

(51) Int.Cl. ⁷	F I	テーマコード(参考)
B 2 3 K 26/06	B 2 3 K 26/06	A 2 K 0 0 2
G 0 2 F 1/37	B 2 3 K 26/06	E 4 E 0 6 8
G 0 2 F 1/39	G 0 2 F 1/37	
	G 0 2 F 1/39	

審査請求 有 請求項の数3 O L (全8頁)

(21)出願番号 特願2004-14126(P2004-14126)
 (22)出願日 平成16年1月22日(2004.1.22)

特許法第30条第1項適用申請有り 2003年8月30日 (社)応用物理学会発行の「2003年(平成15年)秋季 第64回応用物理学会学術講演会講演予稿集第3分冊」に発表

(71)出願人 390014306
 防衛庁技術研究本部長
 東京都新宿区市谷本村町5番1号
 (74)代理人 100079290
 弁理士 村井 隆
 (72)発明者 大越 昌幸
 神奈川県横須賀市走水2-21-D-304
 (72)発明者 井上 成美
 神奈川県横須賀市浦賀町6-18-161
 Fターム(参考) 2K002 AA04 AB12 BA02 HA20 HA21
 4E068 CA01 CA03 CB08 CD01 CD05
 CD08

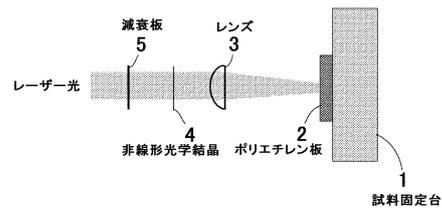
(54) 【発明の名称】 多波長超短パルスレーザー光による材料加工法

(57) 【要約】

【課題】 熱に弱い材料(高分子材料や生体材料、低融点材料、熱拡散しやすい材料等)等においても、加工部周辺に熱変性層を形成せず、加工面の化学組成も変化させない、高精度かつ高速での材料の微細加工法を確立する。

【解決手段】 近赤外線を含む、パルス幅が1ns未満の超短パルスレーザー光を、非線形光学結晶4あるいはオプティカルパラメトリック増幅器等により一部波長変換し、基本波(波長変換前のレーザー光)とともに高調波(波長変換後の短波長化された1種類以上のレーザー光)あるいはOPA等の光(波長変換後の長波長化された1種類以上のレーザー光)を同一材料の同一箇所照射することにより、高精度かつ高速でのレーザー加工を可能とする。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

近赤外線を含む、パルス幅が 1 ns 未満の超短パルスレーザー光を、高調波発生用波長変換手段により一部波長変換し、前記超短パルスレーザー光の基本波とともに波長変換後の短波長化された 1 種類以上の高調波を同一材料の同一箇所照射することを特徴とする多波長超短パルスレーザー光による材料加工法。

【請求項 2】

近赤外線を含む、パルス幅が 1 ns 未満の超短パルスレーザー光を、長波長波発生用波長変換手段により一部波長変換し、前記超短パルスレーザー光の基本波とともに波長変換後の長波長化された 1 種類以上の長波長波を同一材料の同一箇所照射することを特徴とする多波長超短パルスレーザー光による材料加工法。

10

【請求項 3】

近赤外線を含む、パルス幅が 1 ns 未満の超短パルスレーザー光を、高調波発生用波長変換手段及び長波長波発生用波長変換手段により一部波長変換し、波長変換後の短波長化された 1 種類以上の高調波及び波長変換後の長波長化された 1 種類以上の長波長波を前記超短パルスレーザー光の基本波とともに同一材料の同一箇所照射することを特徴とする多波長超短パルスレーザー光による材料加工法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザー光による材料加工法に係り、とくに近赤外線を含む、パルス幅が 1 ns (ns は 10^{-9} 秒) 未満の超短パルスレーザー光による材料加工法であって、前記超短パルスレーザー光を非線形光学結晶あるいはオプティカルパラメトリック増幅器 (O P A) 等により一部波長変換し、基本波 (波長変換前のレーザー光) とともに高調波 (波長変換後の短波長化された 1 種類以上のレーザー) 及び / 又は O P A 等の光 (波長変換後の長波長化された 1 種類以上のレーザー光) を同一材料の同一箇所照射することにより、高精度かつ高速でのレーザー加工を可能としたものである。また、従来困難とされてきた熱に弱い材料 (高分子材料や生体材料、低融点材料、熱拡散しやすい材料等) 等にも適用可能となり、被加工材料の種類も広がる。これらの結果は、電子機器用プリント配線基板の高精度微細加工やマイクロ化学分析システムの製作、マイクロ・ナノマシーニング技術に適用可能になる等、その用途は電気、電子のみならずあらゆる分野で有用である。

