

フェムト秒レーザーによる材料加工に関する研究

～高時間分解能イメージングなどによる加工過程の計測～

金光 泰¹⁾・福本 英人¹⁾・長友 章悟¹⁾・楢原 達哉²⁾・横谷 篤至³⁾

Study on Material Processing with Femtosecond Laser ～Measurement of Processing Process by Imaging of High Time Resolution and etc.～

Yasushi KANAMITSU, Hideto FUKUMOTO, Shogo NAGATOMO,
Tatuya NARAHARA, Atsushi YOKOTANI

Abstract

Recently, femtosecond lasers have become to used for the microfabrication such as drilling and cutting of various kind of materials which can be used in the MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. However it is generally said that thermal effects can be decrease by using short pulsed lasers, the burr and the molten walls are often observed around the drilled holes in certain kinds of material such as Si even if the femtosecond laser is used. Then, we have tried to estimate the degree of the thermal effects during the drilling process with the femtosecond lasers. In this work, we observed the diameter of the hole formation with double pulsed laser changing delay time between the two pulses. Double pulsed laser ($\lambda = 780 \text{ nm}$, $\tau = 100 \text{ fs}$, $f = 10 \text{ Hz}$, $\Delta t = 0 \sim 40 \text{ ps}$, $E_1, E_2 = 100 \mu\text{J}$) was focused on the Si substrate and glass using a lens with a focal length of 100 mm. An image-intensified CCD camera with a high-speed gate of 5 ns was utilized to take images of a drilled hole during the drilling process. As a result, the double pulsed laser can be expected to suppress the heat influence from the single pulse laser. Especially, at delay time of about 5-7 ps, heat influence became the minimum. We think that these phenomena caused by the fact that the second pulse was irradiated some metalized surface which was made by the liquefaction by the first pulse irradiation.

Key Words:

Femtosecond laser, Microfabrication, Thermal effect, Drilled hole, Image-intensified CCD camera

1. はじめに

近年、電子機器の開発において小型化、高性能化、低コスト化、低消費電力が要求されており、電子機器を構成する電子デバイスの極小化が進められている¹⁾。そのため、小さな部品中に組み込んでしまえるさらに極小な多機能デバイスを作る MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術が求められている。MEMS の分野では微細加工を必要とする材料が多種使用されており、デバイスそのものがミクロンサイズであ

るので、加工精度としてナノメートルオーダーが要求されるが、そのような精度で材料を選ばない、新しい非接触加工としてレーザー加工の開発が期待されている。従来の加工用レーザーとして用いられているナノ秒レーザーでは、熱拡散によりエネルギーが照射部周辺に伝わるため、材料融解再固化による盛り上がりが発生させてしまう⁴⁾。そこで、熱拡散よりも早くエネルギーを注入できるフェムト秒レーザーを用いて研究を行ってきた。フェムト秒領域のパワーを用いることで熱影響は大きく低減できた。しかし、フェムト秒レーザーを用いても完全に熱影響を抑制することが出来たわけではない。そこで本研究ではフェムト秒レーザーアブレー

1) 電気電子工学専攻

2) 電気電子工学科

3) 電気電子工学科教授

ションによるシリコン基板への加工穴形成過程を観察し、熱影響との関係を調べる目的で、厚さ 50 μm の極薄シリコン基板にフェムト秒レーザーを照射し、高速ゲート付きのイメージインテンシファイアを装着した CCD カメラを使用して、ゲート幅 5 ns でフェムト秒という超短パルスによって瞬時に起こる加工現象を時間的にとらえて解析した。

過去の研究で、時間波形制御を行ったダブルパルスフェムト秒レーザーで極薄シリコン基板のダイシングを行った結果、従来のレーザーダイシング方法で発生していたクラックやチッピングが見られなかった。時間波形制御による利点は、マイクロクラックの発生を抑制しつつ、加工穴底面が平坦な円柱状の加工溝を得ることが出来るという点である。また、パルス間の時間差が 10 ps の時に加工穴は最も浅くなり、加工底面が平坦になるという結果が出た⁷⁾。しかし、いまだ詳細な現象は把握されていない。そこで本研究では、遅延時間を制御したダブルパルスフェムト秒レーザーによる加工穴形成過程を高速 ICCD カメラを用いて観察し、遅延時間制御による固体材料の微細加工特性の評価を行った。

