

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4880820号
(P4880820)

(45) 発行日 平成24年2月22日(2012.2.22)

(24) 登録日 平成23年12月9日(2011.12.9)

(51) Int.Cl.

B28D 5/04 (2006.01)
B23K 26/00 (2006.01)

F 1

B28D 5/04
B23K 26/00 330
B23K 26/00 G

請求項の数 9 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2001-12372 (P2001-12372)
 (22) 出願日 平成13年1月19日 (2001.1.19)
 (65) 公開番号 特開2002-210730 (P2002-210730A)
 (43) 公開日 平成14年7月30日 (2002.7.30)
 (43) 審査請求日 平成20年1月11日 (2008.1.11)

(73) 特許権者 504221107
 株式会社レーザーシステム
 北海道札幌市西区二十四軒1条4丁目1番
 10号
 (74) 代理人 100105050
 弁理士 驚田 公一
 (72) 発明者 三澤 弘明
 徳島県徳島市大谷町大開40-39
 (72) 発明者 アンドリウス マルティンキャビティス
 徳島県徳島市八万町柿谷12番地ロイヤル
 コーポ林102号室
 (72) 発明者 サウリウス ヨードカシス
 徳島県徳島市八万町柿谷12番地シャンボ
 ロー林208号室

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ支援加工方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

透明材料からなる被加工材料の内部に、外部に連通する孔を形成するレーザ支援加工方法であって、

レーザビームの集光点が前記被加工材料の表面を通過するように、レーザビームの集光点で前記被加工材料の表面および内部を走査するステップと、

前記被加工材料内の前記レーザビームの集光点で走査されることにより形成された構造変化領域のみをエッチング処理により除去して、前記被加工材料内に孔を形成するステップと、

を有する、レーザ支援加工方法。

10

【請求項 2】

前記被加工材料は、シリカ硝子、サファイヤまたはダイヤモンドである、請求項1に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 3】

前記エッチング処理において使用するエッチャントは、弗酸溶液またはアルゴンガスプラズマである、請求項2に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 4】

前記レーザビームは、フェムト秒パルスレーザまたはピコ秒パルスレーザである、請求項1~3のいずれか一項に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 5】

20

透明材料からなる被加工材料の内部に、外部に連通する孔を形成するレーザ支援加工方法であって、

アキシコンレンズを含む集光光学系により集光させたレーザビームを、前記被加工材料の表面から内部に向けて照射するステップと、

前記被加工材料内の前記レーザビームを照射されることにより形成された構造変化領域のみをエッチング処理により除去して、前記被加工材料内に孔を形成するステップと、
を有する、レーザ支援加工方法。

【請求項 6】

前記被加工材料は、シリカ硝子である、請求項 5 に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 7】

前記被加工材料は、サファイヤまたはダイヤモンドである、請求項 5 に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 8】

前記エッチング処理において使用するエッチャントは、弗酸溶液またはアルゴンガスプラズマである、請求項 7 に記載のレーザ支援加工方法。

【請求項 9】

前記レーザビームは、フェムト秒パルスレーザまたはピコ秒パルスレーザである、請求項 5 ~ 8 のいずれか一項に記載のレーザ支援加工方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、レーザビームを用いて、被加工材料に極微小な孔を形成するレーザ支援加工方法に関し、特に、シリカ硝子、サファイヤ、または、ダイヤモンドを被加工材料として用いる場合において好適なレーザ支援加工方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来、シリコンやガラス等の被加工材料に対して極微小な加工を施す加工方法としては、半導体製造プロセス等において使用されているフォトリソグラフィ技術やインプリンティング技術、及び、エッチング技術やスパッタリング技術などが知られている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

ところで、上述のエッチング技術やスパッタリング技術などによる加工方法においては、被加工材料の表面部近傍における 2 次元的な加工しかできず、該被加工材料の内部にまで亘る 3 次元的な加工ができない。したがって、例えば、被加工材料の内部に到達する孔などを形成する加工は、このような加工方法によっては行うことができなかった。

