

# Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発とその増幅及び加工応用

2033109 矢津田匠海

主任指導教員：戸倉川正樹 指導教員：米田仁紀

## 1. はじめに

波長 2  $\mu\text{m}$  帯のレーザーは、水やポリマー材料に吸収を有していることから医療用レーザーメス[1,2]やポリマー加工[3]の光源として用いることができる。また 1.5  $\mu\text{m}$  帯の光と同様、1  $\mu\text{m}$  に吸収を有する Si で高い透過率を示すことからステルスダイシング[4]や、インゴットからウェハを切り出す KABRA プロセス[5]といった Si 材料の 3 次元加工用の光源として用いることが可能である。加えて Si と同様、半導体材料として用いられる Ge が 1.5  $\mu\text{m}$  帯に吸収を有し、2  $\mu\text{m}$  帯を透過することから[6]、Ge の 3 次元加工用の光源としても用いることができる可能性がある。また中赤外には分子の指紋領域と呼ばれる、多種の分子の吸収線がある領域(3-20  $\mu\text{m}$ )が存在している。1  $\mu\text{m}$  や 1.5  $\mu\text{m}$  といった従来のレーザーを用いた波長変換では、酸化物系非線形結晶を使用した場合、長波長側の透過端が 2.5  $\mu\text{m}$  までしかないため波長 5  $\mu\text{m}$  以上の中赤外光の発生は難しい。また、非酸化物系非線形結晶を使用した場合、短波長側の透過端が 0.6-1  $\mu\text{m}$  にあるため 1  $\mu\text{m}$  や 1.5  $\mu\text{m}$  のレーザーでは 2 光子吸収過程との競合が起こり、中赤外光発生の効率が悪くなる[7,8,9]。しかし 2  $\mu\text{m}$  帯のレーザーの場合、GaAs 等の非酸化物系非線形結晶における 2 光子吸収の影響が小さいため、これらを用いて波長 5  $\mu\text{m}$  以上の中赤外光の発生が可能である[10]。本研究では、ポリマー材料や半導体材料の加工及び 3-8  $\mu\text{m}$  の中赤外光への波長変換を行うための光源として、パルスエネルギー  $\mu\text{J}$  以上の波長 2  $\mu\text{m}$  帯短パルス光源の開発を行った。利得媒質としては 2  $\mu\text{m}$  帯に広帯域な利得を持ち、高出力なものが容易に手に入る 800 nm 帯のレーザーダイオードを励起光源として利用することができる Tm<sup>3+</sup>が添加されたダブルクラッドファイバーを利用した。また、光源の実用性を高めるため、励起光や増幅時の信号光の導入をファイバーの融着によって行うことで、自由空間を極力減らした構成を選択した。

## 2. 原理

### 2.1 Tm レーザー

波長 2  $\mu\text{m}$  帯で動作するレーザーとしては Ho<sup>3+</sup>レーザーや Cr<sup>2+</sup>:ZnS/ZnSe レーザー、Tm<sup>3+</sup>レーザー等が挙げられる。Ho<sup>3+</sup>は 2.0-2.1  $\mu\text{m}$  帯に利得を有し、主に 2  $\mu\text{m}$  帯 Tm レーザーによる励起が行われる。Cr<sup>2+</sup>:ZnS/ZnSe は 1.8-3.4  $\mu\text{m}$  に広帯域な利得を有しており、1.5  $\mu\text{m}$  帯の Er ファイバーレーザー等で励起される。これらに対して Tm<sup>3+</sup>は図 2-1 のように 1.7-2.1  $\mu\text{m}$  に比較的広帯域な利得を有しており、また市販の高出力な 800 nm 帯レーザーダイ

オードを励起光源として利用した高出力・高効率動作が可能であるという利点を持つ。

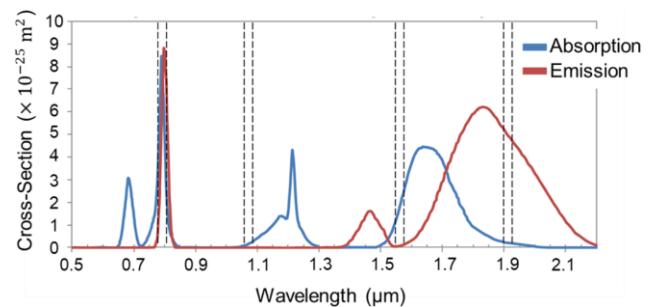


図 2-1. Tm 添加ファイバーの吸収・誘導放出断面積[4]

