平成２６年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ヘッド分離型パルスギャップレーザによる次世代超薄型ディスプレイ用フレキシブルガラスの加工技術開発」

研究開発成果等報告書

平成２７年　３月

委託者　近畿経済産業局

委託先　一般財団法人大阪科学技術センター

目　次

第１章　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

１－２ 研究体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３

１－３ 成果概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５

１－４ 当該研究開発の連絡窓口 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６

第２章　低価格でヘッド分離型可能なパルスギャップレーザのための要素技術の開発

２－１パルスギャップ領域で動作する高出力1064nmDFB半導体レーザの開発　・・・・・７

２－２パルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２

２－３コンパクトな532nm波長変換部の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１９

第３章　 ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の試作開発

３－１ 超小型レーザヘッドの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２１

３－２ レーザヘッドの衝撃・振動への耐性の向上と評価 ・・・・・・・・・・・・・・・２２

３－３ ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の開発 ・・・・・・・・・・・・・２３

第４章　R2R方式フレキシブルガラス加工装置の試作開発

４－１ フレキシブルガラスの高品位加工のための加工条件の抽出 ・・・・・・・・・・２４

４－２ 超小型レーザヘッドをガントリ搭載したR2R方式加工装置の試作開発 ・・・・２６

第５章　全体総括 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ２９

第１章 研究開発の概要

１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標

近年、曲げる事ができる次世代超薄型ディスプレイや面発光デバイス、超軽量型太陽電池用途として、非常に薄くて割れにくく、また傷も入りにくい頑丈なフレキシブルガラスの需要が急増している。そのため、2008 年頃より世界のガラストップメーカである旭硝子、コーニング（米国)、日本電気硝子が競って大面積フレキシブルガラスのサンプル出荷を始めた。このガラスは巻き取れるため、今後は様々な製品が印刷技術のような手法（ロール・ツー・ロール生産方式：R2R）で生産でき、劇的なコスト低減ができる大きな利点がある一方で、大面積を高品質に加工する方法が確立されていない。

本技術開発では、低価格で且つ、レーザヘッドを自由に動かす事ができる信頼性の高いパルスギャップレーザを開発し、大面積（幅広）フレキシブルガラスを自由空間において高品質に且つ、高速にスクライブすることが可能な、ロール・ツー・ロール生産方式に最適化された加工技術を開発する。

フレキシブルガラスのスクライブ加工においては、機能の確保・高度化のための高品質な加工とともに、ロール・ツー・ロール生産により劇的に製造コストを低減することが求められているが、現状ではこれらを実現する加工技術がない。本提案では、低価格且つレーザヘッドを自由に動かす事ができる堅牢なパルスギャップレーザを開発し、大面積フレキシブルガラスを自由空間において高品質、且つ高速に加工する技術を開発する。

研究の概要

1. 低価格でヘッド分離型可能なパルスギャップレーザのための要素技術の開発

【1-1】パルスギャップ領域で動作する高出力 1064nmDFB 半導体レーザの開発

従来の超短パルスレーザで用いられている受動モード同期レーザを、直接変調型の DFB 半導体レーザに置き換えることにより、種パルス光発生装置を低価格化、小型化、メンテナンスフリー化させる。チッピングのない高品位なガラス加工に必要なパルス幅 50～100 ピコ秒（パルスギャップ領域)、種パルス光として必要なピークパワー100mW 以上（従来比で 10 倍以上）を達成する DFB 半導体レーザを世界に先駆けて開発した。

【1-2】パルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発

開発した DFB 半導体レーザからの光パルスを増幅して高強度光パルスを発生させる。従来の超短光パルスの増幅では複雑な再生増幅器が用いられてきたが、調整が煩雑で安定性に問題がある。一方、本提案のパルスギャップ領域では、パルス幅が太く、実用性の高いファイバ増幅器を用いてもパルス歪みが少ないという利点がある。そこで、光増幅部の大部分をファイバ化し、ファイバ増幅器では対応できない最終段の高出力部だけバルク増幅を適用したコンポジット構成を導入して、安定な高出力光増幅器を構築した。はじめに実験定盤上で試作し、水冷方式ではあるが、8W 出力を達成し、次にこれらを空冷方式で実現するための構成を検討し、8～10W 出力を達成した。

【1-3】コンパクトな 532nm 波長変換部の開発

得られた 1064nm 高強度パルスを波長変換することにより、ガラス加工が可能な波長 532nm の光パルスを発生させる。ヘッドの小型化のためにシングルパス構成を採用し、且つ、高変換効率（50～70%以上）を達成して、フレキシブルガラス加工に必要な出力パワー(>5W)を実現した。

２．ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の試作開発

【2-1】超小型レーザヘッドの開発

前述の高出力光増幅部と波長変換部を集積化し、ファイバ接続が可能な小型レーザヘッドを試作する。すべての素子の冷却方法を水冷から空冷に変えて装置を簡略化し、世界最小クラスのヘッドサイズ（30cmx50cm程度、従来比で1/8程度）を実現した。

【2-2】 レーザヘッドの衝撃・振動への耐性の向上と評価

ガントリに搭載する場合、ヘッドの加減速による強い衝撃・振動を受ける。従来の超短パルスレーザでは、そもそも光学定盤上での設置を想定しており、このような劣悪な条件では使用できないため、最終目標として 0.5G 以上の衝撃力においても安定に動作するヘッドの構造とファイバ収容構造を開発した。

【2-3】 ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の開発

上記のレーザヘッドと DFB 半導体レーザ、電源等を組み合わせてピコ秒レーザ部の試作を行った。上述の各項目の簡素化によるコストカットを積み重ね、事業化の時点において、同程度の加工能力を持つピコ秒パルスレーザ（3,500 万円程度）の半分程度（1,800 万円程度）で実現の目処がついた。

また、【2-2】の衝撃・振動試験の結果をもとにその性能を向上させるための改良を実施し、加えて、レーザヘッド内で使用される光学部品に対する耐久性を確認する実験を行い、事業化時点で許容できる動作範囲を明確にした。

３．R2R方式フレキシブルガラス加工装置の試作開発

【3-1】フレキシブルガラスの高品位加工のための加工条件の抽出

フレキシブルガラスの曲げ特性を向上させるためには、基板切断時に発生するガラス端面で発生するチッピングを抑制する必要がある。一般的なレーザ発振器によるレーザ加工ではレーザ照射時における光吸収から熱膨張および熱拡散によりガラスのチッピングが発生するが、高いピークパワーを持つピコ秒レーザ発振器では局所的に材料を昇華させることが出来るため、チッピングが抑制されることが既に分かっている。

今回製作した532nm光パルスは小型ヘッド・高出力であるが、パルス幅は 50ps とこれまで実績ある条件と異なるため、加工条件を最適化する必要がある。この発振器を活用し、既存データと比べて良好な加工結果が得られるよう、スポット径、パルスエネルギー、照射量や照射方法を変更して、チッピングフリーで加工線幅 40μm（ガラス厚 50～200μm に対応）の高精度・微細加工を実現した。

【3-2】超小型レーザヘッドをガントリ搭載したR2R方式加工装置の試作開発

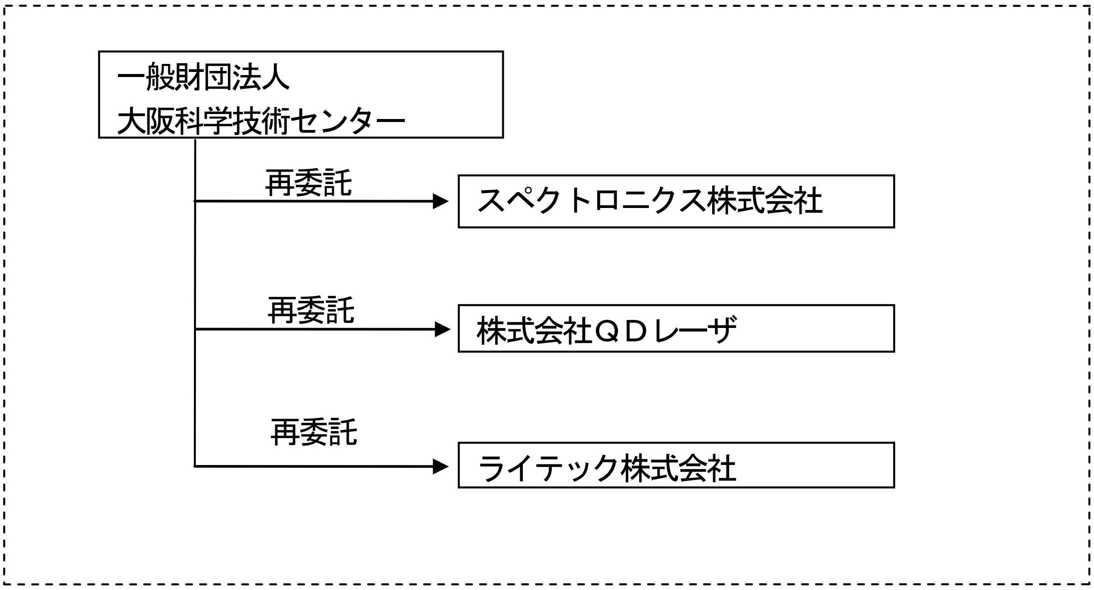
フレキシブルガラスの利点として、通常の板ガラスと異なり巻き取り処理ができることから生産現場の省スペース化、高い生産性が期待されている。そのためには、門型構造のガントリを活用した加工機が適していると考えられる。しかしながら、これまでレーザヘッドが大型で耐振動性も確保されていないため、前述の構成でピコ秒レーザ発振器を活用した例はほぼない。今回開発したレーザ発振器の最大の利点である省スペース性を活用し、レーザヘッドをガントリに搭載し、R2R方式の大面積ガラスを想定した加工装置を試作した。実際にR2R構造にするにはロール型のガラスやロール巻き取り機が必要になってしまうため、今回の装置構成は平面直交二軸ステージをワーク面に設置した。また、高スループット化を念頭に置いてガルバノスキャナも装置に搭載し、これらの加工装置の試作を通じてレーザヘッドや加工機の性能を認識

することで、次世代の生産性の高いレーザガラス加工装置のプロトタイプを実現した。

１－２　研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1)研究組織(全体)