【0004】

また、上述の加工方法においては、例えば、ダイヤモンドやサファイヤの如き、硬質の材料に対する加工ができない。そのため、従来、ダイヤモンドの如き硬質の材料に対して、例えば極微小な孔を形成する加工を行う場合、極小径のドリルを用いて加工していた。しかし、直徑が、例えば、数 μm 乃至十数 μm というような極小径の孔をドリルによって形成する加工は困難であり、また、より小径の孔を形成しようとする場合には、もはやドリルでの加工は不可能となる。

【0005】

なお、ダイヤモンドに対する加工としては、従来、レーザ加工が提案されている。ところが、ダイヤモンドに対するレーザ加工においては、加工面を平滑な面とすることが困難であり、平滑な壁面を有する極微小な孔を形成する加工などはできなかった。

【0006】

そこで、本発明は、上述の実情に鑑みて提案されるものであって、ダイヤモンドやサファイヤの如き硬質の被加工材料に対しても、極微小な孔を形成する加工を容易、かつ、確実に行うことができ、また、被加工材料の内部にまで亘る 3 次元的な加工を行うことができ

10

20

30

40

50

、さらに、平滑な加工面を形成することができるレーザ支援加工方法を提供しようとするものである。

【0007】

【課題を解決するための手段】

上述の課題を解決するため、本発明に係るレーザ支援加工方法は、透明材料からなる被加工材料に対しレーザビームを集光して照射し、このレーザビームの照射位置を該被加工材料内において少なくとも1箇所は該被加工材料の表面上である位置を含めて走査させ、この被加工材料のレーザビームが照射された部分をエッチング処理により取り除き、該部分を孔とすることを特徴とするものである。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、シリカ硝子、サファイヤ、または、ダイヤモンドのいずれかであることとしたものである。また、本発明は、エッチング処理においては、エッチャントとして、弗酸溶液、または、アルゴンガスプラズマを使用することを特徴とするものである。

10

【0008】

さらに、本発明に係るレーザ支援加工方法は、アキシコンレンズを用いた集光光学系により集光させたレーザビームを、透明材料からなる被加工材料に対し、この被加工材料の表面上である位置を含み該被加工材料の内部に亘る領域に照射し、この被加工材料のレーザビームが照射された部分を取り除き、該部分を孔とすることを特徴とする。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、シリカ硝子であることとしたものである。

20

【0009】

また、本発明は、上記レーザ支援加工方法において、被加工材料のレーザビームが照射された部分を取り除くことを、エッチング処理により行うこととしたものである。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、サファイヤ、または、ダイヤモンドのいずれかであることとしたものである。また、本発明は、エッチング処理においては、エッチャントとして、弗酸溶液、または、アルゴンガスプラズマを使用することを特徴とするものである。

【0010】

また、本発明は、上述の各レーザ支援加工方法において、レーザビームは、パルスの持続時間がフェムト秒乃至ピコ秒オーダーであるパルスレーザであることとしたものである。

30

【0011】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の具体的な実施の形態を図面を参照しながら説明する。

〔1〕本発明に係るレーザ支援加工方法は、図1に示すように、透明材料からなる被加工材料1に対しレーザビーム2を集光して照射し、このレーザビーム2の照射位置を該被加工材料1内において少なくとも1箇所は該被加工材料1の表面上である位置を含めて走査させ、この被加工材料1のレーザビーム2が照射された部分をエッチング処理により取り除き、該部分を孔とするものである。

【0012】

ここで、レーザビーム2は、レーザ光源3より発せられ、アッテネータ4、ビームエキスパンダ5及びハーフミラー6を経て、対物レンズ7に入射されて、被加工材料1の表面部、または、該被加工材料1の内部に集光される。アッテネータ4は、被加工材料1に照射されるレーザビーム2のパワーを調節するための偏光によるアッテネーションを行うフィルタである。この光学系は、倍率が100倍程度の顕微鏡を構成している。また、対物レンズ7としては、開口数(NA)が1.35程度のものを用いることができる。被加工材料1をシリカ硝子とした場合、このシリカ硝子中におけるレーザビームの集光スポットは、レーザビームの波長を795nmとした場合、0.78μm程度となる。また、レーザビームの波長を480nmとした場合、0.47μm程度となる。