### 2.2 Q スイッチ法

Q スイッチ法とは、光共振器の Q 値を急激に変動させることで高エネルギーな短パルス光を得る手法である[5]。図 2-2 に示されるように Q スイッチ法では、まず最初に共振器の損失を大きい状態(AB 区間)にし、非発振状態で反転分布を大きくする。その後共振器の損失を小さくすることで(BC 区間)、蓄えたエネルギーを短時間に放出させる(CD 区間)。このような動作によって高エネルギーな短パルス光を得ることができる。

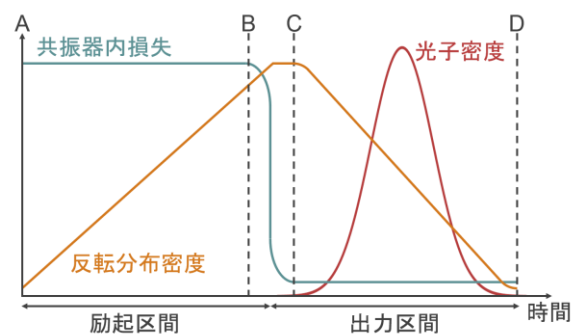


図 2-2. Q スイッチ法における各パラメータの時間変化

### 2.3 音響光学変調器

音響光学変調器(Acousto-optic Modulator: AOM)は媒質内に音響波を発生させることで、屈折率の波を作り出しそれによって入射光を回折させる光学素子である。図 2-3 左に AOM の構造概要を示す。RF 信号源から出力された信号によってトランスデューサーが振動し、音響波が発生する。その音響波が光学媒質内に入ると回折格子のように作用する屈折率を持った波が生じる。本研究では図 2-3 右のように一次回折光を用いて AOM が ON

の時にのみ共振器が構成されるようにしている。本研究で用いた AOM は回折効率が 9 割程度のものであり、0 次光側には AOM が ON の状態でも 1 割程度の抜け光が発生している。この抜け光による発振を避けるため、より深い変調を得ることのできる 1 次光で共振器を構成することとした。

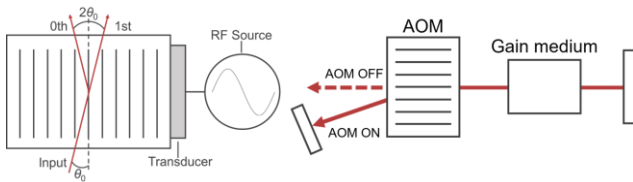


図 2-3. (左)音響光学変調器の構造と(右)Q スwitching 機構

### 3. Q スwitch Tm ファイバーレーザーの開発

#### 3.1 実験構成

図 3-1 に実験構成を示す。

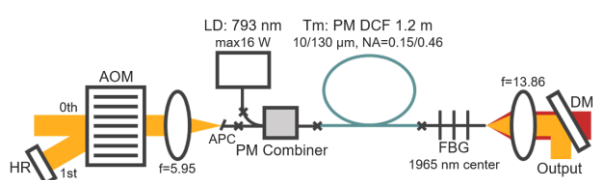


図 3-1. Q スwitch Tm ファイバーレーザーの実験構成

利得媒質として長さ 1.2 m の Tm 添加 PM ダブルクラッドファイバー(コア径 10  $\mu\text{m}$ 、クラッド径 130  $\mu\text{m}$ 、NA=0.15)を使用し、PM 励起コンバイナーを通して波長 793 nm、最大出力 16 W のレーザーダイオードを用いて励起した。PM 励起コンバイナーからの出射光はレンズでコリメートし、AOM に入射させ、その 1 次回折光を HR ミラーでフィードバックさせている。共振器はこのフィードバック光と、利得ファイバーの逆端面に融着されたファイバーブラッググレーティング(FBG)からのフィードバック光で構成している。また、フレネル反射によるファイバーへのフィードバックを防ぐため、PM 励起コンバイナーには APC コネクタ処理のされた PM ファイバーを融着し、FBG の端面には約 9°の角度でクリーブを行っている。また、FBG からの出射光に対して 2  $\mu\text{m}$  を反射し、793 nm の光を透過するダイクロイックミラーを用いることで残存励起光のカットを行っている。