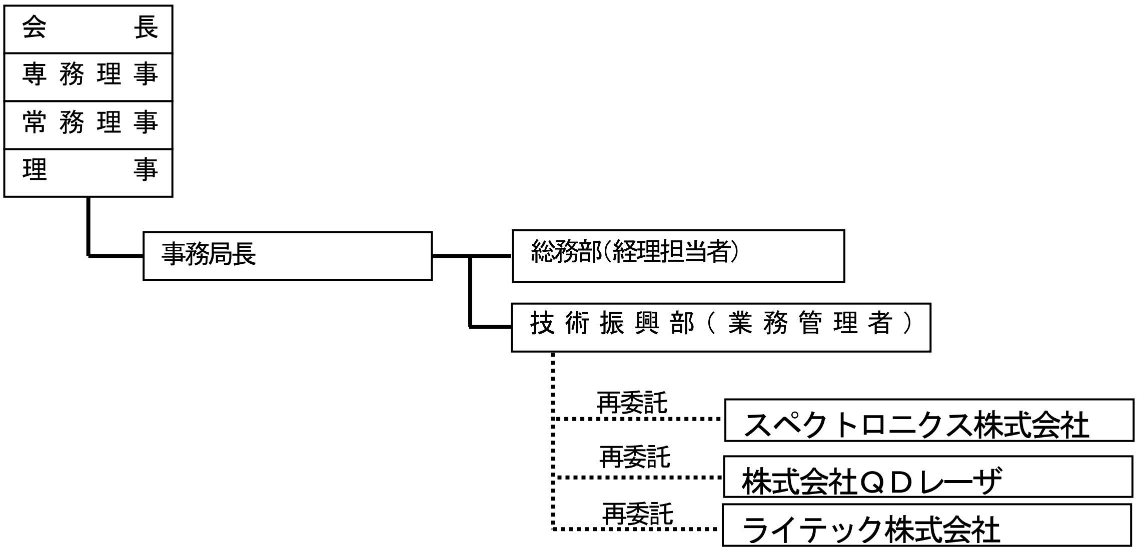
総括研究代表者（ＰＬ）
スペクトロニクス株式会社
代表取締役社長　岡田　穣治

副総括研究代表者（ＳＬ）
株式会社ＱＤレーザ
代表取締役社長　菅原　充

2)管理体制

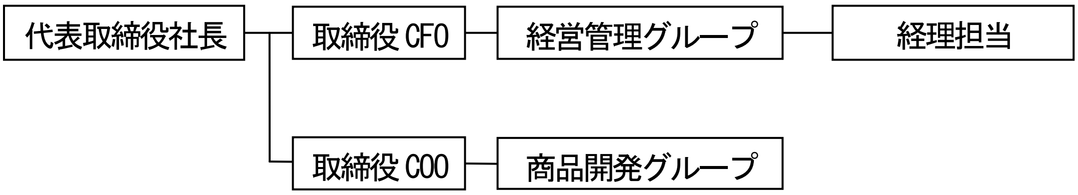
①事業管理機関

[一般財団法人大阪科学技術センター]

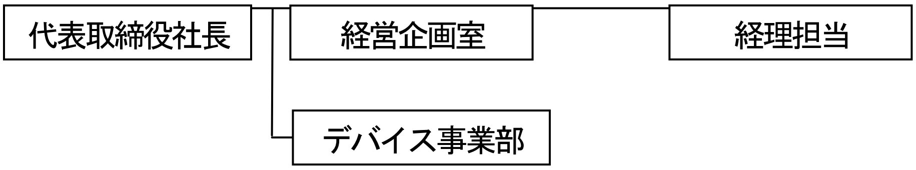


②（再委託先）

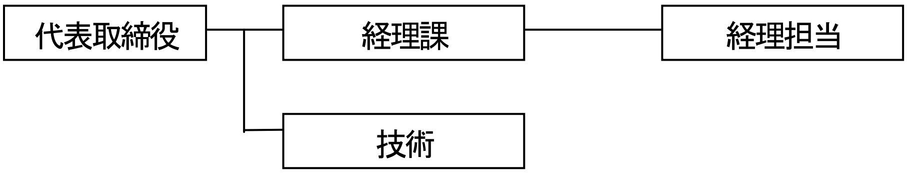
スペクトロニクス株式会社



株式会社ＱＤレーザ



ライテック株式会社



(2)管理員及び研究員

【事業管理者】一般財団法人大阪科学技術センター

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
村上　嘉孝	常務理事・技術振興部長	4
福田　　隆	技術振興部　主席調査役	4
脇坂　啓司	技術振興部　副部長	4
鳥山　博司	技術振興部　調査役	4
長谷　　実	技術振興部　調査役	4
中山　幸子	技術振興部	4

【再委託先】

スペクトロニクス株式会社

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
◎岡田　穣治	代表取締役社長	総括　１，２，３
吉川　徹	取締役	１，２，３
村山　伸一	商品開発グループマネージャー	１，２，３
折井　庸亮	商品開発グループ	１，２，３
内海　功朗	商品開発グループ	１，２，３

(注) ◎プロジェクトリーダー

株式会社ＱＤレーザ

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
○菅原　充 武政　敬三 横山　吉隆	代表取締役社長 デバイス事業部部長 デバイス事業部製品開発グループ プロジェクトリーダー	副総括　１，２ １，２ １，２

（注）○プロジェクトサブリーダー

ライテック株式会社

氏　名	所属・役職	実施内容（番号）
浅川　雄一	技術　主任技師	２，３

１－３　成果概要

項目	目標値	達成状況
1．低価格でヘッド分離型可能なパルスギャップレーザのための要素技術の開発		
【1-1】パルスギャップ領域で動作する高出力 1064nmDFB 半導体レーザの開発	パルス幅 50ps ピークパワー100mW	300mW
【1-2】パルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発	空冷式で出力パワーとして 8～10W	空冷式で 8W 以上
【1-3】コンパクトな 532nm 波長変換部の開発	変換効率 50～70% 出力 5W 以上	変換効率 65% 出力 6W
２．ヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の試作開発		
【2-1】超小型レーザヘッドの開発	空冷式で 30ｃｍ×50ｃｍ程度	空冷式で 30ｃｍ×51ｃｍ
【2-2】レーザヘッドの衝撃・振動への耐性の向上と評価	0.5G の衝撃に対するビーム安定性の改善	完了 レーザ発振器の総合評価を行い、加工装置搭載に課題がないことを確認した。
【2-3】ヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の開発	１．1,800 万円程度で実現する ２．光学部品に対する耐久性を確認する実験を行い、事業化時点で許容できる動作範囲の明確化	１．材料原価を 800 万円以下に抑え、販売価格を 1,800 万円に抑える事ができるようになった。 ２．光学部品の耐久性を向上し、十分産業用レーザとして耐えられる仕様に改善する事ができた。

３．R2R 方式フレキシブルガラス加工装置の試作開発		
【3-１】フレキシブルガラスの高品位加工のための加工条件の抽出	既存データと比べて良好な加工結果が得られるよう、チッピングフリーで加工線幅 40μm（ガラス厚 50～200μm に対応）の高精度・微細加工の実現	ガラス厚 50, 100, 240μm 厚ガラスに対して、加工線幅 40μm 以下のチッピングフリーの切断加工を実施要した。 また、曲げ特性試験において加工品質の検証を行い、加工条件と加工品質の相関を取得し、最適条件を把握した。
【3-2】超小型レーザヘッドをガントリ搭載した R2R 方式加工装置の試作開発	直交二軸ステージに加え、ガルバノスキャナによる加工速度の向上を図る。また、高速化によるガラス切断性能の評価を行う。	ガルバノスキャナによる加工高速化を図り、高出力においても熱影響による曲げ特性の向上が確認された。

１－４　当該研究開発の連絡窓口

〒550-0004　大阪市西区靱本町１丁目８番４号

(一財)大阪科学技術センター

技術振興部　　TEL：06-6443-5322　　FAX：06-6443-5319

脇坂　啓司　Email：wakisaka@ostec.or.jp

第２章　低価格でヘッド分離型可能なパルスギャップレーザのための要素技術の開発

２－１パルスギャップ領域で動作する高出力 1064nmDFB 半導体レーザの開発

２－１－１　成果まとめ

QD レーザは、チッピングのない高品位なガラス加工に必要な DFB レーザの開発を担当し、パルス幅 50～100 ピコ秒（パルスギャップ領域）、種パルス光として必要なピークパワー100mW 以上（従来比で 10 倍以上）の光出力を有する DFB 半導体レーザの開発を行ってきた。平成 25 年度までに、半導体レーザ素子に集積化された半導体増幅器（SOA）の最適化、また DFB レーザ・SOA 部の変調方式の最適化を行い、50 ピコ秒（<100 ピコ秒）で 300mW の光出力が得られ、目標を達成した。

本レーザは、半導体レーザの緩和振動を利用してパルスを発生するゲインスイッチ方式にて 50 ピコ秒の短パルス動作を実現している。一般的なパルス変調と比較して、制御条件のトレランスは狭くなる可能性がある。加工機としての適用を考慮して、長期安定性について確認する必要があり、パルス通電装置を用いて評価を行った。40℃ 570 時間のパルス通電を実施し、10%以下の光出力変動量が得られ、実用上問題ないことを確認した。

表 2-1　25 年度までの開発目標と成果

項目	数値目標	平成24年度		平成25年度	
		実施内容	数値成果	実施内容	数値成果
パルス幅(ピコ秒)	50 -100	・素子最適設計 1.共振器長・結合係数 2.ディチューニング	50	特に無し	50 (<100)
ピークパワー(mW)	>100	・新方式の増幅器集積素子試作 ・新型パッケージ開発による短パルス電気注入効率改善	90 注:24年度目標50mWを達成	・増幅器集積素子の最適化 1.素子構造(増幅器長) 2.変調方式	300 目標100mWを達成

２－１－２　２４年度の成果の技術詳細

２４年度は下記３点に主眼を置き開発を行った。

- 半導体素子パラメータを最適化した DFB レーザ素子の開発
- DFB レーザ部で発生した短パルス光を増幅可能とする半導体増幅器を集積した DFB/SOA 素子の開発
- 電流注入効率を改善した新型パッケージの開発

（1）　半導体素子パラメータを最適化した DFB レーザ素子の開発

DFB レーザのパラメータとしては、共振器長、結合定数およびディチューニング量（半導体活性層の組成波長と発振波長の差）が挙げられる。半導体内部で生成された光が、どの程度効率よく増幅されるかと、その増幅された光がどの程度のスピードで半導体素子の外に放出されるかを決めるパラメータで、短パルス動作にとって重要なパラメータとなる。これらのパラメー

タの最適化により図 2-1-1 に示すような 50 ピコ秒でのパルス駆動を実現した。またそのパルス駆動時においても、図 2-1-2 に示すような良好なスペクトル特性を実現した。

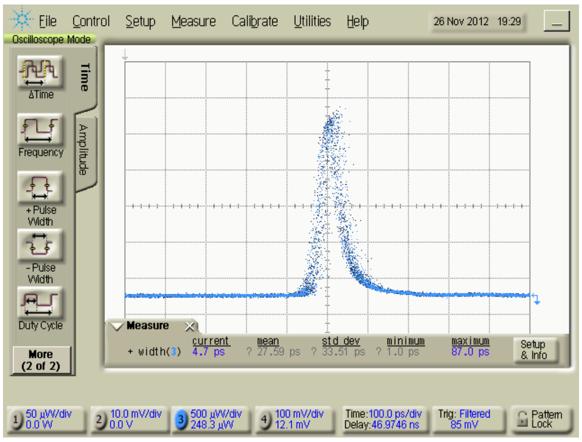


図 2-1-1 1064nmDFB の 50psec パルス波形

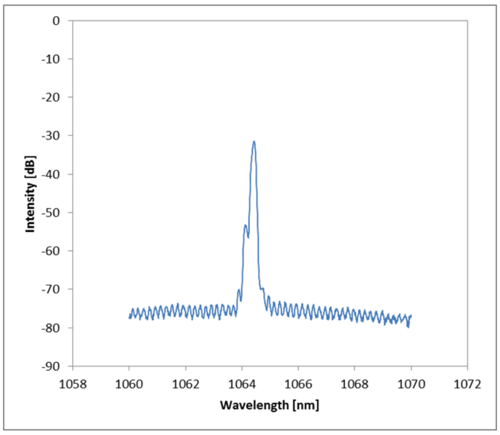


図 2-1-2 1064nmDFB の 50psec パルス発生時のスペクトル特性

(2) DFB レーザ部で発生した短パルス光を増幅可能とする半導体増幅器を集積した DFB/SOA 素子の開発

(1) で説明した素子は、ゲインスイッチ動作と呼ばれる動作方法を用いており、光出力として数十 mW 程度に留まる。良好なパルス動作を維持しつつ光出力改善のため、DFB レーザに半導体増幅素子 (SOA) を集積した DFB/SOA 素子の開発を行った。