20

30

【背景技術】

【0002】

レーザー微細加工に用いられる光源は、パルス幅が ns 以上の紫外線レーザーが一般的である。しかし被加工材料によっては、加工部周辺に熱変性層が形成され、また加工面の化学組成も変化する場合がある。そこで最近、加工部周辺の熱変性層形成を抑えるために、パルス幅がピコ秒 (ps 、 10^{-12} 秒) あるいはフェムト秒 (fs 、 10^{-15} 秒) の超短パルスレーザー光が利用されようとしている。超短パルスレーザー光の発振波長を近赤外域とすると、一部の被加工材料において、加工面の化学組成も変化しないことが報告されている。

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

従来の方法では困難とされてきた、熱に弱い材料 (高分子材料や生体材料、低融点材料、熱拡散しやすい材料等) 等においても、加工部周辺に熱変性層を形成せず、加工面の化学組成も変化させず、高精度かつ高速での材料の微細加工法の確立を課題とする。

【0004】

本発明は、上記の点に鑑み、単波長レーザー光に比べて高速の材料加工が可能で、加工部周辺に熱変性層を形成せず、加工面の化学組成も変化させず、高精度微細加工が可能な多波長超短パルスレーザー光による材料加工法を提供することを目的とする。

50

【 0 0 0 5 】

本発明のその他の目的や新規な特徴は後述の実施の形態において明らかにする。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 6 】

上記目的を達成するために、本願請求項 1 の発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法は、近赤外線を含む、パルス幅が 1 n s 未満の超短パルスレーザー光を、高調波発生用波長変換手段により一部波長変換し、前記超短パルスレーザー光の基本波とともに波長変換後の短波長化された 1 種類以上の高調波を同一材料の同一箇所照射することを特徴としている。

【 0 0 0 7 】

本願請求項 2 の発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法は、近赤外線を含む、パルス幅が 1 n s 未満の超短パルスレーザー光を、長波長波発生用波長変換手段により一部波長変換し、前記超短パルスレーザー光の基本波とともに波長変換後の長波長化された 1 種類以上の長波長波を同一材料の同一箇所照射することを特徴としている。

【 0 0 0 8 】

本願請求項 3 の発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法は、近赤外線を含む、パルス幅が 1 n s 未満の超短パルスレーザー光を、高調波発生用波長変換手段及び長波長波発生用波長変換手段により一部波長変換し、波長変換後の短波長化された 1 種類以上の高調波及び波長変換後の長波長化された 1 種類以上の長波長波を前記超短パルスレーザー光の基本波とともに同一材料の同一箇所照射することを特徴としている。

【 発明の効果 】

【 0 0 0 9 】

本発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法によれば、従来困難とされてきた熱に弱い材料（高分子材料や生体材料、低融点材料、熱拡散しやすい材料等）等においても、加工部周辺に熱変性層を形成させず、加工面の化学組成も変化させず、高精度かつ高速での材料の微細加工法を確立でき、プリント配線基板の高精度微細加工に利用可能である等、電子機器製作のための必要不可欠な技術となる。また本発明は、これらエレクトロニクス分野にとどまらず、マイクロ化学分析システムの製作やマイクロ・ナノマシニング技術等、今後微細加工を利用して発展するデバイス製作の分野に多大に利用可能である。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 0 】

以下、本発明を実施するための最良の形態として、多波長超短パルスレーザー光による材料加工法の実施の形態を図面に従って説明する。

【 0 0 1 1 】

図 1 乃至図 8 を用いて本発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法の実施の形態 1 を説明する。

【 0 0 1 2 】

図 1 は、近赤外線を含む、パルス幅が 1 n s 未満の超短パルスレーザー光として、波長 790 nm、パルス幅 130 f s の Ti:sapphire レーザー光を基本波として単独使用した場合、その第 2 高調波（波長 395 nm）単独使用の場合、及び基本波と第 2 高調波とを混合した実施の形態 1 の場合の、ポリエチレンの微細加工における比較実験の装置概略である。図 1 において、1 は試料固定台で、この上に被加工材料としてポリエチレン（PE）板 2 が載置されている。3 はレーザー光集束用の石英製レンズ、4 は高調波発生用波長変換手段としての非線形光学結晶、5 はレーザー光を減衰させる減衰板である。

