

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820025

研究課題名(和文) 高速超短光パルスマイクロ接合を実現する2波長マイクロ接合システムの開発

研究課題名(英文) Development of the two-wavelength laser microwelding system that is capable of high speed ultrafast laser microwelding

研究代表者

玉木 隆幸 (TAMAKI, Takayuki)

奈良工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：80455154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超短光パルスマイクロ接合法に材料が線形吸収する波長の連続発振光を組み込み、高速かつ高品位に大面積を接合可能な2波長マイクロ接合システムを構築した。さらに、加工時における超短光パルスと連続発振光との相互作用を把握するために、超短光パルスの光吸収を測定した。この測定結果した光吸収をもとに、有限要素法により計算機シミュレーションを行い、透明材料における伝熱を解析した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed the two-wavelength laser microwelding system using femtosecond laser system and continuous wave laser system which has a wavelength of linear absorption about materials to be joined. The microwelding system is capable of joining a large area at high speed and high quality. Also, in order to understand the interaction of the femtosecond laser pulses and continuous beam during laser microprocessing, the light absorption of the femtosecond laser pulses was measured. Based on the measurement result about light absorption, we analyzed the heat transfer in the transparent material using the finite element method.

研究分野：応用光学

キーワード：マイクロ接合 フェムト秒レーザー レーザー接合 炭酸ガスレーザー ガラス

1. 研究開始当初の背景

我々は、ピコ ( $10^{-12}$ ) 秒以下のパルス幅をもつ超短光パルスを用いた超短光パルスマイクロ接合法を開発している (図 1)。超短光パルスは、極めて短いパルス幅ゆえに、非常に高いピークパワーをもつ。この超短光パルスを被接合材料境界面に集光照射すれば、集光点 (境界面) 近傍において、複数の光子を同時に吸収する非線形吸収現象が発生する (図 1 (a))。そして、この非線形吸収現象により、プラズマが生成され、プラズマが後続の光パルスを吸収し、集光点近傍のみに熱や衝撃波が発生する。このため、材料境界面においてマイクロメートルサイズの局所的な材料溶融が生じる (図 1 (b))。さらに、照射後、溶融した材料が再凝固することにより、マイクロ接合を実現することができる (図 1 (c))。

この超短光パルスマイクロ接合法を用いれば、被接合材料表面の損傷なしに境界面のみを溶融させ、材料間を直接接合させることができる。さらに、本接合法は、加工後の徐冷が不要であり、光吸収材などを被接合材料間に挿入する必要もないため環境にやさしく、接合領域への光透過も可能である。

しかし、現在の超短光パルスマイクロ接合法には、加工速度が遅いという問題が存在する。例えば、ガラス間の超短光パルスマイクロ接合を考えた場合、1 mm 角の領域を接合するためには、現在のところ、約 16 秒の加工時間が必要である。このため、A mm 角の領域を接合するためには、 $16 \times A^2$  秒の加工時間が必要になると考えられる。つまり、超短光パルスマイクロ接合法により、産業応用上重要な大面積接合を行うためには、加工速度を向上させる技術開発が不可欠である。

2. 研究の目的

超短光パルスを用いた加工に、材料が線形吸収する波長の連続発振光を同時照射することにより、高速かつ高品位に材料内部を加工できる 2 波長マイクロ加工法を提案し、平成 25 年に本加工法に関する特許出願 (研究業績 5-1) を行っている。そして、本加工法を用いた初期実験において、超短光パルス、または、連続発振光 (炭酸ガスレーザー) の出力制御により、加工痕直径 (溶融領域) を調整でき、超短光パルス単体における加工 (図 2 (a)) と比較し、その加工痕直径を約 3 倍に至るまで拡大できることを示している (図 2 (b))。また、

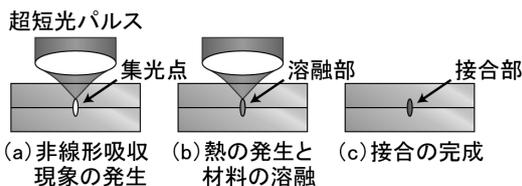


図 1 超短光パルスマイクロ接合法の概念図。(a) 超短光パルス照射による非線形吸収現象の発生。(b) 局所的な熱発生と材料の溶融。(c) 材料の再凝固による接合。