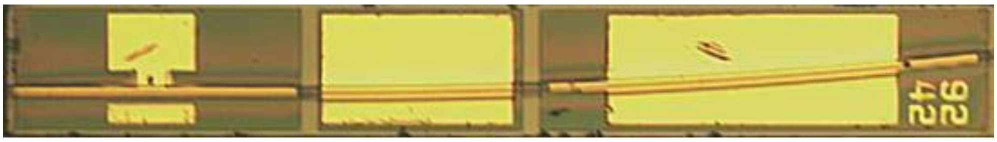


図 2-1-3 DFB/SOA 集積素子外観

図 2-1-3 に示すような DFB レーザをパルス駆動し、SOA 部に定電流を入れた場合の光出力-SOA 電流依存性を図 2-1-6 (左) に示す。パルス光出力で 100mW 以上の光出力が得られた。光波形も 50 ピコ秒を維持していることを確認した (図 2-1-5)。ただし図 2-1-6 (右) に示すように光スペクトルは SOA 増幅とともに自然放出光成分が大きくなり DFB モードが有効に増幅されていないことが確認でき、変調方式の最適化が必要であることがわかった。

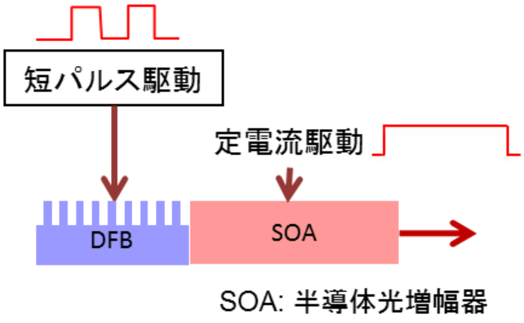


図 2-1-4 DFB/SOA の動作条件

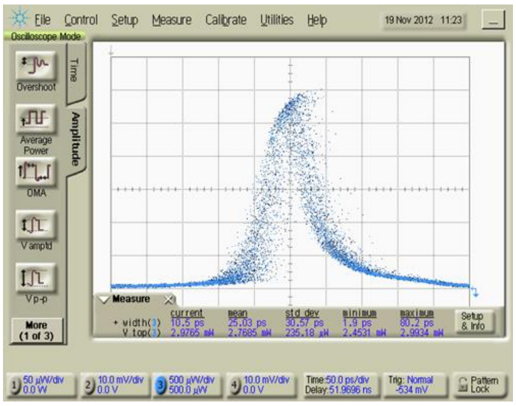


図 2-1-5 SOA 部からの光パルス波形

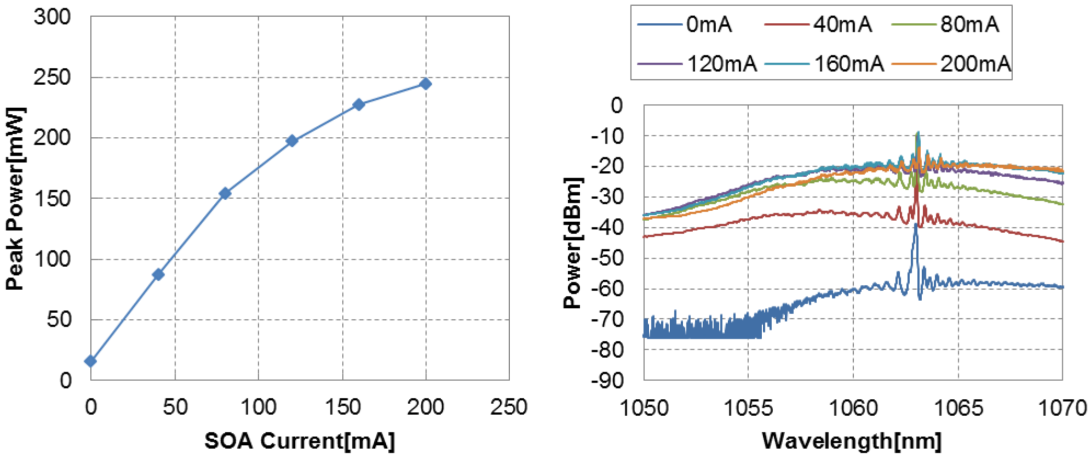


図 2-1-6 パルスピークパワー（左）とパルススペクトル特性（右）

(3)電流注入効率を改善した新型パッケージの開発

パルスドライバからのパッケージへの電気信号の入力効率を改善するため、パッケージの電気入力部分を高周波コネクタ（SMPM コネクタ)にした新規バタフライパッケージを開発した（図 2−1−7 左)。図 2−1−8 に示すように電気入力の改善により光出力も改善し 90mW の特性が得られ最終目標達成まで後 10mW となった。また図 2−1−9 に示すように良好なスペクトル特性も同時に実現している。

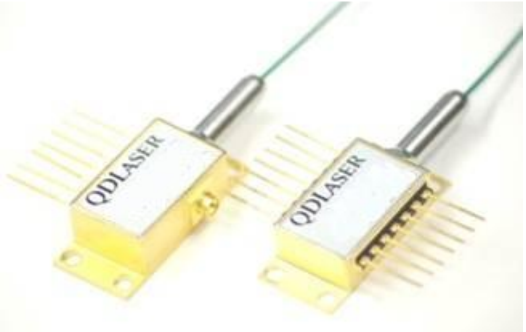


図 2-1-7 新型パッケージと標準パッケージ

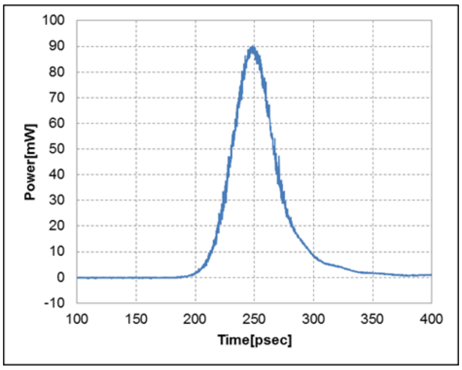


図 2−1−8　パルス光出力

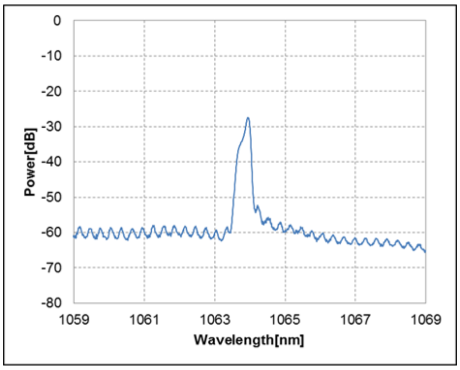


図 2−1−9　スペクトル特性

２－１－３　２５年度の成果の技術詳細

２５年度は２４年度の結果をもとに DFB-SOA 素子の SOA 素子長最適化と変調方式の最適化を行った。

（１） SOA 素子長最適化

SOA 素子の素子長が長い場合、SOA での光増幅率が増え、自然放出光の増幅度合も高くなり、ノイズ源となる可能性があるため、その最適化を行った。実験により素子長は 1200um が最適であることがわかり、CW 光出力で 150mW が得られた (図 2－1－10)。またスペクトル特性も良好であることを確認した (図2－1－11)

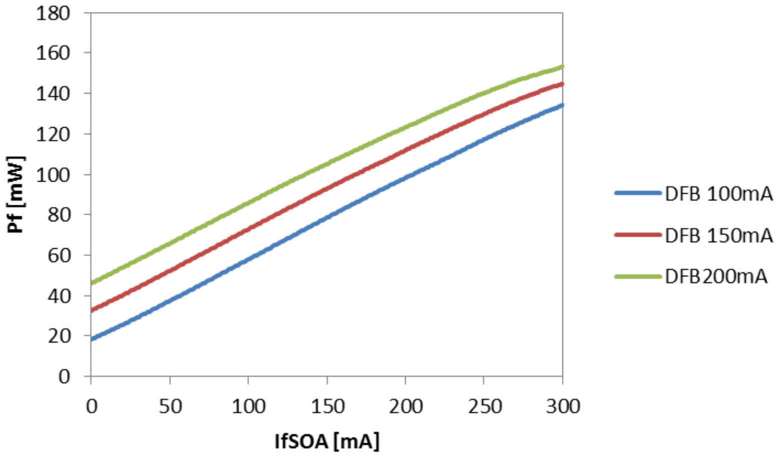


図２－１－10　DFB-SOA の CW 光出力

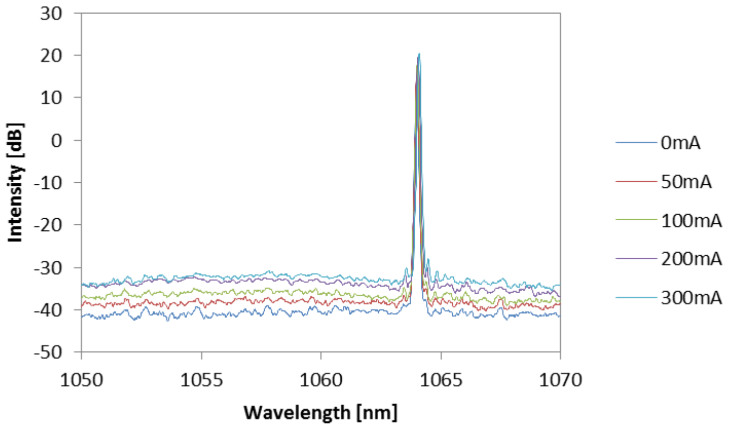


図２－１－11　スペクトル特性

（２）駆動方式の最適化

(1) で最適化された DFB-SOA 素子を用いて駆動方式の最適化を行った。図 2－1－12 に示すように DFB 部だけでなく SOA 部もパルス駆動する方式を採用した。図２－１－13 に示すように光出力は 300mW に到達した。また図２－１－14 に示すように自然放出光が抑制され、SN が改善されたことが確認できた。本方式を採用することにより 50 ピコ秒動作で 300mW 以上の光出力が得られ、開発目標を達成した。

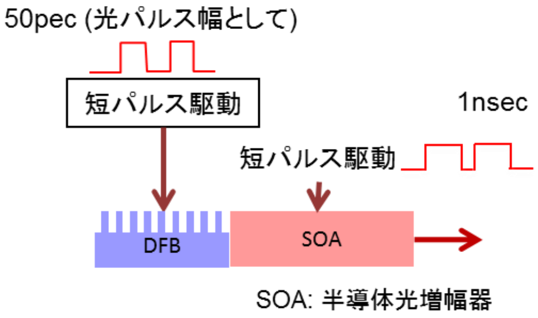


図２−１−12　DFB-SOA の両素子パルス駆動方式

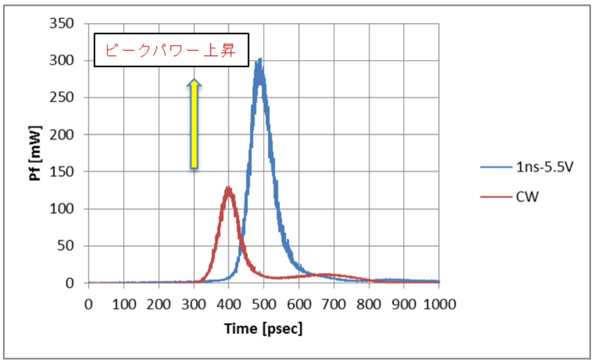


図２−１−13　DFB-SOA のパルス駆動時に光出力特性

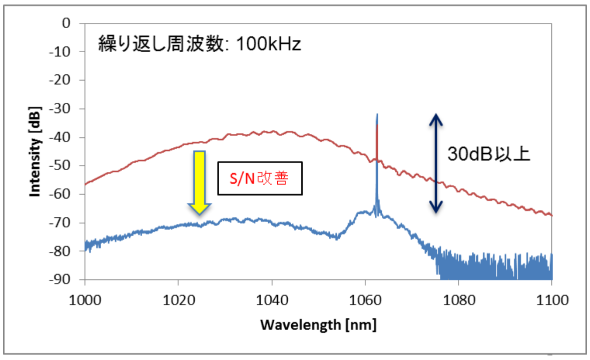


図２−１−14　DFB-SOA のスペクトル特性

２−１−４　パルス通電試験結果（26 年度実施）

1064nm DFB-LD を用いて通電試験を実施した。個数、実施条件を以下に記載する。

- 1064nm DFB-LD 10 台
- 動作条件： 50ps パルス動作 10MHz, Pf=100mW 相当
- 試験温度：30℃, 40℃

30℃ 160 時間、40℃ 570 時間の試験において、10%以下の光出力変動量が得られ、実用上問題ないことを確認した。

項番	時間	Tld	Pulse width	安定性	結果
1	160h	30℃	50ps	10%以下	問題なし
2	570h	40℃	50ps	10%以下	問題なし