40

【0013】

レーザ光源3としては、パルスの持続時間がフェムト秒(fsec)乃至ピコ秒(psec)才

50

ーダであるパルスレーザを用いている。このようなレーザ光源3としては、例えば、チタン-サファイヤレーザ(Ti:Sapphire laser)を用いることができる。この場合、発振波長は、795 nmである。また、レーザパルスの持続時間及び繰り返し周波数としては、生成アンプを併用することにより、例えば、120 fs(FWHM)のパルスを1 kHzの繰り返し周波数で発生させることができる。レーザーパワーは、1パルスあたり、0.30 μJとなる。

【0014】

レーザビーム2が被加工材料に与えるエネルギーは、5 J/cm²乃至50 J/cm²程度となる。なお、5 J/cm²は、被加工材料1がシリカ硝子である場合、このシリカ硝子に対し、加工に必要な構造変化を生じさせるための閾値にあたる。このエネルギーは、10 アッテネータ4によって調節される。

【0015】

レーザビーム2の被加工材料1における照射位置の走査は、該被加工材料1をX-Y-Zステージ(3次元ステージ)8に載置させて移動させることによって行う。このX-Y-Zステージ8は、図1中矢印X、矢印Y及び矢印Zで示す3次元方向のいずれにも移動できるように構成されている。このX-Y-Zステージ8の移動速度は、毎秒125 μm程度である。このX-Y-Zステージ8は、ドライバ9を介して、コンピュータ装置10によって制御されて駆動する。すなわち、コンピュータ装置10は、X-Y-Zステージ8を所定のプログラムに従って駆動させることにより、被加工材料1において、レーザビーム2の集光点が任意の予定された軌跡上を走査されるようとする。20

【0016】

また、被加工材料1においてレーザビーム2が照射されている部分は、対物レンズ7及びハーフミラー6を介して、CCDカメラ11によって観察される。このCCDカメラ11が撮像した映像は、モニタ12に表示されるとともに、映像記録装置(VTR)13によって記録される。また、被加工材料1は、照明装置14により、フィルタ15を介して照明される。

【0017】

そして、被加工材料1としては、上述のシリカ硝子の他、サファイヤ、または、ダイヤモンドなどである。

【0018】

被加工材料1におけるレーザビーム2の照射及び走査が完了すると、この照射が行われた部分は、光学的エネルギーにより構造変化を起こし、屈折率の変化などを生じた状態となつている。

【0019】

被加工材料1がダイヤモンドである場合、レーザビームの照射によって炭化を生ずることがある。また、被加工材料1がシリカ硝子である場合においても、レーザビームの照射後において汚れが生じている場合がある。このような炭化物や汚れは、例えば超音波洗浄によって取り除くことができ、また、アセトン溶液による洗浄や、300 °C、1時間程度のアニールによって除去することができる。

【0020】

次に、この被加工材料1に対して、エッチャント(エッティング溶液、または、エッティングガス)を用いてエッティング処理を行う。このエッティング処理により、被加工材料1においてレーザビーム2の照射が行われた部分が溶解して該被加工材料1より取り除かれる。

【0021】

レーザビーム2の走査は、被加工材料1内において少なくとも1箇所は該被加工材料1の表面上である位置を含めて行われている。そのため、エッチャントは、被加工材料1の表面部のレーザビームの照射が行われた部分を溶解させ、この部分より該被加工材料1の内部のレーザビームの照射が行われた部分に滲入してゆく。また、エッティング処理によって溶解され被加工材料1より取り除かれた部分は、該被加工材料1の表面部のレーザビームの照射が行われた部分より、該被加工材料1の外方側に排出される。そして、被加工材料50