またこれまでの研究において高速 ICCD カメラの時間分解能 200 ps で測定を行い、フェムト秒レーザーによる加工開始数 ns の現象の解明を行ってきた⁸⁾。しかし、高速 ICCD カメラの時間分解能には限界がある為、カメラ単体では加工開始数 ps という短時間の現象を捉えることはできない。そこでポンププローブ技術を組み合わせた高時間分解能実験装置の開発を行った。

2. ダブルパルスによる加工穴形成過程の計測

2.1 実験装置及び方法

図 1 に実験装置構成図を示す。装置はフェムト秒レーザー発生部、サンプル加工部、撮影部の三つから構成されている。フェムト秒レーザー発生部で、Ti:Sapphire レーザーシステムから発振させたレーザー（エネルギー:0~1.5 mJ/pulse,パルス幅:100 fs, 繰り返し周波数:10 Hz）はスリットを通すことでビーム径を絞った後、サンプル加工部へ送り、遅延光学系素子を通すことでダブルパルスにする。図 2 に遅延光学系素子を示す。遅延光学系素子は、パルスを分割し再度空間的に重ね合わせる際に、一方のパルスの光路長を変化させることにより遅延時間の制御を行った。ダブルパルスにしたレーザーは焦点距離 100 mm の平凸レンズを用いて、サンプルへ集光照射した。平凸レンズの前面にメカニカルシャッターを配置し、サンプルへのレーザーのショット数を 1 ショットに制御した。撮影部は、レンズなどの障

害物を避けて、加工穴形成過程をできるだけ正面から撮影するため、フェムト秒レーザーの光軸から約 15° の位置に ICCD カメラを設置した。照明用光源として、CW の Nd:YAG レーザーの第二高調波(出力:50 mW)を用いた。ここで、アブレーションによって生じるプラズマやブルームの自発発光は撮影の妨げとなるため、カメラの前面に色ガラスフィルターを挿入する事で、ブルームなどの雑光を分離し、サンプル表面で反射した照明光のみをカメラに入光させた。また、Ti:Sapphire レーザーシステムの励起光として用いている Nd:YLF レーザーの Q スイッチ信号をトリガーとし、パルスジェネレーターを用いてカメラのシャッターが開くタイミングと、レーザーがサンプルに照射されるタイミングを一致させた。なお、再生増幅に要する時間は光軸調整のたびに変わるので、タイミング調整は撮影に先駆けて必ずおこなった。カメラのゲート幅は 5 ns に設定した。また、サンプルにはシリコン基板,ガラス基板を用いた。

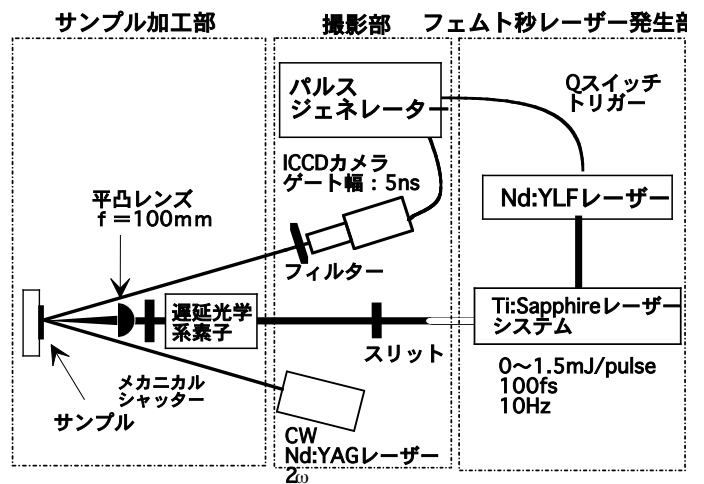


図 1 実験装置構成図

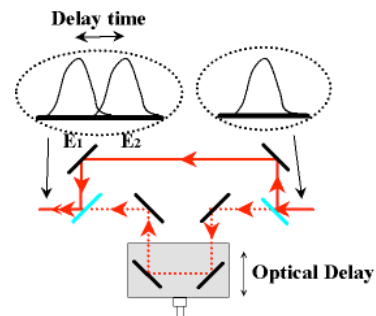


図 2 遅延光学系素子

発振させたフェムト秒レーザーは、第 1, 第 2 パルスのエネルギー E_1, E_2 を $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ として実験を行った。その時の遅延時間は 0 s, 70 fs, 5 ps, 10 ps, 20 ps, 30 ps, 40 ps の 7 通りで実験を行った。カメラのゲート幅を 5 ns に設定して撮影を行い、加工穴の直径変化を計測し、立ち上がり時間を調べた。最終加工穴直径の 90% となる時間を立ち上がり時間として定義した。過去の研究から、この立ち上がり時間の長短と熱影響の大小には相関があることが分かっているため、立ち上がり時間を見ることで熱影響の度合いを見積った。

