

平成21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22年 3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	1
1.1. 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1.1.1. 背景	1
1.1.2. 研究開発の目的・目標と実施内容	5
1.2. 研究体制	7
1.3. 成果概要	8
1.4. 当該研究開発の連絡窓口	8
2. 開発課題1：パルスファイバレーザーの開発	9
2.1. 光源概要	9
2.1.1. 構成	9
2.1.2. 仕様・目標性能	11
2.2. 発振器1（ナノ秒発振器）	12
2.2.1. 概要	12
2.2.2. 原理と構成	12
2.2.3. 結果	12
2.3. 発振器2（ピコ秒発振器）	14
2.3.1. 概要	14
2.3.2. 構成	15
2.3.3. 結果	15
2.4. プリアンプ	17
2.4.1. 概要	17
2.4.2. 原理と構成	17
2.4.3. 結果	17
2.5. パワーアンプ	21
2.5.1. 概要と原理	21
2.5.2. 構成	21
2.5.3. 結果	22
3. 開発課題2：波長変換システムの開発	25
3.1. 概要	25
3.2. 結晶の選択	25
3.3. 構成とビーム伝搬	27
3.4. 第2高調波発生	27
3.5. 第4高調波発生	28
4. 全体総括	29
4.1. 目標・実績の比較による達成度検証	29
4.2. まとめ	30
参考文献	31
専門用語集	32

1. 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的および目標

1.1.1 背景

a) 高精度切削加工の現状と傾向

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絶対必要な要素技術である。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上に、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い。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メインストリームとなることに間違いない。

b) レーザーによる加工の特徴

レーザーを用いた微細加工のポイントは、光子エネルギーによる材料の原子間結合の直接切断である。機械的な手法に限界があるのは、単に加工工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、いわば加工工具により物質をこそげ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-熔融-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熔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を用いると、熔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エンベロープ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(図 1-1)。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。

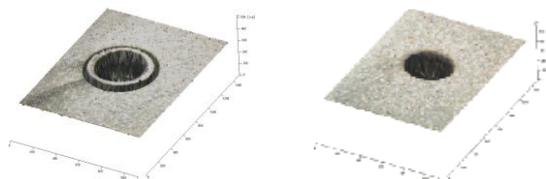


図 1-1 熱加工(左)と非熱加工(右)による加工の例

c) 難加工性非金属材料のレーザー微細加工

今回共同で申請している日星電気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、また、医療用の高機能部材などである。これらは最終製品の高性能化に歩調を合わせて、サブミリ単位まで小型化が著しく進んでいるデバイスである。これらの加工はすでに従来方法の限界に近いため、画期的な高精度加工は切実な要望である。レーザーによる微細加工を行おうとしても、ガラスやフッ素樹脂の非熱加工に適した光源がないことが原因の一つである。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る。図 1-2 にいくつかの原子結合エネルギーと、それに対応するレーザー波長を示す。

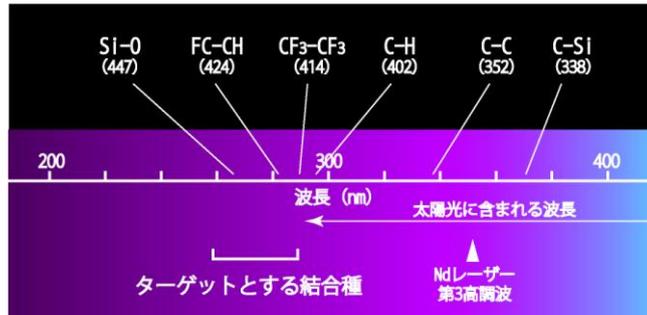


図 1-2 化学結合エネルギーと解離に必要な波長
(結合種の下括弧内は結合エネルギー、kJ/mol)

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。光子エネルギーは波長に反比例するため、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ことが理解できる。

d) 産業用 UV レーザーの現状と取り組み

UV 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、一部のレーザーは未だ産業用として使われている。波長も 200-310nm の間に様々あり、各種結合を切断する十分な光子エネルギーを持っている。しかしながらガスレーザーは極めて効率が悪い上にガスのメンテナンスが必要であるため、高付加価値の半導体製造パッチプロセスなど以外には適用できない。またビームプロファイルが悪いため、集光性が悪く、微細加工には不向きである。一方、固体レーザーの波長変換による UV 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ウム (Nd) イオンを活性種として用いたレーザーの第 3 高調波 (355nm) が最短波長である。図 2 で見るとおり、この波長は有機物を中心とする低エネルギーの結合を解離するには十分だが、フッ素樹脂の主鎖を形成する C-C の切断は不可能である。さらにフッ素樹脂の特性を決定する F-C 結合や、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る。産業用 UV レーザーの現状をまとめると表 1-1 のようになる。ガラスまで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、260nm を境にして加工性能が大きく変わる。

表 1-1 産業用 UV 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	255	◎	◎	◎	?	本件のターゲット

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る高い安定性、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(図 1-3 参照)、すでに kW を超える高出力の加工用にはメインキャストとして導入が進んでいる。その一方、パルス化は遅れており、最近ようやくパルスファイバレーザーが製品化されつつあり、波長変換された可視レーザーもリリースされてきた。研究開発レベルでは紫外のファイバレーザーも発表されている。UV が得られるファイバレーザーとして、すでに我々は低出力ながら

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クライテリアを満たした最先端半導体検査用光源の開発に成功し、国内装置メーカーに出荷している。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、上記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活用できると考える。

ファイバレーザー＝光通信起源のレーザー技術

素子に通信用の厳しい規格をクリアしたものを使用

- ・低損失による長い利得長＝高利得
- ・高効率・良好なビーム品質

導波路による閉じこめ

- ・熱マネジメントの容易さ

発熱部分の表面積・体積比が大きい

- ・励起源としてのLDとの親和性
- ・パワースケーラビリティ
- ・機械的安定性

基本的に機械的可動部分なし

- ・デザインの自由度

従来のレーザー光源とは一線を画す安定性、耐久性の実現 → 産業用として最適

図 1-3 ファイバレーザーの利点

高いスループットの加工を確保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、短波長で発振させることができる。第4高調波における波長ではNd固体レーザーが266nmなのに対し、Ybファイバレーザーは255nm以下が可能である。このわずかな10nmの違いが、特にガラス加工にとっておおきな影響を与えることは前記の通りである。ファイバレーザーをベースとした光源の開発は急激に伸びている(表 1-2)が、第3高調波までをターゲットにしている例が多い。未だ第3高調波でまかなえるアプリケーションが多いことは一因だが、ガラスやフッ素樹脂も加工できる、反応性の高い深紫外光を十分にハンドリングし、光源寿命を確保できないことも挙げられる。

表 1-2 2007-2009年に主要各社からリリースされたファイバベースの短波長レーザー

	Coherent	SP	Nufern	Rofin (Corelase)	Mobius
モデル名	Talisker	Pantera	nuQ	X-LASE	G1+
方式	ファイバ発振器 + 固体アンプ	固体発振器+ ファイバアンプ	オール ファイバ	オール ファイバ	直接変調LD+ ファイバアンプ
出力モード	モード同期	モード同期	Qスイッチ	モード同期	パルスMOPA
平均出力(W)	18 @ 1064nm 8 @ 532nm 4 @ 355nm	12 @ 355nm	20 @ 532nm	24 @ 1064nm	30 @ 1064nm 18 @ 532nm 10 @ 355nm
パルス幅	10~15ps	<50ps	100ns	10~30ps	2~100ns
繰り返し	50~200kHz	80MHz	20~100kHz	1~4MHz	~1MHz
ビーム品質M ²	<1.3	<1.3	1.5	<1.5	<1.3

1.1.2 研究開発の目的・目標と実施内容

a) 研究の目的

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絶対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および周辺に切削くずが残る、加工がしにくい素材であった。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、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、およびその評価が本研究の目的である。

研究の最終目標として、「平均出力 2W 以上、波長 260nm 以下のファイバベースのパルスレーザーをツールとした、ガラス、フッ素樹脂に対する微細加工システムを開発し、その性能を評価して加工サンプルとして結果を得る」とする。なお、今年度の目標は①ファイバレーザーベースでの 20W クラスのパルスレーザーの構築と、②それを用いた波長 260nm 以下の紫外光源の実証、UV 光学系の運用寿命を延ばすための結晶運用環境の開発と実証である。

b) 研究の概要

① パルスファイバレーザーの開発

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。ファイバの非線形性により、本来パルス発生に向かないファイバレーザーを高出力で運用するため、非線形効果を可能な限り抑制する構成とパラメーターを丁寧に探る。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すりあわせを行いながら、目標達成を行う。

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 以下の深紫外光を発生させる。出力・安定度ともに高い UV 光を発生させるため、結晶の選定、集光パラメーターの最適化を行い、場合によってはレーザー側のパルス幅や繰り返しを変化させることによって、適正な動作点を探る。一方、UV 領域で使用される光学素子、結晶は高エネルギーの光子に常にさらされるために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いため、これを抑制してダウンタイムを最短にするための環境開発を行う。

※ 最終的な目標はこれを用いた加工と評価であるが、今回の実施期間においてはオプション項目とする。

c) 実施内容

① パルスファイバレーザーの開発（実施：株式会社メガオプト、日星電気株式会社）

（特定研究開発計画中のサブテーマ「1. 高性能レーザーの開発」における「1-2 微細プロセス用光源の開発」に基づく開発内容）

1-1 パルス発振器

Q スイッチによるものと半導体レーザー直接変調によるもの、モード同期の 3 種類について開発を実施し、繰り返し周波数 100kHz~1MHz、パルス幅 2ns~200ns の範囲にある発振器を開発する。基本的

には固定周波数、固定パルス幅とするが、可能であれば、ある範囲でパラメーターが可変となる設計を考慮する。

1-2 増幅器

上記で得られた低出力パルスを増幅し、平均出力 20W 以上のパルスファイバレーザーを実現する。ここでは製品レベルまでのエンジニアリングではなく、簡易的な筐体に入れて出力と基本的な特性の実証までを行う。

