

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ピコ秒グリーンレーザーを用いた無熱切削
加工技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 関東経済産業局
委託先 株式会社つくば研究支援センター

目次

第1章 研究開発の概要	1
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.....	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発	5
2-2 ピコ秒グリーンレーザー波長変換ユニットの開発	6
2-3 ピコ秒グリーンレーザービーム整形光学系の開発	10
2-4 ビアホール等加工用光源の最適仕様の確立.....	12
2-5 結論.....	15
第3章 全体統括	16
3-1 過年度（平成22年度～平成23年度）を含む研究開発成果	16
3-2 研究開発後の課題.....	16
3-3 事業化展開	16
付録1 専門用語等の解説.....	17

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

【研究背景】

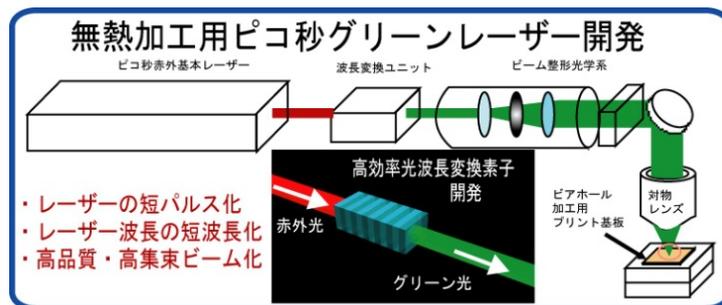
近年の電子配線技術では、プリント基板の高集積化が、電子部品の実装を必要とするあらゆる分野で利用されている。高集積化を目指したプリント基板では積層化が進み、積層した各導電（金属）層間と絶縁層に穴（ビアホール）を開け、その内壁に金属メッキを施して各導電層を連結する方法を採用している。このため、ビアホール加工（切削加工）の精密・微細化は、重要な要素技術となる。かつてビア径（ビアホール直径）は数百 μm であったが、現在は最高で30 μm 、通常50~100 μm となっているが、プリント基板等の高集積化への要求は強く、数年後にはビア径10 μm の加工装置が市場に出ることが求められている。

近年のプリント基板は、金属（銅、アルミニウム）、ガラス、プラスチック等の異種材料を使用していることから、ビアホールの作成では、これらの材料を同時に加工する必要がある。現在では、上記被加工物を同時に切削できる技術として、機械的ドリル切削、炭酸ガスレーザーあるいはNd:YAGレーザーが市場で使われている。

ドリル切削では30 μm 径のビアホール加工が限界で、切れ味の変化による加工不良率が高いこと（バリの存在）、摩擦熱によるスミア（ビアホール内壁に樹脂が付着。）の存在が問題となっている。一方、炭酸ガスレーザーの使用では、熱加工であるためのスミアの存在が問題であり、また波長が長い（10 μm 近く）ため、微細化に限界もある。ナノ秒パルスのNd:YAGレーザー（波長約1 μm ）も使用されているが、まだ熱加工の領域であり、デブリ（飛沫物）の存在、ブルーム（蒸発物）の吸収によるレーザービームのエネギーロスが問題となっている。

上記の課題を解決する方向としては、熱発生を抑え、またビームの微細整形が可能なレーザー光源開発が重要となる。特に、レーザー光を短パルス・短波長化すると、原子結合の切断により物質が気化するアブレーション加工となり、熱がほとんど発生しない無熱加工となる。これにより、熱発生に伴う上記の問題の多くを解決することができる。

このような背景から、本研究開発では、ピコ秒レーザーに最適化した波長変換ユニットを新規開発し、最適チューニングを施したピコ秒赤外基本レーザー（波長1030nm）に装着することにより、簡便にピコ秒グリーンレーザー（波長515nm）を発振させ、無熱、微細加工を可能とする切削加工用光源として最適化した。本研究開発の基本概念を下図に示した。



グリーンレーザー発振用波長変換材料として、物質・材料研究機構で開発した高い変換効率と長期安定性に優れたMg添加定比タンタル酸リチウム単結晶(MgSLT)を使用している。このMgSLT結晶基板にリソグラフにより形成した周期電極パターンを通して電圧を印加し、結晶内に周期分極構造(PP構造)を造る。この構造を利用して、疑似位相整合(QPM)方式による波長を半分の長さにする第二高調波発振(SHG)波長変換素子を作成した。QPM方式SHG素子は、①従来のホウ酸リチウム(LBO)結晶等の波長変換に比べ低い光強度下で高い波長変換効率を得られる、②光損傷を回避し、長寿命安定動作が可能、③偏光方位不変で、光の進行方向にずれ(ウォークオフ)がないため、ビーム整形、径制御などが容易で取扱いが簡便、といった優位性を有している。しかし、これまでピコ秒以下のパルス領域での応用は進んでおらず、本研究の成果により今後、QPM-MgSLT波長変換のあらたな超短パルス領域への展開が期待される。

【研究の目的及び目標】

本研究開発は、高度化指針における（2）電機機器に関する事項に係る。その高度化目標は次の通りである。

- ア．微細加工対応
- エ．非金属（ガラス、樹脂等）加工対応
- オ．高硬度材加工対応

上記高度化目標をふまえ、本研究の目的は、次世代プリント基板切削加工等で要求される高精度・微細化加工を達成するため、無熱加工と異種材料の加工に対して最適化が可能なピコ秒グリーンレーザーを開発するとともに、波長変換、短パルス化、ビーム整形制御を果たしたグリーンレーザー光源をレーザー切削加工機へ搭載し、種々の材料に対する加工条件から光源としての最適仕様を確立し、10 μ m以下のビアホール加工を可能とする無熱切削加工技術として川下業者に提供することである。

平成24年度は、平成23年度研究開発の成果をベースに各要素技術の一層の改良・改善を行い、ピコ秒グリーンレーザー発振の最終目標性能を実現するとともに、ビーム整形光学系の最適化を行い、ピコ秒グリーンレーザーとともにレーザー加工実験機に搭載し、レーザー切削加工評価を行い、光源としての最適仕様を確立する。

〔1〕波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発

- ・赤外ピコ秒パルスレーザーとしての完成度アップと、SHG波長変換のための最適化。
- ・仕様目標：23年度目標に加え、繰り返し20kHz以上。

〔2〕ピコ秒グリーンレーザー波長変換ユニットの開発

- ・1次QPM構造（開口1mm \times 1mm以上、素子長2mm程度）による波長変換素子の性能改善
- ・仕様目標：パルス幅15~20ps、パルスエネルギー10 μ J、繰り返し周波数10~20kHz。

〔3〕ピコ秒グリーンレーザービーム整形光学系の開発

- ・ピコ秒グリーンレーザー加工実験系のためのビーム整形光学系設計試作。
- ・仕様目標：ピコ秒グリーンレーザー集光ビームサイズ10 μ m以下

〔4〕ビアホール等加工用光源の最適仕様の確立

- ・開発したピコ秒グリーンレーザーとビーム整形光学系によるビアホール等加工試験を実施。
- ・ビアホール等加工用光源としてのレーザーの最適仕様確立

【研究実施内容】

① 波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発（実施：株式会社メガオプト）

基本構成要素であるシード光発振器、パルスストレッチャー、再生増幅器、コンプレッサーの各部分の最適化により、波長1,030 \pm 0.7nm、パルス幅20ps以下、パルスエネルギー30 μ J以上、繰り返し周波数20kHzのピコ秒パルス赤外レーザーを開発するとともに、波長変換用に最適化を実施し、基本波光源として完成させる。

② ピコ秒グリーンレーザー波長変換ユニットの開発（実施：株式会社SWING）

平成23年度の研究開発の結果、波長変換素子の誘電破壊閾値強度が1桁改善したため、1次QPM方式による波長変換を採用し、素子サイズとして、開口部1mm \times 1mm、素子長2mm程度の素子を目標として、性能改善と最適化を行う。開発目標は、波長変換ユニットに搭載した状態で、パルス幅20ps以下、パルスエネルギー10 μ J以上、繰り返し周波数20kHzのピコ秒グリーンレーザー光を発振させ、レーザー加工用波長変換ユニットとして完成させる。