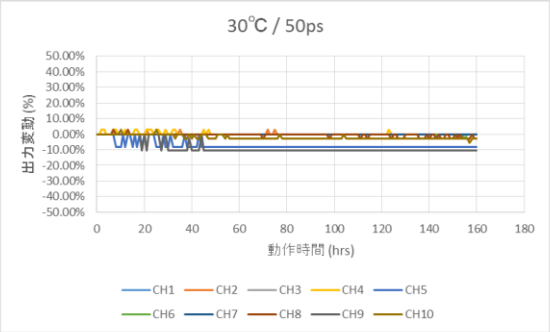


図 2-1-15 30℃通電試験結果

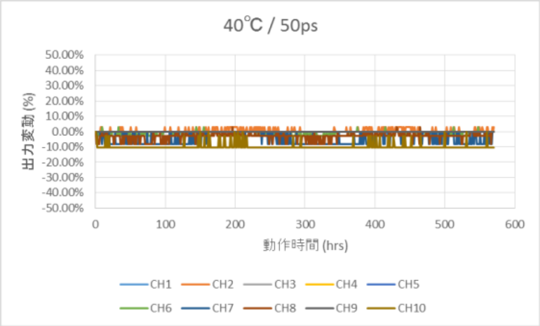


図 2-1-16 40℃通電試験結果

２－２　パルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発

光パルスの時間幅がナノ秒～ピコ秒程度に短くなると、高出力の光パルスをレーザ発振器から直接発生するのは難しい。このため、図 2-2-1 に示すようなマスタオシレータ（シーダー、種光源）と光増幅器とを組み合わせた MOPA (master oscillator power amplifier)構成が広く用いられている。現在、高出力ファイバレーザの名称で流通しているレーザの殆どは、その光増幅器の部分に光ファイバ増幅器を用いたものである。

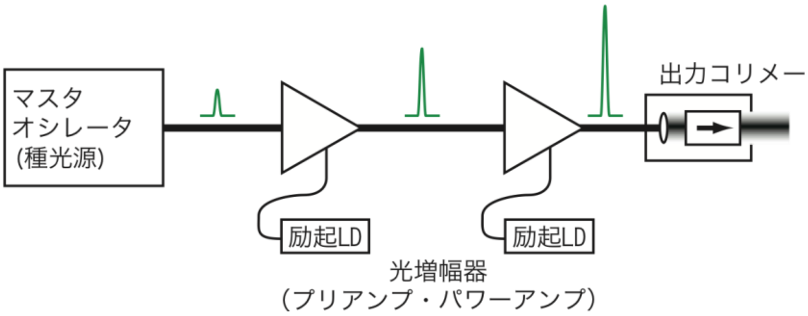


図 2-2-1: MOPA 構成の高出力ファイバレーザ　(LD:レーザダイオード)

光ファイバ増幅器は母材となる材料と添加物により増幅帯域が異なり、様々な種類のものがこれまでに提案・実用化されている。その中で、石英系の光ファイバに希土類を添加して光増幅媒質として用いたものは最も長い歴史を持つ。産業用レーザで重要な波長 1μm 帯では、当初、添加する希土類としてネオジウム(Nd)が試みられたが、1990 年代中頃にイッテルビウム(Yb)を添加した光ファイバ増幅器が検討され、今日では主流となっている。

Yb 添加光ファイバ増幅器(YDFA)は、波長 975～1200 nm の広い範囲で利得を持ち、パワー変換効率が高く、高出力動作に適している。また、Er 添加光ファイバ増幅器で見られるような濃度消光が起こらないため、Yb 添加濃度を高くすることが可能である。YDFA の出力パワーに関しては、クラッドを 2 重化したダブルクラッド構造の導入、ファイバコンバイナによる高効率な励起方法の確立、励起用レーザダイオードの高出力化を背景に、非常に早いペースで高出力化が進展している。例えば、連続光ファイバレーザの出力は、シングルモード出力で 500 W、マルチモード出力で 50 kW を超えており、パルス幅が数十～数百ナノ秒のパルスレーザにおいても、パルスエネルギーがミリジュールを超えるようなものが普及している。

一方、パルス幅がピコ秒の領域に入ると、YDFA による高出力化は難しくなる。高出力化を阻む要因としては光学損傷や放熱などが挙げられるが、パルス幅が短い場合は、ファイバ内での非線形光学効果によるパルス歪みが最大の問題である。元々、ファイバの母材となる石英ガラスの非線形性はとても低いが、光ファイバ中では非常に狭い領域に光が閉じ込められるためにエネルギー密度が高くなり、更に、メートルオーダーの距離を伝搬することから、光ファイバ増幅器自体が非線形媒質として効率よく機能する。例えば、1μm 帯用シングルモードファイバに 10 ピコ秒の光パルスを伝搬させた場合、わずか 1～10 nJ 程度のパルスエネルギーでスペクトルの広がりが顕著になり、スペクトル幅が数 nm～百 nm 程度に広帯域化する。このスペクトル広がりは、加工用レーザでは致命的問題となる。レーザ加工では、加工能力を高めるために短波長の光へ波長変換することが多いが、波長変換結晶の許容スペクトル幅は非常に狭く、LBO 結晶を用いる場合は 2 倍波（波長 532 nm）で 2 nm、4倍波（波長 266 nm）では 0.2 nm まで狭くなる。よって、レーザからの出力光のスペクトルがこの許容スペクトル幅よりも広い場合は、

ファイバ増幅器からの出力をいくら高くしても、波長変換に寄与することなく無駄になる。

この問題への対処方法として、ファイバ中の非線形効果の抑圧のため、ファイバのコア径を太くすることでエネルギー密度を下げる方法が一見有効に見える。しかし、コア径を単純に太くするとマルチモード化し、ビーム品質の低下とモード分散によるパルス波形歪み・パルス幅広がりが起こる。よって、コアとクラッドの屈折率差を下げて、シングルモード条件に近づける必要があるが、これにも限界があり、屈折率差を下げすぎると曲げによる損失変動が大きくなるため、ステップインデックスファイバではコア直径 30μm 程度が限界である。よって、サブマイクロジュール程度のパルスエネルギーまでは対応できるが、ガラス加工に必要な数十マイクロジュールには遠く及ばない。

このため、現在市販されている高出力ピコ秒レーザでは、Nd:YAG、 Nd:YVO4、セラミックYb:YAG、Nd:YLF などのバルク材料を用いたバルク光増幅器がよく使用されている。但し、これらのバルク光増幅器では、1 段当たりの利得がファイバ増幅器に比べて格段に低いという欠点があり、パワーの変換効率も悪い。よって、高い利得が必要な場合には、1 つの光増幅器を複数回通過させるような再生増幅器を構成することが多い。ただし、光路の切り替えやタイミング制御の問題があり、装置が複雑化・大型化する。また、光路調整などが面倒であり、メインテナンスや寿命への影響がある。このような理由により、レーザ装置の製造コストが高くなるだけでなく、本提案で目指しているようなガントリ搭載できるほど小型化するのは困難である。そのかわり、バルク光増幅器ではビームを太くすることにより非線形効果の影響をほぼ無視できるオーダーに抑圧することができる。このため、バルク増幅器ではパルス波形歪みやスペクトル広がりが問題になりにくい。

以上のように、ピコ秒領域で MOPA 構成をする場合、ファイバ増幅器では非線形光学効果によるパワー・パルスエネルギーの上限があり、それを解決するにはバルク増幅器を使用するのが唯一有効な手立てであるが、装置が複雑化・大型化し、非常に高価なレーザになってしまう。

上記の問題点は、高出力の超短光パルスを発生させる際に共通する普遍的な技術課題であるが、これらとは別に、種光源として利得スイッチング半導体レーザを用いる場合に特有の問題がいくつか存在する。

現在のところ、ピコ秒種光源として最も広く普及しているファイバモード同期レーザの場合、数ミリワット～数十ミリワットの平均出力パワー（ピークパワーで数十 kW）が得られる。ファイバモード同期レーザにおいてこのように比較的高い出力が得られる理由は、ファイバレーザの出力がピークパワーではなく平均パワーで決まるためである。一方、利得スイッチング半導体レーザの場合は、ピークパワーが制限を受け、利得スイッチング時のパルスのピークパワーと連続(cw)動作させた場合の平均パワーは同程度になる（オーダーとして）。通常の単一モードの半導体レーザでは、出力平均パワーは数十 mW 程度であり、パルスエネルギー（もしくはピークパワー）で比較すると、ファイバモード同期レーザよりも 5～6 桁低くなる。

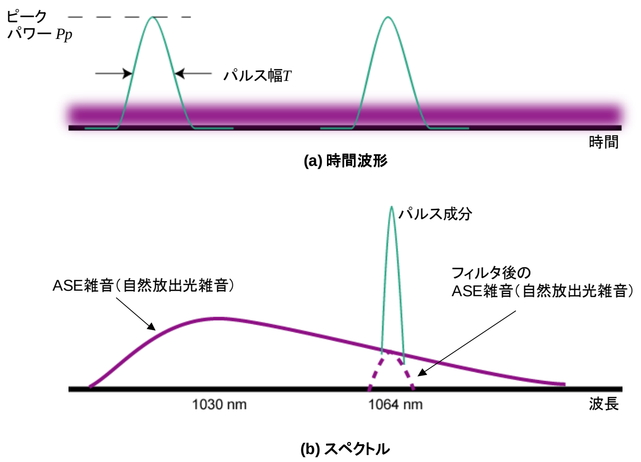


図 2-2-2 光増幅器の雑音

このような微弱な信号を光増幅器で増幅すると、雑音光に埋もれてしまうという問題がある。誘導放出に基づく光増幅（ファイバ増幅器、バルク増幅器を含む）では、自然放出に起因する雑音光が発生するため、出力光は図 2-2-2 のように背景に雑音を伴う。また、光増幅器内部で発生した雑音光は信号光と一緒に伝搬しながら増幅されるため、無視できない強度になり、元々信号光の増幅に使われれるべき励起パワーの大部分が、雑音光の増幅に使われてしまう。（このため、光増幅器からの雑音は、増幅された自然放出光雑音（amplified spontaneous emission noise; ASE 雑音）と呼ばれる。）

これに対処するには、

(a) 入力パルスのパルスエネルギーを高くする

(b) 光増幅器の雑音を下げる

(c) フィルタなどで ASE 雑音光をカットする

といった方法が考えられる。

(a) については、QD レーザが開発する DFB 半導体レーザのテーマになっており、従来比で 5 倍程度までは改善できた。

よって、(b) と (c) を光増幅器側でどのように実現するかが、開発の中心的な課題となる。但し、(b) については、光増幅器の雑音の大きさを示す雑音指数に理論限界があることに注意しなければならない。これまで 1μm 帯の YDFA やバルク増幅器ではあまり検討されておらず、8～10 dB 程度である。よって、多段接続された YDFA によるファイバ増幅器の雑音指数を下げるための設計指針を明らかにし、実際に低雑音ファイバ増幅器を構築することが、開発の中心課題となる。

