大の非線形定数を持つ BBO を第二候補とした。本事業においては、CLBO を波長 1064nm の第四高調波発生用でカットしたサンプルを用いて実験を試みたが、製作したホルダーでは回転許容幅を超えて結局は使用できなかった。そのことから、最終的には、今回の実験では特別な UV のハンドリングが不要である BBO を 260nm 以下の UV 光確認のために用いた。

ファイバレーザ以降のレーザ構成は、ファイバ部で得られた 1030nm 光はアイソレーターで戻り光対策がなされた後に、音響光学 (AO) 光シャッターを経て波長変換部分に導入される。波長変換は 2 段階の波長変換ステージからなり、まず第二高調波発生 (SHG) 結晶に基本波を集光し、変換された SHG 光はコリメートされる。2 色性ミラー 2 枚により基本波を除外し、SHG 光は第四高調波 (FHG) 結晶に集光され、得られた UV 光はコリメートされて 2 色性ミラーで 530nm 光を除外された後出力される。

実験にて測定されたアイソレーター透過後の出力は最大 18.9W であり、このときビーム透過率は約 89%であった。今回用いたアイソレーターは 1030nm の波長に対応したものを選択したが、仕様の透過率は 25°C にて 92%以上である。仕様をわずかに満たさなかった理由として、残留励起光或いは無偏光成分が増幅光に含まれていたためと考えられる。前回、途中で基本波出力が大幅に低下したため、波長変換の実験では出力は約 14W に制限していたが、今回はフルに 18~19W を最大出力として使用することが可能であった。透過したビームは f=50mm の平凸レンズで LBO 結晶に入射した。LBO 結晶は type1 のノンクリティカル位相整合 (NCPM) のものを使用した。LBO 結晶は銅のマウントに搭載され、マウントはヒーターによって設定温度は 199.5°C に保たれた。出力されたビームは残留した 1030nm 光と変換された 515nm 光を両方含むので、515nm 反射、1030nm 透過のミラーで 515nm 光だけ

を取り出して出力を測定した。

図 2-14 に 1032nm 光出力に対する 516nm 光出力および変換効率を示す (繰返し周波数 1MHz)。この条件下では線幅は FBG によりロックされ十分に狭く、1032nm の低い入力時は 516nm 光出力入力に対して 2 乗に反応し、効率が 40% に近づくと線形にその傾向をシフトさせた。最大出力は 1032nm 光の最大入力約 19W 時に約 8.2W であった。変換効率は 44% が達成された。さらにシード LD の温度、バイアス電流、電流パルスを微調整したところ、最大 9.2W が得られ、変換効率約 50% を達成することができた。

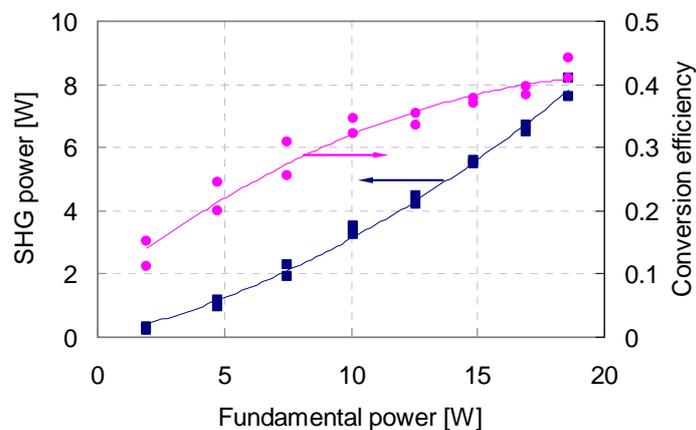


図 2-14 1032nm 基本波入力に対する 516nm SHG 光出力と変換効率

次に、得られた 516nm 光を再度 $f=75\text{mm}$ の平凸レンズで BBO に集光した。位相整合条件の最適化は室温における角度調整より行い、最大 0.1W 程度の 258nm を確認し、260nm 以下の UV 光を得た。しかしながら、今回の事業期間内では最適化できずに終了した。集光条件の追い込みとスペクトルの最適化によって当初の目的である 2W は達成できると予測できる。実証試験終了後、今回設計したレーザーヘッドに光学系を構成し、ファイバ部と共に長期運転並びに安定性試験を実施する予定である。

