

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760124

研究課題名(和文) 高速オートフォーカス機構を用いた高信頼超短光パルスマイクロ接合システムの開発

研究課題名(英文) Development of highly-reliable ultrafast laser microwelding using high-speed autofocus system

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・講師

研究者番号：80455154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000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オートフォーカス機構を組み込み、被接合材料の境界面高さに応じて集光点位置をリアルタイムに自動調整可能な接合システムを開発した。本システムを用いれば、確実に境界面のみを溶融させることができ、安定性、信頼性、品質性の観点から高度化した接合技術の確立が可能である。さらに、構築されるオートフォーカス機構は生産加工分野における要素技術となるため、穴加工、溝加工をはじめとする多くの微細加工分野への展開が可能であり、三次元微細構造の形成技術に応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed novel ultrafast laser microwelding system that can adjust the focal point position according to the height of the interface of two substrates to be welded in real time by applying autofocus system to conventional ultrafast laser microwelding system. With the present system, because it is possible to melt only the interface, the establishment of the sophisticated welding technique in terms of stability, reliability, and quality properties is possible. Further the autofocus system, which is constructed in this study, is element technology in the industrial processing field. Thus the autofocus system can apply in microprocessing such as hole drilling, grooving, and three-dimensional microprocessing.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：マイクロ接合 超短光パルス フェムト秒レーザー オートフォーカス コントラスト法 FPGA 微細加工

1. 研究開始当初の背景

マイクロ接合技術は、情報通信、医療・バイオ、環境・エネルギー、自動車など多様な産業分野において工業製品の小型高機能化・高精度実装化を実現する基盤的技術として注目を集めている。とくに、レーザー光を用いたマイクロ接合技術は、(1) 特殊な雰囲気が必要とせず、(2) 非接触かつ直接的に、(3) 高速かつ高精度な接合を実現できるという特長を有している。しかし、旧来のレーザーマイクロ接合法は線形吸収現象による熱発生を用いるため、被接合材料の選択に制約がある。そこで、研究代表者らは、ピコ秒からフェムト秒程度のパルス幅をもつ超短光パルスによる非線形吸収現象を利用することによって、超短光パルスの波長に線形吸収をもたない材料であっても、被接合材料の境界面のみを溶融でき、材料間を局所的に接合できる超短光パルスマイクロ接合法を開発している。

超短光パルスマイクロ接合法における加工プロセスは、次の4つの手順からなる。(1) 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超短光パルスを被接合材料境界面に集光照射する。(2) 集光点(被接合材料境界面)近傍において光強度が高くなり、集光点近傍のみに非線形吸収現象が生じる。(3) 非線形吸収現象により、集光点近傍においてマイクロオーダーサイズの局所的な材料溶融が生じる。(4) 光パルス照射後には、材料の再凝固が生じるため、被接合材料境界面においてマイクロ接合が可能となる。

非線形吸収現象を用いたこの超短光パルスマイクロ接合法は、材料表面の損傷なしに材料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、光吸収材などを被接合材料間に挿入する必要がないため、接合領域に光を透過させることが可能であるなどの特長をもつ。

このように優れた特徴を有する超短光パルスマイクロ接合法ではあるが、被接合材料境界面の状態が接合の成否に大きく影響するという問題がある。例えば、材料境界面が超短光パルスの光軸と垂直ではない場合、集光点を水平移動させれば、光パルスを集光させるべき本来の位置と実際の集光点位置とに差が生じてしまう。この差は、本来実現すべき材料境界面の溶融ではなく、境界面以外の部材を溶融させる一因となり、被接合材料を必要以上に損傷させ、高強度かつ高精度な接合を実現させることを困難にする。つまり、超短光パルスマイクロ接合において、被接合材料の境界面高さに応じて、集光点位置を調整できる技術開発は重要であるといえる。

2. 研究の目的

超短光パルスマイクロ接合法において、確実に接合を実現させ、安定性、信頼性、品質性

に優れたデバイスを作製可能な生産技術を確立するために、被接合材料の境界面高さに応じて集光点位置を高速に自動調整できるオートフォーカス機構を構築し、その機構の性能評価を行う。さらに、オートフォーカス機構を組み込んだ超短光パルスマイクロ接合システムを開発し、加工特性、システム特性の評価を行う。

3. 研究の方法

オートフォーカス機構を組み込んだ超短光パルスマイクロ接合システムを開発するために、自動z軸ステージ、CMOS(相補型金属酸化膜半導体)カメラ、FPGA(Field Programmable Gate Array:(直訳)現場において書き換え可能な論理回路が多数配列された半導体デバイス)などのハードウェア部分と、画像処理アルゴリズムなどのソフトウェア部分とにより構成されるオートフォーカス機構を構築し、オートフォーカス機構の追従性、安定性などを評価する。