③ ピコ秒グリーンレーザービーム整形光学系の開発（実施：国立大学法人東京大学、株式会社SWING）

波長変換により発振させた上記ピコ秒グリーンレーザーを、ビアホール直径10 μ m以下のレーザー

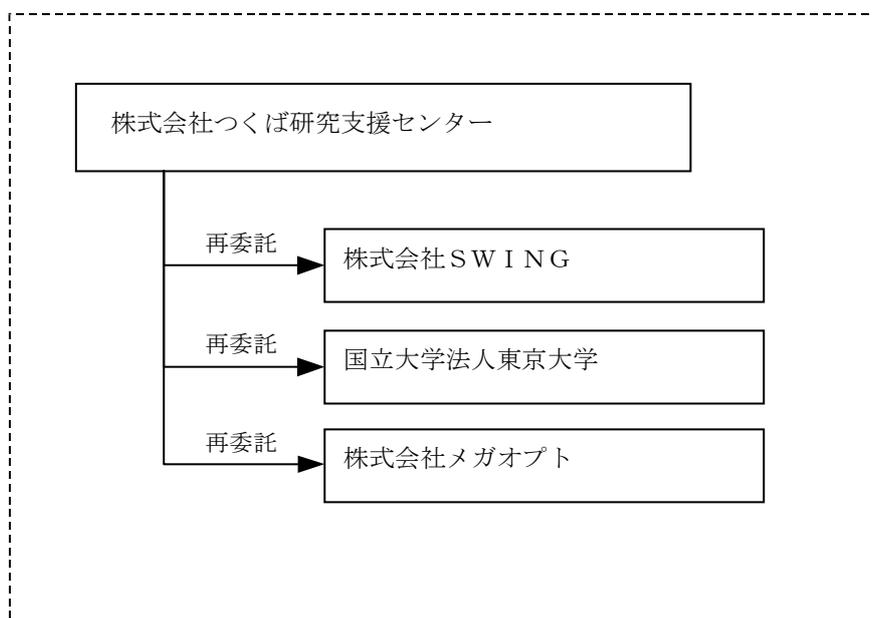
加工に最適な形状に集光するために、レーザービームのビームクオリティー（ M^2 、波面形状など）を測定し、そのビームクオリティーに応じたビーム整形光学系の最適化を実施する。

④ ビアホール等加工用光源の最適仕様の確立（実施：株式会社 SWING、株式会社メガオプト）

上記ピコ秒グリーンレーザーとビーム整形光学系を搭載したレーザー加工実験機（23 年度に構築）において、レーザー切削加工実験を各種材料に対して実施する。その試験結果を基本波レーザー、波長変換レーザー及び整形光学系の最適化プロセスにフィードバックし、ビアホール等加工用光源としてのレーザーの最適仕様を確立する。

1-2 研究体制

（研究組織）



総括研究代表者（P L）
株式会社 SWING
取締役副社長 北村健二

副総括研究代表者（S L）
国立大学法人東京大学
生産技術研究所 研究部 基礎系部門
教授 志村 努

1-3 成果概要

本年度に得られた成果概要を要約すれば以下のようになる。

- ① ピコ秒グリーンレーザー発振用波長変換素子の、ピコ秒レーザーに対する誘電破壊耐性の1桁以上向上を実現したことにより、大幅な軽薄短小化と高い波長変換性能を備えた波長変換素子（1次QPM構造）を開発し、本素子を搭載したコンパクトな波長変換ユニットとして完成させ、目標仕様であるエネルギー $10\mu\text{J}$ 以上、 20kHz 以上のグリーンレーザーを発振させた。
- ② またレーザービーム整形に関する設計理論とビームパラメーターの評価法を確立し、本設計に基づいた、ピコ秒グリーンレーザー加工光学系を構築し、目標とした直径 $10\mu\text{m}$ 以下のビーム集光とCu薄板へのレーザー穴あけ加工を実現した。
- ③ 以上の結果に基づき、ビアホール等加工用光源としてのレーザーの最適仕様を確立した。

研究開発項目毎の目標達成状況は以下の通りである。

[1] 波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発

- ・当期の目標仕様（23年度実績に加え、繰り返し 20kHz を実現）を100%達成した
- ・仕様目標達成状況（カッコ内は目標値）：
中心波長 1030.7nm ($1030\pm 0.7\text{nm}$)、繰り返し $10\sim 20\text{kHz}$ ($10\sim 20\text{kHz}$)、パルスエネルギー $120\mu\text{J}@10\text{kHz}$ 、 $40\mu\text{J}@20\text{kHz}$ ($30\mu\text{J}$ 以上)、パルス幅 $18\sim 20\text{ps}$ ($18\sim 20\text{ps}$)

[2] ピコ秒グリーンレーザー波長変換ユニットの開発

- ・ピコ秒レーザーに対する波長変換素子の誘電破壊耐性が1桁以上向上したことにより、大幅な軽薄短小化と高い波長変換性能を備えた波長変換素子（1次QPM構造）を開発し、本素子を搭載したコンパクトな波長変換ユニットとして完成させ、目標仕様を100%達成した。
- ・仕様目標達成状況（カッコ内は目標値）：
素子の形状は開口部 $1.2\text{mm}\times 4.5\text{mm}$ 、素子長 $1\sim 2\text{mm}$ 。
中心波長 515.35nm ($515\pm 0.35\text{nm}$)、繰り返し $10\sim 20\text{kHz}$ ($10\sim 20\text{kHz}$)、パルスエネルギー $50\mu\text{J}@10\text{kHz}$ 、 $12\mu\text{J}@20\text{kHz}$ ($10\mu\text{J}$ 以上)、パルス幅 $18\sim 20\text{ps}$ ($18\sim 20\text{ps}$)

[3] ピコ秒グリーンレーザービーム整形光学系の開発

- ・レーザービーム整形に関する設計理論とビームパラメーター評価法を確立し、本設計に基づく、ビアホール直径 $10\mu\text{m}$ 以下のレーザー加工に最適なビーム整形光学系を構築した。
- ・上記光学系において、直径 $10\mu\text{m}$ 以下のビーム集光が可能であることを確認した。
- ・以上により目標を100%達成した。

[4] ビアホール等加工用光源の最適仕様の確立

- ・開発したピコ秒グリーン光源と整形光学系を組み込んだ加工実験系において、Cu薄板へのレーザー穴あけ加工試験を実施した結果、ビーム径と同等の穴が形成されることを確認した。
- ・以上の検討の結果を基に、ビアホール等加工用光源としてのレーザーの最適仕様を確立、目標を100%達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理者】

株式会社つくば研究支援センター
茨城県つくば市千現 2-1-6
研究支援部 次長 高田 青史
Tel : 029-858-6000
Fax : 029-858-6014
E-mail : tci-is@tsukuba-tci.co.jp

第2章 本論

2-1 波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発

本研究開発は、ピコ秒レーザーに最適化した波長変換ユニットを新規開発し、最適チューニングを施したピコ秒赤外基本レーザー(波長1030 nm)に装着することにより、簡便にピコ秒グリーンレーザー(波長515nm)を発振させ、無熱、微細加工を可能とする切削加工用光源として最適化することを目的としている。

波長変換レーザーの特性(ビーム形状、波面性能など)が基本レーザーの特性を引き継ぐのと同時に、波長変換特性(変換効率等)自体が基本レーザーの仕様(波長線幅等)に依存するという関係にあるため、基本レーザーの性能はきわめて重要である。

今回の波長変換用ピコ秒パルス赤外基本レーザーの開発にあたっては、メガオプトですでに開発してあった、既存のレーザーシステム(実験機)に改良を施し、波長変換向けに最適化チューニングを施して使用した。レーザーを用いた微細加工では、レーザー光のパルス幅が短いほど無熱となり、より微細な加工を可能とする。本開発では当初20ピコ秒近辺のパルス幅によるグリーン光の発振を目標としていたが、今後のニーズとして更に短パルス化が望まれることから、サブピコ秒の発振実験までおこなった。その際は、基本レーザーのシード発振器出力そのものを、波長変換素子に入射した。

