



M. Tokurakawa

# 波長 2 $\mu\text{m}$ 帯ナノ秒 / フェムト秒 光パルス発振器・増幅器の開発 およびポリマー、シリコン材料加工応用

戸倉川 正樹\*

キーワード：加工用ナノ秒 / フェムト秒レーザー、レーザー加工、2  $\mu\text{m}$  レーザー

## 1. 研究の目的と背景

レーザー加工は従来の切削加工では不可能な精度、速度、自由度を可能とし、航空機、自動車、医療機器、スマートフォンなど最先端のものづくりの現場において必要不可欠な存在となっている。近年、我が国の製造業は依然として高い国際競争力を維持してはいるものの、海外との競争は激化している。またレーザー加工機の心臓部であるレーザー装置については、我が国は CO<sub>2</sub> レーザーにおいては依然として世界トップの技術を有しているが、近年ファイバーレーザーや固体レーザーへの置き換えが進み、海外の後塵を拝している。我が国が製造業において高い国際競争力を維持し発展を続けていくには、より高付加価値な製品を提供していくことが必要であり、レーザー装置や加工技術はそのための基幹技術となる。

現在高精度なレーザー加工には主として高出力・高効率・高集光性を有した波長 1  $\mu\text{m}$  帯 Yb レーザーやその高調波が用いられているが、従来とは異なる性質を有す新材料開発も日々進められており、対象物質や目的に応じて最適なレーザー波長を選択することは有効であり、その為の新しい光源技術が必要とされている。例えば短波長では我が国は青色(400-460 nm) LD の独自の技術を有しており、最近ではファイバー結合型の 1 kW 出力の製品も開発されている。銅材は古くからある材料であるが今後電気自動車のモーターなどの部材として一層の需要の高まりが予想されるが、Yb レーザーでは吸収が弱く加工が難しいが 600 nm 付近から急激に吸収が増加するため高出力な青色 LD により加工が可能と考えられる。長波長においても国内企業より Er:ZBLAN ファイバーを利用した波長 2.8  $\mu\text{m}$  帯で動作可能な 20 W 近い高出力のファイバーレーザーが市販化されており、同じく Yb レーザーでは難しいガラスや樹脂の加工応用に利用されている。

長波長帯のレーザーの中でも特に波長 2  $\mu\text{m}$  帯 Tm レーザーは大きな注目を集めている。応用面からみると 2  $\mu\text{m}$  光は前述の 2.8  $\mu\text{m}$  光と同様に線形吸収によるポリマー材料の加工が可能であり(吸収係数は 1 桁以上低い値となる)、2 光子吸収を用いたシリコンウェハの 3 次元加工への応用も期待される。シリコン以外にも Ge 系の半導体では現状の 1.5  $\mu\text{m}$  帯レーザー光では線形吸収のため 3 次元加工が

難しいが、2  $\mu\text{m}$  光を用いると透明となり 3 次元加工が可能と考えられる。医療応用においては生体組織に対して適切な侵入深度の下、血液の凝固も作用を伴う、精密で出血の少ない手術への応用が期待されている<sup>1)</sup>。また実用性を考えると、Tm レーザーは 0.8  $\mu\text{m}$  帯のレーザーダイオードによる直接励起によって、交差緩和過程をとらなう量子効率<sup>2)</sup> の高効率・高出力なレーザー動作が可能であり、連続発振ファイバーレーザーやフェムト秒増幅器では平均出力 1 kW が報告されている<sup>2)</sup>。また扱い易いシリカファイバー中を低損失に伝搬可能で空冷動作も可能であり、現在主流の Yb ファイバーレーザーと同様にコンパクトでメンテナンス性に優れた光源とすることが可能である。

本研究ではナノ秒/フェムト秒領域での高エネルギーな波長 2 $\mu\text{m}$  帯パルス光源による加工応用を目指した。新規のフェムト秒/ナノ秒発振器を多数開発し、ナノ秒領域では増幅器により高エネルギー化を果たし、各種加工実験を実施した。本稿ではその詳細と展望について報告する。