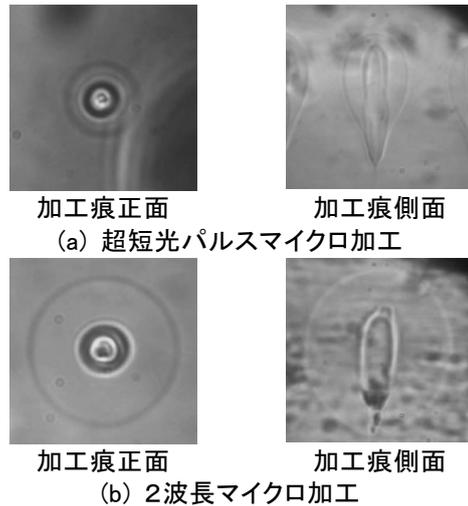


図 2 (a) 超短光パルスマイクロ加工と (b) 2 波長マイクロ加工の結果 (超短光パルス 1.3  $\mu$ J、連続発振光 5 W)。

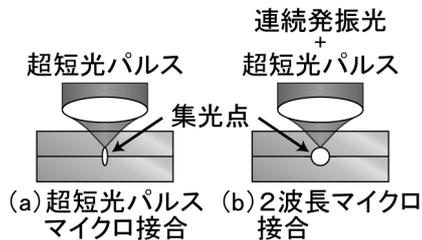


図 3 (a) 超短光パルスマイクロ接合と (b) 2 波長マイクロ接合の概念図。

超短光パルスのみ、または、連続発振光だけでは加工できないガラス材料を、2 波長マイクロ加工法を用いることにより、加工できることを示している。

本研究においては、高速かつ高品位に大面積を接合可能な生産技術を確立するために、前述の 2 波長マイクロ加工法を応用した、2 波長マイクロ接合システムを開発する (図 3)。さらに、超短光パルスと連続発振光との相互作用を把握するために、超短光パルスの光吸収を計測する。そして、この光吸収の結果を、熱伝導方程式をもとにした計算機シミュレーションに利用し、超短光パルス照射直後からの熱伝導を解明する。

3. 研究の方法

(i) 2 波長マイクロ接合システムの構築

2 波長マイクロ接合システムの光学系を図 4 に示す。超短光パルス光源としては、フェムト秒レーザーシステム (波長: 1.064  $\mu$ m、パルス幅: 250 fs (f: フェムト、 $10^{-15}$ )、繰返し周波数: 1 MHz、最大出力: 2 W) を用いる。さらに、連続発振光用の光源としては、炭酸ガスレーザーシステム (波長: 10.6  $\mu$ m、連続発振) を使用する。フェムト秒レーザーシステムから出射された超短光パルスは、減光フィルター、および、半波長板と偏光板を通過し、また、炭酸ガスレーザーシステムから出射された連続発振光は、Si ウェハを通過する

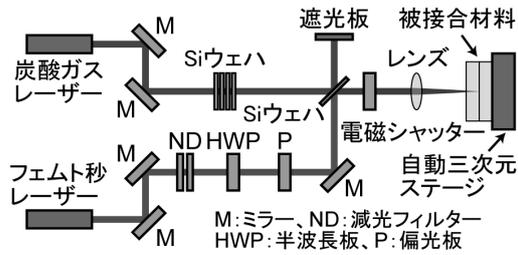


図4 2波長マイクロ接合システムの光学系。

ことにより、それぞれの光強度を調整する。その後、波長  $1.064 \mu\text{m}$  の超短光パルスを反射させ、 $10.6 \mu\text{m}$  の連続発振光を透過できる光学特性を有する Si ウェハにより、各光ビームを時間的、空間的に重ね合わせる。さらに、両波長を透過帯域とする ZnSe 製、または、ブラックダイヤモンド製のレンズにより、共軸にて、被接合材料境界面に集光照射する。被接合試料としてはガラス試料を用いる。このガラス試料は自動三次元ステージ上に固定されているため、ステージを走査することにより、集光点（熔融部）を各軸方向に移動することが可能であり、三次元的な熔融領域を形成することができる。また、電磁シャッターを用いることにより、各光ビームの露光時間を調整することができる。