また、ガラスにおいては、第 1, 第 2 パルスのエネルギー E_1, E_2 を $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J}), (E_1, E_2) = (30 \mu\text{J}, 30 \mu\text{J})$ の 2 通りのエネルギーで実験を行なった。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 シリコンの時間分解測定

図 3 にパルスエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ の時の高速度 ICCD カメラによって正面から撮影した遅延時間毎の加工穴の観察結果を示す。このすべての画像は $100 \mu\text{m}$ 角の大きさで、写真の下の数値はレーザーを照射してからの経過時間 (ns) である。フィルターを挿入することでプラズマやブルーームの自発発光を撮影することなく、ほぼ正面から時間の経過とともに加工穴直径が増加していく様子を撮影することができた。図 4 に遅延時間 5 ps における加工穴直径の時間変化をグラフ化した結果を示す。横軸にレーザーを照射してからの経過時間 (ns)、縦軸に加工穴直径 (μm) をとり 1 ns 毎にプロットした。この加工穴直径は、ICCD カメラの画像と加工を行ったサンプルの光学顕微鏡写真を対応させて調べた。ここで、最終加工穴直径の 90% となる時間を立ち上がり時間と定義しグラフ内に記入した。各遅延時間における加工穴直径の時間変化のグラフから立ち上がり時間は、遅延時間が 0 s の時は約 14 ns, 70 fs の時は約 13 ns, 5 ps の時は約 8 ns, 10 ps の時は約 10 ns, 20 ps の時は約 10 ns, 30 ps の時は約 10 ns, 40 ps の時は約 10 ns であることがわかった。遅延時間に対する立ち上がり時間のグラフを図 5 に示す。このグラフから、遅延時間が数 ps~10 ps 付近で立ち上がり時間が最も短くなることがわかった。数 ps~10 ps で立ち上がり時間が短くなった原因は、第 1 パルス照射後、数 ps~10 ps の間にレーザー照射部が液化しているのではないかと推測できる。固体と液体では吸収率や反射率が異なる。そのため吸収される第 2 パルスのエネルギーが変化したと推測できる。レーザーの中心ほどビームの強度が強いため、照射部中央に近い部分ほど液化がはやく進む。そこにちょうど第 2

パルスが照射されると、ビームの中心に近いほど吸収される割合が減少する。このように全体的に吸収されるエネルギーが減少するため、立ち上がり時間が短くなったと考えられる。過去の研究で、レーザー照射後 10 ps 以降においてアブレーションが生じた際に発生するブルーームが観測された⁹⁾。このブルーーム噴出中に第 2 パルスが照射されると、その粒子群によって第 2 パルスが遮蔽される。この時噴出する粒子の密度が最も高い角度はレーザー光と平行な角度であるため第 2 パルスの中央の強度が大きく減少すると予想できる。このため、遅延時間 10 ps~40 ps では立ち上がり時間に差が生じなかったと推測できる。