② 波長変換システムの開発（実施：株式会社メガオプト）

（特定研究開発計画中のサブテーマ「1. 高性能レーザーの開発」における「1-2 微細プロセス用光源の開発」に基づく開発内容）

2-1 波長変換による深紫外光発生スキームの開発

上記レーザー光の波長変換により出力 2W 以上、波長 260nm 以下の深紫外光源を実現するための基礎検討として、出力・寿命に関する具体的な数値目標を置かず、項目 1 にて完成したファイバレーザーによる UV 光の発生の実証を行う。

2-2 結晶運用環境の開発

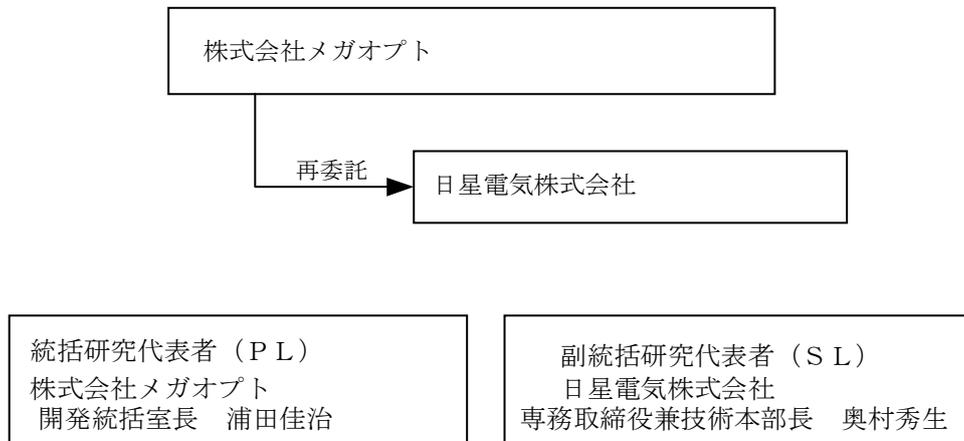
本レーザーが産業用に供されるための、2ヶ月以上連続自動運転が可能な結晶チャンバーおよび自動トラッキングシステムを開発する。本システムはレーザーとは独立してその稼働を確認するまでとする。

③ プロジェクトの管理・運営

- ・ 事業管理者・株式会社メガオプトにおいて、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書を作成する。
- ・ 本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行う。
- ・ 再委託先の日星電気が作成する証憑書類について、指導・確認を行う。

1.2 研究体制

a-1) 研究組織(全体)

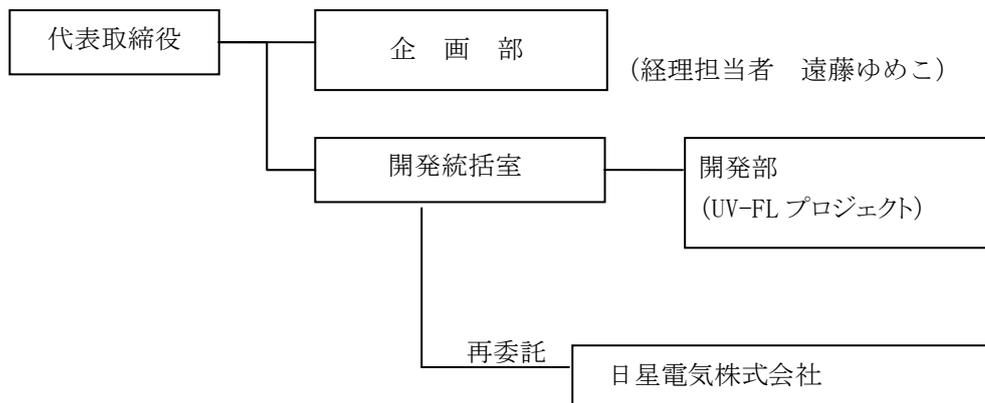


a-2) 管理体制

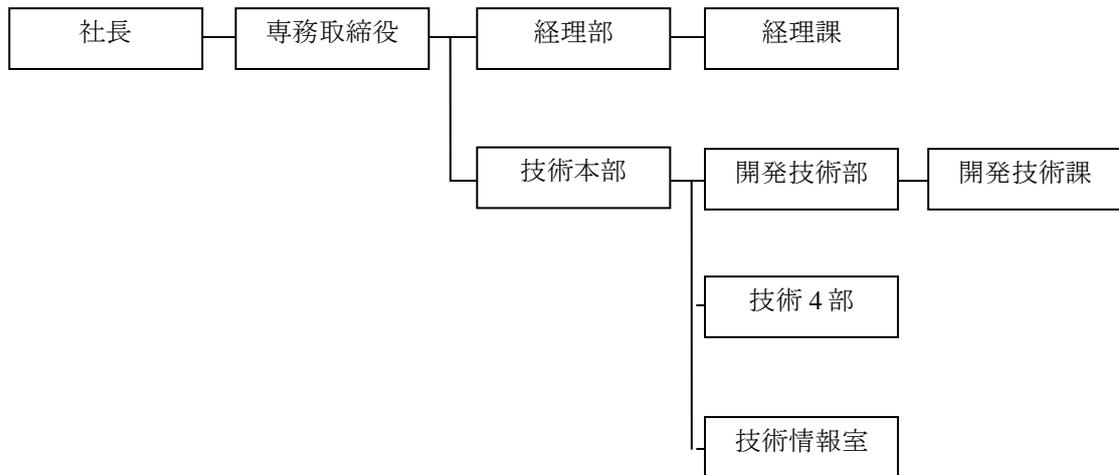
①事業管理者

[株式会社メガオプト]

(業務管理者：企画部 藤丸達彦)



② 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 鈴木 久弘

(業務管理者) 専務取締役 奥村 秀生

1.3 成果概要

① パルスファイバレーザの開発

- ・ 半導体レーザ直接変調した発振器(発振器 1)、および AO を挿入してモード同期と Q スイッチの両方を実現するファイバレーザ(発振器 2)、の 2 種類、3 モードの発振器を開発した。
- ・ 発振器 1 ではパルス幅が 1.2ns 以上で可変、繰り返し周波数は電氣的に最大 1MHz まで可変な発振器を実現した。
- ・ 発振器 2 では AO モード同期によるパルス幅 20ps 程度、繰り返し 10MHz 前後の発振と、AOQ スイッチによるパルス幅 300ns~700ns、繰り返し 1kHz の発振を切り替え可能な発振器を実現した。
- ・ 発振器 1 を用いて、ここからのパルスを増幅することにより、最大平均出力 23.6W のパルスファイバレーザが実現された。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。

② 波長変換システムの開発

- ・ 波長変換により最大平均出力約 0.6W の 266nm 深紫外光源を実現した。
- ・ 実現にあたり、非線形波長変換に関する材料の数値的検討を行った。
- ・ ファイバレーザの部品調達の容易さと、開発に使える時間の関係で、基本波となる波長が 1064nm となったため、結果的にその第 4 高調波である UV 光の波長は 266nm となり目標をクリアできなかった。
- ・ レーザによって発生する紫外線に対してレーザ自体に及ぼされる影響を前もって検討した。また、雰囲気制御可能な結晶チャンバー(パージボックス)を開発した。結晶トラッキングシステムが手動で確実に動作することを検証した。
- ・ 現在までのデータ蓄積では、数値目標として掲げた 2 ヶ月以上の動作を担保することはできなかったが、UV 光に対して対策された雰囲気制御チャンバー、トラッキングシステムの開発が完了した。連続運転時間に関する検証は今後の長時間動作実証から合理的に求められるため、継続的に実施することで達成可能である。

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
浦田佳治
Tel. 048-468-3291, Fax. 048-468-3292
e-mail: yurata@megaopto.co.jp

株式会社メガオプト・企画部
藤丸達彦
Tel. 048-469-3377, Fax. 048-469-3332
e-mail: fujimaru@megaopto.co.jp

2. 開発課題 1：パルスファイバレーザの開発

2.1 光源概要

2.1.1 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アンプ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 5 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。アンプの項にも記すが、特にパルスの増幅器では、パルスとパルスの間に時間があり、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利得のものを複数接続する。1 段あたり 10-15dB の利得を持たせるとすれば、発振器出力が 0.1mW オーダーになることが予想できるので、これからレーザの最終目標出力 20W を前提にすれば、トータル 43dB であるから 3-4 段の増幅器が必要となることがわかる。低出力であるほどファイバ部品の挿入損失が小さく増幅度を高くできる。従ってそれぞれの段からの出力と増幅度としては、表 2-1 の程度となると予想した。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

	出力	増幅度	効率
発振器	0.1mW	-	-
増幅器 1	5mW	17dB	-
増幅器 2	100mW	13dB	-
増幅器 3	2W	13dB	-
増幅器 4	20W	10dB	-
増幅器全増幅度		43dB	
第 2 高調波	10W	-	50%
第 4 高調波	2W	-	20%
波長変換全効率			10%

上記をまとめると、図 2-1 に示すような全体像になる。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、コア励起のアンプが有効である。一方増幅器 3 以降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。前の 2 段と後 2 段は作りが異なるため、以降では前段 2 つをプリアンプ、後段 2 段を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、現在 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
- ・ 入手までのリードタイムの長さ
- ・ 特殊部品であるゆえの耐久性や実績の欠如

を勘案し、ここでは高度な技術の実用化を前提とした本開発の性質から考え、入手が容易で開発期間をより有効に使うことができるため、ファイバレーザの波長を 1060nm とした。当初目標である 1030nm の光への変更について触れると、後述する図 2-12 にあるように、Yb ファイバレーザが発生する利得は 1030nm の方がより高く、従って性能の観点からは 1060nm と比較して劣るものにはならない。1030nm のレーザは本質的に 1060nm のレーザと同等または優れた性質を発揮するものであり、部品調達が容易になる将来的な展望に立てば、本開発の技術がそのまま転用できることが明白である。なお、最終出力は制御された直線偏光である必要があるため、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は偏光保存するタイプが用いられた。