#### 3.2 実験結果と考察

##### 3.2.1 出力の繰り返し周波数依存性

AOM の繰り返し周波数を 30 kHz に設定し、励起パワーを変化させたときの出力を図 3-2 に示す。発振閾値 1.7 W、スロープ効率 27%での発振が確認された。

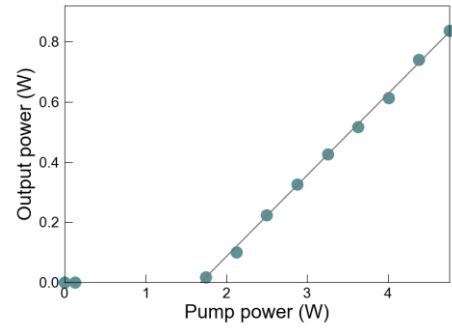


図 3-2. 平均出力の励起パワー依存性

次に励起パワーを 4.7 W で一定にし、AOM の繰り返し周波数を 10~100 kHz の間で変化させたときの平均出力とパルス幅を図 3-3 に示す。

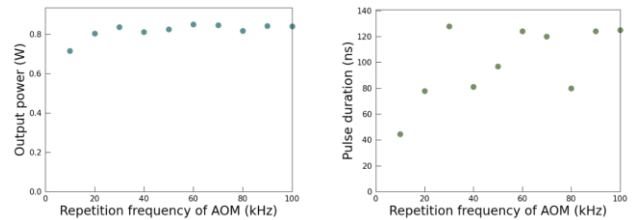


図 3-3. (左)平均出力と(右)パルス幅の AOM 繰り返し周波数依存性

まず平均出力の低繰り返し周波数側を見ると、30 kHz 以下において平均出力が繰り返し周波数の低下とともに減少していることが読み取れる。これは上準位に励起されている Tm<sup>3+</sup>イオンの数が増えることで ETU や非放射緩和が起こりやすくなることで誘導放出以外のエネルギー消費が増えることによると考えられる。次に高繰り返し周波数側を見ると、40 kHz や 50 kHz、80 kHz において平均出力がわずかに低下していることが確認できる。次にパルス幅についてみると、通常は繰り返し周波数を下げると、規格化された励起パワーが増加することによってパルス幅は短くなる。しかし図 3-3 右では 10~30 kHz 以外ではそうになっていないことが確認できた。このような理論値からの外れが起きている高繰り返し周波数側のパルス列を確認すると、図 3-4 左のように AOM の繰り返し周波数と実際のパルス出射の繰り返し周波数が一致していないことが読み取れた。

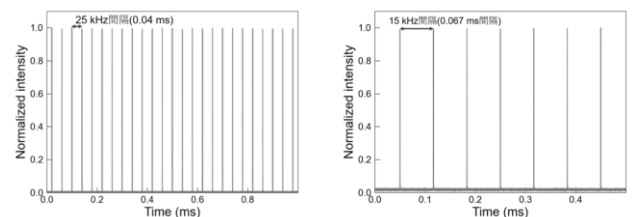


図 3-4. (左)50 kHz 時、(右)低励起 30 kHz 時のパルス列

この繰り返し周波数の不一致は、繰り返し周波数を上げ、パルスの出射間隔が短くなったことで次のパルス出射タイミングまでに十分にエネルギーを蓄えることができなくなったことが原因であると考えられる。これが原因であれば励起パワーを変化させることで、AOM の繰り返し周波数とパルス出射間隔の不一致が起こる範囲に変化が起こるはずである。実際に励起パワーを 3.2 W に低下させて測定を行うと、繰り返し周波数とパルス出射間隔が一致していた 30 kHz においても図 3-4 右のように出射間隔の不一致が起こることが確認できた。このことから、図 3-3 における平均出力とパルス幅の理論値からの外れは実際の繰り返し周波数が低下することによって、誘導放出以外でのエネルギー消費の増加や閾値に対して規格化された励起パワーが増加していることによって起きていると考えられた。