1 からレーザビームの照射が行われた部分がエッチング処理によって取り除かれることにより、平滑な加工面が形成される。

【0022】

このエッチング処理におけるエッチャントとしては、いわゆるウェットエッチングにおいては、フッ化水素酸（HF）溶液を使用することができる。また、いわゆるドライエッチングにおいては、アルゴン（Ar⁺）ガスプラズマを使用することができる。

【0023】

ウェットエッチングにおけるエッチャントであるフッ化水素酸溶液の濃度や成分としては、例えば、5.4wt%HF水溶液（HF（48%）：H₂O = 1 : 9（容積比））、13.4wt%NH₄HF₂溶液（HF（50%）：NH₄HF₂（40%） = 1 : 9（容積比））（以下、バッファードフッ化水素酸という。）、または、HF、HNO₃水溶液（HF（48%）：H₂O : HNO₃（70%） = 15 : 300 : 10（容積比））などを使用することができる。

10

【0024】

このようなエッチャントを使用し、例えば、20分乃至480分（8時間）程度の所定時間に亘るエッチング処理を行うことにより、被加工材料1からレーザビーム2が照射された部分が取り除かれ、図2に示すように、孔が形成される。

【0025】

図3に、上述の各エッチャントを使用した場合におけるシリカ硝子に対するエッチング処理の進行状況を示すグラフを示す。図3において、（a）、（c）及び（e）は、被加工材料に形成した垂直な孔の直径のエッチング処理の進行に応じた拡大状況を示し、（b）、（d）及び（f）は、該垂直な孔のエッチング処理の進行に応じた深さを示している。また、（a）及び（b）は、エッチャントとして、5wt%HF水溶液を使用した場合を示し、（c）及び（d）は、エッチャントとして、HF、HNO₃水溶液を使用した場合を示し、（e）及び（f）は、エッチャントとして、バッファードフッ化水素酸を使用した場合を示している。

20

【0026】

ところで、上述のようにしてレーザビームの照射及びエッチング処理により形成された微小な3次元パターンを実用的に応用するには、得られたパターンが実際に孔であることを確認し、異なる化学溶液が孔（チャンネル）内部に流れ込むようになる必要がある。

30

【0027】

このような理由で、エッチャントとしてHF、HNO₃水溶液を用いてエッチング処理した構造をローダミン染料イソプロピルアルコール溶液に浸した。試料の表面がきれいになった後、ローダミンフォトルミネッセンス強度分布をレーザー走査共焦点顕微鏡で確認した。フォトルミネッセンス励起には、540nmレーザ励起を用いた。確認されたフォトルミネッセンス強度分布によれば、図4に示すように、ローダミン染料溶液は、シリカ（石英）内に形成された孔に容易に浸透していた。この結果によると、上述したレーザ支援加工方法は、小さな領域における微小部分の化学的な製造に適用できることが分かる。

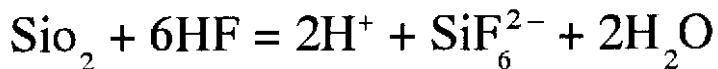
【0028】

40

なお、観測されたエッチング現象の機構を明らかにするためには、2つの重要な点を考慮する必要がある。すなわち、（i）形成されたパターンに沿った非常に速いエッチング率と、エッチング液の選択との関係は薄いが、（ii）直角方向のエッチング率と、特定のエッチング液とは強い関係がある。エッチング溶液によって異なる反応性は、以下に示すエッチングの化学反応によって説明することができる。