(ii) 超短光パルス照射直後からの熱伝導に関する過渡現象の解明

連続発振光が同時照射されている場合の超短光パルスの光吸収を計測する。この光吸収の結果をもとに、移動体積熱源内に生じる繰返しパルス、および、連続熱源に関する熱伝導方程式を有限要素解析することにより、超短光パルス照射直後からの熱伝導に関する過渡現象を解明し、加工メカニズムを明らかにする。なお、有限要素解析にあたっては、市販ソフトウェアである ANSYS を利用する。

4. 研究成果

(i) 2波長マイクロ接合システムの構築

超短光パルス光源としてフェムト秒レーザーシステム（波長： $1.064 \mu\text{m}$ 、パルス幅： $250 \text{ fs}$  (f: フェムト、 $10^{-15}$ )、繰返し周波数： $1 \text{ MHz}$ 、最大出力： $2 \text{ W}$ )、連続発振光用の光源として炭酸ガスレーザーシステム（波長： $10.6 \mu\text{m}$ 、連続発振）を使用し、構築した2波長マイクロ接合システムを図5に示す。

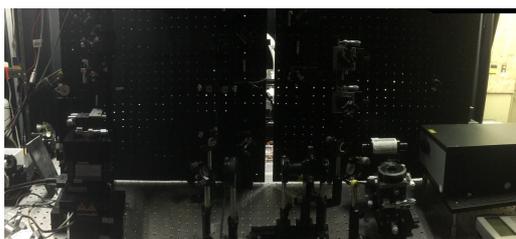
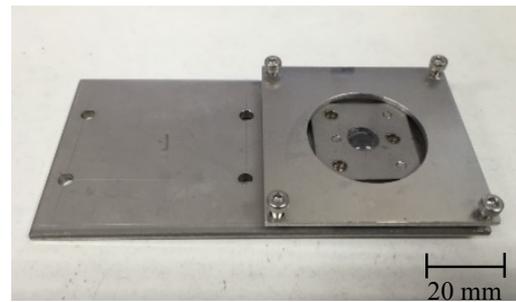


図5 構築した2波長マイクロ接合システム。



(a) 作製した治具



(b) ニュートンリング

図6 治具。(a) 作製した治具、(b) ニュートンリング。

・試料密着用治具の作製

接合時には、被接合試料を重ねあわせ、その試料境界面にフェムト秒レーザー光を対物レンズにより集光させる。この際、フェムト秒レーザー光の集光点（熔融範囲）が試料境界面を含み存在する必要がある。つまり、被接合試料間の間隙を低減できれば、集光点が試料境界面に存在する可能性が高くなる。このため、図6(a)に示す治具を設計作製した。この治具の片面には凸レンズが付いており、凸レンズの上に被接合試料を配置し、均等にねじを締めることにより、試料間隙が波長程度であることを示すニュートンリングを生じさせることができる（図6(b)）。

・超短光パルスマイクロ接合

被接合試料として白板ガラス（SCHOTT B270、 $50 \times 50 \times t1 \text{ mm}$ 、ガラス転移点  $536 \text{ }^\circ\text{C}$ ）を用いた。この白板ガラスを2枚重ね、その境界面に出力  $1.0 \text{ W}$ 、 $1.1 \text{ W}$ 、 $1.2 \text{ W}$  に設定した超短光パルスを集光照射した。さらに、図7に示す渦状の接合領域を形成するために、表1に示す加工条件において、自動 xyz ステージを走査させた。接合された試料を透過顕微鏡により観察した結果を図8に示す。