### 3.2.2 スペクトル

4.7 W 励起、AOM 繰り返し周波数 30 kHz 時のスペクトルを図 3-5 に示す。測定の結果、FBG の中心周波数 1965 nm に一致した中心周波数のスペクトルが確認された。

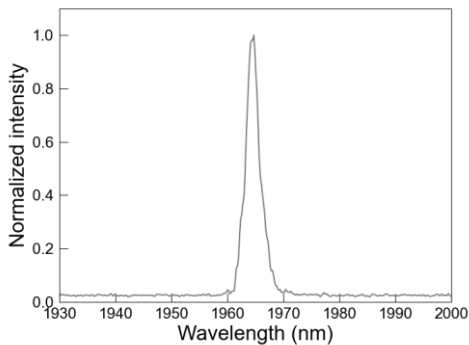


図 3-5. 30 kHz - 4.7 W 励起時のスペクトル

## 4. Q スイッチレーザーの増幅

### 4.1 コア径 25 μm ファイバーによる後方励起増幅

#### 4.1.1 実験構成

コア径 25 μm の Tm ファイバーを用いた Q スイッチレーザーの後方励起増幅の実験構成を図 4-1 に示す。

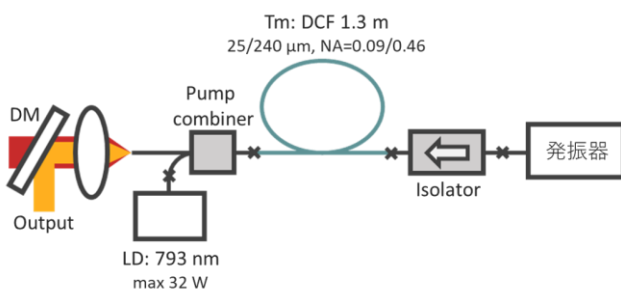


図 4-1. コア径 25 μm ファイバーによる後方励起増幅実験構成

増幅用のファイバーとして Tm 添加ダブルクラッドファイバー (コア径 25 μm、クラッド径 240 μm、NA=0.09/0.46) を使用し、コア径 25 μm の励起コンバイナーを用いて波長 793 nm のレーザーダイオードで後方励起した。また、励起コンバイナーの出射側端面はフレネル反射による規制発振を防ぐため、約 9° のアングルクリーブを行った。

### 4.1.2 実験結果と考察

#### 4.1.2.1 平均出力とパルス波形

AOM の繰り返し周波数を 30 kHz と 10 kHz に設定し、励起を 4.7 W に固定した発振器からの出力を増幅した際の平均出力を図 4-2 に示す。

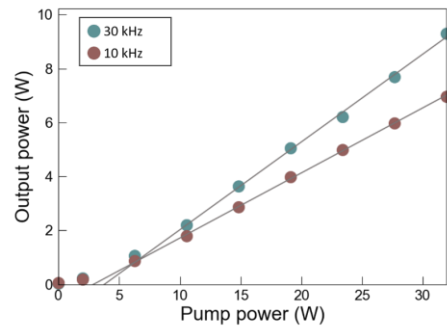


図 4-2. 平均出力の励起パワー依存性

繰り返し周波数 30 kHz 時と 10 kHz 時のスロープ効率はそれぞれ 33%、24% となり、32 W 励起時に最大平均出力 9.3 W と 7.0 W が得られた。次に 30 kHz と 10 kHz での増幅前後のパルス波形を図 4-3、図 4-4 に示す。

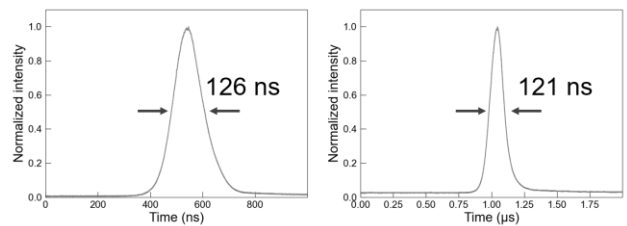


図 4-3. 繰り返し周波数 30 kHz でのパルス波形 (左: 増幅前、右: 増幅後)