以上の課題を解決するために我々はファイバ増幅器を利用したプリアンプと、バルク増幅器を利用した高出力パワーアンプを組み合わせた光増幅器を提案している。本来、ファイバ増幅器とバルク増幅器は構成部品や設計手法などがまったく異なり、技術的なオーバーラップがないため、産業用レーザにおいてこれらを組み合わせて用いる前例は（申請時には）なく、この点で新規性・独創性の高い技術である。

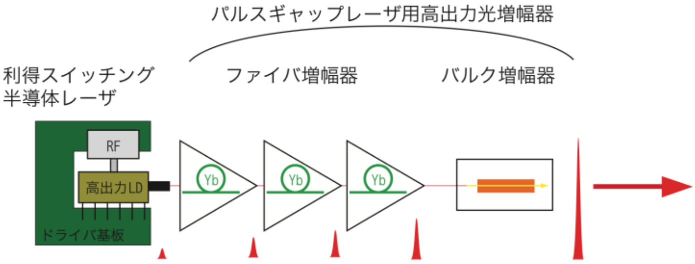


図 2-2-4 提案するパルスギャップレーザ用高出力光増幅器

本提案の改善性は、ファイバ増幅器とバルク増幅器の相反する性質を相補的に組み合わせることにより、それぞれの光増幅器の欠点を克服できる点にある。具体的にいうと、ファイバ増幅器をプリアンプとして用いることにより、低雑音で、且つ、高利得な光増幅を実現する。これにより、利得スイッチング半導体レーザからの微弱な信号を雑音に埋もれさせることなく増幅することが可能になる。また、最終段にバルク増幅器を用いることにより、スペクトル広がりを引き起こすことなく出力を高めることができ、更に光学部品の損傷などに対する耐力も向上する。以上のように、2 種類の光増幅器を組み合わせることにより、コンパクト性を犠牲にすることなく、雑音特性、利得特性、出力特性を大幅に改善することが可能になる。

2－ 2－ 1 実験用種パルス光源の装置化

半導体レーザとして QD レーザ製 1064 nm DFB レーザを用い、パルス電流ドライバと組み合わせて実験用ピコ秒種パルス光源として装置化した

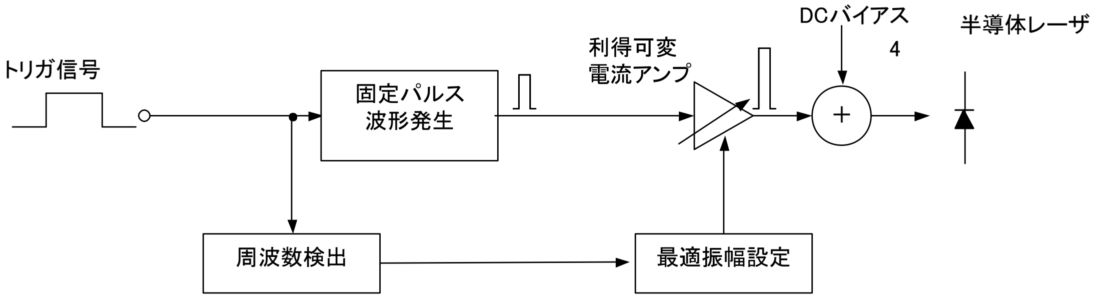


図 2-2-6 利得スイッチング用電流ドライバのブロック図

パルス電流ドライバの構成を図 2-2-6 に示す。外部から入力パルスを入力し、それに応じてピコ秒光パルスを半導体レーザから発する構成になっている。一般的にトリガ信号はパルスの出力タイミングの指令に用いることが多く、パルス幅が一定でないため、一旦、固定パルス発生部で利得スイッチング用の固定時間幅の電流パルスに変換し、電流アンプで増幅した後、バイアス電流を重畳して半導体レーザに注入する。

そこで平成 24 年度に、QD レーザ製 1064nm 半導体レーザを駆動するドライバ基板を試作した。外観を図 2-2-9 に示す。また、この電流ドライバは繰り返し周波数 10 kHz から 10 MHz の範囲で無調整でピコ秒パルスを発生させることが可能である。図 2-2-10 にパルス波形を示す。単峰性のペデスタ

ルの小さい良好なパルス波形が得られている。パルス幅は半値全幅で 61 ピコ秒である。ピークパワーは 20mW 程度であるが、本年度から次年度にかけて QD レーザ㈱において開発する新しいパッケージの半導体レーザに載せかえることにより、最終目標の 100 mW に到達させることは十分に可能であると思われる。

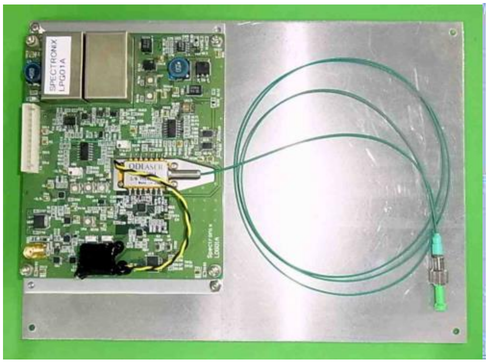
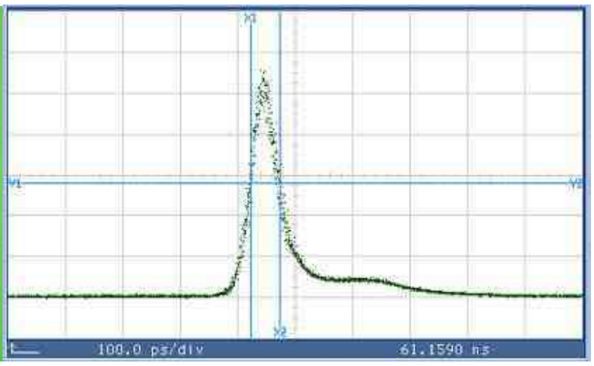


図 2-2-9 試作した利得スイッチング用ドライバ基板図



2-2-10 利得スイッチング半導体レーザからの出力パルス波形

また、提案しているレーザ全体の開発効率を向上するため、開発したドライバ、及び、半導体レーザをピコ秒パルス発生器として装置化した。ドライバ基板、及び、コントローラ、電源などを内蔵し、フロントパネルからの操作のほか、外部トリガを受け付けることが可能であり、次段のファイバ増幅器に対するゲート信号などの通信機能を実装している。

バルクアンプ部の前段となるファイバアンプ部では、目標とする出力 300mW 以上を達成する事ができた。平成 25 年度の低雑音光アンプ部の開発では、組立性、信頼性を考慮し、平成 24 年度に開発したパルス光源ユニットへ機能を一部移植した。その結果、低雑音光アンプ部では小型化、剛性の向上を実現し、信頼性を向上する事に成功した。

図 2-2-4：パルス光源ユニット

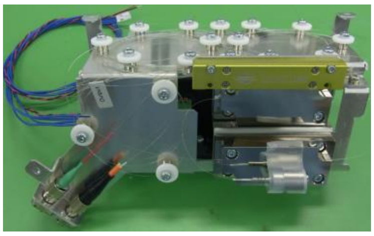


図 2-2-5：低雑音光アンプ

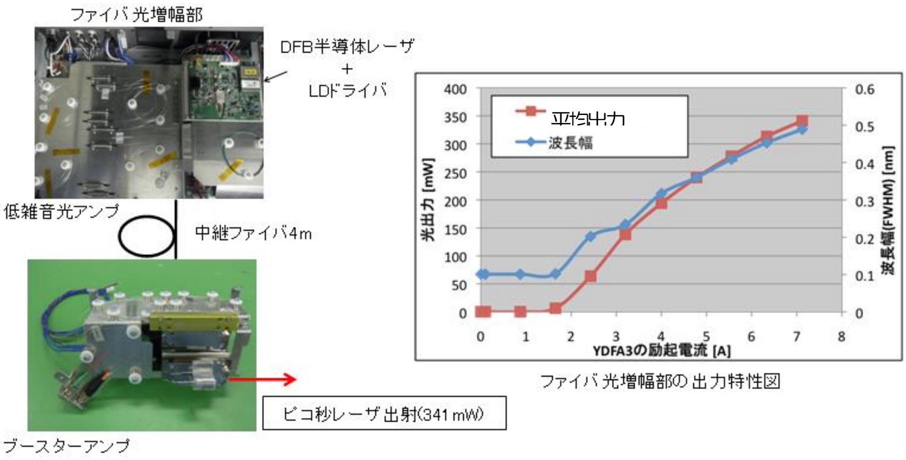


図 2-2-6：ファイバアンプ部の構成、及び出力特性図

2－ 2－ 2 低雑音ファイバ増幅器の開発

一般的に、MOPA 構成のレーザの場合、アンプを多段に接続して増幅するが、このとき各段の光増幅器の設計は同じではなく、それぞれにおいて明確な指針がある。

光増幅器で直接増幅する場合、光増幅器内で発生する ASE 雑音により信号対雑音強度比 (S/N 比) が劣化する。この劣化の度合いを定量的に評価する指標として雑音指数があり、入力としてショット雑音限界の光を増幅器に入射した場合の入力と出力の S/N 比の比で定義される。

開発しているレーザ全体では、利得スイッチング半導体レーザからの微弱パルス光を最終的にはワットレベルまで増幅するため、複数のファイバ増幅器、及び、バルク増幅器を組み合わせているが、このように多段接続した光増幅器全体としての雑音指数は、個々の光増幅器の雑音指数で書き表すことができる。図 2-2-12 のように 4 段接続した場合、増幅器全体の雑音指数 F は、

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3}$$

のように表される。ここで Gn, Fn は n 段目の光増幅器の利得と雑音指数である。この式から、全体の雑音指数は初段の光増幅器の雑音指数でほぼ支配され、始めの数段の光増幅器の利得が十分高ければ、最終段の光増幅器の雑音特性が多少悪くとも、全体としては影響を受けないことがわかる。よって、低雑音化するためには、初段の光増幅器の低雑音化と高利得化が鍵となる。

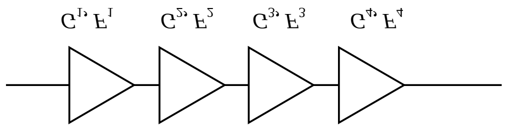


図 2-2-12 多段接続した光増幅器

提案しているレーザでは、最終段のみがバルク増幅器となり、他はファイバ増幅器となる。我々は、前述の考察から、前段のファイバ増幅器の設計では低雑音化に注力し、後段のファイバ増幅器では非線形光学効果を抑制する設計に注力した。初期の実験機の写真と出力特性を図 2-2-15 に示す。

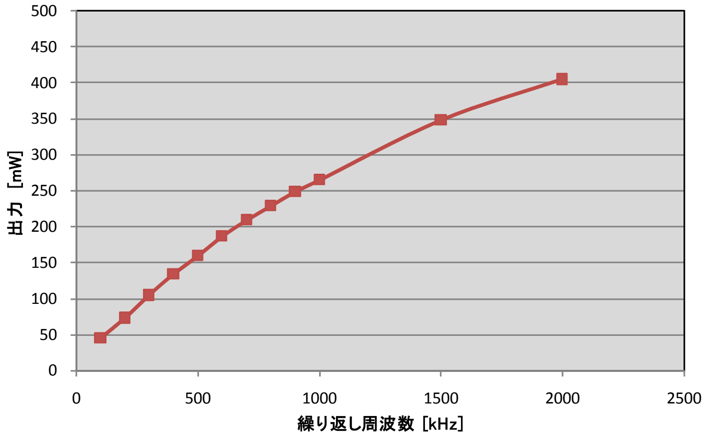


図 2-2-15 実験用に作成した 1064nm ファイバ増幅器(左)と出力特性(右)