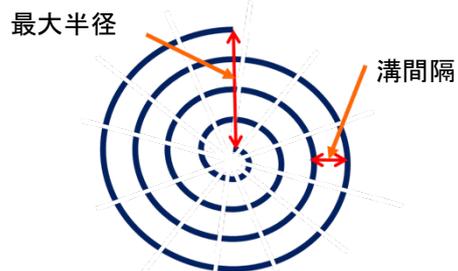


図7 接合領域の概念図。

表1 加工条件。

走査速度	2 mm/s
最大半径	5 mm
回転数	100
周回分割数	15
渦間隔	50 μm

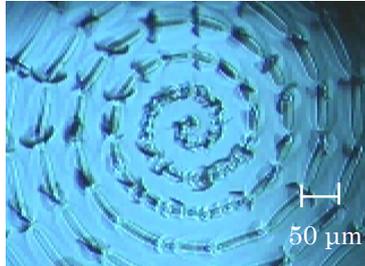


図8 接合領域の透過顕微鏡像(中心部)。

表2 最大荷重。

フェムト秒レーザー光の出力 [W]	最大荷重 [N]
1.0	69.1
1.1	70.2
1.2	83.5

接合後の試料の引張強度を測定するために、接合後の試料を引張試験機にかけた。試料の下側を固定端の治具に挟み、もう一方を引張速度 1 mm/s にて上昇させ、接合された試料に垂直方向の引張荷重を与えた。試料が破断したときの引張荷重(最大荷重)を引張強度とし、接合面積を表1の加工条件から最大渦直径 10 mm の円形の加工面積とすれば、接合強度は式(1)により求めることができる。

$$\text{接合強度 [MPa]} = \frac{\text{引張強度 [N]}}{\text{接合面積 [mm}^2\text{]}} \quad (1)$$

接合した試料の引張試験における最大荷重を表2に示す。また、共焦点レーザー走査型顕微鏡により、引張試験後の試料形状を観察した。この結果を図9に示す。表2より、フェムト秒レーザー光の各出力条件において、約 70 N 以上の引張強度が得られていることがわかる。また、図9(a)より引張試験後の試料形状は直径 10 mm 程度の円形のため、接合領域の端から剥離が生じたと考えられる。さらに、図9(b)より引張試験後の試料形状は高さ 1 mm 程度であり、熔融領域以上に他方の試料が付着していることがわかる。

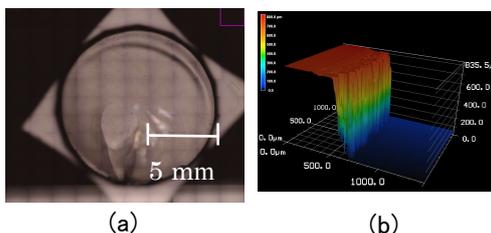


図9 共焦点レーザー走査型顕微鏡像。

(ii) 超短光パルス照射直後からの熱伝導に関する過渡現象の解明

発光現象の観察に用いたハイスピードカメラを組み込んだ光学系を図10に示す。ハイスピードカメラ(nac、MEMRECAM、HX-3)のフレームレートを 1000 fps に設定し、発光現象の観察を行う。この時、フェムト秒レーザーの出力を 1.3 W、照射時間を 1/4 s とした。撮影により得られた動画をフレームごとに分割し、発光現象が顕著に見られた連続する5つのフレーム取り出した(図11)。なお、フェムト秒レーザー光は図11上部から入射している。

図11より、1000 fps の撮影条件において強い発光が見られる時間は 2/1000 秒間であることがわかる。この発光現象がレーザー誘起プラズマであるならば、衝突吸収と非共鳴吸収によりエネルギー吸収が増大すると考えられる。このため、発光していない間と比較し、発光している間には強い吸収が生じており、ガラス内部への加工の主要なプロセスは、2/1000 秒間以内に行われると考えられる。

次に図12のモデルを用い、伝熱解析を行った。図12において、円筒領域がフェムト秒レーザー光の吸収領域である。円筒領域の半径  $r$  と高さ  $h$  はフレームレート 100 fps にて発光現象を観察した際に得られた発光領域より決定する。フェムト秒レーザー光の光吸収率を測定した結果、および、高速度カメラを用いた発光現象の観察結果から、フェムト秒レーザー光入射後の 2/1000 秒間は光吸収率 12%、その後 1/4 s までは光吸収率 4.5% とする。この解析アルゴリズムの概略図を図13に示す。また、解析上、レーザーは連続光発振と仮定する。さらに、熔融痕はガラス転移点(576 °C)以上で形成されるとした。解析条件をレーザー出力 1.3 W、照射時間 1/4 s とし、熔融痕が形成される状況を再現するために、有限要素法を用いてシミュレーションを行った。得られた結果を図14に示す。なお、画像上部からフェムト秒レーザー光が入射しているとし、熔融痕の断面を表示している。