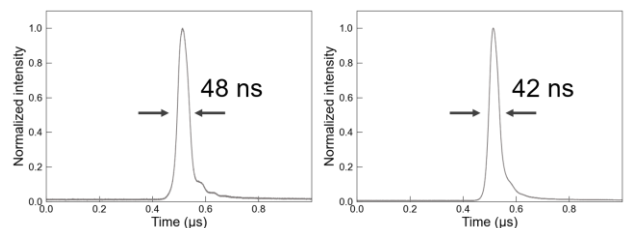


図 4-4. 繰り返し周波数 10 kHz でのパルス波形 (左: 増幅前、右: 増幅後)

図 4-3、図 4-3 から 30 kHz、10 kHz とともにパルス幅が短くなっていることが確認できた。これは利得飽和によってパルスの後縁側の増幅率が小さくなったことによって起きていると考えられる。またこれらの結果から求めたピークパワーは図 4-5 のようになっており、最大ピークパワーは 30 kHz で 2.6 kW、10 kHz で 16.76kW となった。

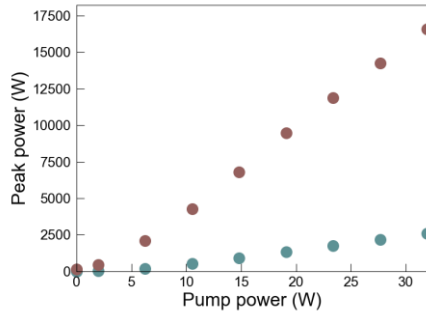


図 4-5. ピークパワーの励起パワー依存性

#### 4.1.2.2 スペクトル

次に増幅前後のスペクトルを図 4-6 に示す。

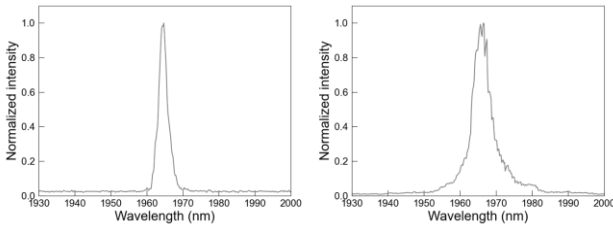


図 4-6. 繰り返し周波数 30 kHz におけるスペクトル (左: 増幅前、右: 増幅後)

図 4-6 から増幅後には中心周波数が長波長側へ移動していること、スペクトルの拡大が起きていることが確認できた。まず中心周波数の移動については  $Tm$  の短波長側には再吸収が存在しており、これが損失として働いたため、短波長側よりも長波長側が効率良く増幅され、結果中心周波数が長波長側へシフトしたものと考えられる。また、スペクトルの拡大については自己位相変調によって起きている可能性が考えられる。