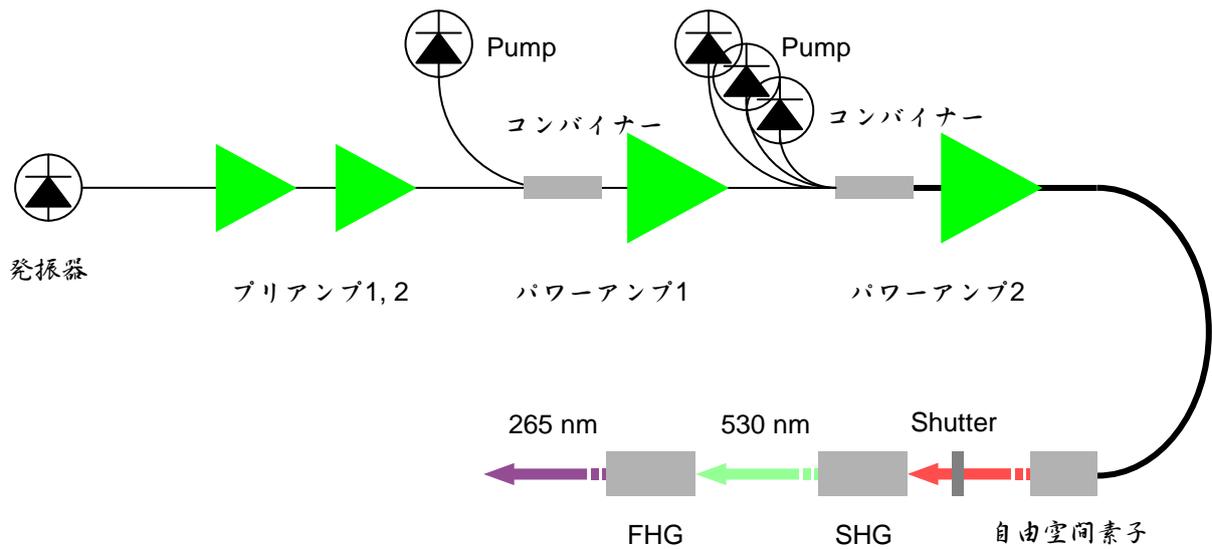


図 2-1 光源概要

2.1.2 仕様・目標性能

光源単体の最終的な目標仕様は以下の通りである。

- ・ 波長 260nm 以下
- ・ 出力 2W

なお、本開発期間中の目標数値は、第 1 章にあるとおり、平均 20W 以上のファイバレーザ出力と、UV 光の発生確認をすることである。

2.2 発振器 1 (ナノ秒発振器)

2.2.1 概要

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、おおまかに分けて、a) 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、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、c) 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。

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 はドライバの立ち上がりからして困難、^{*2} 共振器の利得と共振器長によるが、通常数 10~100 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

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。このためナノ秒発振器としては LD の直接変調による方法を採用した。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。

2.2.2 原理と構成

発振器の原理はパルス電流で駆動された LD による利得スイッチである。ここで使用している LD は電流注入型であり、出力端からの出力は SM ファイバを経て外部へ出力される。SM ファイバの途中にはファイバブラッググレーティング (FBG) が接続されており、半導体の後面とこの FBG により共振器が構成されている。電極から注入される電流によって活性層に利得が発生し、活性層の組成と環境条件、FBG の反射バンドにより決まる波長とスペクトルでレーザ発振が得られる。LD に極めて短いパルス状の電流を流すと、電流がしきい値を超えている時間のみ活性層に利得が生じ、電流のパルス幅にだいたい一致した光パルスを取り出すことが可能である。具体的にはファイバ部にある FBG によって線幅が狭窄化された波長約 1060nm の LD (14 ピンバタフライマウント) に、十分な駆動容量を持つ短パルス発生回路が接続され、LD が駆動された。外部のトリガ発生器から周期的なトリガ信号が短パルス発生回路に入力された。LD 出力は偏波保存 (PM) タイプのファイバで取り出され、出力端は FC/APC コネクタを用いて続くアンプ段に容易に結合できるようにした。

2.2.3 結果

高繰り返しナノ秒パルスが発生できる駆動回路を用いて LD を発光させたところ、図 2-2 (a) のような光パルスが得られた。この図ではこの電源で最小と考えられるパルス幅、1.2ns において、パルス繰り返し

返し周波数を 800kHz に設定したものを図示している。図 2-2 (b)は時間スケールを拡大した図であり、パルス間隔が 1250ns であることから、繰り返し周波数 800kHz を読み取ることができる。パルスは前半のメインピークとそれに続くサブピークからなっていたが、電流パルス幅を変えた場合はメインピークのパルス幅のみが変化し、サブピークはパルス幅、パルス高さともにほとんど変化が見られなかった。サブピークは電源回路のアナログ部分に残留する付帯的なキャパシタンスによるものと考えられる。従って、サブピークの存在は本質的ではなく、より洗練された回路基板を用いることで消滅させることができるはずである。光パルスのメインピークのパルス幅は、駆動回路の電気パルス幅にはほぼ一致していた。一方、パルス幅が 1.2ns を下回ると、ピーク高さが減少した。これは電流パルスの立ち上がり時間が 0.5ns 程度であり、時間遅延を少なくすることにより所定のパルス高さに達する前にパルスの立ち下がりが発生するためと考えられる。従ってこのパルス駆動回路と LD からなる発振器で発生可能なパルス幅は最小 1.2ns である。これ以降の開発はこの最小パルス幅にて行った。

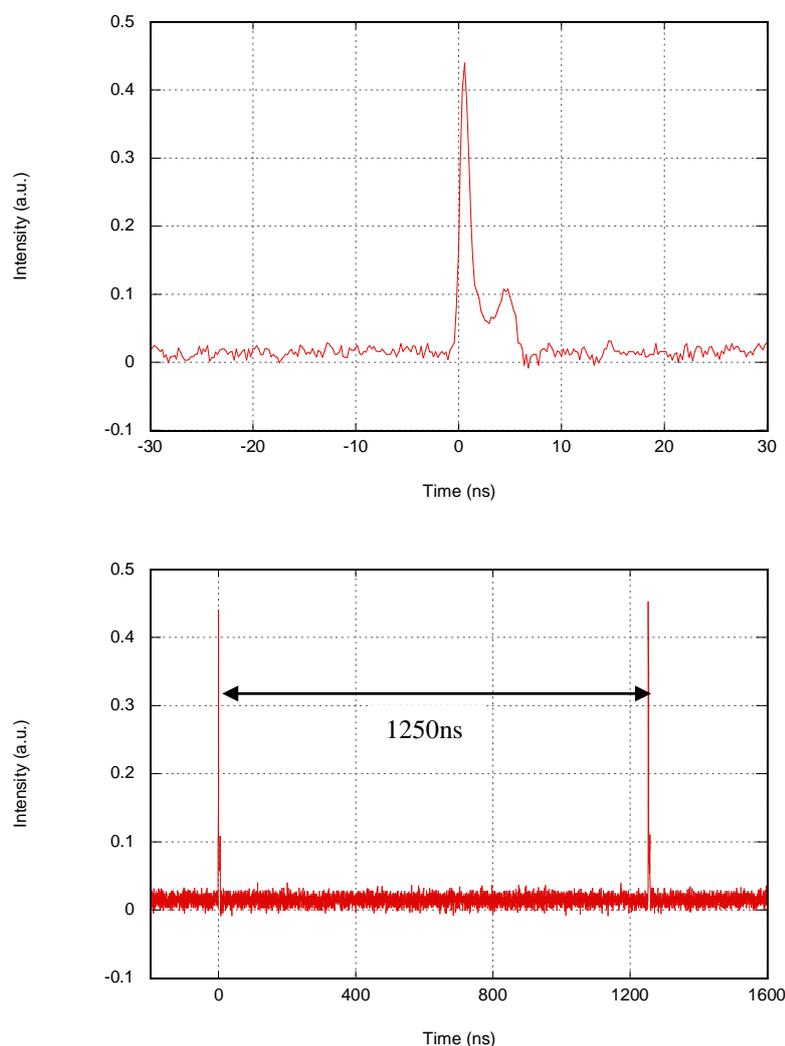


図 2-2 発振器からの光パルス、(a) 波形 (上)、(b) 繰り返しのようす (下)

800kHz 繰り返し、パルス幅 1.2ns の時の発振器出力は 0.16mW であり、パルスあたりのエネルギーは約 0.2nJ であることがわかった。従ってパルスの時間波形としてガウス形状を仮定するとピーク出力は 170mW と計算できる。これは当初の LD の連続波発振出力に対して比較できる程度に十分高い出力であり、LD の特性を活かしつつ、パルス発生がなされていることがわかった。

一方、パルス発振しているときのスペクトルは図 2-3 のようになった。発振の中心波長は 1064.115nm、線幅は半値で約 18pm であった。ここで用いた計測器である光スペクトラムアナライザ (Advantest Q8483) 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った。発振器は LD の温度によってスペクトルのシフト、およびスペクトル形状が若干変化することがわかった。温度約 26°C において一定として、以後の開発を行った。

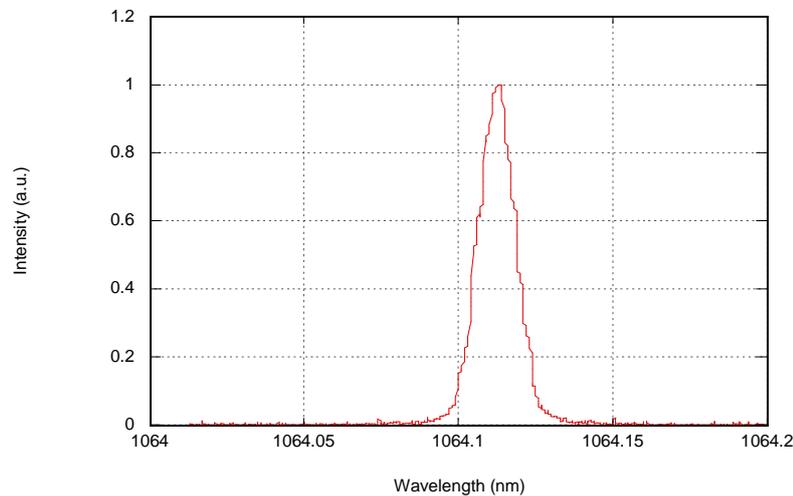


図 2-3 発振器のスペクトル

以上のことから、最短パルス幅 1.2ns、最大ピーク出力 170mW、線幅 20pm 以下の、発振器出力として理想的な結果が得られた。発振器の中心波長は LD の温度だけでなく環境温度に対しても変動するものの、10pm のオーダーであり実用上なんら問題になることはないと思われる。