本節では、基本レーザーの構成と仕様概要について述べる。

図1に、ピコ秒パルス赤外基本レーザーの基本構成を示した。

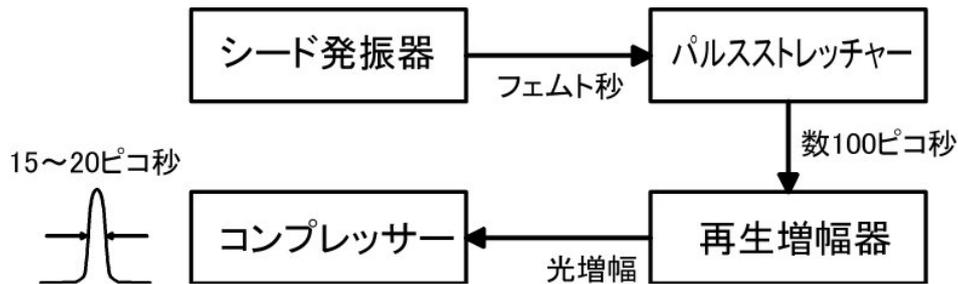


図1 ピコ秒パルス赤外基本レーザーの構成

ピコ秒パルス赤外基本レーザーの基本動作について簡単に説明する。

シード発振器は、Yb : YAGの媒体を使用したフェムト秒モードロックレーザーを使用した。主な仕様は、波長 : 1030.7nm、繰り返し周波数 : 50MHz、パルス幅 : 180fs (0.18ps) である。後に述べる、サブピコ秒(フェムト秒)の発振実験の場合は、本シード発振器からのシーダー光を直接波長変換素子に入射して実験を行った。

パルスストレッチャーでは、シード発振器から出力された超短パルス光を正の分散特性(長波長側が短波長側よりも進む)をもつ素子に入射させて、レーザーパルスの時間幅を拡大する。実際には分散特性を持つ素子として回折格子を使用しパルス幅を拡大した。このレーザー光をチャープパルス列という。

再生増幅器では、2枚のミラーによって共振器を構成し、チャープパルス列を1/2波長板により、共振器内部に取り込み飽和増幅に達するまで共振器内を往復させてポッケルスセルによるスイッチングによって増幅光を取り出す。

コンプレッサーにおいて、増幅されたレーザーを負の分散特性(短波長側が長波長側よりも進む)の素子にいれ、パルス圧縮を行い所望のパルス幅と高いピークパワーを得ることができる。この原理を利用しパルス幅を20ps程度にする。

本年度の研究開発では、繰り返し周波数の高周波化に取り組んだ。ピコ秒レーザーのパルス駆動は、再生増幅器内のポッケルスセルに高電圧の矩形パルス在所定の繰り返し周波数(10kHz~100kHz)で印加することにより行う。繰り返し周波数の変更の際し、再生増幅器の共振器ミラー

の調整とモードマッチングの調整により横モードと出力の最適化を図った。

図 2 は再生増幅器からの出力波形を示す。チャープパルス列を再生増幅器の光軸と一致させることで、図 2 の写真の下に表示されているチャープパルス列が増幅され、写真の上に表示されるように、ポッケルスセルを用いたスイッチングにより 1 つのパルスが再生増幅器から出力される。

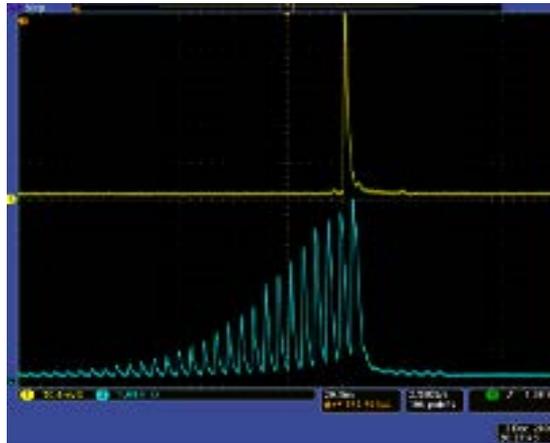


図 2 再生増幅器からの出力波形

24年度までのサポイン研究開発で達成された、ピコ秒パルス赤外基本レーザーの仕様を表1に示す。

表 1 開発したピコ秒パルス赤外基本レーザーの仕様

項目	24年度達成値
基本方式	Qスイッチパルスレーザー
偏光	直線偏光(波長消光比100:1のPBSを通過後、消光比15dB)
中心波長	1030.7nm
繰り返し周波数	10~20kHz
パルスエネルギー	100μJ @10kHz、 40μJ @20kHz
出力安定性	4% (4H連続動作)
パルス幅	18~20ps
出力形態	空間光として出力

2-2 ピコ秒グリーンレーザー波長変換ユニットの開発

[1] 素子開発

23年度サポイン研究開発において、PP-MgSLT波長変換素子の誘電破壊耐性（レーザーダメージ閾強度）が、ピコ秒領域で大幅に改善することが明らかになった。すなわち、ナノ秒レーザーでの誘電破壊耐性が $0.3\text{GW}/\text{cm}^2$ であるのに対して、パルス幅20ps程度のピコ秒パルスレーザーでは $10\text{GW}/\text{cm}^2$ 以上のピーク強度でもダメージが発生しないことがわかった。その結果、23年度から開発目標を、当初低い誘電破壊耐性を前提にした3次QPM方式から、コンパクトでより高性能化が得やすい1次QPM方式に軌道修正した。24年度においては、1次のQPM素子としての最適化を実施し、波長変換ユニットの完成をはかった。

図3に、開発した波長変換素子の写真を従来のナノ秒対応の素子と対比して示した。ピコ秒対応波長変換素子が、ナノ秒対応素子に比べて短尺化していることがよくわかる。また、23年度開発品に比べ、24年度開発品は、厚さを1.0mmから1.2mmと20%厚くすることに成功した。

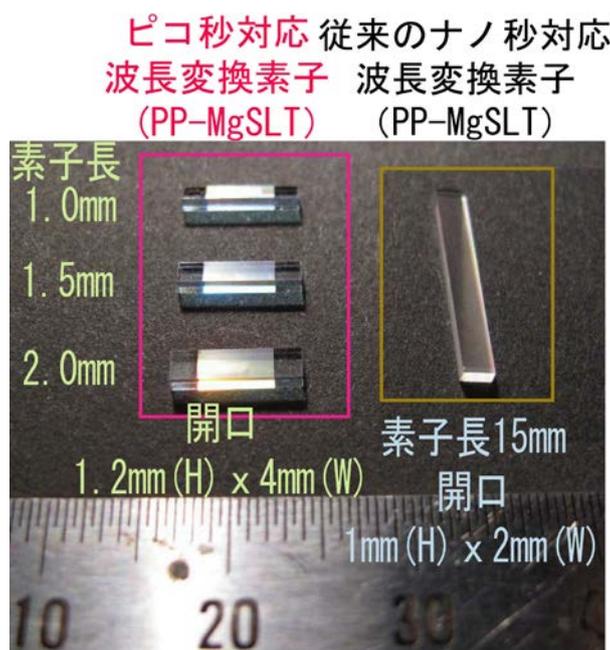


図3 開発した波長変換素子の写真

[2] 素子の性能評価

波長変換素子の性能評価のために素子評価システム（図4）を構築した。本システムでは、コンピュータによる計測機器の自動制御を行うことにより、素子の入出力特性（入射パワーとSHG出力の関係）やSHG効率の面内マッピング（均一性の評価）などを簡便に評価できるようになっている。メガオプト社で開発したピコ秒赤外基本波レーザー（波長1030.7nm）に、本評価システムを結合して、波長変換素子の評価を行った結果を以下に示す。