#### 4.1.2.3 ビーム品質 $M^2$

ナイフエッジ法を用いて測定したビーム径とそのフィッティング結果を図 4-7 に示す。測定結果から求められた  $M^2$  は 1.95 となった。

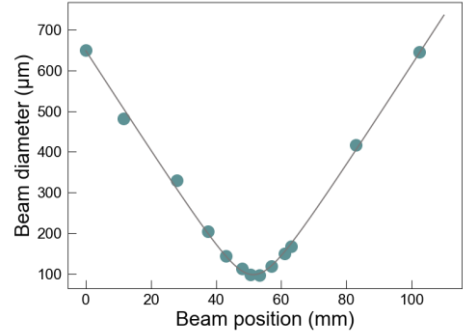


図 4-7. ビーム品質

## 4.2 コア径 12 $\mu m$ ファイバーによる前方励起増幅

### 4.2.1 実験構成

コア径 12  $\mu m$  の  $Tm$  ファイバーを用いた Q スイッチレーザー前方励起増幅の実験構成を図 4-8 に示す。

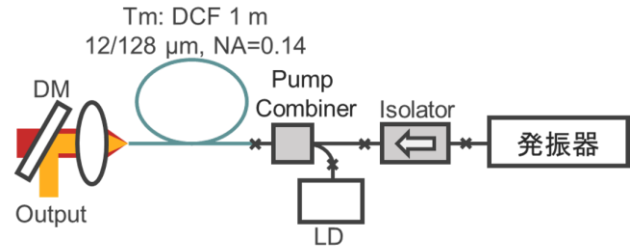


図 4-8. コア径 12  $\mu m$  ファイバーによる前方励起増幅実験構成

### 4.2.2.1 平均出力とパルス波形

AOM の繰り返し周波数を 10 kHz と 30 kHz に設定し、励起を 4.7 W に設定した発振器からの出力を増幅した際の平均出力を図 4-9 に示す。

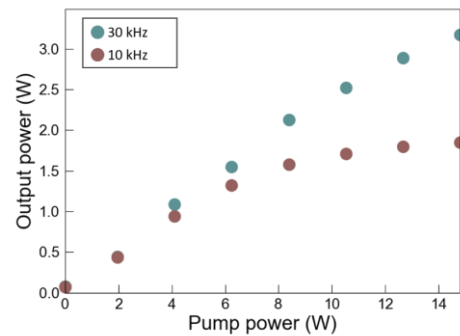


図 4-9. 平均出力の励起パワー依存性

平均出力を見ると、30 kHz、10 kHz とともに励起パワーを高くすると出力の増加が緩やかになることが確認された。これは  $Tm^{3+}$  は 2  $\mu m$  帯のレーザー動作を行う準位の傍に多数の準位が存在しており、繰り返し周波数の低下や励起光強度の増大によって励起イオン数が上昇した結果、ETU や ESA の発生確率が上昇したことによって起きていると考えられた。次に 30 kHz と 10 kHz での増幅前後のパルス波形を図 4-10、図 4-11 に示す。

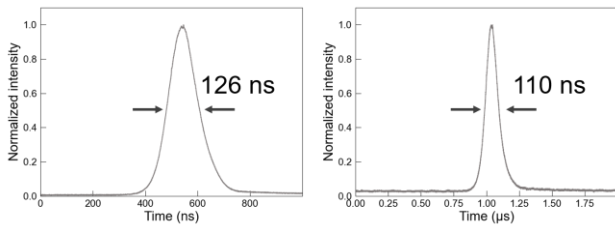


図 4-10. 繰り返し周波数 30 kHz でのパルス波形  
(左: 増幅前、右: 増幅後)

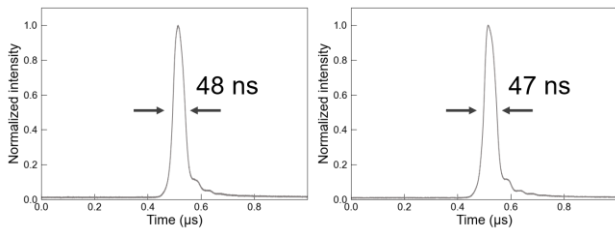


図 4-11 繰り返し周波数 10 kHz でのパルス波形  
(左: 増幅前、右: 増幅後)

コア径 25  $\mu\text{m}$  のファイバーを用いた増幅実験の結果と同様に、利得飽和による影響と考えられるパルス波形の変化が確認された。

## 5. 波長 2 $\mu\text{m}$ 帯短パルスレーザーを用いた加工

この章では 3 章および 4 章で作成した発振器と増幅器からの出力を用いてポリマー材料やシリコン材料の加工を行った結果について述べる。

### 5.1 実験構成

材料のレーザー加工に用いた実験構成を図 5-1 に示す。

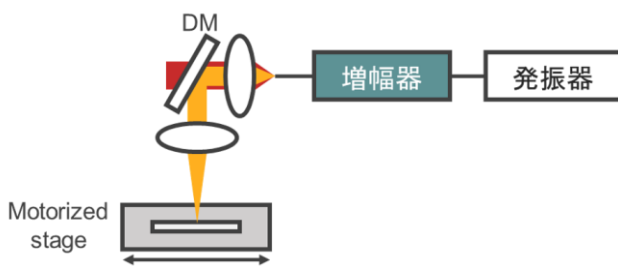


図 5-1. レーザー加工実験構成

増幅器からの出力をコリメートし、DM で残存励起光をはじいた後にレンズで集光し、集光点に加工対象を置く形で加工を行った。また、加工対象に線を引くような形で加工を行う際は、加工対象をステップモーター式のステージの上に載せ、ステージを移動させた。

### 5.2 実験結果と考察

#### 5.2.1 ポリマー加工実験結果

レーザーの出力とステージの送り速度を変化させな

がら、厚さ 0.3 mm のポリアセタールとポリプロピレンの加工を行った結果をそれぞれ図 5-2 と 5-3 に示す。レーザーの出力は 0.9 W、1.1 W、2.2 W の 3 種類を、ステージの送り速度は 0.125 mm/s、0.25 mm/s、0.5 mm/s の 3 種類を使用した。