2.3 発振器 2 (ピコ秒発振器)

2.3.1 概要

ピコ秒クラスのパルス幅を 2.1.1 で示した方法により出力することは、技術的に不可能ではないが必ずしも容易ではない。ピコ秒以下のパルスを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するのが受動モード同期である。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、一昨年度から続く開発において原理実証済みである⁶⁾。この形態では、ファイバレーザの共振器中に AOTF を挿入することで、モード同期を発生させる。基本的にはファブリーペロー型共振器に AOTF を挿入しただけの構成であり、回折光に対して共振器を組むことによりモー

ド同期が発生しピコ秒のパルス列を発生できる。本年度の開発では、これに引き続き以下の内容を実施した。

- ・FBGを出力カプラーとして配置を逆転しインライン導波ができる形態とした。ファイバ端はナノ秒発振器と同様にFC/APCにて接続ができる形にした。
- ・AOTFをQスイッチと見なした動作を行い、ジャイアントパルスの発生を試みた。

2.3.2 構成

下記の方針に基づき共振器の構成を変更した。

- ・励起LDを直接ファイバエンドに接続→WDMカプラーを介してレーザー共振器と結合
- ・全反射FBGと部分反射ミラーからなる共振器→WDMカプラーと利得ファイバの間に置かれた部分反射FBG（PR-FBG）と、共振器の空間部分最終部に配置された全反射ミラーで構成された共振器
- ・出力は部分反射ミラーから空間出力→WDMカプラーの1060nmブランチからの出力をFC/APCコネクタを介して取り出し
- ・AOTFに印加される電気信号のON/OFFをパソコンから制御できるように変更し、AO Qスイッチとしての動作確認が行える状態とした。

なお、これは基礎開発であり、繰り返し周波数を変える必要がないので、組み込みFBGは1種類のみとした。励起LDは波長約975nmで最大出力500mW、WDMカプラーは980nm-pass, 1060nm reflectの3ポートタイプであり、FBGは反射の中心波長1067nm、バンド幅0.64nm、最大反射率約75%のものであった。利得ファイバはシングルモードで長さ5m、AOTFはバンド幅約3nm、回折効率95%のものを使用した。全反射ミラーは反射率99.9%を1064nmで保証したものである。

2.3.3 結果

AOTFに連続のRF信号をかけ、AOTFによる回折光に対して共振器を構成することによりモード同期動作が確認できた。このときRF周波数はPR-FBGの波長における回折が発生するように調整した。またRF信号出力はその波長において最大出力が得られる（つまり最大回折効率が得られる）出力とした。図2-4 (a)にモード同期時のパルス列を示す。パルス間隔は正確に68nsであった。レーザーの共振器長はファイバ部（PR-FBG～コリメータ部）約6920mm、空間部約170mmであり、ファイバの屈折率1.45として計算すると、この共振器長を反映したパルス間隔でパルスが発生していることがわかった。発生しているパルスについてそのパルス幅を、オートコリレーターで計測したところ図2-4 (b)のようになった。測定器の最大パルス幅が50psであることと、信号そのもののSN比が若干悪かったために、ピークの表示が必ずしも明確ではないが、表示上では22.46psのパルスが発生していることを確認した。

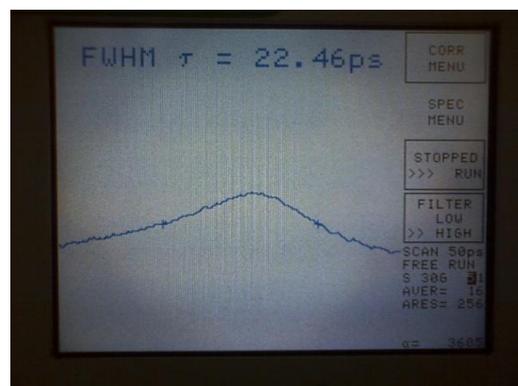
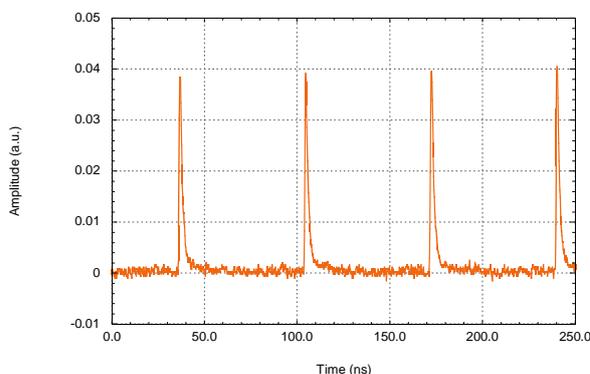


図 2-4 (a)モード同期で発生したパルス列：左、(b)測定したパルス幅：右

一方、AOTFの回折光に対して共振器を組んだ状態で断続的なRF信号をかけることによりQスイッチ動作を確認した。RF周波数およびRF信号出力はモード同期時と同様の設定とした。RF信号のON/OFFは外部トリガーからのTTL信号に同期させたが、RF信号発生器の性能の制限によりトリガーのON/OFF周波数は1kHzに設定した。

図2-5に断続的なRF信号の印加によって発生したパルスを示す。パルス幅は300nsと長いが、典型的なジャイアントパルスの形状であり、Qスイッチ発振が達成されていることを示す。

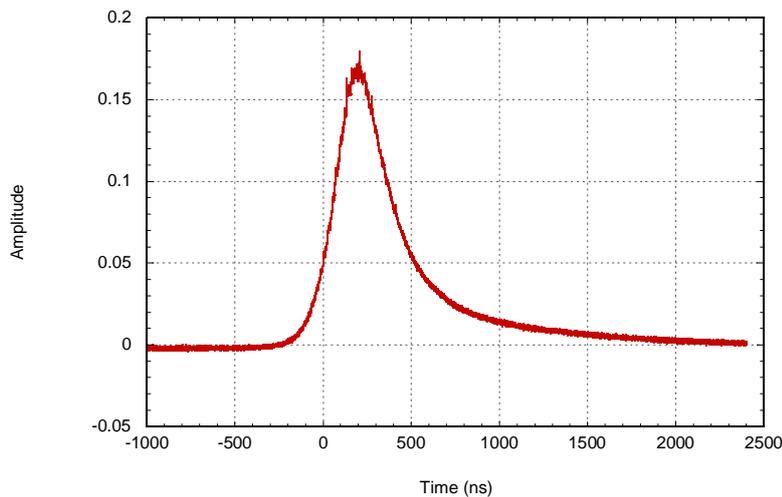


図2-5 AOTFのON/OFF動作で発生したQスイッチパルス

FBGとミラーの反射率を入れ替え、パルス幅約22.5ps、繰り返し周波数約14.7MHzのパルス列を平均出力8mWで安定に出力することができた。また、RF信号のON/OFFにより共振器のQ値を変更し、Qスイッチ動作が行えることを確認した。Qスイッチの周波数1kHzでの動作時、平均出力は5mW、パルス幅約300nsであり、パルスエネルギー4uJ、ピークパワー13Wのパルスが発生できることがわかった。励起パワーを低くすることにより、平均出力が低下するがそれとともにパルス幅の広がりも観察された。例えば平均出力2mWにおいて、パルス幅は700nsとなった。ファイバレーザは高利得であり、飽和増幅が行われる範囲内では、発振器からの出力が増幅後の平均出力に与える影響が極めて小さいことを考えると、このQスイッチ発振器もまたパルス幅可変型発振器として用いることができる。ただし励起パワーを極端に低くすることでパルス出力の安定性が欠落するため、このセットアップにおける最大パルス幅は700nsであった。

出力はファイバを導波させることができ、FC/APCコネクタを介して容易にプリアンプに導入することが可能である。ただしプリアンプとの結合実験は、この期間では実施しなかった（飽和不足によるプリアンプ損傷を回避するため）。しかしながら発振器を複数用意することにより、様々なパラメータを持った出力パルスを発生できる。発振器の特性だけを変えることにより、全体の特性を大きく変えられる、というMOPAの持つ特徴を有効に引き出すことができるため、次年度以降、特に加工試験を行う際に最適なパラメータを探るための手段として極めて実効性が高い。

2.4 プリアンプ

2.4.1 概要

パルスの増幅器は連続波と異なり、パルスとパルスの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出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することにした。

2.4.2 原理と構成

ファイバ増幅器は従来のレーザーと同様に、基本的にはレーザー活性材料（利得）とそれを励起する励起源のみから構成される。ファイバプリアンプでは前者にSM-Ybドープファイバを、後者にSM-LDを利用する（図2-6）。レーザー活性材料であるYbドープファイバをその吸収スペクトルに一致したSM-LDで励起し、そこに利得波長に一致する信号光を通すことにより励起されたエネルギーの一部が誘導放出により信号光と同じ位相で放出されることにより増幅がおこる特性を利用するものである。図2-12に典型的なYbドープファイバの吸収と発光波長を記した。

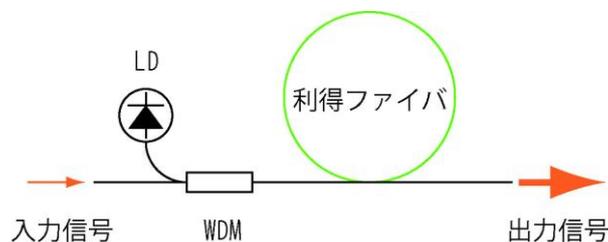


図 2-6 プリアンプの基本構成

2段構成のうち、1段目で5mW、2段目で約100mWの出力が得られるように検討した。各段は実際には基本構成に加え、不意のASEやアンプ段でのレーザー発振により上流にある光学素子が破損しないような対策がなされた。プリアンプ出力は基本的にベアファイバ出力を積分球で取得した。スペクトルはコネクタ経由で光スペクトルアナライザ（OSA）にて取得した。また時間波形は高速フォトダイオードを使用して、2.5GHzのオシロスコープで観察した。