【0029】

【数1】



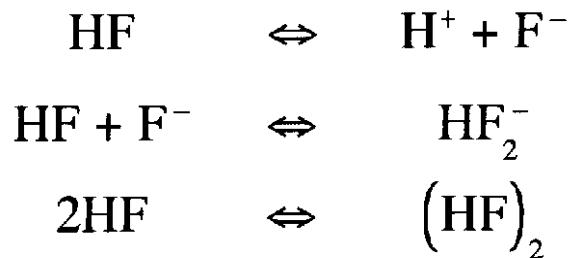
10

【0030】

希釈されたHF溶液においては、次のような平衡関係が確立されている。

【0031】

【数2】



20

【0032】

これらのラジカルの石英のエッティング処理に対する影響は、それぞれ異なっている。フッ化物の濃度が非常に低いと、エッティング処理は、主として HF_2^- によって行われる。濃度が 0.1 mol/l のとき、 HF_2^- と $(\text{HF})_2$ によるエッティングは、同等であることが見いだされた。最後に、高い濃度では、 $(\text{HF})_2$ によるエッティングの寄与が大きい。さらに、再現可能なエッティングでは、 HF_2^- エッティング機構からの寄与を抑制する必要があることを見いだした。 HF_2^- 反応を除くには、HF溶液に酸を加えるか、または、全体のHF濃度を非常に減少させるという2つの方法がある。したがって、これによって、HF水溶液希薄及びHF、 HNO_3 水溶液（フッ化物濃度は 2 mol/l より大きい）によるエッティング処理と、バッファード弗酸におけるエッティング処理との観測された相違を説明することができる。これは、バッファード弗酸は、殆ど HF_2^- と F^- から構成されるからである。

30

【0033】

石英において最も構造変化を生じたパターンの方向と、これに直角な方向のエッティング率の異方性は、円柱形状の空洞に由来する拡散の相違によって部分的に説明することができる。構造変化を生じた部分に沿った拡散は、新鮮なエッチャントが供給される1次元拡散過程と考えることができる。1次元拡散方程式の解（フィックの第1法則）は、次の通りである。

40

【0034】

【数3】

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = D \nabla^2 N(x, t)$$

10

【0035】

ここで、 N は、濃度であり、 D は独立拡散係数である。

【0036】

【数4】

20

$$N(x, t) = N_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right],$$

【0037】

ここで、 x 及び t は、空間軸及び時間軸であり、 N_0 は濃度の初期値である。この解を得るための初期条件は、1次元準無限サンプルについて、 $x = 0$ 及び $t \geq 0$ において $N = N_0$ であり、 $x > 0$ 及び $t = 0$ において $N = 0$ である。これは、実験条件に対応していて、実験では、エッチング液が点 $x = 0$ においてサンプルの表面に供給される。他の座標、例えば y に沿った拡散が同じ拡散係数 D を有して追加されると、形式的には次のように記述される。

【0038】

【数5】

30

$$N(x, y, t) = N_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{\sqrt{4Dt}} \right) \right].$$

40

【0039】

この式によると、石英の被加工材料内の構造変化を生じた部分に沿った濃度の流れ (x に沿った1次元拡散) は、他の方向 (実際にはエッチングチャンネルの横方向) の濃度の勾

50

配により影響を及ぼされ、実際には、円筒状の空洞内で、エッティング処理の間、すなわち、時間が経過するにつれて広がっていくことになる。

【2】

次に、本発明に係るレーザ支援加工方法は、図5に示すように、アキシコンレンズ（軸線を光軸上に位置させた円錐型レンズ）16を用いた集光光学系により集光させたレーザビーム（ベッセルビーム：Bessel beam）2を、透明材料からなる被加工材料1に対し、この被加工材料1の表面上である位置を含み該被加工材料1の内部に亘る領域に照射し、この被加工材料1のレーザビーム2が照射された部分を取り除き、該部分を孔とするものである。

【0040】

レーザビーム2は、上述の実施の形態と同様に、レーザ光源3より発せられたパルスの持続時間がフェムト秒乃至ピコ秒オーダであるパルスレーザである。また、被加工材料1としては、上述のように、シリカ硝子、サファイヤ、または、ダイヤモンドなどである。被加工材料が、サファイヤ、または、ダイヤモンドである場合、上述したように、この被加工材料1のレーザビームが照射された部分を取り除くことを、エッティング処理により行うが、被加工材料が、シリカ硝子である場合、エッティング処理は特に必要ではない。