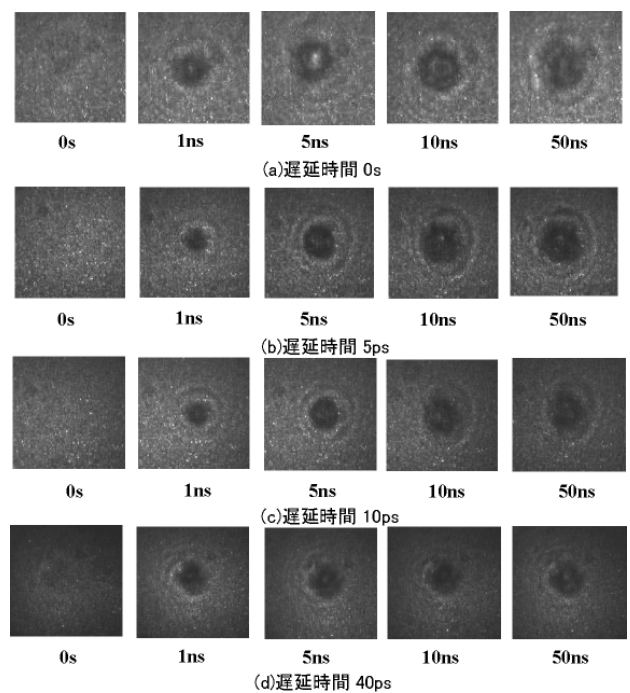


図 3 シリコンの加工穴形成過程

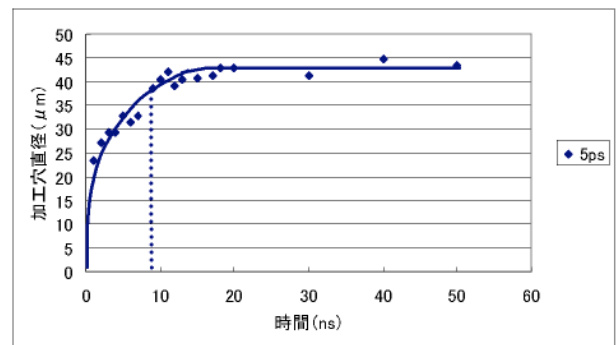


図 4 加工穴直径の時間変化

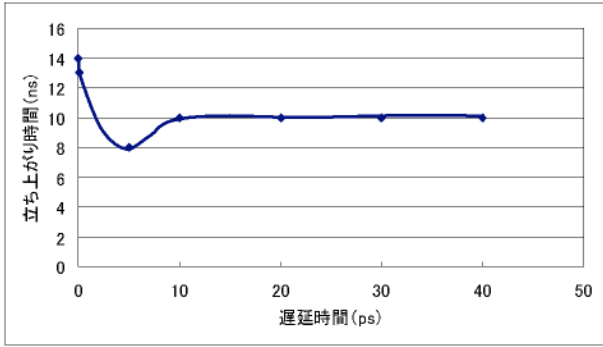


図5 遅延時間依存性

2.2.2 ガラスの時間分解測定

図6にパルスエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ のときの高速度 ICCD カメラによって正面から撮影した遅延時間毎の加工穴の観察結果を示す。図7にパルスエネルギー $(E_1, E_2) = (30 \mu\text{J}, 30 \mu\text{J})$ のときの高速度 ICCD カメラによって正面から撮影した遅延時間毎の加工穴の観察結果を示す。高速度 ICCD カメラによって得られたすべての画像は $100 \mu\text{m}$ 角の大きさで、写真の下の数値はレーザーを照射してからの経過時間 (ns) である。フィルターを挿入することでプラズマやブルームの自発発光を撮影することなく、ほぼ正面から時間の経過とともに加工穴直径が増加していく様子を撮影することができた。図8にパルスエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ のときの遅延時間 5 ps における加工穴直径の時間変化をグラフ化した結果を示す。横軸にレーザーを照射してからの経過時間(ns),縦軸に加工穴直径(μm)をとり 1 ns 毎にプロットした。ここで、最終加工穴直径の 90%となる時間を立ち上がり時間と定義しグラフ内に記入した。パルスエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ のとき、各遅延時間における加工穴直径の時間変化のグラフから立ち上がり時間は、遅延時間が 0 s の時は約 9 ns, 70 fs の時は約 6 ns, 5 ps の時は約 4 ns, 10 ps の時は約 4 ns, 20 ps の時は約 6 ns, 30 ps の時は約 6 ns, 40 ps の時は約 6 ns であることがわかった。パルスエネルギー $(E_1, E_2) = (30 \mu\text{J}, 30 \mu\text{J})$ のとき、各遅延時間における加工穴直径の時間変化のグラフから立ち上がり時間は、遅延時間が 0 s の時は約 5 ns, 70 fs の時は約 4 ns, 5 ps の時は約 1 ns, 10 ps の時は約 2 ns, 20 ps の時は約 4 ns, 30 ps の時は約 4 ns, 40 ps の時は約 4 ns であることがわかった。遅延時間に対する立ち上がり時間のグラフを図9に示す。このグラフから、2通りのパルスエネルギーにおいても遅延時間が数 ps~10 ps 付近で立ち上がり時間が最も短くなることがわかった。この数 ps~10 ps で立ち上がり時間が短くなった原因は、シリコンで述べた考察と同じと推測できる。よって、パルスエネル