## 2. 全正常分散フェムト秒ファイバーレーザーの開発

ファイバーレーザーはその導波路構造と長い有効作用長から 30dB を超える高い利得が得られ、高効率で高出力なレーザー動作が可能である。しかし同時に強い非線形光学効果も発生し、特にソリトン領域の超短パルスレーザーでは nJ を超えるエネルギーを有するフェムト秒パルス発生は困難であった。近年これを克服すべく、共振器の分散値を制御し非ソリトンの全正常分散としたモード同期ファイバーレーザーが開発され、波長 1  $\mu\text{m}$  帯では大口径 Yb ファイバー技術と併用され 1  $\mu\text{J}$  以上のパルスエネルギーが実現されており、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> レーザーを超える高ピークパワー動作が実現されている。これは全正常分散レーザーでは光パルスは常に正チャープしており、瞬時光強度が抑制され、またパラボリック形状のパルスを形成し強い非線形光学効果(B 積分値 $\gg\pi$ )を受けても高次分散の発生を抑制できることに起因する。しかし波長 2  $\mu\text{m}$  帯では一般的なシリカファイバーは材料分散によって大きな異常分散を有しており、上述の全正常分散動作は難しかった。

本研究ではシリカガラスではなくフッ化物ガラス

\* 電気通信大学 レーザー新世代研究センター 准教授

ZBLAN( $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $LaF_3$ - $AlF_3$ - $NaF$ )ファイバーを利用することによって、波長  $2\mu m$  帯での全正常分散モード同期レーザーによる高エネルギー動作を可能とし、フェムト秒レーザー加工を行うことを目的とした。

まず本研究で利用した ZBLAN ファイバーの特徴について述べると、ZBLAN ファイバーは波長 $\sim 4\mu m$  帯まで光を透過できることから $\sim 3\mu m$  帯中赤外レーザーに使用され、またフォノンエネルギーが低いことから可視域の Pr や Er 添加ファイバーレーザーにも利用されてきた。機械強度が低く潮解性を有していることから、取り扱い外難しいと考えられてきたが、近年その品質も改善し、製品への利用もなされるようになってきている。本研究において特に重要な特徴は、その分散特性であり図 1 に示すように ZBLAN ファイバーは波長  $2\mu m$  帯でシリカガラスに比べて遥かに小さな材料分散を示し、コアの開口数を 0.2 程度とすると、ファイバーコア径を直径 $\sim 6.4\mu m$  以下とすることによって、構造分散によりトータルの分散値を正常分散とすることが可能となる。

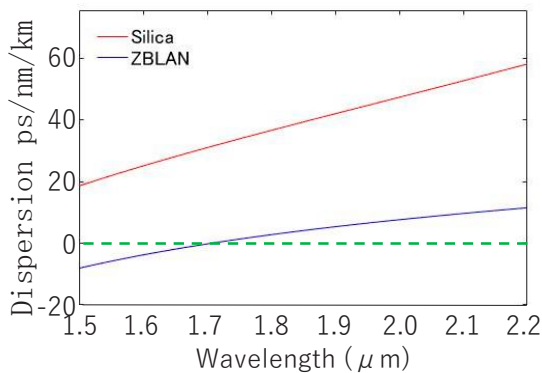


図 1. シリカガラスと ZBLAN ガラスの材料分散の比較

実験装置の概略を図 2 に示す。共振器は図中半時計回りのリング共振器を採用した。利得ファイバーには長さ 1.3 m, Tm 添加濃度 10,000 ppm, コア径  $6.2\pm 0.2\mu m$ , NA 0.2 の Tm:ZBLAN ファイバーを採用し、計算値で  $19040\pm 6160 fs^2$  の正常分散を有している。実効的なモード径は  $7.4\mu m$  であり一般的なシングルモードファイバーと同程度である。両端面には熱的影響を緩和するため同コ