2－ 2－ 3 バルク増幅器の開発

ファイバ増幅器で増幅されたピコ秒パルス列を更に増幅するためのバルク増幅器の試作を行った。平成 24 年度には必要性能を満たす構成を模索するための実験機を光学定盤上で作成し、平成 25 年度にバルク増幅部と波長変換部をレーザヘッドに収容して装置化する開発を実施した。その際のバルク増幅器構成の概略を図 2-2-19 に示す。ファイバ増幅器からの出力をレンズでコリメートし、出力アイソレータに通した後、増幅器用のアイソレータを通じて Nd:YVO4 結晶に入射する。この図では明示していないが、Nd:YVO4 結晶は励起用半導体レーザによりエンドポンプされている。信号光は Nd:YVO4 を通過した後、ミラーにより反射されて再度 Nd:YVO4 結晶を通過し、往復で利得を受ける。

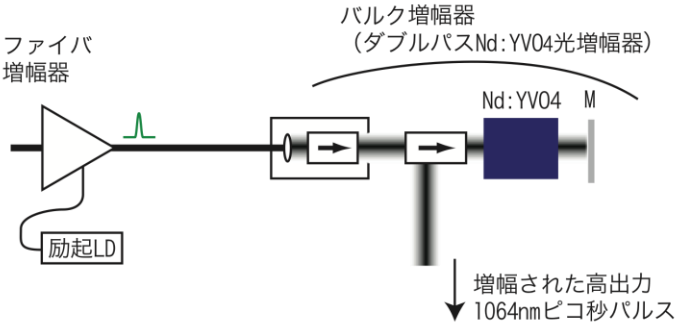


図 2-2-19 バルク増幅器の構成図

図 2-2-21 に出力特性の測定結果を示す。利得スイッチング半導体レーザの繰り返し周波数は 100kHz で、出力光パルス列をファイバ増幅器で 35mW まで増幅した後に、バルク増幅器に入射した。Nd:YVO4 結晶へ注入する励起光パワーに応じてバルク増幅器の出力パワーは増加し、励起光パワーが 60W で 8.2W の出力が得られた。このときのパルスエネルギーは 80μJ を超えており、微細加工用としては十分である。このときの光スペクトルを図 2-2-22 に示す。中心波長は 1064.1 nm、スペクトル線幅は 0.11 nm であり、ファイバ増幅器で見られるようなスペクトル広がりがバルク増幅器ではほとんど問題にならないことが分かる。また、次年度に作成する波長変換部の許容スペクトル幅よりも十分に狭い。

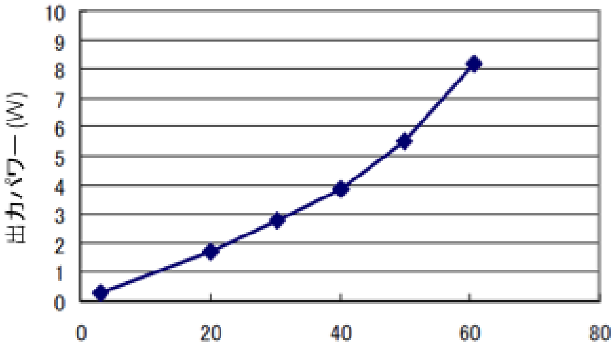


図 2-2-21 バルク増幅器の出力特性
(横軸：励起パワー(W))

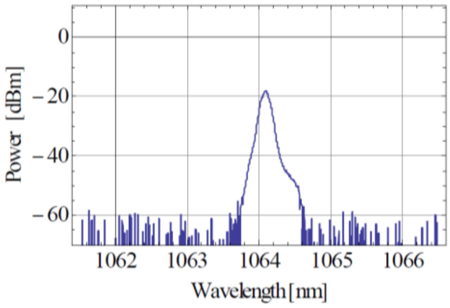


図 2-2-22 バルク増幅器の出力光スペクトル

結果として、平成 24 年度は水冷によるバルクアンプで出力 8W 以上を達成したが、平成 25 年度はペルチェ素子（電流によって熱を移動させる素子）とファンを併用し、レーザヘッドの光学ベース部全体を冷却する事による排熱方法を開発した。大発熱量のバルク増幅器においては、特殊な伝熱プレートを用いて熱を拡散させ、これを複数のペルチェ素子で排熱する構成とした。この結果、空冷で出力 12W を達成する事ができた。

図 2-2-1：バルクアンプ部の調整の様子

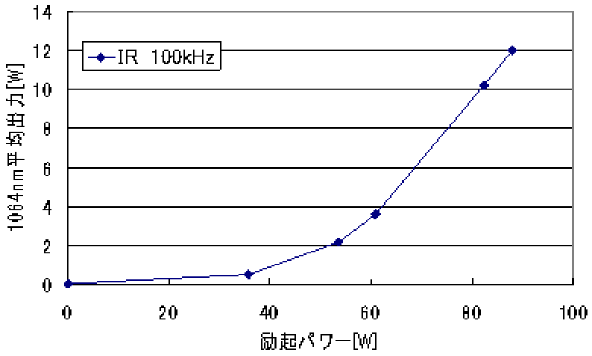
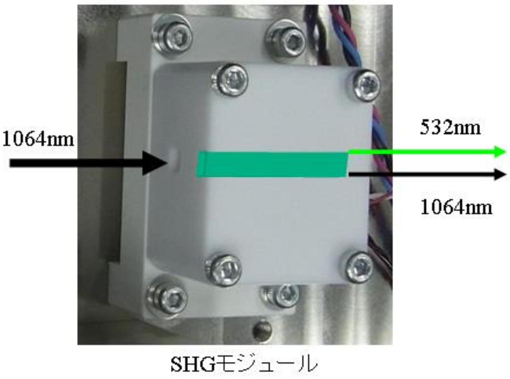


図 2-2-2：励起パワーと 1064nm 光出力グラフ

２－３　コンパクトな 532nm 波長変換部の開発

波長変換部の開発は、次の通り目標値を達成することができた。532nm の出力は、目標が 5W 以上に対して最終的には出力が 6W となり、波長 1064nm から 532nm への波長変換効率は目標とする 50%以上に対して 65%となった。

この波長変換技術には、トレードオフとなるパラメータが存在する。レーザ波長 1,064nm を 532nm に効率的に変換する課程において、変換効率が低すぎると目標とする出力が得られなくなり、逆に変換効率が高すぎるとビーム品質の劣化を招いてしまい、加工品質に重大な悪影響をもたらすことになる。そこで、これらの実験から最適な条件を導出し、シングルパス構成で高変換効率 65%以上、平均出力 6W 以上が出せる LBO を搭載した SHG モジュールを開発した。



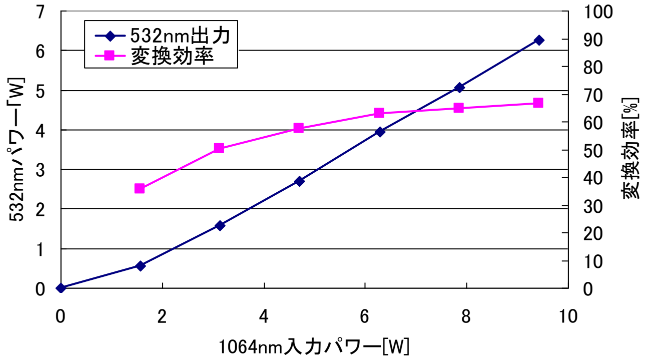


図2-3-1：シングルパス構成LBOモジュール　　　図2-3-2：変換効率・出力特性データ

平成24年度に達成した、【1-2】完全空冷バルクアンプ後で出力8W以上@1,064nmのレーザ光を、非線形光学結晶であるLBOを利用して、LBO長さ、ビーム半径、パルスエネルギなどを変えながらデータ取りし、ドライブによる波長変換効率の推移を求めた。

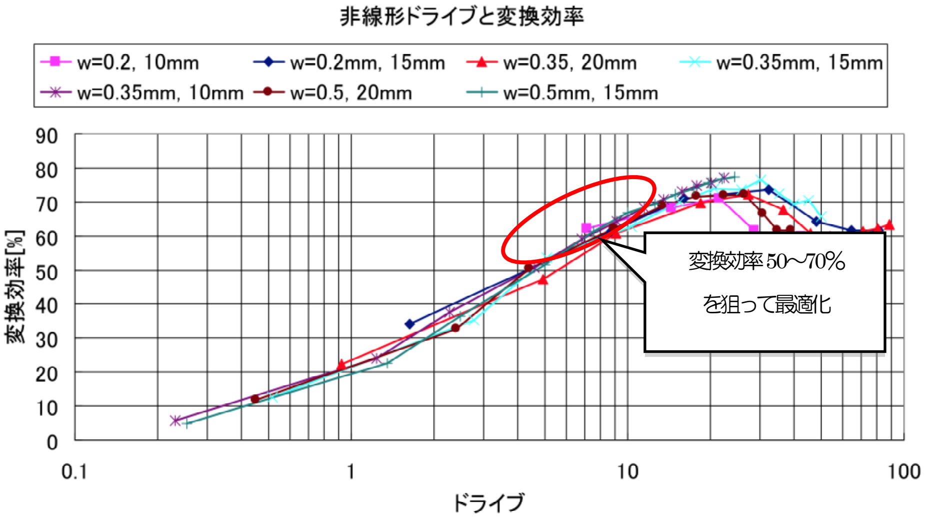


図2-3-3：LBO結晶を用いた波長変換効率の推移

$$\text{ドライブ}=\eta_0=\frac{8\cdot\pi^2\cdot d_{eff}^2}{n_1^3\cdot\lambda^2\cdot c\cdot\varepsilon_0}\cdot L^2\cdot I_0$$

$$I_0=\frac{\varepsilon}{\tau p}\cdot\frac{2}{\pi\cdot(\omega T)^2}$$

d_{eff}：有効非線形定数
n_1：屈折率，L：結晶長さ
λ：波長，c：光速，ε_0：誘電率
ε：パルスエネルギ
τp：パルス幅
ωT：ビーム半径

図2-3-4：ドライブの理論計算式

第３章　ヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の試作開発

３－１　超小型レーザヘッドの開発

532nm パルスギャップレーザ光源のレーザヘッド部を、設置面積を約 30cm×50cm 程度に収まる事を目標に開発した。開発時のポイントは、以下の通りであった。

(a) レーザヘッド部の冷却を完全空冷化すること

(b) 排熱効率のよい部品配置と空冷流路の最適化を行うこと

(c) 産業用途に耐え得る高い信頼性を有すること

(a) については、【1-2】で達成した。(b) については、レーザヘッド内部の発熱体の配置を排熱効率が高まるように最適化し、更にペルチェ素子、ヒートシンク、冷却ファンの配置を最適化して吸熱／放熱効率の最大化を達成した。(c) については、ペルチェ素子への熱負荷を最小化する駆動方法によってペルチェ素子を長寿命化しながらも、必要な冷却能力を達成しつつ信頼性を向上し、同時に加速度 0.5G に耐え得る構造を達成した。この結果、冷却能力に余力を持たせる事が可能となり、532nm でレーザ出力 6W 以上を実現して、当初想定よりも広範囲な加工に対応可能である。