ギーに関係なく遅延時間が数 ps~10 ps の間で立ち上がり時間が最も短くなると推測できる。

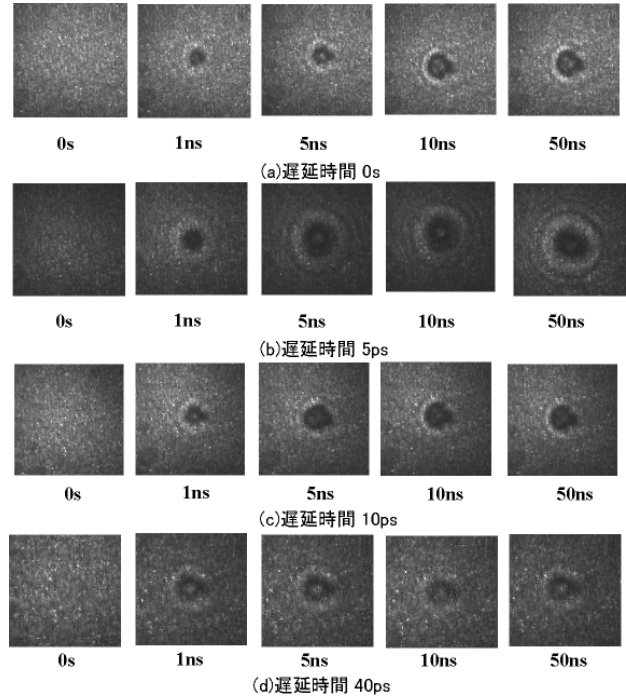


図6 ガラスの加工穴形成過程 $(E_1, E_2=100 \mu\text{J})$

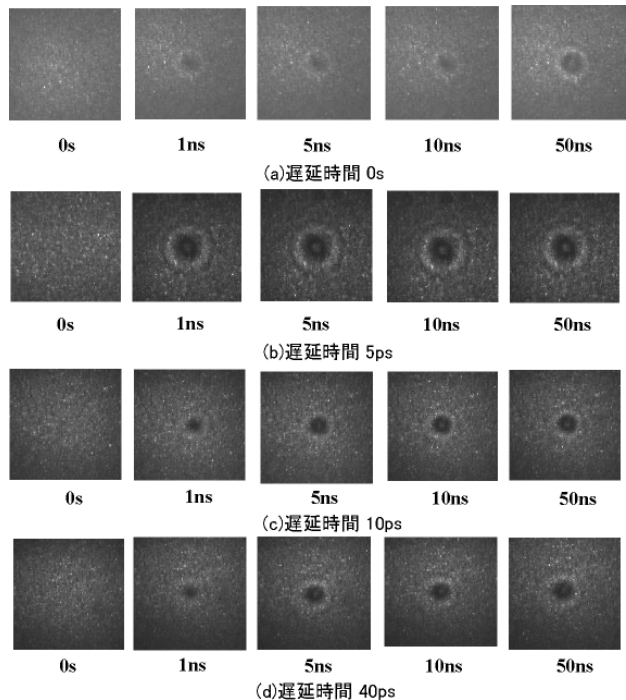


図7 ガラスの加工穴形成過程 $(E_1, E_2=30 \mu\text{J})$

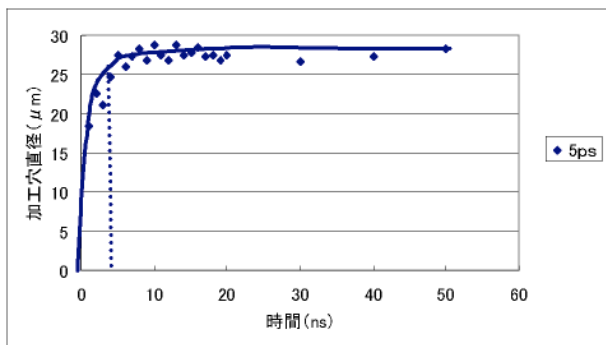


図8 加工穴直径の時間変化 ($E_1, E_2=100 \mu\text{J}$)