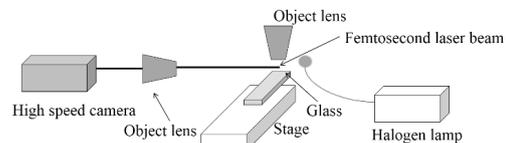


図10 発光現象観察用光学系。

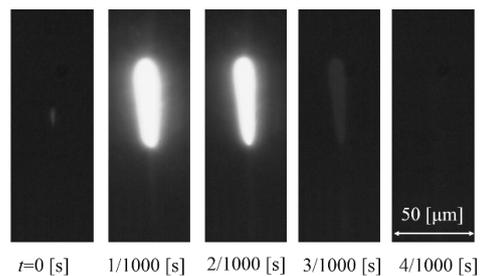


図11 発光現象の観察結果。

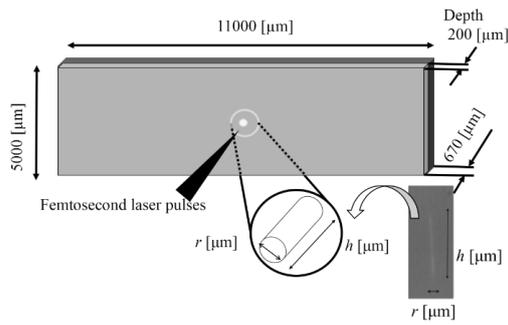


図12 解析モデル。

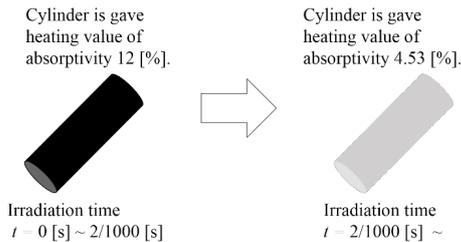


図13 解析アルゴリズム。

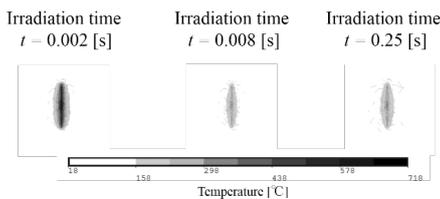


図14 解析結果。

図14より、フェムト秒レーザー光入射後の2/1000秒において、ガラス転移点(576℃)を超える温度に達し、光入射後1/125、1/4秒時点ではガラス転移点に達しない結果が得られる。この結果から、光入射後の2/1000秒以内で溶融痕の形成が終了していると考えることができる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計5件)

- (1) 玉木 隆幸、乾 永弥、松本 葵、渡邊 歴、  
“ガラス材料間の超短光パルスマイクロ接合法における接合領域と接合強度の関係探索、” 第63回応用物理学会春季学術講演会、平成28年3月19日～22日、東京工業大学 大岡山キャンパス。
- (2) 松本 葵、栗田一佳、玉木隆幸、八幡恵輔、大村悦二、“ガラス内部へのフェムト秒レーザー加工の照射時間と溶融痕サイズの関係、” 第63回応用物理学会春季学術講演会、平成28年3月19日～22日、東京工業大学 大岡山キャンパス。

- (3) Aoi Matsumoto, Takayuki Tamaki, Shinichi Enoki, Keisuke Yahata, and Etsuji Ohmura, “Heat transfer analysis of two wavelengths laser microprocessing,” SPIE Photonics West 2016, 13-18 Feb. 2016, Moscone center, San Francisco.

- (4) 松本 葵、玉木隆幸、榎 真一、八幡恵輔、大村悦二、“ガラス内部の2波長レーザーマイクロ加工における伝熱解析、”第77回応用物理学会秋季学術講演会、平成27年9月13日～16日、名古屋国際会議場。

- (5) 松本 葵、玉木隆幸、榎 真一、八幡恵輔、大村悦二、“フェムト秒レーザー加工の伝熱解析における熱源モデル形状の検討、” 第23回機械材料・材料加工技術講演会、平成27年11月14日～15日、広島大学。

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

玉木 隆幸 (TAMAKI, Takayuki)

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：80455154