【 0 0 1 3 】

基本波の実験では、図 1 の装置において非線形光学結晶 4 は使用せず、前記基本波のレーザー光を厚さ 2 mm の減衰板 5 を通した後、焦点距離 150 mm の石英製レンズ 3 により、厚さ 2 mm のポリエチレン板表面でスポット径 1.8 mm² になるように集光した。パルスエネルギーは最大 10 m J とした。アブレーションによるエッチング深さとレーザ

10

20

30

40

50

ー光照射エネルギー密度との関係を調べるために、パルスエネルギーを変化させて実験を行った。

【 0 0 1 4 】

第 2 高調波の実験は、厚さ 0.5 mm の非線形光学結晶 4 を、上記基本波の光路中に挿入して波長変換による短波長化された高調波を発生させ、さらに第 2 高調波のみを通過させる厚さ 2 mm のバンドパスフィルター（図示せず）を通して第 2 高調波のみを得た。出力されたパルスエネルギーは最大 1.5 mJ であった。この第 2 高調波を、上記と同様焦点距離 150 mm の石英製レンズ 3 により、ポリエチレン板上でスポット径 1.8 mm² になるように集光した。この場合、光路中には上記減衰板 5 は挿入しなかった。アブレーションによるエッチング深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係を調べるために、 10
パルスエネルギーを変化させて実験を行った。

【 0 0 1 5 】

基本波と第 2 高調波とを混合させる本発明の実施の形態 1 の場合、基本波の光路中には、上記減衰板 5 と非線形光学結晶 4 を挿入して 2 波長の超短パルスレーザー光を発生させた。上記と同様焦点距離 150 mm の石英製レンズ 3 により、ポリエチレン板上でスポット径 1.8 mm² になるように集光した。この結果、ポリエチレン板の同一箇所に基本波と高調波とが照射される。アブレーションによるエッチング深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係を調べるために、パルスエネルギーを変化させて実験を行った。

【 0 0 1 6 】

上記いずれの実験も、レーザー光のパルス繰り返し周波数は 10 Hz とし、加工は大気 20
中で行った。

【 0 0 1 7 】

図 2 は、レーザー光照射によりエッチングされた穴の深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係を示している。この場合、基本波（790 nm）と第 2 高調波（395 nm）との比較を行っている。レーザー光の照射時間は 10 s 一定とした。例えば、照射エネルギー密度 80 mJ/cm² のときを比べてみると、基本波の場合のエッチング深さは約 1 μm、第 2 高調波では約 12 μm であった。エッチングが始まる照射エネルギー密度（アブレーションしきい値）も、基本波の場合 50 mJ/cm²、第 2 高調波では 20 mJ/cm² であった。さらに、エッチング形状を走査型電子顕微鏡により観察した結果、い 30
ずれの場合も加工部周辺に熱溶融層は全く形成されていなかった。したがって、エッチングの観点からは、基本波よりも第 2 高調波の方が優れていると考えられる。しかし後述するように、第 2 高調波を用いた場合、加工面は変色し化学組成の変化が起こる。したがって、第 2 高調波の利用は必ずしも得策ではない。

【 0 0 1 8 】

図 3 は、レーザー光未照射及び第 2 高調波で加工されたポリエチレンのラマンスペクトルを示している。未照射ポリエチレン表面に見られるいくつかのシャープなピークの形状が、第 2 高調波照射後変化し、かつ 1200 から 1700 cm⁻¹ のブロードなピークも 40
スペクトルに重なってくる。さらに、1605 cm⁻¹ に新たなピークが見られた。上記ブロードなピークは遊離炭素によるものと同定でき、これがポリエチレン表面の変色の原因である。1605 cm⁻¹ のピークは C=O 結合と同定され、第 2 高調波で加工を行うとエッチング速度は速くできるが、化学組成が変化することが判明した。

【 0 0 1 9 】

図 4 は、レーザー光未照射及び第 2 高調波で加工されたポリエチレン表面の赤外透過スペクトルである。第 2 高調波で加工されたポリエチレン表面からは、1715 cm⁻¹ 及び 832 cm⁻¹ に新たなピークが測定された。前者は C=O 結合、後者は C=C-H 結合と同定できる。赤外透過スペクトルからも、第 2 高調波で加工した表面の化学組成は変 40
化することがわかった。

【 0 0 2 0 】

図 5 は、レーザー光照射によりエッチングされた穴の深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係を示している。この場合、基本波（790 nm）、基本波と第 2 高調波（3 50