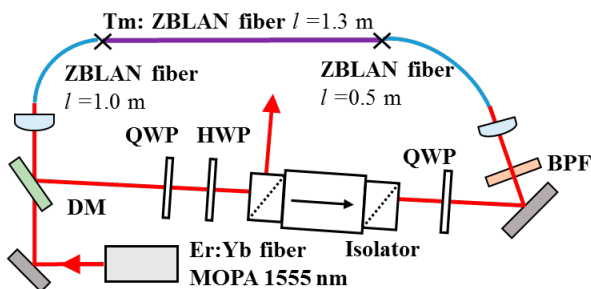


図 2. 全正常分散 Tm:ZBLAN ファイバーレーザー実験図

アサイズ、NA を有する無添加 ZBLAN ファイバーを機械的に接合し(接合損失 $\sim 0.3dB$ )、その端面はアングル研磨されておりフレネル反射による寄生発振も抑制している。励起光源には  $1.55\mu m$  の Er:Y fiber laser を用いたが  $800 nm$  帯の LD を用いることも可能である。自由空間中には  $\lambda/4$  板、 $\lambda/2$  板、アイソレーター(PBS-FR-PBS)、 $\lambda/4$  波長板を挿入し、波長板の角度を調整することによって非線形偏波回転による変調機構が発生しパルス発振が得られる。このとき全正常分散レーザーではソリトンパルスとしての定常状態が存在しないため、バンドパスフィルター(中心波長  $1870 nm$ , バンド幅  $35 nm$ , 最大透過率  $84\%$ )を用いることによって、共振器一周毎のスペクトル形状を定常化し、安定したモード同期発振を得ることが可能となる。レーザー出力はアイソレーターの入力側の PBS より取り出しており、その出力特性を図 3 に示す。励起出力が  $270 mW$  を超えたところからモード同期発振が得られ。出力は励起光とともに増加し、励起出力  $410 mW$  時に最大出力  $64 mW$  において図 4 に示す最大スペク

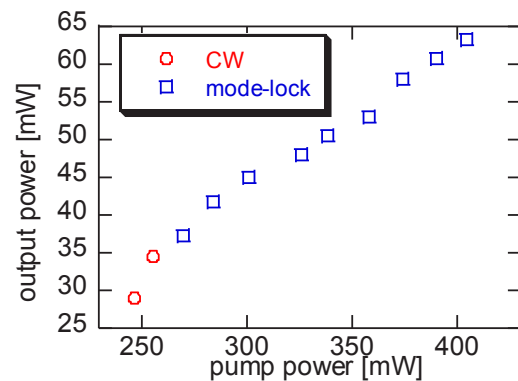


図 3. 全正常分 ZBLAN ファイバーレーザー出力特性

トル幅  $80 nm$  が得られた。このときスペクトル形状はキャットイヤー(猫の耳)型と呼ばれる全正常分散モード同期レーザーの特徴を示した。繰り返し周波数は  $75 MHz$  でありパルスエネルギーは  $0.9 nJ$  である。最大出力時に測定された自己相関波形を図 5(a) に示す。