2.4.3 結果

プリアンプ手前で測定した発振器出力は69uWであった。図2-7にプリ1段目の励起パワーに対する出力を示す。線形に増加し、飽和などの特性は観察されなかった。最大出力は3.2mWであり、このアンプでの実効増幅度（光学素子損失を含めた増幅度）は16.7dBであった。特にパルスの時間波形に影響は見られなかった。

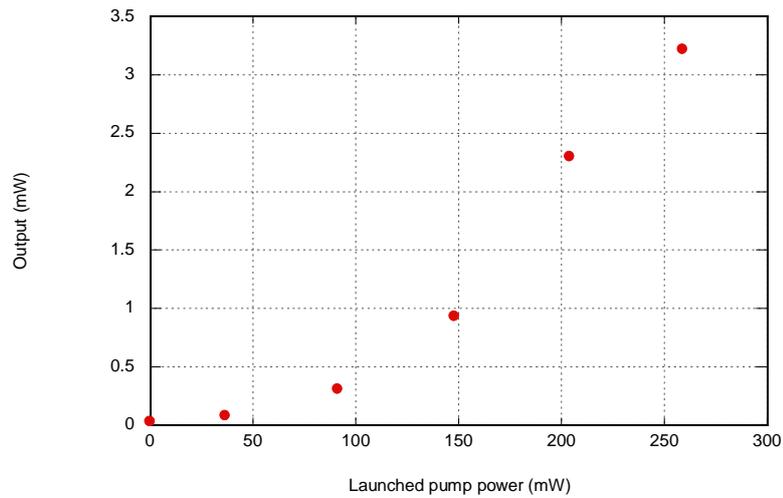


図 2-7 プリアンプ 1 段目の入出力特性

図 2-8 にプリ後段の励起パワーに対する出力を示す。出力は線形に増加して、飽和は見られなかった。最大出力は 2 段目の利得ファイバ直後の測定で 132mW と、想定を上回るパワーが確保できた。実効的な増幅率は 12.2dB となった。図 2-9 に最大出力時のスペクトルを示す。スペクトルについては発振器と比較して若干広がった (18pm→19pm) ようにも見えるものの依然 OSA の分解能の限界以下であり、データとしての信憑性には欠ける。いずれにしてもこの段階でのわずかなブロードニングは本質的には影響がない。

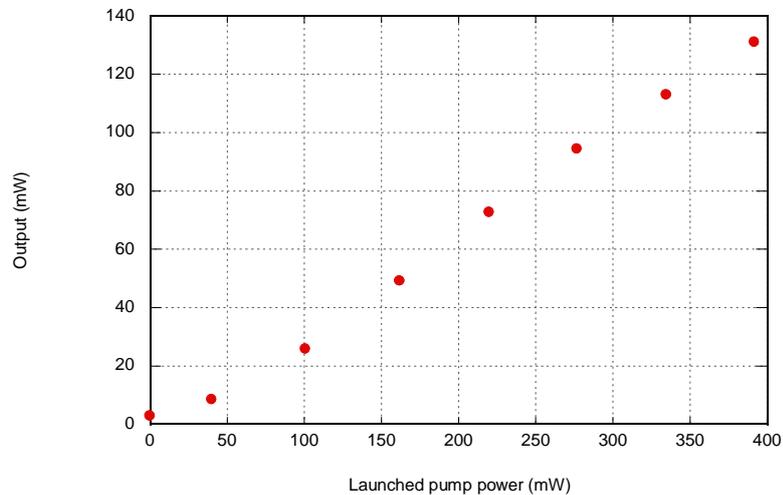


図 2-8 プリアンプ 2 段目の入出力特性

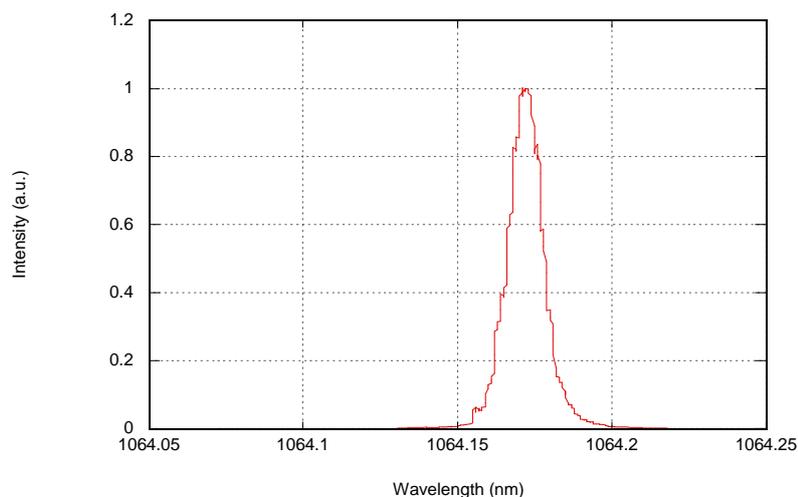


図 2-9 プリアンプ出力スペクトル

ビームプロファイルについては厳密なシングルモードファイバであることから測定しなかった。プリアンプによって増幅されたパルス波形を図 2-10 に示す。発振器のパルス波形と比較するとわずかに 1 つめのパルス高が増加し 2 つめのパルスよりも増幅度が高いことがわかった。一般的にアンプ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、アンプ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。13dB 程度の低利得設定とすることで、システムの安定性が確保されたと考えてよい。

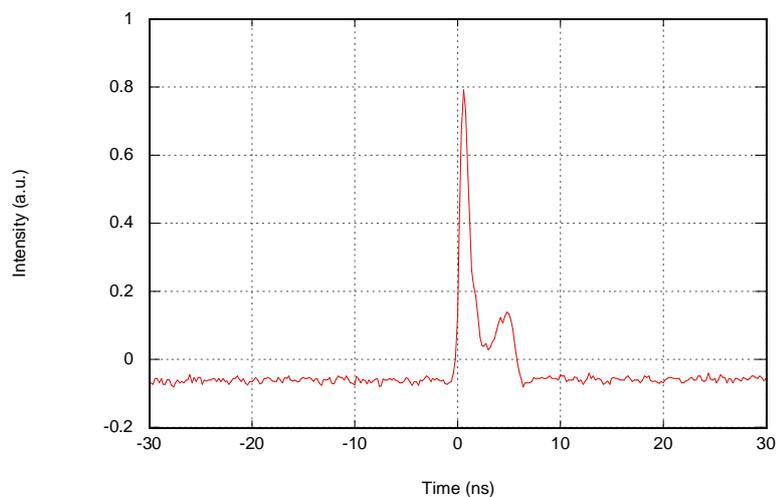


図 2-10 プリアンプ出力のパルス波形

2.5 パワーアンプ

2.5.1 概要と原理

基本的には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。第 2 章冒頭で議論した利得の議論からパワーアンプも 2 段構成とした。しかし、それぞれの段で得るべきパワーは 2W、20W であるため、シングルモードファイバでは非線形光学効果が強く表れる懸念があった。スペクトル幅を抑制するためには、ファイバ中のパルス光強度を抑制（誘導ラマン散乱、誘導ブリュアン散乱）し、また光強度の変化率を抑制（自己位相変調）しなければならない。しかし、例えばこのアンプ前段で求められる平均パワー2W に対し、パルス幅 2ns、繰り返し周波数 500kHz を仮定するとピークパワーは 2kW にも達する。少なくともパワーアンプ 2 段目では非線形光学効果が抑制できるように、コア径が大きい、いわゆるラージモード径ファイバ（LMA）を使用する必要がある。一方で増幅後の出力が 1W を超える必要があるため、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非効率である。SM-LD はその出力が高々1W 弱であるからである。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。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。

2.5.2 構成

基本構成を図 2-11 に示す。プリアンプ出力はまずポンプコンバイナー1 に導入された。コンバイナーには MM ファイバ結合 LD が 2 個接続された。以上がパワーアンプ 1 段目の構成となる。出力ファイバは次に 2 段目のポンプコンバイナー2 に接続された。ポンプコンバイナー2 は入力、出力ともに 25 ミクロンコアの DC-LMA であった。この後ろに 30 ミクロンコアの Yb ドープ DC-LMA ファイバを利得ファイバとして接続した。出力端面は偏光を調整できるようなファイバ固定治具に固定された。出力を観察するためにファイバ端近傍には非球面のコリメートレンズを配置して、平行光が出力されるように調整した。出力は空間用のパワーメーターで測定した。またビームプロファイルは CCD カメラ式のビームプロファイラで取得した。スペクトルはコネクタ経由で OSA にて取得した。また時間波形は高速フォトダイオードを使用して、2.5GHz のオシロスコープで観察した。

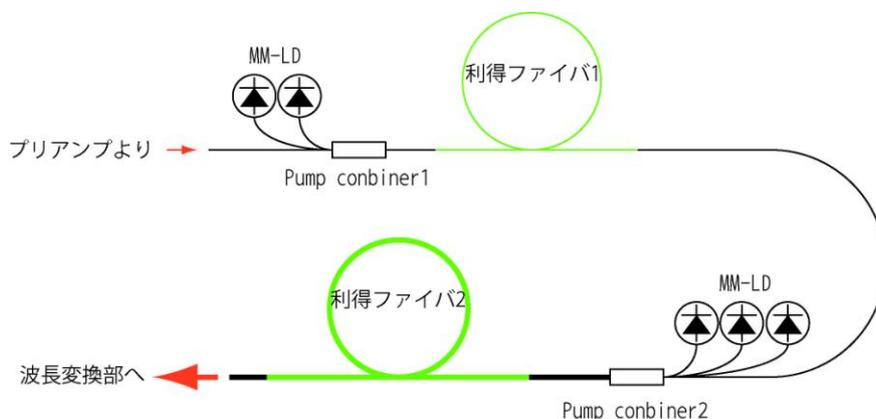


図 2-11 パワーアンプ構成

2.5.3 結果

a) 1 段目

コンバイナーと利得ファイバの融着を行う際、通常の SM ファイバと異なるのは内部クラッドに励起光が閉じこめられ伝搬する必要があるということである。DC ファイバはファイバ最外部の樹脂コーティングを外部クラッドとして構成されるため、融着後のリコーティングが必須となる。樹脂として使用できるのは、内部クラッドの屈折率よりも若干低い屈折率を持った樹脂ということになるので、一般に低屈折率を持つ樹脂でコーティングされる。ここでは国内で入手できる、優れた光透過性を示す低屈折率ポリマーを用い、溝を切ったアルミ治具を使用してリコーティングした。リコートされた部分は赤外線ビューワーにて観察し、過度に励起光が漏れないことを確認した。