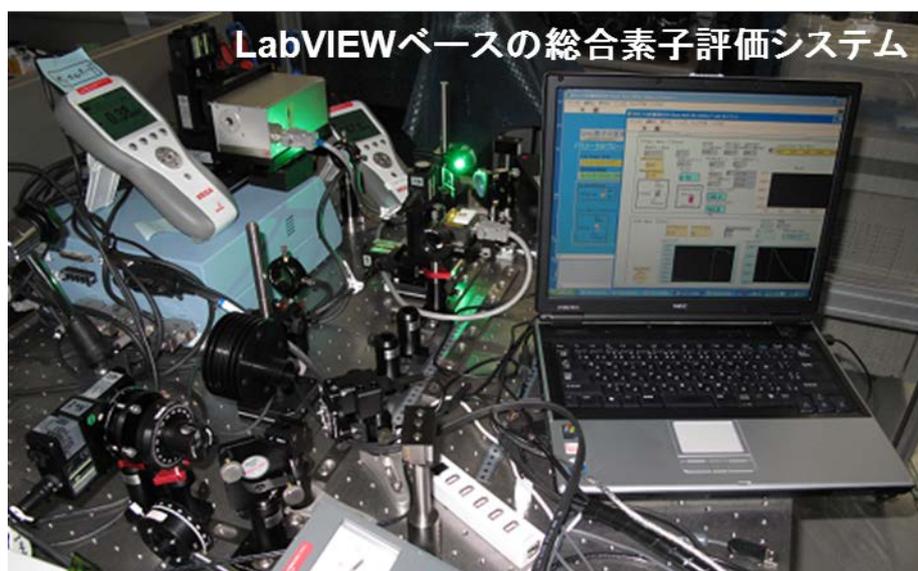


図4 波長変換素子総合評価システム

表2 はサポイン開発目標に対する達成状況を示しており、目標は100%達成されている。

表 2 サポイン開発目標に対する達成状況

		23年度	24年度実施		目標仕様
		10kHz	20kHz	100kHz	
ピコ秒 基本波光源	平均パワー	1.2W	0.8W	1.8W	10~20kHzで30μJ以上
	パルスエネルギー	120μJ	40μJ	18μJ	
ピコ秒 グリーン光	平均パワー	0.5W	0.24W	0.46W	10~20kHz10μJ以上
	パルスエネルギー	50μJ	12μJ	4.6μJ	
	SHG効率	42%	32%	25%	

目標達成

レーザーを用いた微細加工では、パルス幅が短いほど無熱となり、より微細な加工を可能とする。本開発では当初 20 ピコ秒近辺のパルス幅によるグリーン光の発振を目標としていたが、今後のニーズとして更に短パルス化が望まれることから、シーダー光を基本波光源として用いて、サブピコ秒の発振実験も行った。

図 5 は、開発した素子（素子長 2mm）において、波長変換効率の入射ピーク強度依存性をピコ秒とサブピコ秒で比較したグラフである。両者とも、低いピーク強度においてはほぼ同じ特性である。ピーク強度が 1GW/cm²を超えるとピコ秒では変換効率が約 40%に高止まる傾向があるのに対し、サブピコ秒では、約 60%の高い変換効率が得られた。

図 6 は素子の SHG 変換効率の入射面内での分布を示す。SHG 変換効率は素子全体にわたり均一であった。

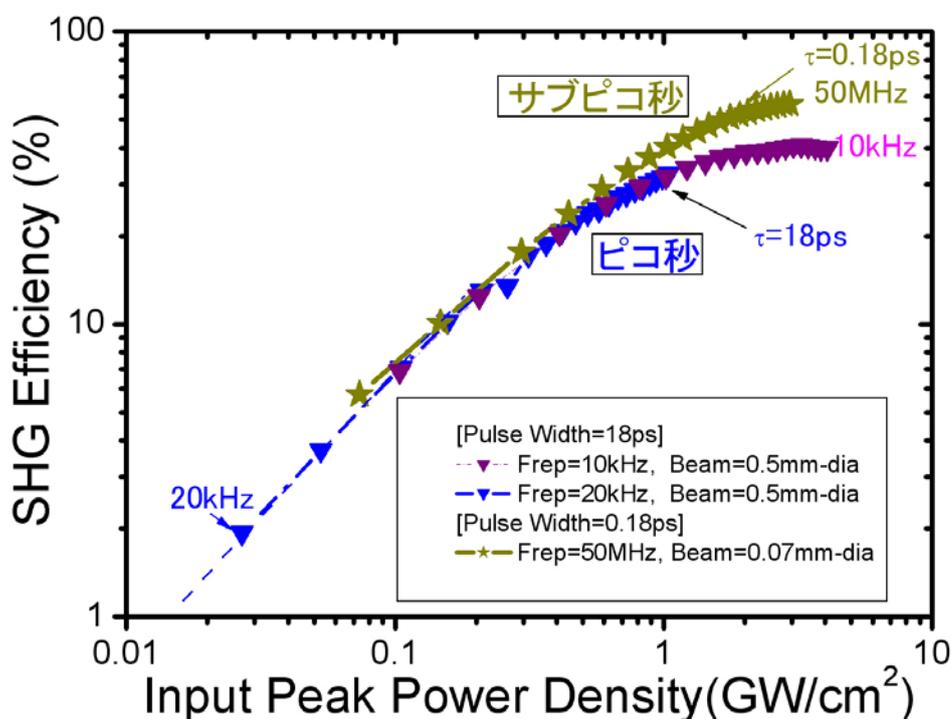


図 5 波長変換効率の入射ピーク強度依存性

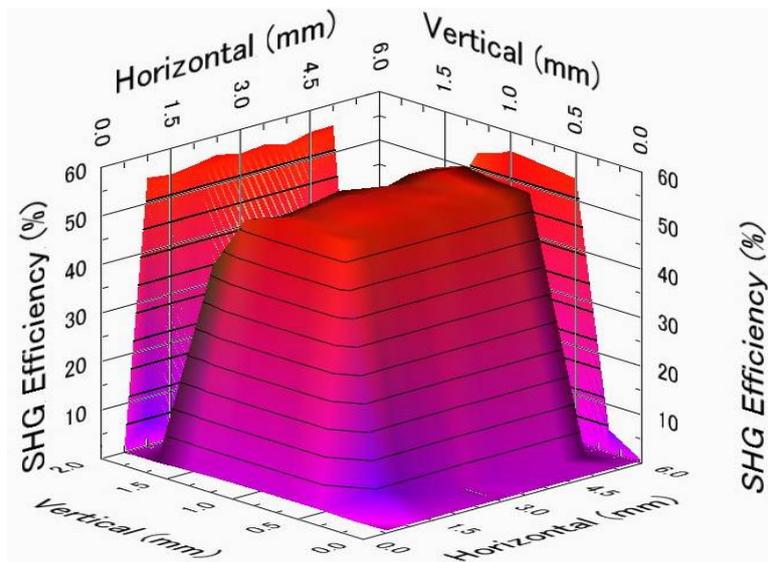


図6 素子のSHG変換効率の入射面内分布

【3】波長変換ユニットの試作

波長変換ユニットの試作を行った。基本レーザーにマウントすることで、簡便にピコ秒グリーンレーザーを発振することが出来る。図7は波長変換ユニットとピコ秒グリーンレーザー発振の様子を示す写真である。最大パワー1.4Wの基本波を入射した場合に、0.5WのSHG出力が得られた。60分の連続発振動作において、パワーの変動は $500\text{mW} \pm 2.5\%$ であった。