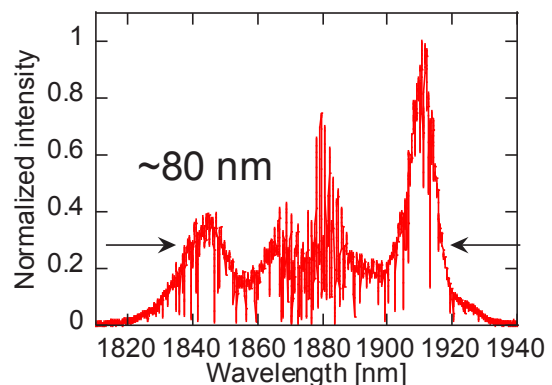


図 4. モード同期発振スペクトル

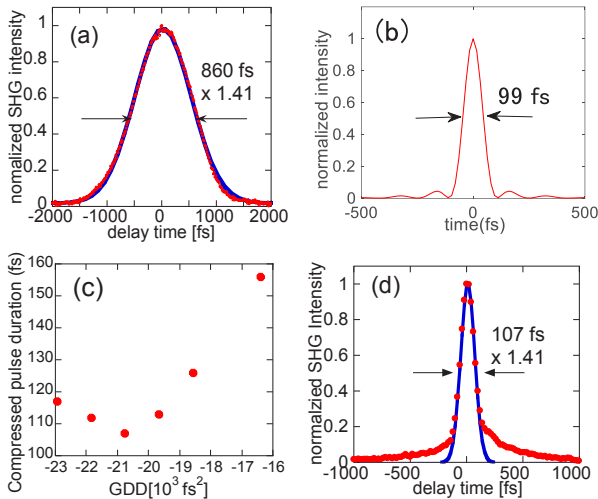


図 5. (a)共振器からの直接出力の自己相関波形。(b) スペクトルから換算されるフーリエ限界パルス。(c)分散補償量と圧縮パルス幅。(d)圧縮後の最短パルス幅

パルス幅は 860 fs と見積もられ、スペクトルから換算されるフーリエ限界パルス幅の 99 fs [図 5(b)] よりも長く、チャープしている事がわかる。反射型の回折格子を用いて外部圧縮を試みたところ、図 5(c) に示すようにパルス幅の可変性が得られ、補償分散量を  $-21000\text{fs}^2$  としたとき最短パルス幅 107 fs が得られた [図 5(d)]。このときピーク光強度は数 kW 程度と見積もられる。

本研究成果は波長  $2\mu\text{m}$  帯で初となる全正常分散モード同期レーザー動作である<sup>3)</sup>。得られているパルスエネルギーは約 1 nJ と未だ低いが、これは使用しているファイバーの分散量が小さすぎるためである。数値計算によると分散量を最適化すれば同構成のレーザーより 10 nJ 以上の出力得られることが分かった。現在これを種子光源とした増幅器の開発を進めている。

### 3. ナノ秒高エネルギーファイバーレーザーの開発

加工対象物や加工内容によっては、パルス幅はナノ秒でも十分であり、より高いパルスエネルギーを有していることが求められる。Q スイッチレーザーはモード同期レーザーに比べて遥かに高いパルスエネルギーを得ることを可能とするが、共振器長の長いファイバーレーザーでは得られるパルス幅は数十 ns に制限されてきた。本研究では音響光変調器(AOM)の一次回折光を利用して、共振器中の寄生発振を抑制し、より高い利得のもと非線形光学効果も利用することによって、パルス幅数ナノ秒の Q スイッチ Tm ファイバーレーザーの開発を行った。

開発したレーザー装置概要を図 6 に示す。共振器はファブリーペロー型であり、利得ファイバーは偏波保持型ダブルクラッド Tm 添加シリカファイバー(コア径  $10\mu\text{m}$ 、クラッド径  $130\mu\text{m}$ ) が用いられ、波長 793 nm マルチモー