【0041】

レーザ光源3より発せられたレーザビーム2は、パルス反復率とエネルギーをシャッター及び中立密度減衰器S+Aによって制御され、アキシコンレンズ16により一旦集光され、再び拡散する。アキシコンレンズ16による集光においては、図6中の(a)、(b)に示すように、光軸方向に延びた焦点が形成される。そして、この拡散光は、第1のレンズ17（ $f = 100\text{ mm}$ ）によって収束された後、さらに、第2のレンズ18（ $f = 30\text{ mm}$ ）によって収束される。この第2のレンズ18によるレーザビーム2の収束点上に、被加工材料1が置かれる。このレーザ支援加工方法においては、レーザビーム2は、光軸方向に長さを有する領域に収束されるので、被加工材料1に対する走査をしなくとも、ある長さを有した孔を形成することができる。

【0042】

そして、この被加工材料1を透過したレーザビーム2は、第3のレンズ19（ $f = 16\text{ mm}$ ）を経て、CCDカメラ11によって撮像される。

【0043】

このレーザ支援加工方法における加工条件は、例えば、以下に示すものである。すなわち、レーザ光源3は、チタン-サファイヤレーザ（Ti:Sapphire laser）であり、発振波長は、795nmである。レーザパルスの持続時間は、170fsec（フェムト秒）である。

【0044】

被加工材料がシリカ硝子の場合、レーザビームによって与えられるエネルギーは、6.8J/cm²（被加工材料の厚さ240μm、アキシコンレンズに入射するレーザビームのエネルギーは、1パルスあたり、約25μJ）。

【0045】

被加工材料がサファイヤの場合、レーザビームによって与えられるエネルギーは、150J/cm²（被加工材料の厚さ150μm、アキシコンレンズに入射するレーザビームのエネルギーは、1パルスあたり、約30μJ）。

【0046】

エッティング処理に用いるエッチャントとしては、上述の実施の形態と同様に、HF, HNO₃水溶液（HF（48%）：H₂O：HNO₃（70%）=15：300：10（容積比））などを用いる。約86μm長のシリカ硝子シリンドラに約14μmの孔を形成する場合において、エッティング処理の時間は、16時間程度である。

【0047】

以下、アキシコンレンズを用いた集光光学系により集光させたレーザビームがいわゆるベッセルビームとなることについて説明する。

10

20

30

40

50

【0048】

自由空間を伝播するスカラー場が回折しないための条件は、マッカッテン (MacCutchen) の定理によって初めて定式化された。この定理によると、輻射場の空間スペクトルがリング内に閉じ込められていると、そのような場は、回折のため広がることなく伝播する。一般に、非回折場 (non-diffracting field) は、自己像 (self-imaging) のクラスに属し、スペクトルは複数のリングに閉じ込められている。

【0049】

どの物理領域においても、回折現象は、ヘルムホルツの方程式に支配される。

【0050】

【数6】

10

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(\vec{r}, t) = 0.$$

20

【0051】

最近、ダーニン (Durnin) は、光源がない領域 $z > 0$ を伝播するスカラー場に関するヘルムホルツ方程式 [数6] は、無回折モード解のクラスを有することを指摘した。

【0052】

【数7】

$$E(x, y, z \geq 0, t) = \exp \left[i \left(k_{\parallel} z - \omega t \right) \right] \times \int_0^{2\pi} A(\phi) \exp \left[i \alpha (x \cos \phi + y \sin \phi) \right] d\phi = A \exp \left[i \left(k_{\parallel} z - \omega t \right) \right] J_0(k_{\perp} \rho),$$

30

【0053】

ここで、 $k_{\parallel, \perp}^2 + k_{\perp}^2 = (k^2 / c^2)^2$ において、 k_{\perp} と $k_{\parallel, \perp}$ とは、それぞれ z 軸に垂直及び平行な伝播ベクトルの成分を表している。すなわち、 $k_{\perp} = k \sin \theta$ で、 θ は、図6中の(a)に示す伝播軸についての錐体角であり、 $A(\phi)$ は、 ϕ に関する任意の複素関数であり、 $\rho^2 = x^2 + y^2$ であり、 J_0 は、第1種の0次ベッセル関数である。 $k_{\parallel, \perp}$ が実の場合、[数7]によると、 $z = 0$ における時間平均強度プロフィール (profile) は、次の式になる。