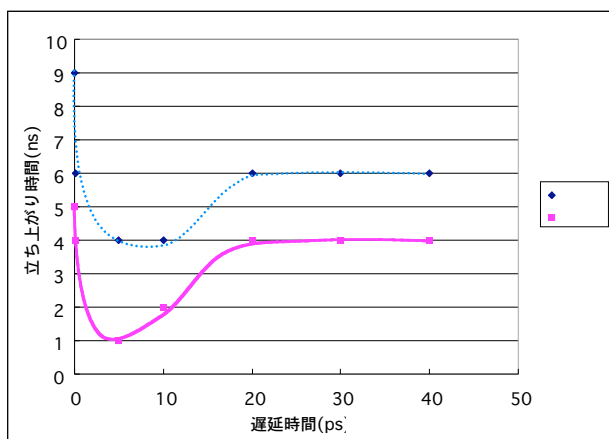


図9 遅延時間依存性

3. ポンププローブを用いた時間分解測定装置開発

3.1 実験装置及び方法

図 10 にポンププローブを用いた時間分解測定装置構成図を示す。フェムト秒レーザーを照明用光源として用いる際、私達が加工に用いている波長 882 nm のレーザーは ICCD カメラの感度が低い為、照明として用いることができない。そこで、レーザーを波長変換結晶に通し第二次高調波(SHG)を発生させ、ICCD カメラの感度が高い波長 441 nm にすることでカメラの照明用光源として用いる。ただし、波長変換結晶を通じ発生する SHG の出力がカメラで撮影するのに十分でなければいけない。そこで、非線形光学結晶の中でナノ秒レーザーを使って技術確立されてきた結晶を使用する必要がある。また、フェムト秒レーザーはピークパワーがナノ秒レーザーよりはるかに高く、波長幅が広いことを考慮し、我々の目的に新しくどのような結晶を用いればよいか検討する必要がある。そこで、今回波長変換を行う非線形光学結晶として、紫領域で良好な透過率を示し、かつ高ピークパワーレーザーに対して耐レーザー損傷性の高い KDP 結晶と LBO 結晶

について波長変換特性を調べた。その後、ポンププローブ時間分解測定装置を用いて実際に加工穴の撮影を行った。

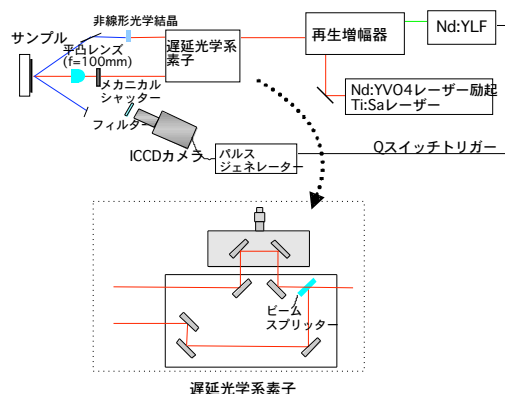


図10 時間分解測定装置構成図

3.2 実験結果及び考察

KDP 結晶と LBO 結晶の非線形光学特性を表 1 に示す。この結果、非線形光学定数も大きく、波長帯域の広いフェムト秒レーザーに適した LBO Type I 結晶を用いることとした。Ar⁺ion レーザーと試作した LBO 結晶を用いて発生させた 441 nm 光を照明として撮影した ICCD カメラの画像を図 11 に示す。Ar⁺ion レーザーを用いて ICCD カメラ単体で撮影した物と比べて、遜色ない撮影ができることがわかった。これによりフェムト秒レーザーを用いた加工穴形成において、加工開始から数 ps という初期過程を観察することができる。

表 1 非線形光学特性

KDP 結晶	Type I	Type II
	位相整合角	$\theta=42.58$
FWHM (° mm)	0.50	△ 1.14 ○
角度波長依存性(° /nm)	0.02	◎ 0.06 ○
非線形光学定数 d_{eff} (pm/V)	0.16	△ 0.18 △
性能指数	0.64	△ 0.62 △

LBO 結晶	Type I (XY 面)	Type I (XZ 面)	Type II (XY 面)	Type II (YZ 面)
	位相整合角	$\theta=90$ $\phi=24.3$	$\theta=27.4$ $\phi=0$	$\theta=90$ $\phi=62.8$
FWHM (° mm)	1.00 ○	0.66 △ 1.88 ◎	3.00 ◎	0.22 △
角度波長依存性(° /nm)	0.08 ○	0.05 ○	0.13 △	0.68 ○
非線形光学定数 d_{eff} (pm/V)	0.89 ◎	0.62 ○	0.56 ○	0.68 ○
性能指数	9.90 ◎	5.07 ○	4.54 ○	6.31 ○