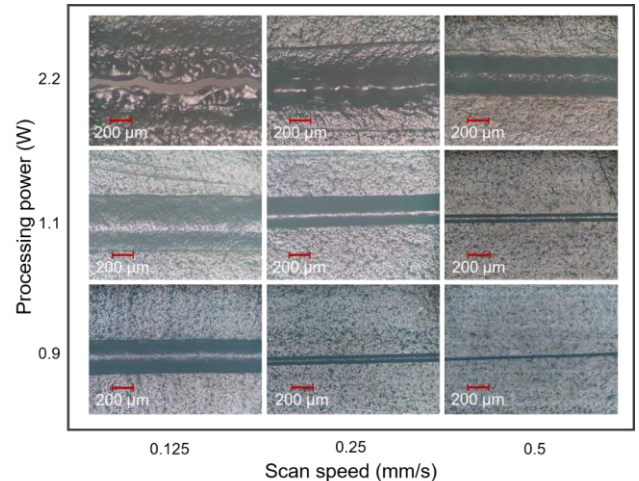


図 5-2. ポリアセタールの加工結果

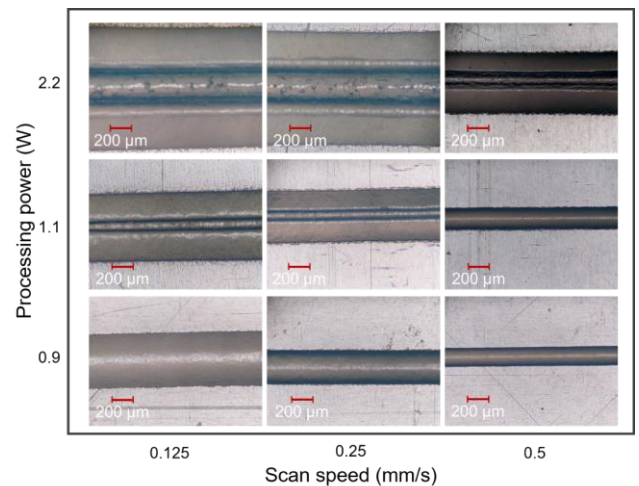


図 5-3. ポリプロピレンの加工結果

[0.9 W, 0.5 mm/s]の組み合わせ時に最小加工径 25  $\mu\text{m}$ 、190  $\mu\text{m}$  がポリアセタールとポリプロピレンでそれぞれ得られた。また、ポリアセタールにおいて 0.5 mm/s の送り速度を使用した場合はこれ以下の出力パワーでは加工痕が確認されなかった。また、[2.2 W, 0.125 mm/s]の組み合わせ時ではポリアセタールを切断できることが確認できた。加えてポリプロピレンで[2.2 W, 0.125 mm/s]、[2.2 W, 0.25 mm/s]の組み合わせを使用した際は加工時に一度穴が開き、その後熱で溶けたものが流れることで切断痕が繋がることが確認できた。次に厚さ 0.5 mm のポリプロピレン、ポリスチレン、ポリカーボネートを 2 枚重ねて行った溶着実験の結果を表 5-1 に示す。

表 5-1. ポリマー材料の溶着実験結果

	ポリプロピレン	ポリスチレン	ポリカーボネート
ポリプロピレン	○	△	△
ポリスチレン	×	○	△
ポリカーボネート	×	○	○

結果としては、全ての材料で同種間の溶着が可能であり、ポリスチレン・ポリカーボネート間では異種材料溶着も可能であった。また、ポリプロピレンは異種材料との溶着を行うことはできなかった。これはポリマーの溶着強度は熔融後の分子鎖の絡まりによって決まるが、材料間の粘度差が大きいと熔融時に拡散が起きづらく[11]、ポリプロピレンが結晶性樹脂であるため、非晶性樹脂である他の材料と粘度差が大きかったことによると考えられる。