95 nm) とを混合した実施の形態 1 の場合を比較している。レーザー光の照射時間は 10 s 一定とした。例えば、照射エネルギー密度 $80 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ のときを比べてみると、基本波の場合のエッチング深さは約 $1 \mu\text{m}$ 、基本波と第 2 高調波とを混合した実施の形態 1 の場合では約 $18 \mu\text{m}$ であった。後者の場合、照射エネルギー密度 $80 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ のとき、第 2 高調波と基本波との割合は $17 : 63 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ であった。第 2 高調波が $17 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ の場合、ポリエチレンはエッチングされない(図 2 参照)。したがって、微弱の第 2 高調波と基本波とを混合すると、第 2 高調波を単独で用いた場合よりもさらにエッチング深さは深くなることわかった。走査型電子顕微鏡によりエッチング形状を観察した結果、加工部周辺に熱溶融層は全く形成されていなかった。

【 0 0 2 1 】

10

図 6 は、レーザー光未照射ポリエチレン及び基本波と第 2 高調波との混合波で加工されたポリエチレンのラマンスペクトルを示している。混合波で加工されたポリエチレンと未照射ポリエチレンとのスペクトルの差異は全く認められなかった。したがって、ラマンスペクトルから、基本波と第 2 高調波との混合波で加工された面の化学組成は全く変化していないことが判明した。

【 0 0 2 2 】

図 7 は、レーザー光未照射ポリエチレン表面及び基本波と第 2 高調波との混合波で加工されたポリエチレン表面の赤外透過スペクトルを示している。ラマンスペクトルと同様、混合波照射後もスペクトルは変化しないことがわかった。したがって、基本波と第 2 高調波との混合波を用いた場合、エッチング速度は著しく速くなり、加工部周辺に熱溶融層も形成せず、かつ加工面の化学組成も変化させない高精度微細加工が行えることを見出した。

20

【 0 0 2 3 】

図 8 は、基本波と第 2 高調波との混合波を用いた実施の形態 1 の場合、ポリエチレン表面での照射エネルギー密度を $80 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ 一定として、第 2 高調波の混合割合を変化させたときのエッチング深さとの関係を示している。レーザー光照射時間は 5 s 一定とした。第 2 高調波 ($F_{3,95}$) と基本波 ($F_{7,90}$) との混合割合を約 $2 : 78 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ とすると、エッチング深さは最も深くなることわかった。このように、基本波への微弱の第 2 高調波の混合は、エッチング速度を著しく速くできることがわかった。

【 0 0 2 4 】

30

本発明の実施の形態 1 は基本波と第 2 高調波との混合波を用いた加工であるが、基本波とオプティカルパラメトリック増幅器 (OPA) 等による長波長化された長波長波との混合波を用いた加工によっても加工速度の改善が可能であり、この場合を本発明の実施の形態 2 として図 9 に示す。

【 0 0 2 5 】

図 9 において、1 は試料固定台で、この上に被加工材料としてポリエチレン板 2 が載置されている。3 はレーザー光集束用の石英製レンズ、6 は長波長波発生用波長変換手段としてのオプティカルパラメトリック増幅器 (OPA)、5 はレーザー光を減衰させる減衰板であり、これらが実施の形態 1 と同様に発生された基本波の光路中に挿入されている。

【 0 0 2 6 】

40

前記基本波の光路中に挿入された OPA 6 により基本波及びこれより長い波長の長波長波を含む超短パルスレーザー光を発生させることができ、基本波と長波長波の混合波が石英製レンズ 3 により、ポリエチレン板上に集光されることでエッチング加工が行われる。

【 0 0 2 7 】

なお、実施の形態 1 は基本波と第 2 高調波との混合波を用いた例であるが、基本波と複数の高調波との混合波を用いてもよいことは明らかである。

【 0 0 2 8 】

また、基本波と高調波に加えて実施の形態 2 に示した基本波より長い波長の長波長波を加えた混合波を用いた材料加工も可能であり、実施の形態 1, 2 と同等の効果が期待できる。

50

【 0 0 2 9 】

実施の形態 1 では波長 7 9 0 n m、パルス幅 1 3 0 f s の Ti:sapphire レーザー光を基本波として用いたが、近赤外線を含む、パルス幅が 1 n s 未満の超短パルスレーザー光を発生可能であれば、Ti:sapphire レーザー光以外のレーザー光源を使用することもできる。

【 0 0 3 0 】

以上本発明の実施の形態について説明してきたが、本発明はこれに限定されることなく請求項の記載の範囲内において各種の変形、変更が可能なのは当業者には自明であろう。

【 図面の簡単な説明 】

10

【 0 0 3 1 】

【 図 1 】 本発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法の実施の形態 1 を示す構成図である。

【 図 2 】 本発明の実施の形態 1 と対比するための材料加工法について、基本波 (7 9 0 n m)、第 2 高調波 (3 9 5 n m) をそれぞれ単独で用いた場合の、エッチング深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係を示すグラフである。