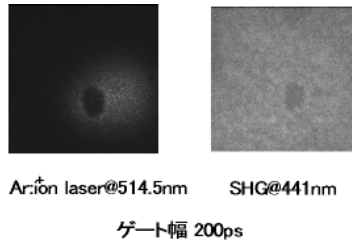


図 11 ICCD カメラの画像

4. まとめ

我々は、ダブルパルスフェムト秒レーザーアブレーションでシリコン及びガラスの穴開け加工を行い、その加工穴形成過程を ICCD カメラで時間分解測定することで遅延時間と立ち上がり時間の関係を調べた。

- ・ シリコン基板の加工でレーザーエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ の時、遅延時間が数 ps \sim 10 ps で立ち上がり時間が最も短くなる。
- ・ ガラス加工でレーザーエネルギー $(E_1, E_2) = (100 \mu\text{J}, 100 \mu\text{J})$ の時、遅延時間が数 ps \sim 10 ps で立ち上がり時間が最も短くなる。
- ・ ガラス加工でレーザーエネルギー $(E_1, E_2) = (30 \mu\text{J}, 30 \mu\text{J})$ の時、遅延時間が数 ps \sim 10 ps で立ち上がり時間が最も短くなる。
- ・ フェムト秒レーザーをダブルパルスにするとシングルパルスに比べ立ち上がり時間が短くなる。

以上の結果より、照射エネルギーに関係なくフェムト秒レーザーをダブルパルスにすることで立ち上がり時間が短くなり、さらに遅延時間が数 ps \sim 10 ps の時に立ち上がり時間が最も短くなることが分かった。よってダブルパルスにすることで熱影響の少ない微細加工ができると考えられる。

また、我々は高時間分解能撮影が可能な、ポンププローブ時間分解測定装置の開発を行った。

- ・ 照明用光源として 882 nm のレーザーの第二次高調波を用いる為、波長変換結晶として、紫領域で良好な透過率を示し、かつ高ピークパワーレーザーに対して耐レーザー損傷性の高い KDP 結晶と LBO 結晶のパラメータの比較を行った結果、LBO Type I 結晶が最適であることがわかった。

- ・ LBO 結晶を実験装置に組み込み、ポンププローブにより加工穴の撮影を試みたところ、撮影することができた。

以上の結果から、フェムト秒レーザー加工において、レーザー照射後数 ps という超高速現象の解明を行うことができるようになった。

参考文献

- 1) S. Ohmi and R.T. Tung "Effect of Ultrathin Mo and Mo Six Layer on Ti Silicide Reaction" *J. Appl. Phys.*, 86, pp. 3655-3660 (1999).
- 2) S. Ohmi and R. T. Tung "Silicide Formation in Co-Deposited Ti Six Layers; The Effect of Deposition Temperature and Mo", *J. Electronic Materials*, 28, pp. 1115-1122 (1999).
- 3) 『115-117 (1999) レーザーとその応用』, 電気学会 (レーザーアブレーションとその産業応用調査専門委員会), コロナ社 (1999).
- 4) J. Ihlemann, B. Wolff and P. Simon, "Nanosecond and Femtosecond Excimer Laser Ablation of Fused Silica", *Appl. Phys.* **A54**, p. 363, (1992).
- 5) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore and M. D. Perry, "Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses", *Phys. Rev. Lett.*, **74**, p. 2248, (1995).
- 6) J. Ihlemann, A. Scholl, H. Schmit and B. Wolff-Rottke, "Nanosecond and Femtosecond Excimer-Laser Ablation of Oxide Ceramics", *Appl. Phys.*, **A60**, p. 411, (1995).
- 7) 黒木 泰宣, 「フェムト秒レーザーを用いた極薄半導体基板のダイシング技術の開発 ～時間波形制御による高精度加工の検討～」, 宮崎大学修士論文, (2003).
- 8) 向本 徹, 「フェムト秒レーザーを用いた半導体製造関連材料の加工」, 宮崎大学大学院修士論文, (2005)
- 9) 水野 俊男, 「フェムト秒レーザーを用いた半導体関連材料の加工特性の評価」 宮崎大学修士論文, (2004).
- 10) 川原 公介, 「フェムト秒レーザーを用いた半導体基板の加工技術の開発」, 宮崎大学大学院修士論文, (2002).