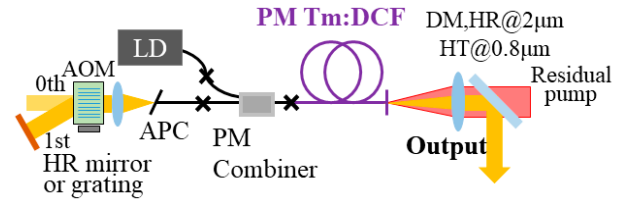


図 6. 波長可変ナノ秒 Q スイッチレーザー概略

ド LD によって偏波保持励起コンバイナーを通して励起されている。励起コンバイナーの片短面には APC コネクタを取り付けた PM ファイバーを融着しフレネル反射による寄生発振を抑制している。APC からの出射光を非球面レンズでコリメートし音響光学変調器(AOM)を用いて AOM が ON 時に 1 次回折光がファイバーへ再結合され、Q スイッチレーザー動作に必要な変調を与えている。利得ファイバーのもう一方の端面は垂直にクリーブされ、フレネル反射による約 3.6% 反射の取り出しポートとして使用されている。このとき出力にはわずかなら残存励起光が含まれているためダイクロイックミラーによって分離している。ここで AOM の 1 次回折光を用いる利点について説明すると、(i) 0 次回折光を利用する場合と比較し、AOM で回折されなかった透過成分がファイバーに再結合されないため、損失変調深さを大きくでき、より強く寄生発振を抑制可能である。よって多くの非飽和利得、すなわち短パルス性と高エネルギー性を得ることを可能としている。(ii) AOM は偏光依存の回折効率と周波数シフトを与えるため、軸を偏波ファイバーの軸と合わせることによって直線偏光の縦モードフリー出力が得られる。(iii) 増幅自然放光(ASE)が発生した場合でも ASE は図中左側の AOM 側に抜けるため、パルスの出力から分離できる。

励起出力を 4W と固定し AOM の繰り返し周波数を 1kHz-100kHz と変化させたときに得られたパルスエネルギーと平均出力、パルス幅とピーク光強度の関係をそれぞれ 図 7, 図 8 に示す。平均出力は 20 kHz 以上では約 500 mW で一定となり、20 kHz 以下から緩やかに減少し、3 kHz あたりから減少が大きくなっている。これは Tm の上準位寿命が  $\sim 300\mu\text{s}$  と短いことから誘導放出以外でのエネルギー消費が増加するためと考えられる。また同様の理

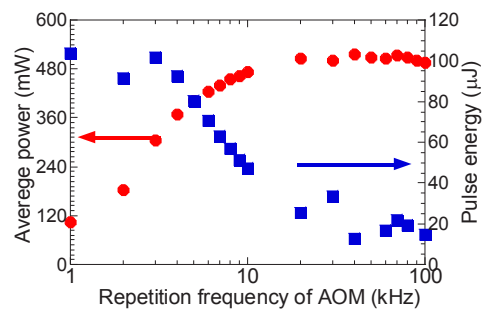


図 7. 平均出力とパルスエネルギーの繰り返し周波数依存性

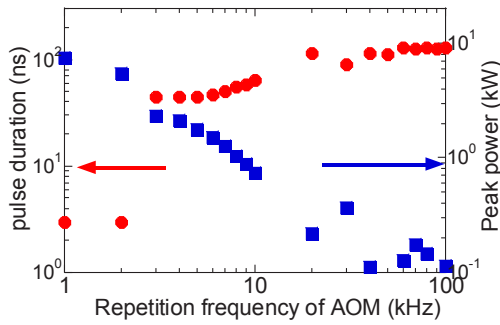


図 8. パルス幅とピーク光強度の繰り返し周波数依存性

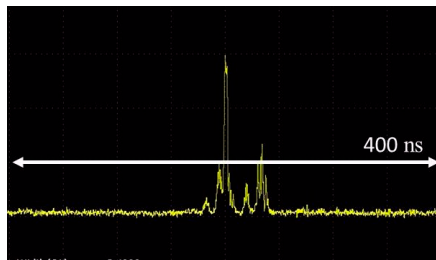


図 9. サブパルス構造を有した時間波形

由で繰り返し周波数を低下させていくと 3 kHz まではパルスエネルギーは上昇し、1 kHz の時に最大パルスエネルギー約 105  $\mu\text{J}$ 、パルス幅  $\sim 3$  ns が得られた。このパルスはサブパルス構造を有しており(図 9)、ピーク光強度はエネルギーをパルス幅で割った値とは大きく異なり、約 7.5 kW と見積もられた。このパルス幅は今までに報告されている Q スイッチ Tm ファイバーレーザーと比べて桁小さな値となっている。パルス幅の繰り返し周波数依存性を見てみると、繰り返し周波数 2 kHz から急激な短パルス化が進んでいることがわかる。またこのときのスペクトルを調べると、ピーク光強度の増加とともに広帯域光発生が起こっていることが分かった(図 10)。これと類似の報告が 1  $\mu\text{m}$  帯 Yb レーザーでされており<sup>4)</sup>、共振器中での後方ブリルアン散乱による非線形フィードバックが発生することによって短パルス化が進み、その結果非線形光学効果の影響がより顕著に発生し、スペクトルの広帯域化が発生したと推定される。先行研究と異なる点として、本研究では波長は 2  $\mu\text{m}$  帯であり、特殊は非線形ファイバーを利用せ