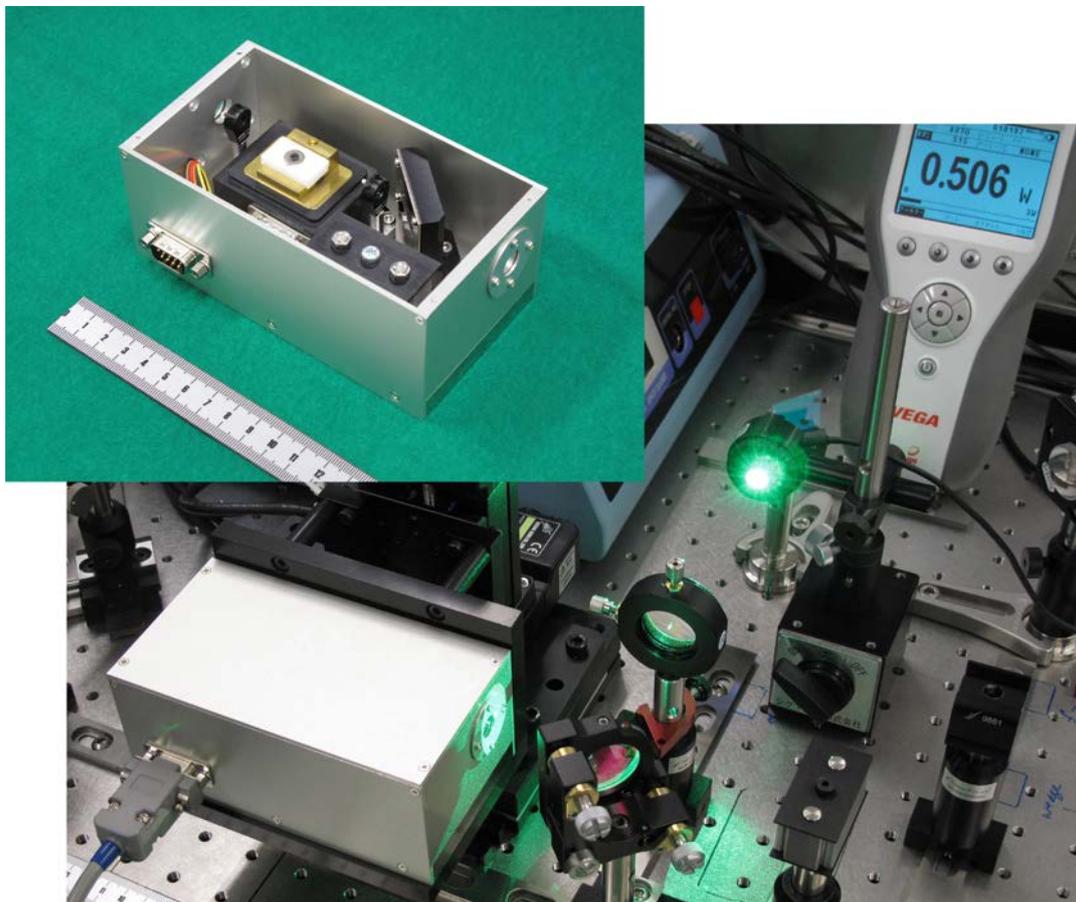


図7 試作した波長変換ユニットとピコ秒グリーンレーザー発振の様子

2-3 ピコ秒グリーンレーザービーム整形光学系の開発

本研究課題においては、波長変換により発振させたピコ秒グリーンレーザーを、ビアホール直径 $10\ \mu\text{m}$ 以下のレーザー加工に最適な形状に集光するためのビーム整形光学系の設計と最適化を実施した。ここではビーム整形光学系の具体的な例として、今回メガオプト内に構築したレーザー加工実験光学系の集光ビーム形状の設計例と、実際に直径 $10\ \mu\text{m}$ 以下のビーム集光が可能であることを実験的に確認した結果について示す。

[1] 基本式

レーザー加工において、ビームを集光した場合の重要なパラメータが、集光ビーム径と焦点深度である。これら 2 つのパラメータはレーザービームのビーム品質 (beam quality) によって変化する。ビーム品質の評価指標にはいくつかの種類があるが、代表的なものひとつが M^2 値であり、 M^2 値がレーザー加工におけるビーム品質を表す直接的で有効な指標であることが本研究における解析の結果わかった。そこで、まずレーザービーム整形に関する基本的な関係式を提示する。

M^2 は式 1 のように定義される。 w_{0R} 、 θ_R はそれぞれ、ビームのビームウエスト半径、ビーム広がり角をあらわす。なお $w_0\theta$ は光学系によらずビーム固有のパラメータであって、**BPP** (Beam Parameter Product) とよばれる (式 2、 λ は光の波長)。

$$M^2 = \frac{w_{0R}\theta_R}{w_0\theta} \quad (\text{式 1})$$

$$BPP = w_{0R}\theta_R = \frac{M^2\lambda}{\pi} \quad (\text{式 2})$$

実用上重要な焦点深度 (DOF, Depth of Focus) は、Rayleigh 長 z_R の 2 倍と定義し、式 3 のように表され、レンズに入射するビーム直径 D と集光ビーム直径 d との関係は式 4 で表される。

$$DOF \equiv 2z_R = \frac{2\pi w_{0R}^2}{M^2\lambda} = 2w_{0R}^2 / BPP \quad (\text{式 3})$$

$$d = \frac{4\lambda f M^2}{\pi D} = (4f/D)BPP \quad (\text{式 4})$$

[2] レーザー加工実験光学系

図 8 に今回構築したレーザー加工実験系の構成を模式的に示す。

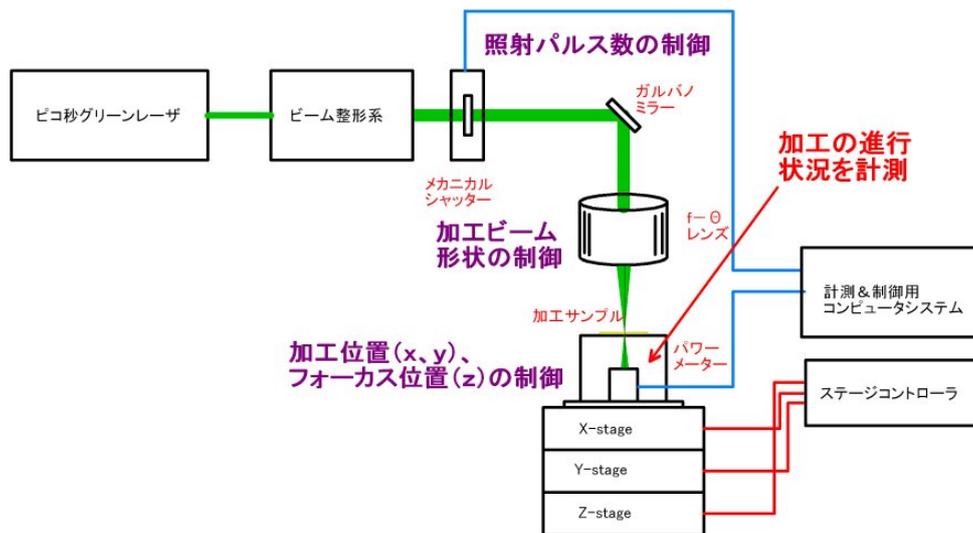


図 8 レーザー加工実験系の構成を表す模式図

[3] ビーム設計と実験的確認

実際にレーザー加工実験光学系で使用するレンズのデータをもとに、レーザー加工用ビーム整形の設計を行う。今回使用した $f-\theta$ レンズは、Sil-Optics 製、S4LFT0055/121 であり、焦点距離 59.3mm、ワークエリアは 20mm×20mm である。

入射ビーム直径と集光ビーム直径、焦点深度との関係を計算するとそれぞれ図 9 の実線、破線のようにになった。

つぎに、実際にレーザー加工実験光学系にレーザービームを入射して、レンズで集光されたビームの形状を評価し、上の計算結果と比較した。使用したレーザーは、サブピコ秒レーザーより SHG により生成された、サブピコ秒グリーンレーザー (M^2 はほぼ 1.0) である。

このようにして計測したビーム径の値を、 $f-\theta$ レンズに入射するビームの直径との関係でプロットしたのが、図 9 の赤い丸である。ビーム径の計測データは、 $M^2=1.0$ として計算した関係式にほぼ符合する。使用したレーザーは、 M^2 がほぼ 1.0 であることから、ビームは理論通りに集光できていることが分かる。また集光ビーム直径は、10 ミクロン以下となっており、目標とした直径 10 ミクロン以下の集光ビームは実現できた。

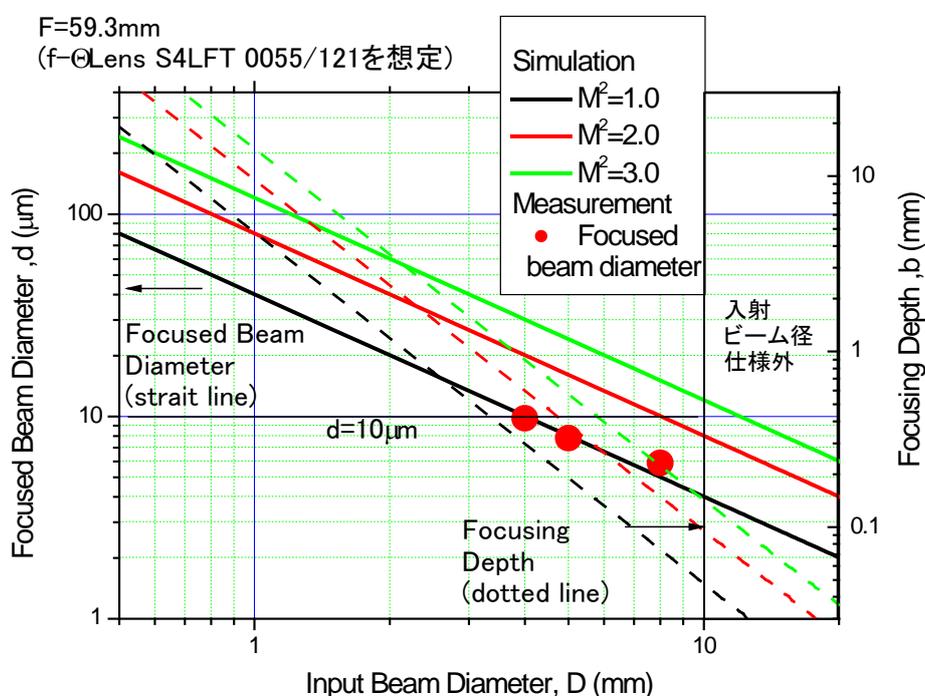


図 9 集光ビーム直径と焦点深度の関係
赤い丸点は、ビーム径の実測値である。

最後に、このビームを使用して、実際にレーザー穴開け加工を行った結果を示す。

レーザー加工実験光学系に Cu 薄膜をセットした後、上記サブピコ秒グリーンレーザーを直径約 6.0 ミクロンに集光して照射して生成された穴の写真を図 10 に示す。透過照明下で観測した穴径はほぼ直径 6.0 ミクロンであり、集光ビーム直径とほぼ一致した。