3 全体総括

3-1 目標・実績の比較による達成度検証

① ファイバ増幅器の開発

目標	実績と自己評価
①-1 ナノ秒・ファイバ増幅器の開発	
<p>波長 1030nm、パルス幅数 ns 程度、繰り返し数 100kHz 以上の電気パルス制御・光パルスファイバ発振器を開発する。多段増幅により平均出力 20W 以上を実現する。各増幅段で出力特性（平均出力、スペクトル、パルス波形）を詳細に測定し、得られたデータを装置構成にフィードバックし、最適化を行う。また、波長 1064nm の増幅特性との比較検証を行う。</p>	<p>■実績 LD 直接変調方式より、波長 1030nm 帯で繰り返し周波数 50kHz, 100kHz, 500kHz, 1MHz 及びパルス幅がそれぞれ約 100ns, 50ns, 10ns, 5ns の光パルスを発振器より取得。100kHz 以上にて平均出力 20W 以上の増幅光を実現した。</p> <p>■評価 出力、波長、パルス特性において数値目標を上回っており、目標は完全に達成された。</p>
①-2 ピコ秒・ファイバ増幅器の開発	
<p>上記装置の発振器部において、電気パルス制御により 500ps 以下の光パルスを発生させる。繰り返し数を変化させることにより、ピーク出力を制御し、多段増幅により平均出力 20W 以上を実現する。各増幅段で出力特性（平均出力、スペクトル、パルス波形）を詳細に測定し、得られたデータを装置構成にフィードバックし、最適化を行う。また、波長 1064nm の増幅特性との比較検証を行う。目標とする最小パルス幅を 100ps 程度かそれ以上と設定し、既存のモードロック方式・短パルスレーザーの弱点である出力不安定性を同方法の採用により解消する。</p>	<p>■実績 ゲインスイッチング方式と外部変調方式によりそれぞれ 150ps と 115ps のパルス発生に成功し、いずれも平均出力 20W 以上の増幅に成功している。</p> <p>■評価 出力、波長、パルス特性において数値目標を満たしており、目標は完全に達成された。</p>
①-3 改良・装置化	
<p>ファイバ部の各部ユニット化を検討し、最終的な装置への組み込みがスムーズになるような設計を行う。各ファイバコンポーネント間及びファイバユニット間での偏光消光比を測定し、得られたデータを装置にフィードバックし、最適化するようなシステムを構成する。ファイバ増幅器のビームプロファイル・ビーム品質 (M2) を測定し、ファイバのマネジメント方法を最適化する。1030nm 及び 1064nm の両波長における出力安定性の試験を通して、増幅器の最終的な評価を行う。また、波長が 1030nm から 1064nm の間の範囲で、ある程度波長可変である装置、或いは、発振器及び前置増幅器を入れ替えるだけで使用できる主増幅器を開発し、パルス特性の可変性も加えたパラメーターの自由度の高い増幅器を開発し、上記同様の評価を行う。さらに、継続実施されているファイバコンポーネント開発により得られたものを搭載し、その評価を行う。</p>	<p>■実績 ファイバ部のユニット化及び増幅器の簡略化に加え、光パルス特性の可変性（繰り返し数 50kHz～1MHz、50MHz、パルス幅約 100ps, 5～100ns）、波長の可変性（LD 温度同調による 1025nm～1034nm、及び 1064nm の発振器・プリアンプの入れ替え）を可能にした。20W 以上の平均出力において良質なビームプロファイルが得られた。</p> <p>■評価 出力、波長、パルス特性において数値目標は完全に達成された。安定性による最終的な評価はプロト機にて実施する。</p>