### 5.2.2 半導体材料加工実験結果

次に繰り返し周波数 10 kHz、平均出力 7W、ピークパワー 16.6 kW のパルスで Si ウェハ裏面に集光し、4 μm/s でステージを掃引してステルス加工を行った結果を図 5-4 に示す。また、同パルスを Ge ウェハ裏面に集光し、63 μm/s でステージを掃引してステルス加工を行った結果を図 5-5 に示す。表面部分には加工痕が存在しないステルス加工ができていることが確認できる。

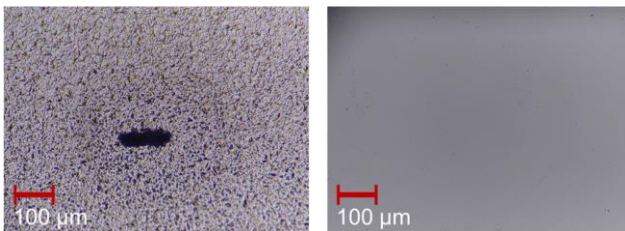


図 5-4. Si ウェハの加工結果(左: 裏面, 右: レーザー入射面)

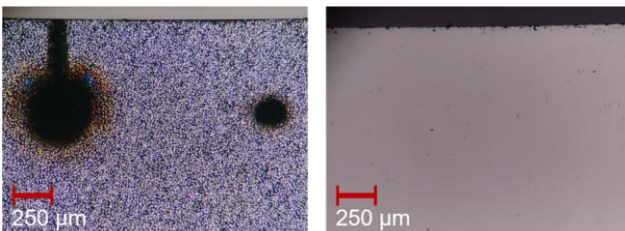


図 5-5. Ge ウェハの加工結果(左: 裏面, 右: レーザー入射面)

## 5. まとめ

本研究では、ポリマー材料やシリコン材料の加工及び中赤外光発生への応用を目指し、高エネルギーな短パルス光源として Q スイッチ Tm ファイバーレーザー発振器の開発とその増幅を行った。発振器の開発では繰り返し周波数 30 kHz において平均出力 840 mW、パルス幅 126 ns のパルスが得られた。また繰り返し周波数 10 kHz に

おいて最大ピークパワー 1.6 kW、パルス幅 44.5 ns のパルスが得られた。増幅実験では、繰り返し周波数 30 kHz において最大平均出力 9.3 W、パルス幅 121 ns のパルスが、繰り返し周波数 10 kHz において最大ピークパワー 16.7 kW のパルスが得られた。また、この光源を用いてポリアセタールやポリプロピレン等のポリマー材料の加工を行い、表面改質、切断が可能であることを確認した。加えて、Si ウェハ、Ge ウェハ共にピークパワー 16.7 kW のパルスを使用することで裏面の加工が可能であることを確認した。

## 参考文献

- [1] Nathaniel M Fried, *Lasers Surgery and Medicine*, **36**, 52-56(2005)
- [2] Nathaniel M Fried, *Journal of Endourology*, **19**, 25-31(2005)
- [3] Ilya Mingareev, et al., *Optics & Laser Technology*, **44**, 2095-2099(2012)
- [4] ディスコ, "レーザーステルスダイシングアプリケーション", <https://www.disco.co.jp/jp/solution/library/laser/stealth.html> (2022.01.17 参照)
- [5] ディスコ, "KABRA プロセス", <https://www.disco.co.jp/kabra/> (2022.01.17 参照)
- [6] ソニー, 戸田淳, 物理情報取得方法および物理情報取得装置並びに半導体装置, 特許第 4984634 号, 2012-05-11
- [7] ファイバーラボ, "光学結晶製品一覧", [www.fiberlabs.co.jp/products-list/laser-opt-compo-index/optical-crystal/](http://www.fiberlabs.co.jp/products-list/laser-opt-compo-index/optical-crystal/) (2022.01.17 参照)
- [8] カンタム・ウシカタ, "非線形結晶", [www.altechna-kantum.com/%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E7%B5%90%E6%99%B6/](http://www.altechna-kantum.com/%E9%9D%9E%E7%B7%9A%E5%BD%A2%E7%B5%90%E6%99%B6/) (2022.01.17 参照)
- [9] 角野広平, *化学と教育*, **63**, 12-15(2015)
- [10] Qiang Fu, University of Southampton, 博士論文(2020)
- [11] Foram Dave, et al, *Polymers*, **13**, 675(2021).