以上の結果より、10 ミクロン以下に集光可能なビーム整形光学系は目標を達成したと判断する。

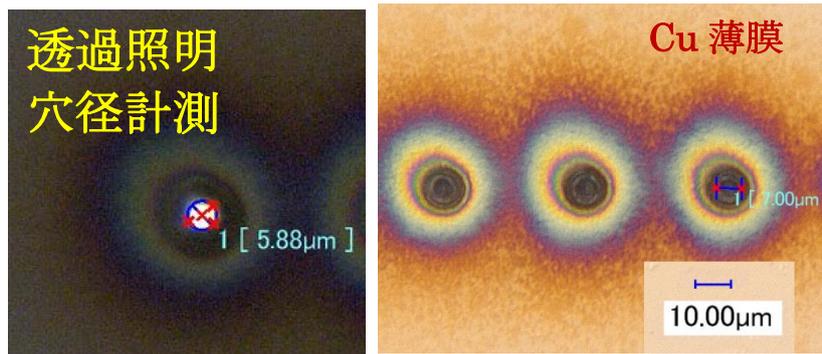


図 10 約 6.0 ミクロンに集光したビームで加工した Cu 薄膜表面のマイクロスコープ写真

2-4 ビアホール等加工用光源の最適仕様の確立

本課題の目的は、ビアホール等加工用光源としてのピコ秒グリーンレーザーの最適仕様を確立することにある。本サポイン研究開発事業においては、PP-MgSLT素子を用いた波長変換技術をピコ秒パルス領域での最適化、すなわちピコ秒パルス基本レーザーへの最適チューニングを施し、ビアホール等微細加工用ピコ秒グリーンレーザーへの応用を実現した。その結果として、本PPMgSLT素子が、穴径10ミクロン以下のビアホール等レーザー微少穴加工を目的としたサブピコ秒から20ピコ秒までの多様な波長変換ニーズに応じてカスタマイズ可能であることを実証した。

本稿で示す研究課題における光源の最適仕様化は、基本レーザーにマウントして簡便にピコ秒グリーンレーザーを生成するための、波長変換ユニットの仕様と駆動条件の最適仕様をまとめることにあり、波長変換素子の設計、製作、評価、レーザー加工応用に関する技術の集大成である。

ピコ秒グリーンレーザーを波長変換素子で構成するという観点に立った場合の、最適仕様の決定方法について考察した。

〔1〕波長変換素子の仕様の最適化ルーチン

A. コンセプト

ユーザーの要望に対するカスタマイズと、基本レーザーと波長変換素子の最適組み合わせの提案を行う。

B. 仕様決定要因

STEP1. 加工目的に応じた、最適なパルス幅 (τ) の選定

STEP2. 加工条件より、E (エネルギー)、W (パワー)、 $E * \tau$ (フルエンス) の決定。

結果的に駆動周波数 (Frep) が自動決定される。

STEP3. 以上の条件から、波長変換素子に入射するビームの最適ビーム径、素子の最適厚さを選定。最適入射条件として、素子に入射する基本波のピーク強度が所定の値 (ここでは $3\text{GW}/\text{cm}^2$ とした) になるように、入射ビーム径を設定することにより、素子の誘電破壊を回避し、結果的に波長変換効率を常に40%以上確保できると想定できる。

C. 基本仕様

① 基本的には、基本レーザーはフーリエ限界パルスとする

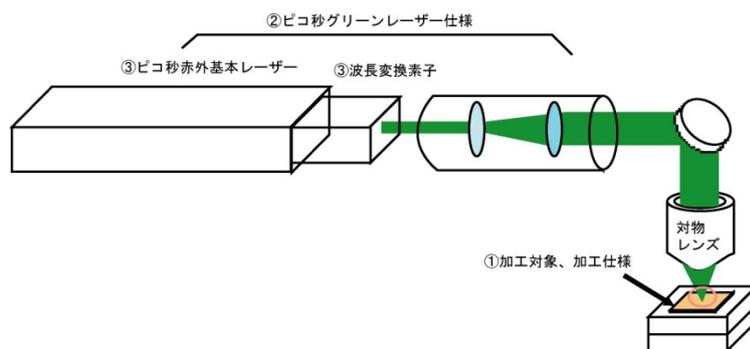
② 波長変換素子

- ・ 材料：PP-MgSLT、厚さ1.2mm、素子長は仕様に応じて最適化
- ・ 入射する基本波のピーク強度： $3\text{GW}/\text{cm}^2$

[2] 『ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジェ』

以上のレーザー仕様決定の仕組みを、川下業者等がプリント基板切削加工等の目的でピコ秒グリーンレーザー導入を検討する場合に、株式会社SWING、あるいは株式会社メガオプトが提供できるサービスの一形態として「ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジェ」（以下「コンシェルジェ」と略することがある）という概念でまとめた。

図11に「コンシェルジェ」の概念を示す。PP-MgSLT素子は、サブピコ秒から20ピコ秒までのパルス幅のレーザーに対して、効率的な波長変換を可能とする性能があることが証明されたが、一方で素子を使いこなすにはノウハウも存在する。そこで、ユーザーの幅広い要求に対するカスタマイズを行い、必要とすると基本レーザーとそれに対する波長変換素子の特性、使用条件を最適化してユーザーに提供するためのツールのひとつが、「ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジェ」である。



ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジェ

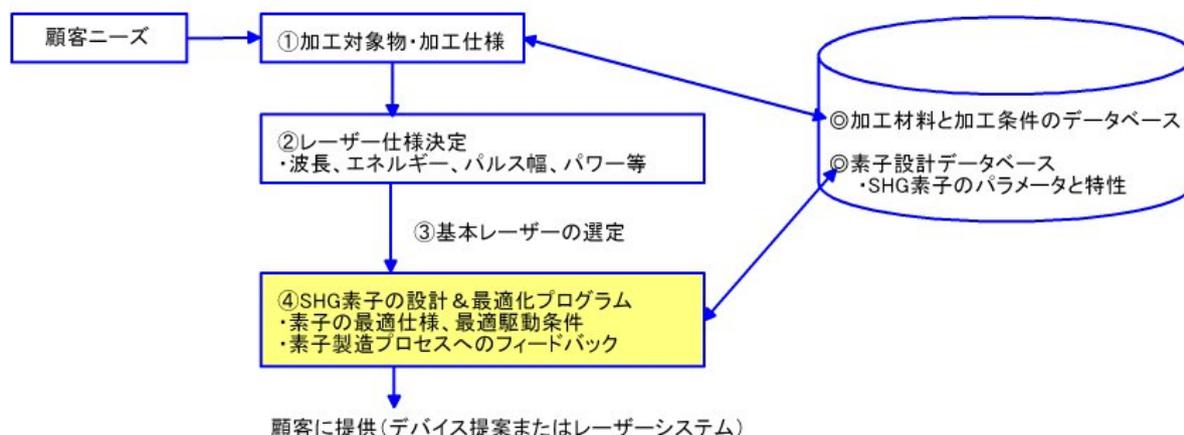


図11 「ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジェ」の概念

「コンシェルジェ」各要素ブロックの機能は下記のようなものである。

① データベース

A: 加工材料と加工目的に対する加工条件のデータベース： このデータベース（閾フルエンスなど）を参照することにより、レーザーの照射条件（フルエンス）を見積もり、必要なレーザーの仕様（波長、エネルギー、パルス幅等）を決定する。