② 波長変換システムの開発

目標	実績と自己評価
②-1 第二高調波ステージの開発	
上記レーザー光の波長変換により、出力 5W 以上の第二高調波を発生させる。入出力特性とビームプロファイルを測定し、理論ビーム伝播との比較を行うとともに、パルス特性及び波長の変化に応じた最適な非線形光学結晶の使用条件を得る。	<p>■実績 波長の違いによる結晶の使用条件を検討し、最大変換効率約 50%、平均出力約 9.2W の 516nmSHG 光源を実現した。</p> <p>■評価 波長、出力の数値目標を満たしており、目標は完全に達成された。</p>
②-2 第四高調波ステージの開発	
上記レーザー光の波長変換により、出力 2W 以上、波長 260nm 以下の第四高調波を発生させる。入出力特性とビームプロファイルを測定し、理論ビーム伝播との比較を行うとともに、パルス特性及び波長の変化に応じた最適な非線形光学結晶の使用条件を得る。	<p>■実績 波長 258nm、平均出力 0.1W の FHG 光を所得した。</p> <p>■評価 最終目標の波長 260nm 以下が実現されたが、出力の数値目標を満たすことができなかった。継続した研究・開発によりクリアできると考えられる。</p>
②-3 改良・装置化	
第四高調波のビーム品質 (M^2) を測定し、必要な場合、波長変換スキームの改良を試みる。測定したビームプロファイルから、真円度 90%以上を得るような補正レンズの構成を検証する。長期間連続運用するための深紫外線に対する光学素子の使用方法を確立する。最終的に、装置の出力安定性を測定し、その実用性を評価する。	<p>■実績 レーザーヘッドの機構設計を新たに行った。前回設計した結晶トラッキングシステムは手動から自動なものに改良し、連続運転可能とした。</p> <p>■評価 数値目標を満たすことができなかったが、原理実証が終了次第、達成可能と予測できる。</p>

3-2 まとめと今後の展開

当初目標の 1030nm 波長帯にて、平均出力 20W 以上、パルス幅 5~100ns、繰り返し 100kHz~1MHz のナノ秒・パルスファイバレーザーを完成させた。発振器は直接変調した半導体レーザーであり、これを 3 段のファイバ増幅器で増幅した結果である。また、メインの増幅器は 1064nm に対しても同様に 20W 以上の出力まで増幅することが可能であった。基本的には電気制御でパルス特性を操る方法を取っており、発振器の基板の使用方法を工夫することにより、ゲインスイッチングによる 150ps の光発生が可能となる。さらに、外部変調方式より 120ps の光パルスを発生させ、平均出力 20W 以上の増幅光を 1030nm 波長帯にて実現させた。波長変換ステージでは平均出力 9.2W、変換効率約 50% の 516nm の第二高調波光を得ている。この光を BBO 結晶に集光させることにより、平均出力は約 0.1W と目標値には達することができなかったが、当初目標の 260nm 以下の第四高調波の発生に成功した。今後の展開として、パラメーター調整（増幅度、線幅の制御、波長変換部分の集光条件など）を経て、第四高調波の所定の出力を取得後、長期運転試験に入る。最適化された光学系を今回設計したレーザー筐体に構成し、完全な装置としての評価を始める。長期運転において十分な安定性が得られた後、UV 光を加工装置に導入して、フッ素樹脂などの、これまでの光源でドライ環境における微細加工が難しかった材料に対して加工と評価を行い、より実用的な加工システムを構築する予定である。製造された加工システムは、本開発の再委託先でもある日星電気を初めとする、先端的部品の製造を行う企業を中心に販売したい。原因は部品調達に関する制限によるものであり、本質的にレーザーの完成度が劣ることではない。得ることが容易であることは合理的に理解でき、部品の入手次第で実現可能である。