- 11) 松尾 直之, 「フェムト秒レーザーを用いた極薄半導体基板のダイシング技術の開発 ～加工ダイナミックスの計測～」, 宮崎大学大学院修士論文, (2003).
- 12) 沢田 博司, 「フェムト秒レーザーアブレーションにおけるレーザー発振条件の加工特性に及ぼす影響」, 精密工学会誌, 69 巻, 1 号, P84, (2003).
- 13) 黒澤 宏, 「レーザー 基礎の基礎」, オプトロニクス社, (1999).
- 14) 宮崎 建創, 超短パルス高強度レーザーの基礎, レーザー加工学会誌 **Vol. 8**, No.3, P28, (2001).
- 15) J.Herrmann/B.Wilhelmi 「超短光パルスレーザー」, 共立出版株式会社, (1991).
- 16) R. Stain, M. Boyle, A. Thoss, A. Rosenfeld, D. ashikenasi, G. Corn, E. Campbell, I. V. Hertel, "Ultrafast laser ablation of dielectrics employing temporally shaped femtosecond pulses", SPIE Proc. 2nd Int. Symp. on laser Precision Microfabrication, Singapore, 2001. P. 78, (2002).
- 17) R. Srinivasan, E. Sytcliffé and B. Bararen, "Ablation and Etching of Polymethylmethacrylate by Very Short (160 fs) Ultraviolet (308 nm) Laser Pulses", *Appl. Phys. Lett.*, **51**, p. 1285, (1987).
- 18) S. Küper and M. Stuke, "Femtosecond UV Excimer Laser Ablation", *Appl. Phys.*, **B 44**, p. 199, (1987).
- 19) S. R. Cain, F. C. Burns, C. E. Otis and B. Bararen, "Photothermal Description of Polymer Ablation: Absorption Behavior and Degradation Time Scales", *J. Appl. Phys.*, **72**, p. 5172, (1992).
- 20) Z. Bor, R. Racz, G. Szabo, D. Xenakis, C. Kalpouzou and C. Fotakis, "Femtosecond Transient Reflection from Polymer Surfaces during Femtosecond UV Photoablation", *Appl. Phys.*, **A 60**, p. 365, (1995).
- 21) S. küper and M. Stuke, "Ablation of Polytetrafluorethylene (Teflon) with Femtosecond UV Eximer Laser Pulses", *Appl. Phys. Lett.*, **54**, p. 4, (1989).
- 22) S.Preuss, M. Spath, Y. Zhang and M. Stuke, "Time Resolved Dynamics of Subpicosecond Laser Ablation", *Appl. Phys. Lett.*, **62**, p. 3049, (1993).
- 23) B. Wolff-Rottke, J. Ihlemann, H. Schmit and A. Scholl, "Influence of the Laser-Spot Diameter on Photo-Ablation Rates", *Appl. Phys.*, **A60**, p. 13, (1995).
- 24) E. N. Glezer and E. Mazur, "Ultrafast-Laser Driven Micro-Explosions in Transparent Materials", *Appl. Phys. Lett.*, **71**, p. 882, (1997).
- 25) J. Sun, J. P. Longtin and P. M. Norris, "Ultrafast Laser Micromachining of Silica Aerogels", *J. Non-Cry. Sol.*, **281**, p. 39, (2001).
- 26) K. Kumagai, M. Okoshi and M. Hanabusa, "Micromachining Transparent Materials by Femtosecond Laser", *Rev. Laser Eng.*, **27**, p. 773, (1999).
- 27) S. Küper and M. Stuke, "Femtosecond UV Excimer Laser Ablation", *Appl. Phys.*, **B 44**, p. 199, (1987).
- 28) E. Ohmura and I. Miyamoto, "Molecular Dynamics Simulation of Laser Ablation Phenomina", *Rev. Laser Eng.*, **26**, p. 800, (1998).
- 29) K. Kawahara, Y. Kurogi, N. Matsuo, H. Sawada, A. Yokotani and K. Kurosawa, "Morphological Characterization of Various Kind of Materials in Femtosecond-Laser Micromachining", SPIE Proc. 2nd Int.Symp.On laser Precision Microfabrication, Singapore, 2001, P86, (2002).
- 30) K. Kawahara, Y. Kurogi, N. Matsuo, H. Sawada, A. Yokotani and K. Kurosawa, "Development of Dicing Technique for Thin Semiconductor Substrates with Femtosecond Laser Ablation" SPIE Proc. 3rd Int. Symp. On Laser Precision Microfabrication, Osaka, 2002. P526,(2003).