コンバイナー1 の励起入力 2 本に、それぞれ 9W の MM ファイバ結合 LD モジュールを接続した。図 2-12 にパワーアンプ 1 段目の増幅出力を示す。入力約 100mW に対して最大約 1.35W の出力が得られた。このステージにおける利得は従って 11.3dB であり、当初予定をやや下回る結果となった。

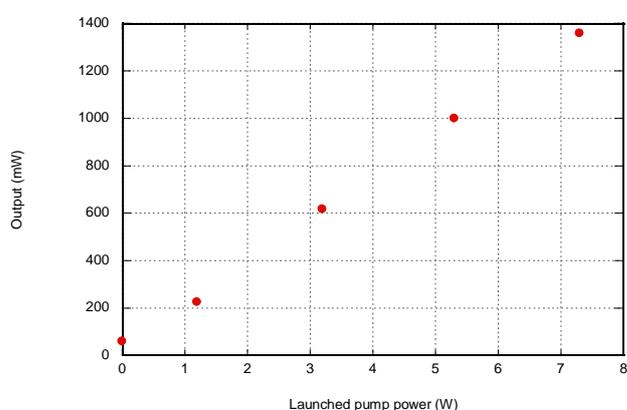


図 2-12 パワーアンプ 1 段目の入出力特性

図 2-13 にパワーアンプ 1 段目出力を 1.35W としたときの出力端のスペクトルを示す。メインスペクトルに関して、スペクトル幅の半値 20pm 程度でありプリアンプ出力と大きく変化していない。しかしながら周辺部分には明らかな持ち上がりが観察された。このグラフの領域内だけで見ても全体的にバックグラウンドが発生していることが確認できた。これは高いピークパワーによってファイバ中で発生した非線形光学効果の結果と考えられる。しかしピークの 1/10 の位置における線幅が 100pm であり、波長変換における許容度に比べると十分小さいと判断された。

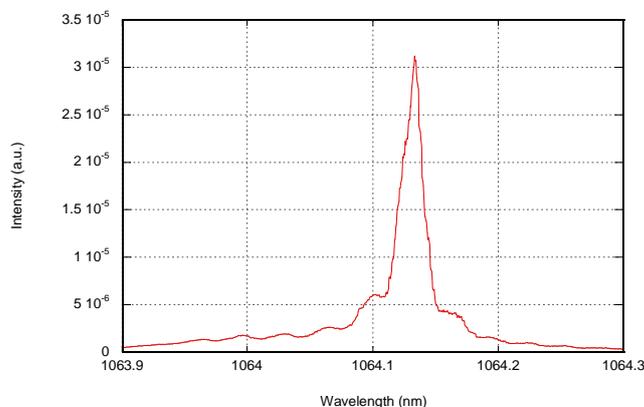


図 2-13 パワーアンプ 1 段目のスペクトル

b) 2 段目

パワーアンプ 1 段目の出力ファイバはコンバイナー2に接続し、さらに 30 μ m コアの LMA-DC の Yb ドープファイバに融着した。この時、信号光の透過効率にはコンバイナー2の直後で約 50%、利得ファイバ後の出力では約 26%であった。コンバイナー2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 MM ファイバ結合 LD モジュールを接続した。図 2-14 にパワーアンプ 2 段目の増幅出力を示す。入力約 1.3W に対して最大約 25.7W の出力がファイバ端出力の全出力を計測することによって得られた。しかしながらこの出力には信号光以外に、利得ファイバにて吸収されなかった残留励起光がある割合で残っていることが考えられた。2 色性ミラーと、アイリスによる拡がり角の違いで分離する方法を組み合わせ信号光のパワーを正確に計測した結果、信号光のパワーは約 23.6W であった。このステージにおける利得は従って約 18dB であり、目標値を上回る結果が得られることがわかった。これによりファイバアンプトータルで 43dB 以上の目標値を上回った。また、ファイバシステム全体でも当初目標である 20W を上回るパワーを達成した。

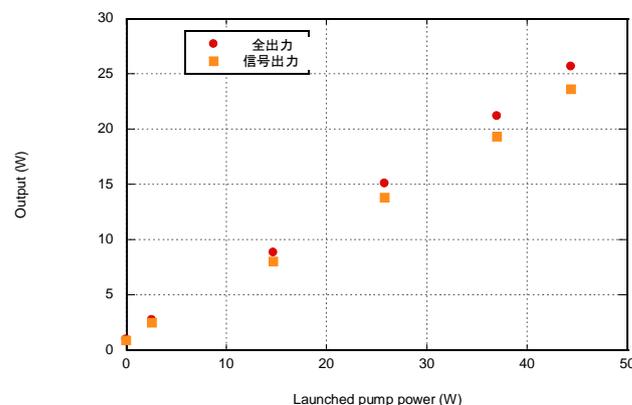


図 2-14 パワーアンプ 2 段目入出力 (赤ドットは全出力=信号光+残留励起光、黄色ドットは信号光成分のみ)

パワーアンプ 1 段目と同様にスペクトルを確認した。まず、励起パワーを変えたときの信号近傍のスペクトル変化を図 2-15 (a) に示す。励起する LD の電流値が増加するのに対し、信号のメインピークの形状に大きな変化がないものの、励起電流 5A を境にして、ピークの周辺にある小さい波状のスペクトルのベースが大幅に増加することが読み取れる。図 2-15 (b) はこの結果から読み取れるメインピークの線幅 (半値幅) の励起電流に対する変化である。数値は OSA の測定機能を利用して読み取ったものであり、ほとんど装置誤差の範囲でしか変化しないことが読み取れた。一般に SPM の効果は中心線幅そのものの増加を招くものであり、このベース (またはペDESTAL) の持ち上がりはそれとはややことなる挙動である。波状のスペクトルは発振器 LD のサイドモードが 4 波混合過程により増幅され、副次的なピークを生んだ結果と考えた。最大出力におけるファイバレーザのビームプロファイルを図 2-16 に示す。使用した CCD カメラの「ヤケ」による干渉縞が認められるが、ビームプロファイルは縦横比 1.1:1 程度、ニアガウシアン形状であり良好であった。この形状はファイバの巻きによって若干変化するものの、固定された条件下での動作の場合、固定されているファイバから出力されるプロファイルは安定であった。

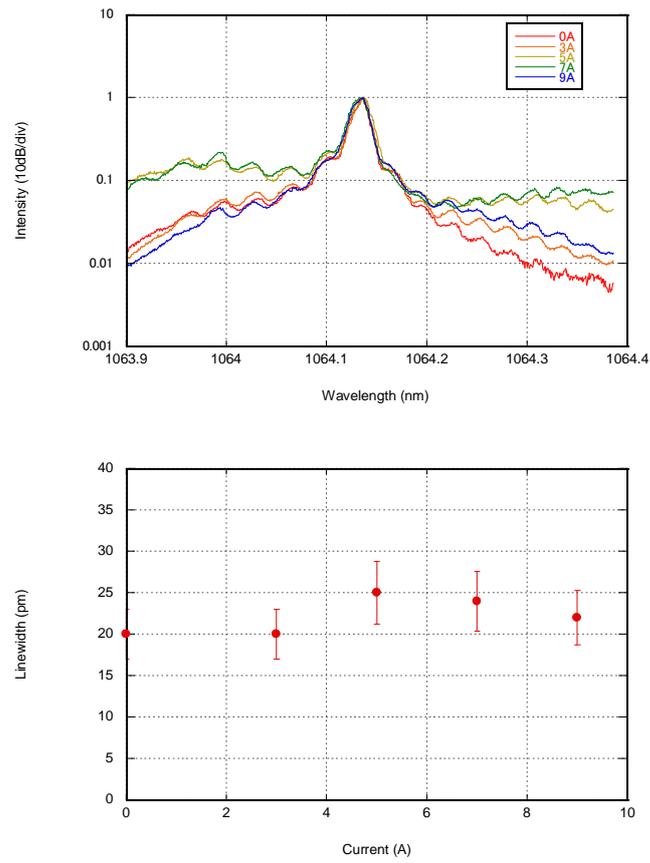


図 2-15 (a)パワーアンプ 2 段目の出力スペクトル：上、(b)線幅の変化：下

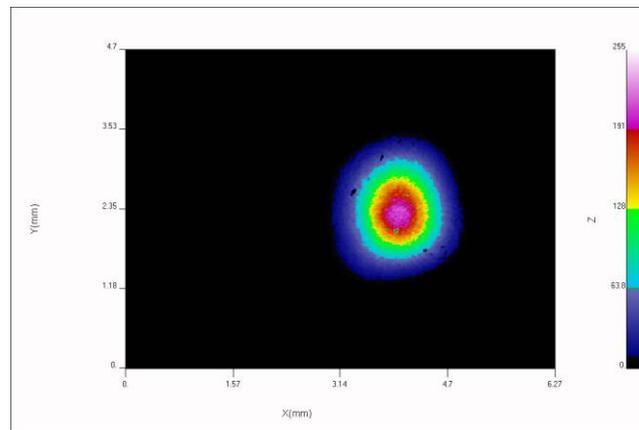


図 2-16 パワーアンプ 2 段目の最大出力におけるビームプロファイル

3. 開発課題 2：波長変換システムの開発

3.1 概要

もう一方の開発課題は高効率で UV 光を出力する波長変換システムを作ることであった。基本波はファイバで組み上げるが、波長変換は自由空間におけるバルクの非線形光学結晶内部における高調波発生を 2 段階組み合わせて行う。従って、