参考文献

- 1) F. D. Teodoro and C. D. Brooks, "1.1 MW peak-power, 7 W average-power, high-spectral-brightness, diffraction-limited pulses from a photonic crystal fiber amplifier", *Opt. Lett.* 30, 2694 (2005).
- 2) S. Desmoulins and F. D. Teodoro, "High-gain Er-doped fiber amplifier generating eye-safe MW peak-power, mJ-energy pulses", *Opt. Express* 16, 2431 (2008).
- 3) P. E. Schrader, R. L. Farrow, D. A. V. Kliner, J.-P. Fève, and N. Landru, "High-power fiber amplifier with widely tunable repetition rate, fixed pulse duration, and multiple output wavelengths", *Opt. Express* 14, 11528 (2006).
- 4) F. J. Kowalski, J. A. Squier, and J. T. Pinckney, "Pulse generation with an acousto-optic frequency shifter in a passive cavity", *Appl. Phys. Lett.* 50, 711 (1987).
- 5) J.M. Sousa, O.G. Okhotnikov, "Short pulse generation and control in Er-doped frequency-shifted-feedback fibre lasers", *Opt. Commun.* 183, 227 (2000).
- 6) Y. Urata and S. Wada, "Pulse-repetition-frequency-variable Mode-locked Fiber Laser", Technical digest on CLEO/Europe 2009, Munich, June (2009).

・光ファイバ

光を導波するための繊維状導波路。現在の主流はシリケートガラスであり、内部はコアと呼ばれる導波層とクラッドと呼ばれる光を閉じこめるための層、最外部の保護層からなる。コアの屈折率をクラッドよりもわずかに高くすることにより、全反射による光閉じこめを実現している。

・シングルモード (SM) ファイバ

特定の波長において最低次の横モードのみが許容されるファイバである。単一モードであるため出射端面は点光源として取り扱うことができ、出射された光は理論的な回折限界まで集光が可能である。

・マルチモード (MM) ファイバ

高次の横モードまで許容されるファイバである。多モードのため出射端面は発光面となる。ビーム輝度を考慮しなければコア径の制限がなく、高パワー、低輝度の伝搬ファイバとして用いられることが多い。

・偏波保存 (PM) ファイバ

ファイバを導波中の光の偏光状態が変化しないファイバ。ファイバコアを含む 1 つの面に沿って、コアを挟むようにストレスロッドと呼ばれる構造体を追加したファイバ。コアに対してストレスロッドを含む面と、それに直行する面の応力が異なるため、それぞれの面に平行な偏光同士のデカップリングがおき、偏光を保持する。

・ラージモードエリアファイバ (LMA)

コア径を大型化するために特に材料屈折率を調整したファイバ。特に高輝度を確保したまま高出力伝搬を行うために開発されており、端面の損傷やファイバ中の光学非線形性を抑制しながら最低次モードのみを効率的に伝搬できる。一方、コアとクラッドの屈折率差が小さく、曲げ損失特性は低下する。

・ダブルクラッド (DC) ファイバ

クラッドを 2 重にしたファイバ。レーザーにおいてはマルチモードファイバで伝搬された励起光をコアに効率的に結合するためにこの構造を用いる。

・波長多重 (WDM) カプラー

複数の波長の光を損失なく合波するための素子。空間素子の 2 色性ミラーと同じ働きで、ある 2 つの波長の光に対して一方を透過、一方を反射することにより、2 つの単色光の合成、または分離を行うことができる。ファイバレーザーでは特に励起光を共振器または光路内に導入するために用いられる。

・ファイバブラッググレーティング (FBG)

ファイバコア中に周期的屈折率分布を形成したファイバ素子。周期に対してブラッグ条件を満たす波長の光のみを選択的に反射するデバイスであり、波長選択性の高い帰還素子、狭帯域バンドストップフィルタなどとして利用できる。一般に空間素子の誘電体多層膜コートされたミラーに相当するが、反射帯域はそれに比べて極端に狭くすることができる。

・マスターオシレータ・パワーアンプリファイア (MOPA)

制御された発振パラメーターと増幅度を両立させるために、パルス幅やスペクトルなどを発振器に、出力を多段増幅器に受け持たせたタイプのレーザー。

・増幅自然放出 (ASE)

Einstein の A 係数に基づく自然放出が大きく増幅されたもの。パルスを増幅する場合、パルスとパルスの間の無信号の時間帯で ASE が発生する可能性がある。ASE は信号と無関係であるため、大きく増幅される場合には反転分布量を低下させ、システム全体の効率を引き下げる負の要因になりうる。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。