B: 素子設計データベース： レーザーの仕様（波長、パルス幅等）に対するSHG波長変換特性の関係を系統的に蓄積。

② 素子の設計&最適化プログラム

素子設計データベース、必要なピコ秒グリーンレーザーの仕様、基本波レーザー仕様をもと

に、素子の設計を行い、素子の特性をシミュレーションしながら、素子と基本レーザーの最適化をはかる。

22年度および23年度サポイン研究開発で開発した、SHG素子動作シミュレーションプログラムをベースに、インターフェースを改良して、「ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジュプログラム」の中核となるシミュレータを開発した。

図12にこのプログラムのメインパネルを示した。

プログラムの機能を簡単に述べる。

[A] パラメータ

- ・ 基本条件：レーザー波長、パルス幅、パルスエネルギー、繰り返し周波数
- ・ 可変パラメータ： d_{eff} 、飽和効率、素子長、QPM次数
- ・ 条件設定：基本レーザーのピーク強度 (W/cm^2)
- ・ 波長線幅：基本条件より自動計算（フーリエリミット条件）または強制的に設定

[B] 自動計算項目

- ・ 上記パラメータより、レーザービームの素子への入射条件を最適化
- ・ QPM素子の設計：グレーティングピッチ、温度許容幅、波長許容幅の算出
- ・ 素子の入出力特性、ガウシヤンでフィットした出射ビーム径

すなわち、素子の設計と、最適化された条件で使用した場合の素子の特性（変換効率、出力パワー）等を推定できる。さらに条件を変えて、様々なシミュレーションを行うことも可能である。

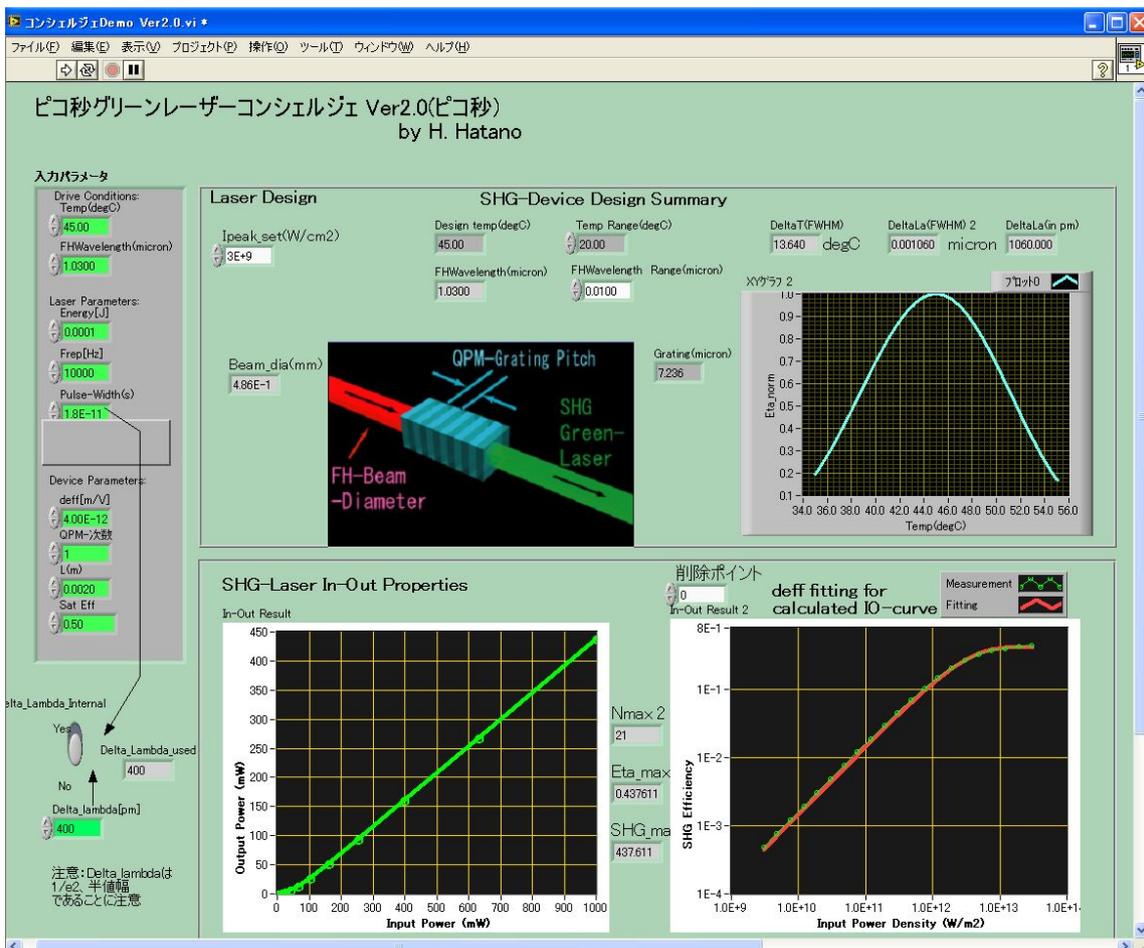


図12 「ピコ秒グリーンレーザー導入コンシェルジュプログラム」のメインパネル

2-5 結論

- (1) ピコ秒グリーンレーザー発振用波長変換素子の、ピコ秒レーザーに対する誘電破壊耐性の1桁以上向上を実現したことにより、大幅な軽薄短小化と高い波長変換性能を備えた波長変換素子（1次QPM構造）を開発し、本素子を搭載したコンパクトな波長変換ユニットとして完成させ、目標仕様であるエネルギー $10\mu\text{J}$ 以上、 20kHz 以上のグリーンレーザーを発振させた。
- (2) またレーザービーム整形に関する設計理論とビームパラメーターの評価法を確立し、本設計に基づいた、ピコ秒グリーンレーザー加工光学系を構築し、目標とした直径 $10\mu\text{m}$ 以下のビーム集光とCu薄板へのレーザー穴あけ加工を実現した。
- (3) 以上の結果に基づき、ビアホール等加工用光源としてのレーザーの最適仕様を確立した。

最後に、本研究開発で確立した技術のスペックを表3に示す。

表3 本研究開発で確立した技術のスペック

項目	主な仕様
◎赤外基本レーザー(波長変換素子評価用実験機)	
・波長	1030.7nm
・繰り返し周波数	10kHz~100kHz
・パルス幅	18~20ps(チューニング例)
・パルスエネルギー	最大 $120\mu\text{J}/\text{pulse}$
◎グリーン光生成用波長変換素子	
・材料:	周期分極反転Mg添加SLT単結晶
・素子サイズ	厚さ1.2mm×幅4.0mm×素子長1.0~2.0mm(基本レーザーに依存)
・波長変換効率	40%~60%(基本レーザーに依存)
・パルス幅	0.18ps~20psで動作確認
・基本波入射条件	強度 $3\text{GW}/\text{cm}^2$ 以下
◎ピコ秒グリーン発振例	
・波長	515.35nm
・パルスエネルギー	$50\mu\text{J}/\text{pulse}$ (パルス幅18ps、繰り返し10kHz、基本波入射 $120\mu\text{J}$ 時)
◎レーザー加工用ビーム整形光学系	
・集光ビーム直径	$10\mu\text{m}$ 以下に集光し、ビアホール等加工に供与

第3章 全体統括

3-1 過年度（平成22年度～平成23年度）を含む研究開発成果

研究開発計画の段階では、ナノ秒パルスレーザーにおける材料（SLT）破壊閾値を基本として波長変換素子を設計した。破壊閾値はレーザービームのエネルギー密度に依存しており、従来条件での値では0.3GW(ギガワット)/cm²程度であった。この破壊閾値以下に必要なグリーンレーザー出力を得るためには、ビーム径を拡大し(2～3mm径)エネルギー密度を下げる、すなわち大口径の波長変換素子を作成する必要があると考えた。したがって、開口が3×3 mmの厚い素子の作成をめざした。しかし、3 mm厚の基板では理想的な1次の細かい周期(周期8ミクロン程度)の分極反転をすることができず、3次の周期(8ミクロンの3倍)で分極反転した素子の利用を計画していた。ここでは、1次に比べ、効率が低いため長い素子長(～30 mm)が必要となる(全体の素子サイズ: 3×3×30 mm)。