さらに、構築したオートフォーカス機構を超短光パルスマイクロ接合法に組み込み、確実に境界面のみを溶融させ、接合の可否を評価する。くわえて、被接合材料の境界面高さに応じて集光点位置、ならびに、入射光強度の変化による集光点高さを調整することにより、接合に際して最適な溶融部を三次元的に形成し、この三次元的な溶融部形状と接合の成否についての知見を集積する。

4. 研究成果

オートフォーカス機構の構成図を図1に示す。オートフォーカスを行うために、被接合試料が表面に固定された自動z軸ステージを移動させ、各z位置(高さ)における試料表面をCMOSカメラにより撮影した。その後、撮影した各画像を用い、各画像における階調値差をFPGAにより計算し、階調値差による合焦法をもとに、焦点位置を推定した。

ここで、階調値差による合焦法とは、合焦された画像は明暗がはっきりしていることを利用した合焦法である。具体的には、同じ対象物を撮影した際、合焦された画像と合焦されていない画像とを比較すれば、合焦された画像のほうが明部と暗部の差がはっきりとしている。つまり、合焦された画像は階調値差が大きくなる。このため、撮像距離を変化させ対象物を撮影し、撮影された画像全体

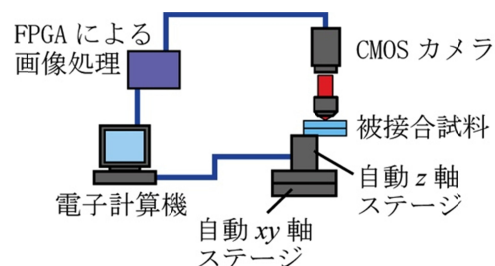


図1 FPGAを用いたオートフォーカス機構。

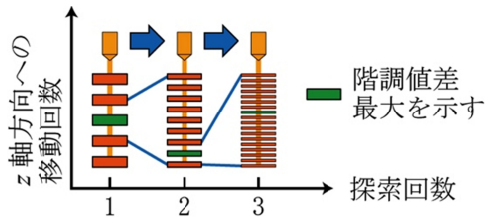


図2 焦点位置の探索方法 .

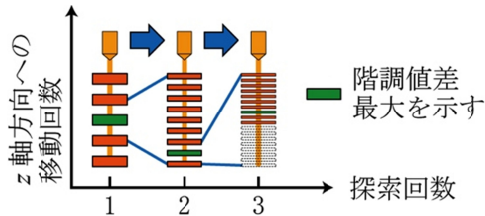


図3 探索時間を短縮可能な焦点位置の探索方法 .

にわたる階調値差を調べることにより、階調値差が一番大きくなる撮像距離が、焦点に最も近い位置であるといえる。

また、推定された焦点位置付近において、自動 z 軸ステージの移動量を細かく設定し、各 z 位置（高さ）における階調値差の演算を行うことにより、図2に示すように、焦点位置をより正確に推定することができる（探索方法1）。つまり、このオートフォーカス機構においては、探索回数を多くするほど、焦点位置を正確に推定することが可能であるが、探索時間も同時に長くなることになる。

このため、階調値差の下がり始めを検出すれば、探索動作を終了し、次の探索を始めるオートフォーカス機構を開発した（図3、探索方法2）。

図2、および、図3のオートフォーカス機構を用いた焦点位置探索における探索時間を評価するために、被接合試料として用いるBK7ガラスを対象に、焦点探索動作を10回行い、各検索時間の平均を算出した。このとき、焦点探索動作時における、自動 z 軸ステージの移動量、および、階調値差の算出回数を表1に示す。また、算出した平均焦点探索時間を表2に示す。

表1 焦点探索条件 .

探索方法	探索回数	1	2	3
方法1 (図2)	算出回数	5	20	40
	移動量 [μm]	1000	100	2.5
方法2 (図3)	算出回数	< 5	< 20	< 40
	移動量 [μm]	1000	100	2.5

表2 平均焦点探索時間 .

探索方法	平均焦点探索時間 [sec]
方法1	87
方法2	51.6

表2より、階調値差の下がり始めを検出後、焦点探索動作を終了し、次の探索を始めることにより、焦点探索時間を約4割減少できることが明らかになった。

つぎに、図4に示す超短光パルスマイクロ加工システムにより、オートフォーカス機構を用いて推定したBK7ガラス表面への加工を行った。図4において、レーザー光源から射出された光パルスは半波長板と偏光板により強度を調整され、ダイクロイックミラーで反射された後、対物レンズによりBK7ガラス表面に集光照射させた。さらに、自動 xy ステージを移動することにより、集光点を走査し、ガラス表面を二次元的に加工した。