【 図 3 】 レーザー光未照射のポリエチレンと第 2 高調波が照射されたポリエチレンのラマンシフトと強度との関係を示すラマンスペクトル図である。

【 図 4 】 レーザー光未照射のポリエチレンと第 2 高調波が照射されたポリエチレンの波数と強度との関係を示すフーリエ変換赤外透過スペクトル図である。

20

【 図 5 】 本発明に係る材料加工法について、基本波 (7 9 0 n m) 単独、基本波と第 2 高調波 (3 9 5 n m) とを混合した実施の形態 1 の場合の、エッチング深さとレーザー光照射エネルギー密度との関係をそれぞれ示すグラフである。

【 図 6 】 本発明の実施の形態 1 に係る材料加工法について、レーザー光未照射のポリエチレン、基本波と第 2 高調波とを混合して照射されたポリエチレンのラマンシフトと強度との関係を示すラマンスペクトル図である。

【 図 7 】 本発明の実施の形態 1 に係る材料加工法について、レーザー光未照射のポリエチレン、基本波と第 2 高調波とを混合して照射されたポリエチレンの波数と強度との関係を示すフーリエ変換赤外透過スペクトル図である。

【 図 8 】 本発明の実施の形態 1 に係る材料加工法について、基本波 (F_{790}) と第 2 高調波 (F_{395}) との混合波を用い、ポリエチレン表面での照射エネルギー密度を 80 mJ/cm^2 一定とした場合の、エッチング深さと第 2 高調波の混合割合との関係を示すグラフである。

30

【 図 9 】 本発明に係る多波長超短パルスレーザー光による材料加工法の実施の形態 2 を示す構成図である。

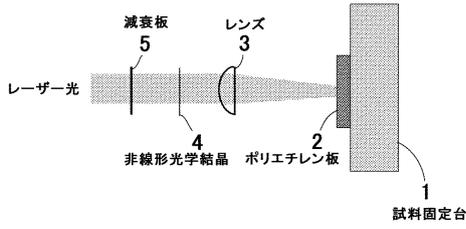
【 符号の説明 】

【 0 0 3 2 】

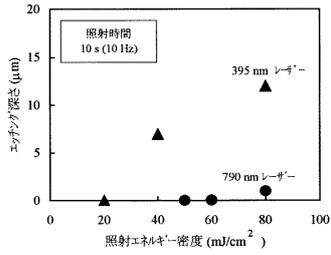
- 1 試料固定台
- 2 ポリエチレン板
- 3 レンズ
- 4 非線形光学結晶
- 5 減衰板
- 6 O P A

40

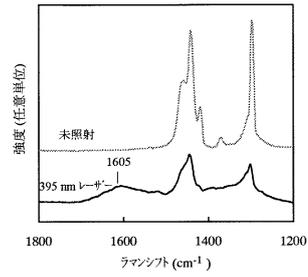
【 図 1 】



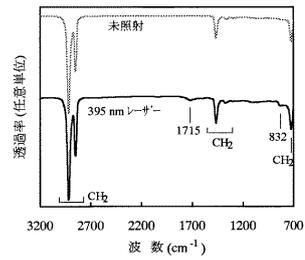
【 図 2 】



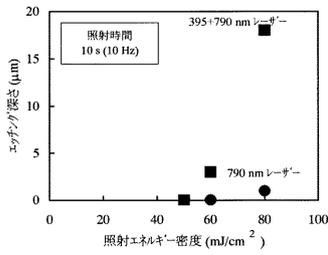
【 図 3 】



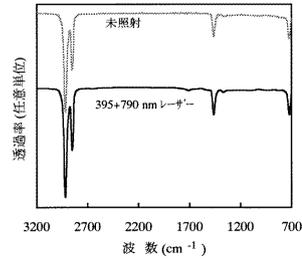
【 図 4 】



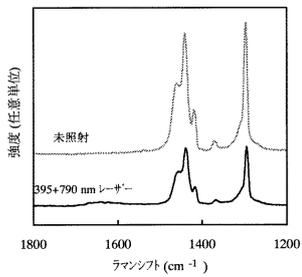
【 図 5 】



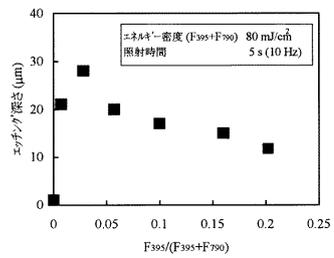
【 図 7 】



【 図 6 】



【 図 8 】



【 図 9 】