- ・ ファイバレーザー出力を空間に結合し、適正なプロファイルのビームを得る
- ・ 適宜 ON/OFF の制御が行えるような系を設置
- ・ 効率的な非線形波長変換を行うように選定された材料と光学パラメーターで変換部分を設置
- ・ 長期的な運用を前提とした対策を必要に応じて行う

を指針として設計・開発を実施した。

3.2 結晶の選択

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。表 3-1 にまず 1060nm の基本波から第 2 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を列挙した。いずれもパブリックドメインソフトウェアである SNLO を用いて計算させた結果である。表の左からカラム 1 は結晶の略号である。カラム 2 は位相整合のタイプである。o は常光、e は異常光を示す。左から基本波 1、基本波 2、高調波の偏光であるので、例えば ooe とあれば常光の基本波から異常光の高調波を得る type1 位相整合となる。カラム 3~5 はビームの結晶内部でのウォークオフ角度、カラム 6 が実効非線形定数、カラム 7 はフィールドゲイン係数の分母にある成分の 2 乗である。カラム 8~13 は結晶角度、結晶温度、ビーム入射角度、ビームの線幅などに関する各種許容度を示している。この表にある条件以外にも、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。KN (KNbO_3) はこの表で最大の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 (KTiOPO_4) は 3 種類あり、成長法によってわずかに異なる性能を列記してあるが、いずれも良好な特性を示すとされている。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、長期的に安定な動作を見込みにくい。BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$) 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 (LiBO_3) 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。リスト下部の材料はいずれも強い潮解性があり使いにくい。以上の検討により 530nm 発生には LBO を適用することとした。

表 3-1 1060nm→530nm 変換用非線形光学結晶の特性リスト

crystal	Type	signal walkoff (mrad)	idler walkoff (mrad)	signal walkoff (mrad)	d _{eff} (p m/V)	SoL2 (W)	Crys. Ang. Tol. (mrad cm)	Temp. Range (K cm)	Signal Accpt. Ang. (mrad cm)	Signal Accpt. BW. (cm ⁻¹ cm)	Idler Accpt. Ang. (mrad cm)	Idler Accpt. BW. (cm ⁻¹ cm)
KN	ooe	0	0	52.02	-9.54	4800000	0.54	0.68	0.9	5.12	0.9	5.21
KTP_F	ooe	3.34	0	4.38	3.54	1.75E+07	10.81	25.97	58.5	7.78	13.26	28.35
KTP_H	ooe	3.62	0	5.09	3.48	1.79E+07	8.94	27.16	41.4	7.69	11.4	27.36
KTP_K	ooe	3.86	0	5.42	3.4	1.87E+07	8.42	2.15	39.24	7.38	10.72	26.24
BBO	ooe	0	0	55.86	2.01	4.24E+07	0.58	40.51	1.15	38.81	1.15	38.81
KTP_K	oeo	0	31.64	0	-1.81	6.54E+07	1.85	3.47		7.96	1.85	30.07
KTP_F	oeo	0	30.71	0	-1.81	6.54E+07	1.9	351.81		8.27	1.9	31.54
KTP_H	oeo	0	31.98	0	-1.8	6.63E+07	1.83	281.89		8.36	1.83	31.87
BBO	oeo	67.82	0	69.59	1.4	8.42E+07	0.9	42.49	37.07	23.58	0.92	192.71
LBO	ooe	0	0	6.38	8.35E-01	2.25E+08	5.19	6.65	10.38	75.48	10.38	75.48
LBO	oeo	0	6.75	0	-6.19E-01	3.90E+08	9.92	6.74		36.88	9.92	241.56
ADP	ooe	20.29	0	23.96	4.34E-01	6.68E+08	2.56	2.76	19.62	43.15	2.95	47.56
ADP	ooe	0	0	29.8	3.82E-01	8.87E+08	1.18	2.46	2.37	265.2	2.37	265.2
DKDP	ooe	22.37	0	24.79	3.38E-01	1.08E+09	2.62	33.74	29.87	42.42	2.87	188.17
KDP	ooe	19.92	0	24.33	3.34E-01	1.10E+09	2.48	13.24	16.42	44.86	2.93	57.81
KDP	ooe	0	0	27.87	2.65E-01	1.80E+09	1.28	11.29	2.55	418.86	2.55	418.86
DKDP	ooe	0	0	25.25	2.22E-01	2.57E+09	1.41	38.56	2.82	132.17	2.82	132.17

一方、265nm 発生に関しても同様の検討を行った。表 3-2 に 265nm 発生用の主要な結晶を列挙した。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。ここで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 2 候補とした。

表 3-2 530nm→265nm 変換用非線形光学結晶の特性リスト

crystal	Type	signal walkoff (mrad)	idler walkoff (mrad)	signal walkoff (mrad)	d _{eff} (p m/V)	SoL2 (W)	Crys. Ang. Tol. (mrad cm)	Temp. Range (K cm)	Signal Accpt. Ang. (mrad cm)	Signal Accpt. BW. (cm ⁻¹ cm)	Idler Accpt. Ang. (mrad cm)	Idler Accpt. BW. (cm ⁻¹ cm)
BBO	ooe	0	0	85.21	1.75	1.45E+07	0.19	5.99	0.37	5.78	0.37	5.78
CLBO	ooe	0	0	32.73	7.89E-01	5.12E+07	0.54	6.76	1.08	10.1	1.08	10.1
LFM	ooe	0	0	133.6	7.53E-01	5.46E+07	0.15		0.27	6.51	0.27	6.51
ADP	ooe	0	0	4.24	6.79E-01	7.33E+07	4.1	0.5	8.21	10.04	8.21	10.04
DADP	ooe	0	0	10.91	6.17E-01	8.76E+07	1.6		3.2	11.03	3.2	11.03
LFM	oeo	81.9	0	99.89	-4.78E-01	1.33E+08	0.3		2.08	5.12	0.35	13.09
KDP	ooe	0	0	13.23	4.65E-01	1.52E+08	1.33	2.52	2.66	11.37	2.66	11.37
KBBF	ooe	0	0	62.18	4.13E-01	1.82E+08	0.29		0.58	14.86	0.58	14.86
DLAP	ooe	0	0	46.77	-4.52E-01	1.85E+08	0.36	0.78	0.72	7	0.72	7
KABO	ooe	0	0	49.78	2.75E-01	4.74E+08	0.34	4.73	0.69	8.02	0.69	8.02
KBBF	ooe	54.43	0	58.55	1.48E-01	1.32E+09	0.57		9.07	10.65	0.61	32.85
LB4	ooe	0	0	28.81	1.30E-01	2.35E+09	0.57		1.14	8.99	1.14	8.99
BBO	ooe	19.19	0	22.18	3.90E-02	2.63E+10	1.27	7.39	11.39	4.75	1.43	12.51
KBO	oeo	35.58	35.59	0	2.50E-02	4.74E+10	0.51		1.02	10.72	1.02	10.72

3.3 構成とビーム伝搬

ファイバレーザ以降の構成を図 3-1 に示す。ファイバレーザで得られた 1060nm 光はアングルクリーブされたエンドキャップから空間に結合され、非球面レンズでコリメートされる。さらに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 2 高調波発生 (SHG) 結晶に基本波を集光し、変換された 530nm 光はコリメートされる。2 色性ミラーにより基本波を除外された 530nm 光は第 4 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。FHG 結晶とその周辺は損傷防止の目的でガスパーズ環境に配置された。

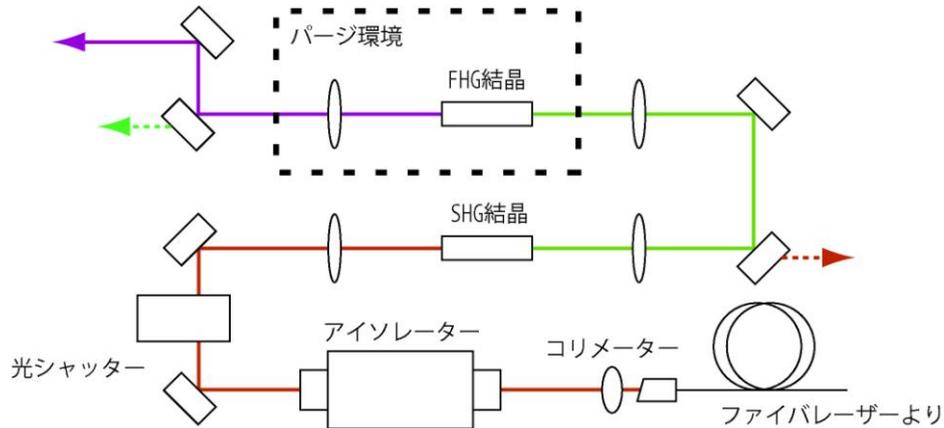


図 3-1 自由空間部分の取り回しと波長変換部分の構成

3.4 第 2 高調波発生

アイソレーターの透過後の出力は最大 23.1W であり、したがってこのとき透過率は約 98% であった。光学素子の安定性を考慮し、以後の実験における最大出力を約 14W に制限した。透過したビームは平凸レンズで LBO 結晶に入射した。LBO 結晶はアパーチャサイズ 3x3mm で長さ 12mm、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約 150°C に保たれた。出力されたビームは残留した 1064nm 光と変換された 532nm 光を両方含むので、532nm 反射、1064nm 透過のミラーで 532nm 光だけを取り出して出力を測定した。図 3-2 に励起 LD 電流に対する 1064nm 光出力、532nm 光出力および変換効率を示す。この条件下では 532nm 光出力は 1064nm の入力に対してほとんど線形に反応した。最大出力は 1064nm 光の最大入力 14W 時に約 4.6W となり、変換効率は 33% が達成された。