図６：【超小型レーザヘッド】（左）レーザ出射側、（右）配線接続側

空冷ヘッドサイズは 30cm×51cm×20cm（※突起部除く。端数四捨五入）を達成し、概ね予定していた設置面積を達成した。開発においては、組立性、メンテナンス性も考慮した。ファイバアンプ部からの光ファイバをレーザヘッド内へ取り込む姿勢、アクセス方向、脱着方法、冷却方法などに大きな制約があり、平成 24 年度の試作機から大きく部品配置を変更した。信頼性を考慮して、レーザヘッドは完全ハーメチック（密閉）構造とした。

３－２　レーザヘッドの衝撃・振動への耐性の向上と評価

開発されたヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の試作機の評価を行った。特に、本光源は小型の特徴を有しており、加工機ガントリヘッドに搭載することが可能である。しかしながら、加工機のガントリヘッドは定常的に動作し、搭載物は加減速による振動を受ける。そのため、レーザヘッド内の構成を見直し、特に、図 3-2-1 に示すような応力印加に対して耐性の高いミラーマウントを開発した。

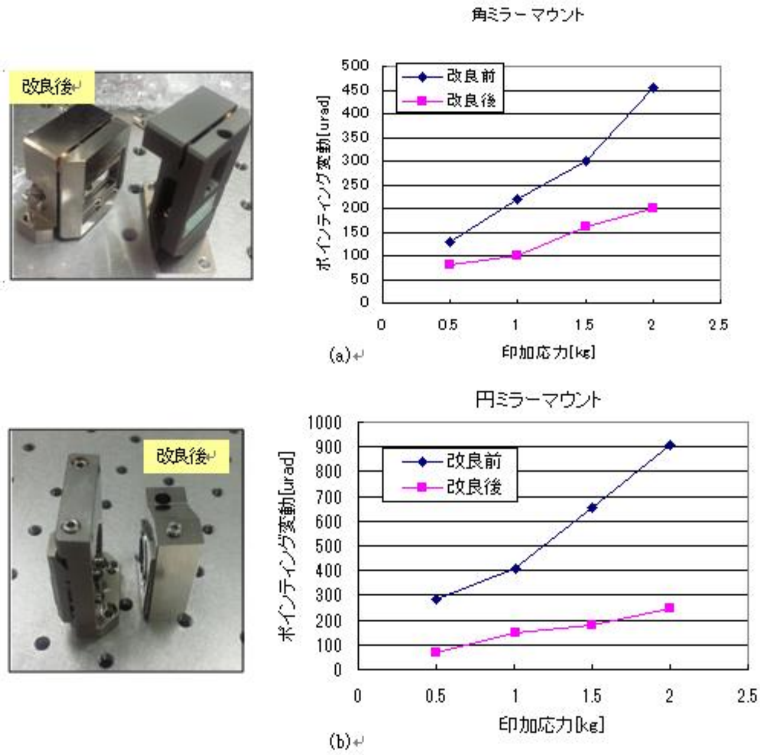


図 3-2-1.　ミラーマウントの改良

その結果、図 3-2-2 に示すように、ミラーマウントを改良する以前では、高い加速度状態での出力安定性が低い傾向にあったが、改良後では加速度の高低によらず高い出力安定性を得ることができた。

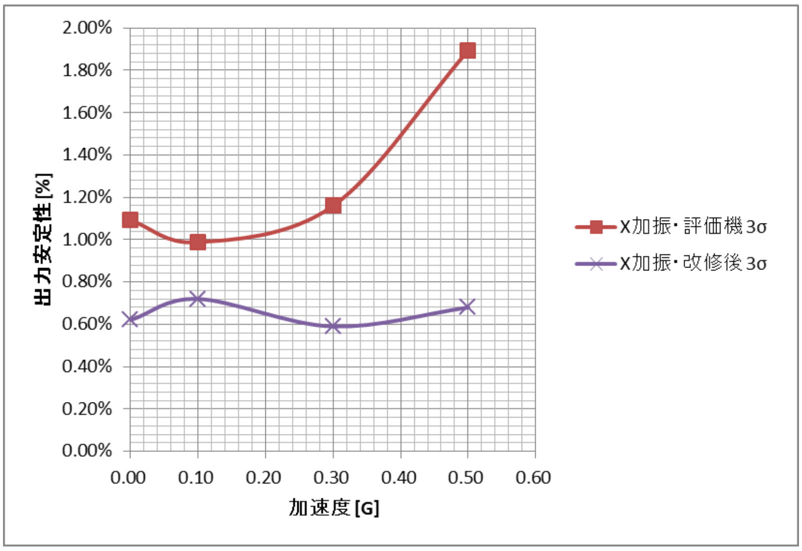


図 3-2-2.　耐振動性評価結果

３－３ ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の開発

ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザ光源の試作機を完成させた。パルス光源ユニット、低雑音光アンプ、超小型レーザヘッド、レーザコントローラ、LDモジュール、制御システム（回路・ソフト）、19インチラックを一体化して、ヘッド分離型パルスギャップレーザの総合検証を実施した。

図3-3-1：パルスギャップレーザ試作機

図3-3-3：レーザシステム調整中

試作機での532nm出力は【図3-3-4：532nm出力特性図】で示す通りとなる。内部アッテネータを100％時に7W@532nmを出力可能という結果となった。これより、ヘッド分離型532nmパルスギャップレーザの試作目標を達成したと言える。

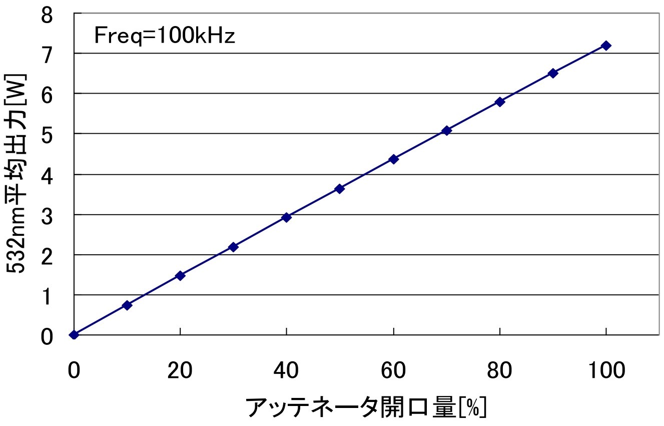


図3-3-4：532nm出力特性図

第４章　R2R 方式フレキシブルガラス加工装置の試作開発

４－１ フレキシブルガラスの高品位加工のための加工条件の抽出

１）目的、計画

試作されたレーザ発振器はパルス幅 50 ps と通常の半導体励起固体レーザ発振器から得られるナノ秒パルス光に比べてパルス幅が短いことからパルスのピーク強度が向上し、それに伴いレーザ加工性能の向上が期待される。また、加工対象となるフレキシブルガラスも厚さ 50、100、240 μm と通常の板ガラスに対して薄いことから照射位置制御の厳密性が求められる。このため、照射光学系を含む加工条件の最適化を図る必要がある。さらに、フレキシブルガラスはその薄さから曲げ特性が良好であるが、通常のレーザ発振器での切断では切断面でのチッピングと呼ばれる毀れやマイクロクラックと呼ばれる目に見えない微小な傷により、その曲げ特性が損なわれてしまう。そのため、考察として、今回得られたレーザ加工条件で薄ガラスを切断しその切断個片の曲げ特性を評価することで、50 ps のレーザパルス光を用いて高品位なレーザ加工が実現できる加工条件を抽出した。

２）実施内容、開発内容

レーザ光は集光レンズにより集光されるが、ビーム品質、入射ビーム径や集光レンズの焦点距離により集光位置でのスポット径や焦点深度が変化する。図 4.1.1 に示すとおり、集光すればよりスポット径が小さくなるため、より微細な加工が実現できる反面、レーザ光の伝播方向での光の発散が強くなり、一般的には厚みのある材料に対して加工能力が劣化する傾向がある。今回、照射光学系を３種用意し、その加工能力の比較を行った。

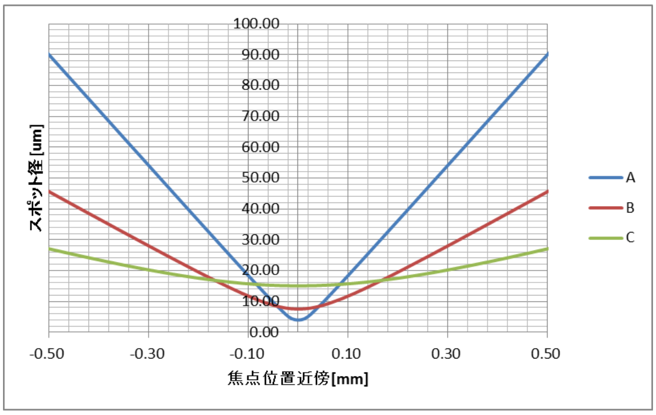


図 4. 1. 1　照射光学系

波長 532 nm に対して、いずれも計算値となるが 4. 4、7. 6、15. 1 μm のスポット径に調整して厚さ 50、100、240 μm の薄ガラスに対して、照射エネルギーと繰り返し周波数（=1 秒間に出力されるパルス数）を変化させてレーザ加工条件を取得した。

3）開発結果

その結果、下記の加工条件の傾向を得た。

・照射エネルギー、繰り返し周波数が少なく加工閾値以下の切断不良条件と、加工閾値を越えた切断可能条件が存在する。ただし、過度な照射エネルギー、繰り返し周波数で切断不良になる場合があり、最適な照射条件の存在が確認された。

・照射光学系の選択において、4.4 μm の微小スポット径ではピーク強度が高く加工能力が高いが焦点深度が少なく、切断可能な条件が狭い。7.6 μm のスポット径では同等の切断能力で、切断可能な条件も広くなる。15.1 μm になるとピーク強度が下がることで加工能力が低くなってしまう。このことから、今回の 50 ps、8 W @ 100 kHz のレーザ発振器のフレキシブルガラス切断に対する切断可能条件が広い加工条件が見出された。

・ガラスの厚みに対して、焦点位置を固定した条件下において、50 μm の厚みに対しては３種の光学系すべてで切断可能であったが、100 μm の厚みに対してはもっともスポット径が小さい光学系では切断不良となり、240 μm の厚みに対してはもっともスポット径が太い光学系でのみ切断可能であった。このことから、切断加工対象の厚みに応じて適切な照射光学系を選択する必要性が確認された。

4）考察

次に、最も曲げ特性の良好な 50 μm 厚ガラスに対して、開発結果で得られた複数の照射光学系、および加工条件で短冊状のガラス個片を切り出し、その個片の曲げ特性を取得した。曲げ特性は図4.1.2 に示すとおり、30 mm 間隔の保持ベース間に上下動する Z 軸にφ6 mm のステンレス製の丸棒を取り付けでサンプル個片を押し、Z 軸がどれほど押し下げられるかを測定した。