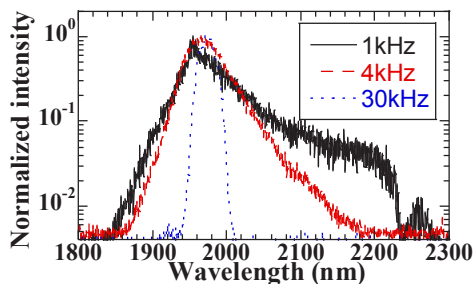


図 10. スペクトルの繰り返し周波数依存

ず、AOM によって繰り返し周波数を制御した状態で短パルス化を果たしている。現状の問題点として急激な短パルス化の後にピーク強度、パルス幅の揺らぎが非常に大きくなることがあげられる。これは利得が非線形光学効果の発生する閾値付近となってしまっていることが原因と考えられ、励起出力増加させることにより安定化が可能と考えられる。現在ファイバー端面の破壊により励起高強度が制限されているが、出力鏡として Fiber Bragg Grating を採用し、端面にはエンドキャップ処理を施すことによって解決可能と考えられる。

#### 4. ナノ秒増幅器と加工実験

加工実験を行うためナノ秒発振器に増幅器を追加した。装置構成としては発振器の出力側に取り出し用ファイバブラッググレーティングを取付、アイソレーターを介してコア径 12  $\mu\text{m}$  と 25  $\mu\text{m}$  のファイバーで増幅を行った(図 11)。ファイバーの破壊を防ぐため非線形作用による短パルス化が起きない繰り返し周波数範囲で動作させた。このとき最大パルスエネルギー 670  $\mu\text{J}$  が繰り返し周波数 10 kHz で得られた。

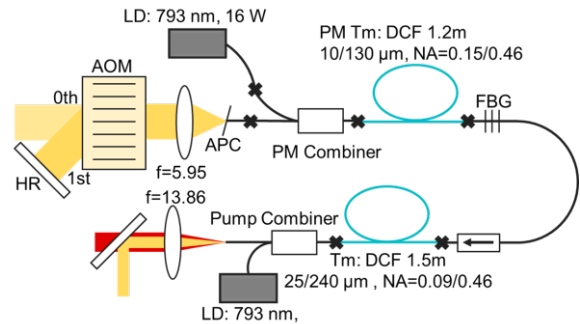


図 11. ナノ秒増幅器

これを用いてポリアセタールとポリプロピレン(厚さ 100  $\mu\text{m}$ )について平均出力と加工速度を変えて行った加工実験結果を図 12、13 にそれぞれ示す。最大加工速度は