図2、および、図3のオートフォーカス機構により、焦点位置探索を行った後、表面加工されたBK7ガラスの超短光パルス入射側表面を図5に示す。

図5より、探索方法1、および、方法2により焦点位置探索を行い、超短光パルスを集光照射し、集光点を二次元的に走査することにより、ガラス表面に加工ができることが明らかである。つまり、焦点位置の探索が実現されていることがわかる。さらに、探索方法1と2において、加工痕の形状に大きな違いが見られないため、階調値差の下がり始めを検出すれば、探索動作を終了し、次の探索を始める探索方法2は、焦点探索時間を短縮するために有意であるといえる。

つぎに、探索方法2を応用し、BK7ガラスを2枚重ねた被接合試料における、試料境界面の空隙を推定した。具体的には、上側試料下面と下側試料上面の差を求めることにより、空隙を推定した。

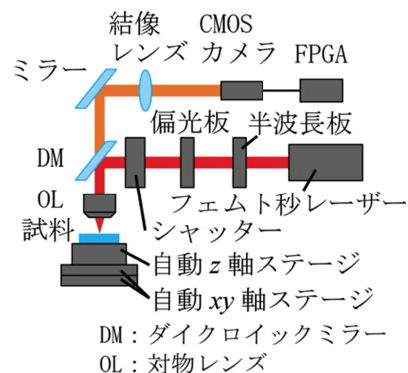


図4 超短光パルスマイクロ加工システム .

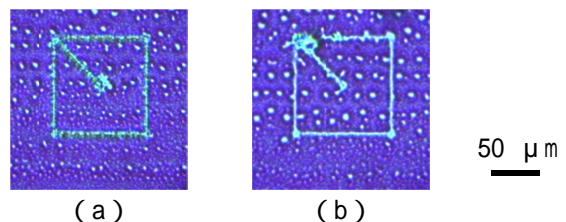


図5 焦点位置探索後、表面加工されたBK7ガラスの超短光パルス入射側表面 ((a) 探索方法1、(b) 方法2) .

さらに、推定した空隙の大きさに対して、超短光パルスのレーザーパワーを変化させ、超短光パルスマイクロ接合を行う接合法（新方式）を開発し、BK7 ガラス間のマイクロ接合を行った。また、本手法との比較を行うために、空隙の大きさに関わらず、レーザーパワーを一定にする旧来の超短光パルスマイクロ接合法（旧方式）においても、マイクロ接合を行った。

旧方式と新方式における接合条件は、それぞれ、走査速度 10 mm/s、最大接合半径 1 mm、溝間隔 50 μm、レンズの開口数 0.4、パルス間隔 1 μs とし、螺旋状に 3.14 mm² の領域を接合した。この接合実験をそれぞれ 10 回繰返し行い、接合の成功率を評価した。

各接合方式における接合結果を表 3 に示す。表 3 より、旧方式において、超短光パルスのレーザーパワーが 1.0 W の場合、不完全な接合という結果が 4 回現れた。これはレーザー出力が小さく、被接合材料における溶融量の不足に起因していると考えられる。これに対して、レーザーパワー 1.2 W の場合、ひびや割れが 2 回発生した。さらに、1.2 W という比較的高出力であるにもかかわらず、不完全な接合という結果が 3 回現れた。これは、接合に必要なパワーを超える光パルスにより、損傷が生じた結果であると考えられる。

また、新方式においては、10 回すべての接合に成功した。さらに、図 6 に示すように、接合された試料すべてにおいて、干渉縞が広範囲に生じていることから、旧方式と比較し、均一な接合に成功しているといえる。

本研究を通じて、オートフォーカス機構を構築し、構築したオートフォーカス機構を超短光パルスマイクロ接合法に組み込むことにより、被接合材料の空隙分布の検出を行い、空隙の大きさに応じて、レーザー光の出力を自動で調整可能な接合システムを開発することができた。さらに、この接合システムは、旧来の超短光パルスマイクロ接合法よりも被接合材料の内部損傷を抑え、かつ、広範囲な領域を接合できることを明らかにした。また、接合成功率を 40% 程度上昇させることに成功した。

表 4 各接合方式における接合結果（○：接合成功、△：ひび割れ、×：接合失敗）。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
旧方式 1.0 W			×		×		×		×	
旧方式 1.2 W		×	×				×			
新方式										



図 6 新方式を用いた超短光パルスマイクロ接合の結果。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

島田 健太郎、玉木 隆幸、FPGA を用いた自動焦点検索装置の開発と実証、電気学会関西支部 高専卒業研究発表会、平成 25 年 3 月 2 日、中央電気倶楽部
 乾 隆之、玉木 隆幸、FPGA を用いた自動焦点検索装置の開発、電気学会関西支部 高専卒業研究発表会、平成 24 年 3 月 5 日、中央電気倶楽部

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
 出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

玉木 隆幸 (奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・講師)

研究者番号 : 80455154