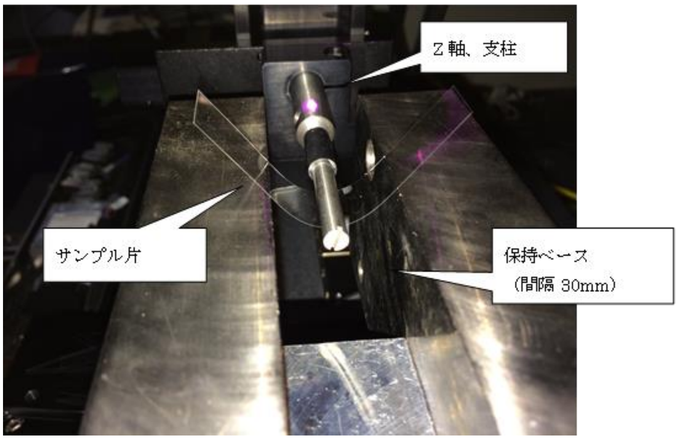


図4.1.2 曲げ特性評価の様子

その結果、図4.1.3　に示す結果が得られた。

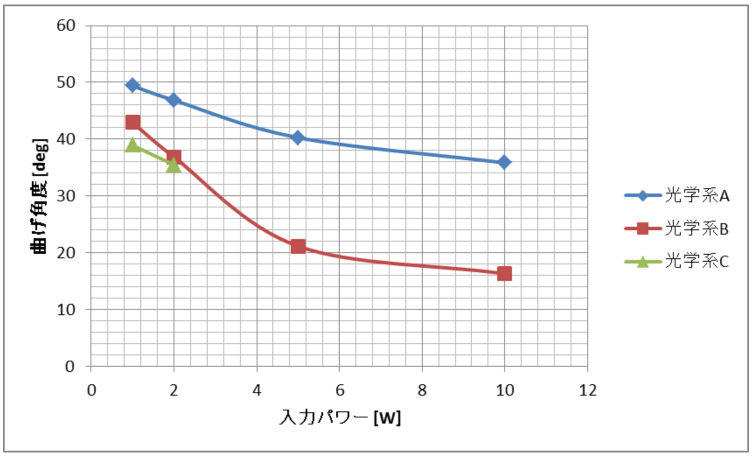


図 4.1.3 照射条件、照射光学系に対する曲げ特性の相関

図に示されるとおり、

・入力パワー（照射エネルギーと繰り返し周波数の積）が低いほど、曲げ特性が良好

・スポット径が絞れている光学系であればあるほど、曲げ特性が良好

つまり、入力パワーが低く照射スポット径が絞れてピーク強度が高いほど、加工対象に悪影響なく良好な切断が可能であることが確認された。

5）結論

今回開発した波長 532nm、パルス幅 50 ps、出力 8 W @ 100 kHz 光源のレーザ発振器を用いて、厚さ 50、100、240 μm のフレキシブルガラスの切断加工を行った。照射光学系、照射条件の最適化を行った結果、加工条件を広く安定な切断加工が実現できる条件として、スポット径 7.6 μm の光学系が選定された。しかしながら、フレキシブルガラスの曲げ特性が良好である高品位な加工条件としては、スポット径 4.4 μm の極小スポット径、かつ、入力パワーを切断閾値近傍まで低減させた加工条件好ましいことがわかった。

4－2 超小型レーザヘッドをガントリ搭載した R2R 方式加工装置の試作開発

1）目的、計画

これまではパルス幅 50 ps レーザ光のフレキシブルガラスに対するレーザ加工条件の抽出を行ってきたが、本研究開発ではレーザ発振器を小型にするなど生産性を考慮、また、将来的な R2R 方式の加工装置を念頭においた上での、レーザ発振器、ガルバノスキャナを搭載したガントリヘッド型加工機による加工生産性の確認を行った。

2）実施項目

図 4.2.1 に示すとおり、レーザ発振器およびガルバノスキャナを搭載したガントリ構成の加工装置を構築した。

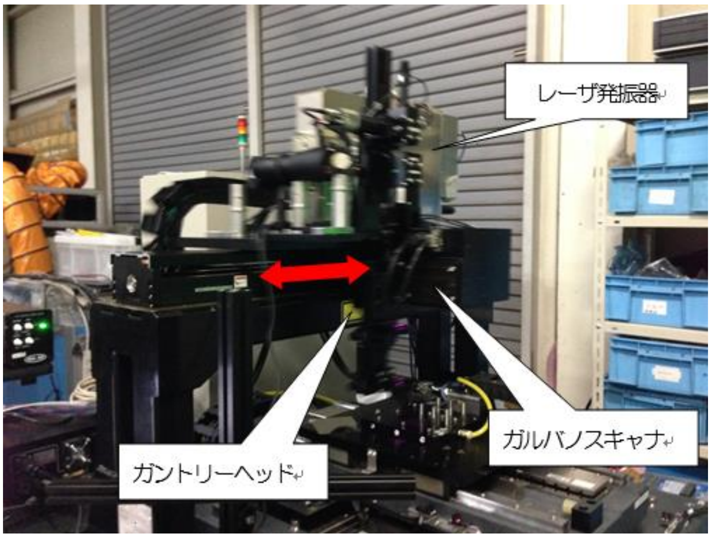


図 4.2.1 ガントリ型レーザ加工機

ガルバノスキャナは数 m/s でレーザ光を走査可能であり高い生産性やレーザ光の重畳を避け加工における熱影響を低減させる効果も期待できる。しかしながら、図 4.2.2 に示す加工走査範囲を仮に 60 mm 角程度とした場合、照射スポット径は 8.8 μm まで拡大してしまうため、最高品位加工条件の再現には課題が残るが、加工速度の向上が期待される。

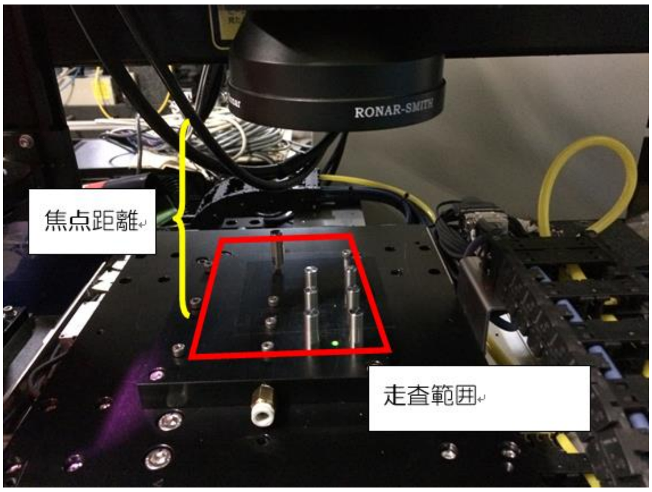


図 4.2.2 ガルバノスキャナ光学系

3）開発結果

ガルバノスキャナを用いて加工速度の検討を行い、以下の結果を得た。

・完全切断できる加工条件では、厚み 50 μm では 20 mm/s、厚み 100 μm では 6 mm/s、厚み 240 μm では 1.6 mm/s での切断速度を確認した。

・ガルバノスキャナで走査速度を速めてレーザ光の重畳を避けることで、低速で加工した場合（図 4.2.3 における光学系 B）よりも、特にレーザ光を高出力で入力時に曲げ特性の改善を図ることがで

きることを確認した。

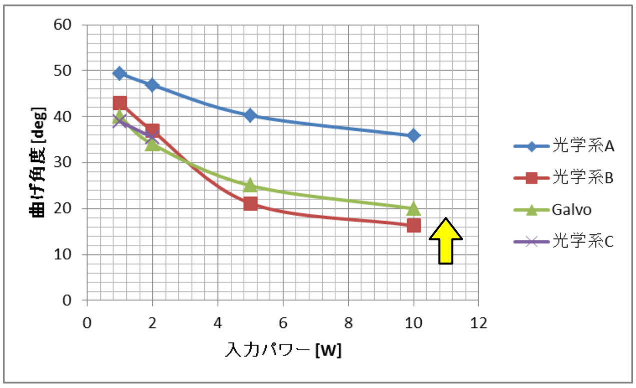


図4.2.3　ガルバノスキャナによる高速加工と従来加工法との曲げ特性比較

4）結論

ガルバノスキャナを用いた加工試験を行い、厚み 50 μm では 20 mm/s、厚み 100 μm では 6 mm/s、厚み 240 μmでは 1.6 mm/s での切断速度を確認した。また、低速加工時に比べて、特にレーザ光を高出力で加工した際の曲げ特性の改善が図れることを確認した。

第５章　全体総括

【複数年の研究開発成果】

「ヘッド分離型パルスギャップレーザによる次世代超薄型ディスプレイ用フレキシブルガラスの加工技術開発」を課題として一般財団法人大阪科学技術センターを事業管理者としてスペクトロニクス株式会社、株式会社ＱＤレーザ、ライテック株式会社とが研究プロジェクトに参画し着実に研究開発を実施し、「ヘッド分離型パルスギャップレーザによる次世代超薄型ディスプレイ用フレキシブルガラスの加工技術開発」の全ての目標を達成することができた。

初年度は低価格でヘッド分離型可能なパルスギャップレーザのための要素技術の開発として、株式会社ＱＤレーザがパルスギャップ領域で動作する高出力 1064nmDFB 半導体レーザの開発を実施し、スペクトロニクス株式会社が水冷式パルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発を行い、両社とも初年度の全ての開発目標を計画通り達成した。

２年目にはパルスギャップ領域で動作する高出力 1064nmDFB 半導体レーザの開発をＱＤレーザが完了させ、この成果物を応用してスペクトロニクス株式会社が完全空冷型のパルスギャップレーザ用高出力光増幅器の開発、及びコンパクトな 532nm 波長変換部の開発を行った。

また同年に、スペクトロニクス株式会社がヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の試作開発として超小型レーザヘッドの試作機を開発し、その試作機をライテック株式会社がレーザヘッドの衝撃・振動への耐性の評価を行った。

２年目の研究開発に関しては、振動時に多少のレーザ出力の不安定性も発見されたが、いずれも仕様値内に収まる程度の変化率となり、全体として予定通り開発目標を達成する事ができた。

最終年度となった本年度は、ライテック株式会社がレーザヘッドの衝撃・振動への耐性の向上と評価を行い、全ての目標を達成している事を確認出来た事で、ヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ光源の開発が完了させる事が出来た。

更に R2R 方式フレキシブルガラス加工装置の試作開発としてフレキシブルガラスの高品位加工のための加工条件の抽出及び改良を行い、超小型レーザヘッドをガントリ搭載した R2R 方式加工装置の試作開発を達成した。

【研究開発後の課題・事業化展開】

本研究プロジェクトが開始される時点で目標としていた仕様の「ヘッド分離型 532nm パルスギャップレーザ」は、予定通り全ての目標を達成し、無事完成した。

また、ライテック株式会社において超小型レーザヘッドをガントリ搭載した R2R 方式加工装置を開発し、フレキシブルガラスの加工が想定していた品質で加工できる事も確認出来た。この結果から、既にライテック株式会社、スペクトロニクス株式会社の両社は、フレキシブルガラス加工を産業（量産）ベースで検討している複数の企業と具体的な加工テストの案件を進めつつある。

現時点では、想定通り高品質、及び高速性を両立したフレキシブルガラス加工の需要は急速に拡大しつつあり、当初予定していた通り、市場から強い引き合いが続いている。

今後は海外輸出を可能とするための国際安全規格（CE、FDA、UL、EU-RoHS など）に準拠した設計・評価を実践し、今後拡大する市場に合わせて製品の信頼性を向上する必要がある。

また同時に、実際の市場調査を進める中でガラス加工業者によっては更に高い生産性（加工速度）を求める会社も存在しているため、例え今回の研究開発プロジェクトの目標を全て達成したとはいえ、更なる高出力化を検討しなければならない可能性がある。

本研究プロジェクトによる研究開発事業により、開発成果物を市場ニーズに合わせるために必要な技術的知見はほぼ全て得られたと考えている。そのため、現時点に置いては海外競合レーザメーカと比較して、ゲインスイッチング方式のピコ秒パルスレーザの分野において高い競争優位性を確保出来た。今後は販売網、及び生産体制の構築を含めた事業化の推進を急ピッチで進める事が重要である。

幸い、スペクトロニクス株式会社は 2015 年 2 月中旬に、ゲインスイッチング方式の産業用ピコ秒パルスレーザを軸とした事業計画によって、産業革新機構を含む複数のベンチャーキャピタルから数億円という大口の資金調達に成功した。今後はこの資金を有効活用し、ガラス加工を含む様々な事業分野で事業展開して行く所存である。