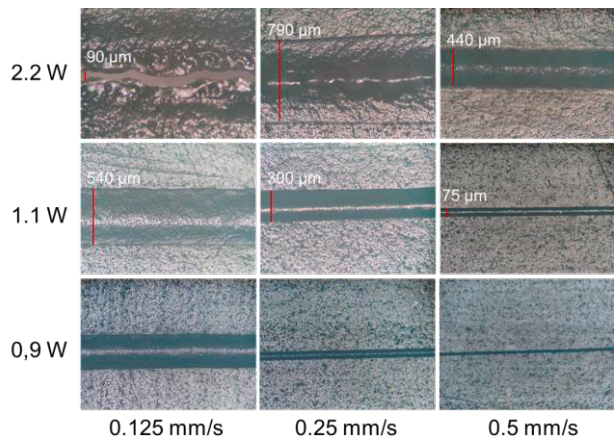


図 12. ポリアセタール加工痕

使用したステッピングモーターステージの移動速度によって制限されている。集光径は約  $25\ \mu\text{m}$  としている。ポリアセタールでは平均出力  $2.2\text{W}$  加工速度  $0.125\ \text{mm/s}$  において切断が確認されたレーザー出力を下げて加工速度を増加させると加工痕は小さくなっていき平均出力  $0.9\text{W}$ 、加工速度  $0.5\text{mm/s}$  時には約  $25\ \mu\text{m}$  サイズの加工痕が確認された。ポリプロピレンはポリアセタールに比べて加工閾値が低くなった。ポリアセタールと同様に平均出力、加工速度を増加させていくとより微細な加工痕が得られた。

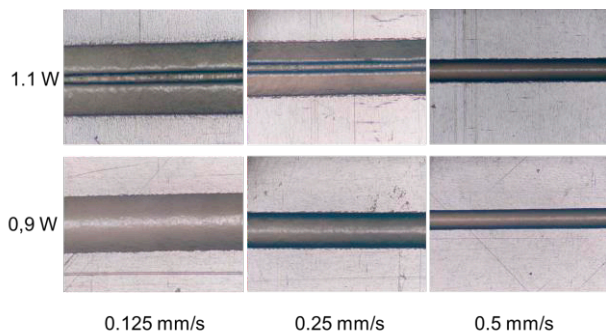


図 13. ポリアセタール加工痕

この他に現在 Si 半導体や Ge 半導体の加工実験を行っている。Si 半導体では裏面側のステルス加工による加工痕の形成が確認されている(図 14)。

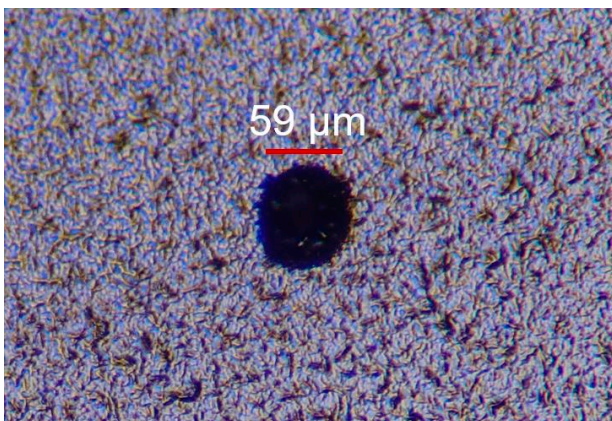


図 14. シリコン基板の裏面加工痕

## 5. まとめ

波長  $2\ \mu\text{m}$  帯ナノ秒/フェムト秒光パルスを用いたレーザー加工を行うため、高エネルギー発振器を開発した。フェムト秒領域では  $\sim 100\ \text{fs}$   $\sim 1\ \text{nJ}$  出力を達成し、現在これ種光源とした増幅器の開発を進めている。ナノ秒領域では発振器出力で  $100\ \mu\text{J}$  以上のパルスエネルギーとパルス幅  $\sim 3\ \text{ns}$  を達成した。増幅器においてはパルスエネルギー  $670\ \mu\text{J}$  を達成しそれ用いたポリマー材料、Si 半導体、Ge 半導体の加工実験を行っている。また加工試料内の応力分布などを可視化するためホログラフィック顕微鏡による位相計測を進めている。

## 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成のご支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) S. Karsten, S. Lamrini, P. Koopmann, and P. Fuhrberg. InTechOpen. InTech, 01 Feb. 2010. Web.
- 2) T. Ehrenreich et al., SPIE Photonics West 2010 7580, Session 16:Late-Breaking News January, (2010)
- 3) M. Tokurakawa, H. Sagara, and H. Tünnermann, Opt Express, 27 19530-19535 (2019)
- 4) S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor, and V. P. Gapontsev, Opt. Lett. 22, 298-300 (1997)