これに対し、実際にピコ秒パルスで照射実験すると、破壊閾値が1桁以上(>10 GW/cm²)高くなる発見をした。これは本開発でもっとも重要な発見の一つで、これによりエネルギー密度の高い絞ったビーム(0.3～0.5 mm径)でも破壊が起こらないことを確認。0.5～1.0mm厚の薄い素子が使用できると同時に1次周期の分極反転素子作成が使える事を証明した。これにより、効率も高くなり、素子サイズは(1×2×2mm)と驚異的に縮小できた。本結果は、コンパクト化、高効率化等すべてにおいて大きな改善を可能とした。

本開発でSLTを用いた周期的分極反転相波長変換素子で、赤外波長レーザーから高効率で波長変換し、ピコ秒、サブピコ秒(フェムト秒)の高出力切削加工用グリーンレーザーが開発できることを証明した。また、従来、再現性の乏しかった短周期で1mm以上の厚さを持つ分極反転素子加工を可能とした。これらの事から、グリーン用波長変換モジュール単体としては、いつでも商品化できる状態に至った。

3-2 研究開発後の課題

波長変換グリーンレーザーは、赤外基本レーザーと波長変換モジュールを合体したものでなくてはならない。本開発では、予算の都合からコンパクトな赤外基本レーザーの開発をするまでに至らなかった。したがって、メガオプトが所有する赤外レーザーをピコ秒パルス化して基本レーザーとして活用せざるを得なかった。コンパクト、高効率波長変換モジュールの商品化は、いつでも可能となったが、川下業者が興味を示す赤外基本レーザーと一体化した光源を提供するには、適切な赤外レーザーの選択とモジュールの合体した開発が必要となる。切削加工等に理想的な光源としての仕様はすでに検討していることから、資金的な余裕あるいは投資があれば一体化光源の開発は可能と言える。

3-3 事業化展開

3-3-1 事業化展開

本開発では、メガオプトが改善してきた赤外基本レーザーを用いて、目標設定としたピコ秒グリーンレーザーおよびサブピコ秒グリーンレーザーのパフォーマンスを実現できた。また、基本レーザーとしての必要条件も明確にすることができた。今後は、よりコンパクト化、高出力化を目指す。物質・材料研究機構の波長変換グループおよび理化学研究所と協力して推進する。また、モジュール化に関しては、株式会社オキサイドがすでに紫外レーザー光源を製造販売していることから、共同で開発する。

3-3-2 実用化目標

世界的な景気の低迷と、日本における半導体加工産業への設備投資が冷え切っている環境で、事業の販売戦略を設定するのは決して容易ではない。また、実際の販売には基本レーザーと一体

化した光源として製品化する必要がある。まずは、海外のレーザーメーカーの基本レーザー(場合によってはファイバーレーザー)を選択し、波長変換モジュールと一体化(アセンブリはメガオプトで可能)した光源として販売戦略を立てる。また、緊密な関係をもつ株式会社オキサイド(SWINGと共に、物質・材料研究機構の認定ベンチャー)は半導体加工評価用の紫外レーザーの製造販売を始めており、共通した顧客が存在するので、協力を得て販売の推進を図る。

次に、国内のレーザー加工装置メーカーである川下業者と、随時ニーズの動向等の情報を得て製品にフィードバックをかけながら、従来品との代換を検討していく。

3-3-3 製品展開

前述したように、緊密な関係をもつ株式会社オキサイドは半導体加工評価用の紫外レーザーの製造販売を始めており、共通した顧客が存在するので、協力を得て販売の推進を図る。

また、オキサイドおよびメガオプトは、米国で最大のレーザー関連ショウケース(Photonic West)やヨーロッパ最大のレーザー関連学会(CLEO Europe)では常にブースを確保し、商品の展示を行い顧客とのコミュニケーションを図っている。顧客との情報交換から波長変換素子として要望する仕様に合わせたモジュールの商品化行う。

さらに、基本レーザーと一体化した光源のプロトタイプを開発し、ブースや加工装置メーカーにおけるデモンストレーションを進める。

付録1 専門用語等の解説

[略字表]

- PP-Mg SLT : periodically poled SLTの略、周期分極反転構造Mg:SLT
- MgSLT : Mg-doped SLTの略、本研究で使用する波長変換素子用非線形光学材料
- SLT : stoichiometric LiTaO₃ (または near-stoichiometric LiTaO₃) の略
- SHG : second harmonic generationの略、光学的第2次高調波発生のこと
- QPM : quasi-phase matching、またはquasi-phase matchedの略、疑似位相整合
- LT : Lithium Tantalate (LiTaO₃) の略、タンタル酸リチウムのこと

[アルファベット]

- M²(エムスクエア) : ビームのガウシアンビームからのずれを表す用語で、理想的なビームでは 1.0 となる。この値は 1 に近いほど好ましく、集光性が良くなる。
- Mg 添加タンタル酸リチウム : タンタル酸リチウムの約 1mol%を MgO で置き換えた結晶で、レーザーの波長を他波長に変換する際の変換効率が非常に良い材料である。

[ア行]

- アブレーション(ablation) : 固体材料に強いレーザー光を照射した時、材料を構成する元素の結合手が切られ、様々な形態(原子、分子、ラジカル、イオン、クラスター等)に分解され爆発的に放出され、材料表面がエッチングされること。

[カ行]

- 疑似位相整合法 : 周期的な分極反転構造で波長変換する方法を疑似位相整合(QPM: Quasi-Phase Matching)法という。

[サ行]

- スミア : 加工熱により樹脂が溶けて、ビアホール内壁に付着して基板内の銅層とスルーホールメッキの電氣的接合を妨げること。
- 積層プリント基板 : 基材である絶縁体で銅箔をサンドイッチした、集積度を高めた基板のこと。

[タ行]

- 炭酸ガスレーザー : 炭酸ガスを発振媒体として使用したレーザーで、波長は主に 9.4~10.6μm が使用されている。

- デブリ(debris)：破片、残骸であるが、本稿では、レーザー加工時に周辺に堆積されるものの意味で使用している。

[ハ行]

- 光第二高調波発生(SHG:Second Harmonic Generation)：非線形光学効果による波長変換のひとつで、入射したレーザー光の2倍の振動数(波長半分)をもつ光(第二高調波)を放射する現象。レーザーの短波長化に利用される。
- ビアホール：積層基板の各銅層をつなぐための穴。穴の内側に銅をメッキして各層間の導通をとる。
- ビア径：ビアホール直径のこと。
- ピコ秒： 10^{-12} 秒のこと。
- フェムト秒： 1×10^{-15} 秒のこと。
- フーリエ限界パルス(フーリエ変換限界パルス)：共振器内の群速度分散(GVD)が完全に補償されたとき、パルス光に含まれる各周波数成分は全て同位相となるため、時間的に最短パルスを示すフーリエ変換限界パルス(TLP:Transform-Limited Pulse)が得られる。光パルスの時間強度波形とスペクトル形状は互いにフーリエ共役の関係にあり、パルス幅 Δt とスペクトル幅 $\Delta \nu$ (周波数領域)の間には、 $\Delta t \cdot \Delta \nu \geq k$ なる不確定性関係が成立する。ここでパルス幅 Δt 、スペクトル幅 $\Delta \nu$ は共に半値全幅(FWHM:Full Width Half Maximum)を示す。kはスペクトルの分布関数に依存し、ガウス型の場合は0.441、sech2型の場合は0.315である。
- プルーム(plume)：噴煙のこと、本稿では、レーザー照射時に加工点からあがる噴煙を指す。
- 分極反転構造：強誘電体の自発分極を反転した構造。分極の方位は、電界をかけることによって反転できる。周期的な分極反転構造を作製すると、効率的なレーザーの波長変換デバイスとして動作する。定比組成タンタル酸リチウムでは、この分極反転電界が従来材料よりも低いため、厚いデバイスを作製するのに有利である。

[マ行]

- 無熱加工：熱の影響を材料にほとんど与えない加工。ピコ秒レーザーではエネルギー密度が高く、レーザー光が材料に照射される時間は、ナノ秒の1/1000である。この間に材料中を熱が伝わる距離は、銅の場合で $0.1 \mu\text{m}$ 程度であり、材料への熱の影響はほとんど無い。

[ヤ行]

- 誘電破壊：高いパワー密度のレーザー光(電磁波)が照射されることによって誘電体に生じるアバランシェ(電子雪崩現象)による破壊現象を指す。レーザーダメージともよばれ、通常は破壊発生の閾値パワー密度が存在する。