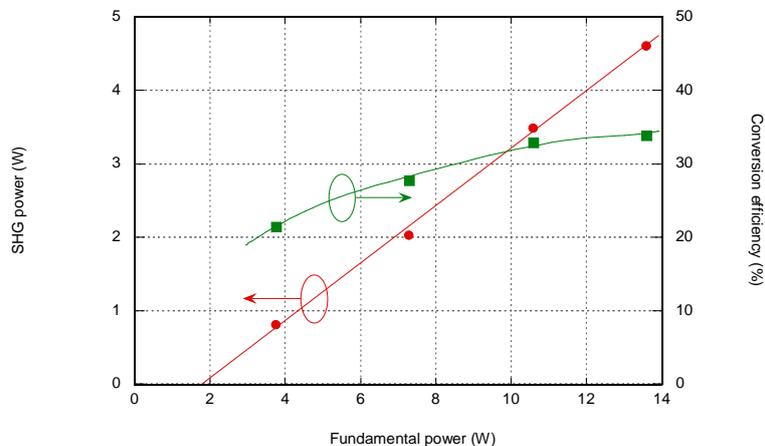


図 3-2 SHG によって得られた 532nm 光出力と変換効率

波長変換効率はこのピーク出力を持つレーザーとしては必ずしも高くないが、その原因として増幅後のスペクトル拡がりと考えられる。

3.5 第4高調波発生

3.4項で得られた532nm光を再度平凸レンズでCLBOに集光した。CLBOはアパーチャサイズ5x5mm、長さ10mmのサイズでtype1の角度位相整合、カット角 $\phi=47$ 度を用いた。結晶は銅のマウントに搭載され、温度調節状態で保持された。位相整合の最適化は角度で粗く行い、最終的に結晶温度を振ることによって微調整を行った。得られた波長266nmのUV光は532nmの混入を防ぐために266nm光のみ反射するミラーによってハンドリングされ、出力の測定を行った。図3-4に532nm光入力に対する266nm光出力とその変換効率を示す。

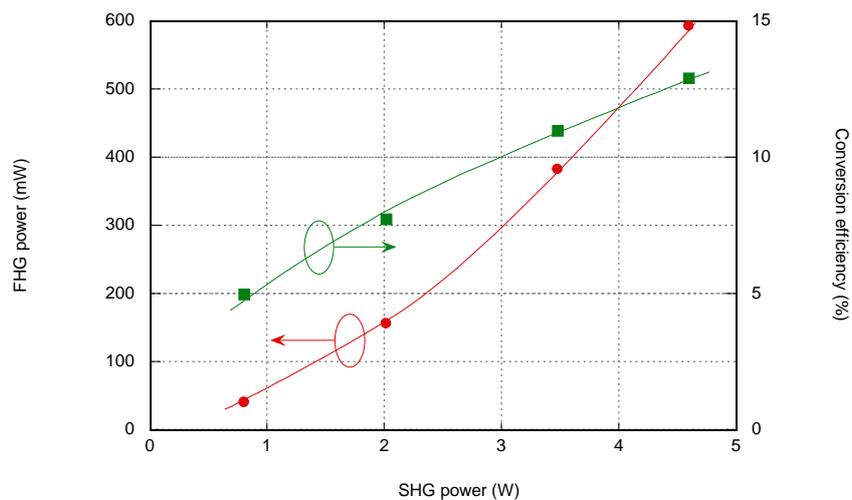


図3-4 FHGによって得られた266nm光出力と、532nm光に対する変換効率

この条件下では266nm光出力は532nmの入力に対して正の相関をもって増加した。最大出力は532nm光の最大入力約4.6W時に約590mWとなり、変換効率は約13%となった。FHGについてもSHGと同様、変換効率はもくろみよりもやや低かったが、集光条件の追い込みによってこれの2倍程度の変換効率を目指すことができると考えている。

以上により、約14Wのファイバレーザー出力から約4.6WのSHGと約0.6WのFHGによるUV光を発生させる波長変換システムの構築ができた。今後、波長変換効率を増加させるための指針として、次のような対策を行う予定である。

- ・ 発振器の条件を詰めることや、プリアンプにおける狭帯域のバンドパスフィルタを挿入することにより、スペクトルのより詳細な制御を行い、信号スペクトルの狭窄化を行う
- ・ ファイバレーザー出力後の素子の再検討で、20W以上のフルパワーでの動作を可能にする
- ・ SHG、FHGステージの集光条件を再調整

4. 全体総括

ここでは第1章にも述べた、「当初目標」と第2章～第3章で述べた開発の「実績」との対比によって、本開発における達成度を客観的に検証し、最後に全体を俯瞰してまとめることにする。

4.1 目標・実績の比較による達成度検証

① パルスファイバレーザの開発

目標	実績と自己評価
1-1 パルス発振器	
Qスイッチによるものと半導体レーザ直接変調によるもの、モード同期の3種類について開発を実施し、繰り返し周波数 100kHz～1MHz、パルス幅 2ns～200ns の範囲にある発振器を開発する。基本的には固定周波数、固定パルス幅とするが、可能であれば、ある範囲でパラメーターが可変となる設計を考慮する。	<p>■実績</p> <p>①半導体レーザ直接変調した発振器、②AO を挿入してモード同期と Q スwitchの両方を実現するファイバレーザ、の2種類、3モードの発振器を開発した。</p> <p>①ではパルス幅が 1.2ns 以上で可変、繰り返し周波数は電氣的に最大 1MHz まで可変な発振器を実現した。</p> <p>②では AO モード同期によるパルス幅 20ps 程度、繰り返し 10MHz 前後の発振と、AOQ スwitchによるパルス幅 300ns、繰り返し 1kHz の発振を切り替え可能な発振器を実現した。</p> <p>■評価</p> <p>2種類の発振器を開発し、いずれもパルス幅、繰り返し周波数などのパラメーターが可変となる設計が反映されており、目標は完全に達成された。</p>
1-2 増幅器	
上記で得られた低出力パルスを増幅し、平均出力 20W 以上のパルスファイバレーザを実現する。ここでは製品レベルまでのエンジニアリングではなく、簡易的な筐体に入れて出力と基本的な特性の実証までを行う。	<p>■実績</p> <p>上記①の発振器を用いて、最大平均出力 23.6W のパルスファイバレーザが実現された。</p> <p>■評価</p> <p>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。</p>

② 波長変換システムの開発

目標	実績と自己評価
2-1 波長変換による深紫外光発生スキームの開発	
上記レーザ光の波長変換により出力 2W 以上、波長 260nm 以下の深紫外光源を実現するための基礎検討として、出力・寿命に関する具体的な数値目標を置かず、項目1にて完成したファイバレーザによる UV 光の発生の実証を行う。	<p>■実績</p> <p>波長変換により最大出力約 0.6W の 266nm 深紫外光源を実現した。実現にあたり、非線形波長変換に関する材料の数値的検討を行った。</p> <p>■評価</p> <p>ファイバレーザの部品調達の容易さと、開発に使える時間の関係で、基本波となる波長が 1064nm となったため、結果的にその第4高調波である UV 光の波長は 266nm となり目標をクリアできなかった。しかしそ</p>

	他の面においては目標を十分に満たしており、本質的には完全に達成されたと考えてよい。
2-2 結晶運用環境の開発	
本レーザーが産業用に供されるための、2 ヶ月以上連続自動運転が可能な結晶チャンバーおよび自動トラッキングシステムを開発する。本システムはレーザーとは独立してその稼働を確認するまでとする。	<p>■実績</p> <p>レーザーによって発生する紫外線に対してレーザー自体に及ぼされる影響を検討した。また雰囲気制御可能な結晶チャンバー(パージボックス)を開発し、前記の検討で明らかになった結果を反映させた。トラッキングシステムが手動で確実に動作することを検証した。</p> <p>■評価</p> <p>現在までのデータ蓄積では、数値目標として掲げた2 ヶ月以上の動作を担保することはできなかったが、UV 光に対して対策された雰囲気制御チャンバー、トラッキングシステムの開発が完了した。連続運転時間は今後の長時間動作実証から合理的に求められるため、継続的に実施することで達成可能である。</p>

4.2 まとめと今後の展開

波長 1064nm、平均出力 20W 以上、パルス幅 1.2ns、繰り返し 800kHz のパルスファイバレーザーを完成した。発振器はこのとき直接変調した半導体レーザーであり、これを 2 ステージ 4 段のファイバ増幅器で増幅した結果である。この光を 2 段の波長変換した結果、平均出力約 0.6W 以上の 266nm 光を得ることに成功した。これらの結果を得るための理論的な背景検証および、UV 素子の長寿命化に関する検討を前もって行い、実用的な加工用に供することが可能なファイバベースの UV 光源が達成された。波長は目標値よりも若干長くなったが、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。当初目標の 1030nm 近傍を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。

試作したレーザーのうち、ファイバ部分は適切なパッケージングをすることによりプロトタイプとして次年度以降の開発実行に寄与可能である。波長変換部分は使用環境に応じた改良が必要だが、基本的なセットアップに大きな変更は不要である。今後はこのレーザーの UV 光出力をより高めるためのパラメーター調整(増幅度、線幅の制御、波長変換部分の集光条件など)を経て所定の出力を得る。さらに得られた 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。

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).
- 7) N. Komine, S. Sakuma, M. Shiozawa, T. Mizugaki, and E. Sato, "Influence of sodium impurities on ArF excimer-laser-induced absorption in CaF₂ crystals", *Appl. Opt.* 39, 3925 (2000).
- 8) J. Wang and R. L. Maier, "Surface assessment of CaF₂ deep-ultraviolet and vacuum-ultraviolet optical components by the quasi-Brewster angle technique", *Appl. Opt.* 45, 5621 (2006).
- 9) Technical whitepaper of ZEUS, "UV properties of plastics: transmission & resistance", http://www.zeusinc.com/UserFiles/zeusinc/Documents/Zeus_UV_Properties.pdf

- 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。機能によって下記のような多くの種類に分類できる。

- 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、一般に図 G-1 において $V < 2.405$ であるような条件で成り立つ。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。

- 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・パワーアンプファイバ (MOPA)

制御された発振パラメータ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。