40

【0054】

【数8】

$$I(x, y, z \geq 0) = 1/2 |E(\vec{r}, t)|^2 \sim J_0^2(k_{\perp} \rho).$$

10

【0055】

$k_{\perp} = 0$ であると、解は、単に平面波であるが、 $0 < k_{\perp} < c$ であると、解は、非回折ビームであり、強度プロフィールは、 k_{\perp} に反比例する率で減少し、ビームの有効幅は、図 6 中の (b) に示すように、 k_{\perp} によって決定される。中央のスポットは、最小で約 $3/42$ になる。

【0056】

【数 7】で表現される非回折ビームは、実験によっては実現することができないが、これは、そのエネルギーが無限だからである。しかし、所望の分布をある程度近似し、伝播の際に回折による広がりが非常に小さくするビームを合成することはできる。このような近似の具体例としては、ベッセルガウス (BG) ビームがあり、これは、ガウス分布に従って絞られ、ベッセル関数に従って近軸を伝播する。ベッセルガウスビームは、ガウスプロフィールによって制限された有限エネルギー束を運ぶので、実験によって実現することができる。ベッセルガウスビームの複素振幅は、次のように表現される。

20

【0057】

【数 9】

$$E(x, y, z) = \frac{w_0}{w(z)} J_0 \left(\frac{k_{\perp} \rho}{1 + \frac{iz}{Z_R}} \right) \exp \left(i \left[\left(k^2 - \frac{k_{\perp}^2}{2k} \right) z - \Phi(z) \right] \right) \exp \left(\left[\frac{-1}{w(z)^2} - \frac{ik}{2R(z)} \right] \times \left[\rho^2 + \frac{k_{\perp}^2 z^2}{k^2} \right] \right),$$

30

【0058】

ここで、 z_R は、 $w_0^2 /$ によって与えられる。

【0059】

【数 10】

40

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}, \Phi(z) = \arctan \left(\frac{z}{z_R} \right), R(z) = z + \frac{L^2}{z}.$$

【0060】

ベッセルガウスビームは、 $w_0 k_{\perp} > 1$ のときだけ通常のガウスビームと非常に異なり、【数 9】は、 $k_{\perp} = 0$ であると、ガウスビームの複素振幅に関する標準表現に帰着する。

50

【0061】

ベッセルガウスビームが、図6中の(a)に示すように、くさび角 θ と開口径Dのアキシコンレンズによって形成される場合、その後の径方向の強度分布は、次の式で近似される。

【0062】

【数11】

$$\frac{I(\rho, z)}{I_0} = \lambda k_{\perp}^2 z J_0^2(k_{\perp} \rho),$$

10

【0063】

平面波と光学軸の交差角 γ は、アキシコンレンズについてのスネルの法則によって得られる。

【0064】

【数12】

$$\sin(\delta + \gamma) = n_{ax} \sin(\delta),$$

30

【0065】

ここで、 n_{ax} は、アキシコンレンズの反射率である。様々な物質の微細構造に関するベッセルガウスビームの適用では、3つのビームパラメータを推定することが重要である。すなわち、中央スポットサイズ、非回折伝播距離、ビームによって供給されるパワー密度である。ベッセルガウスビームのスポットサイズは、典型的には、 $J_0(k_{\perp})$ 関数の第1の零点の2倍として定義される。

【0066】

【数13】

40

$$d_0 = 2r_0 = \frac{4.816}{k_{\perp}} .$$

10

【0067】

$N = D \sin(\gamma) / k_{\perp}$ / リングでなるベッセルガウスビームの最大伝播距離は、ビーム伝播軸から離れた最も内側のリング回折の距離によって定義され、次の式で表現される。

【0068】

【数14】

20

$$Z_{\max} = \frac{2}{\pi} N Z_{RB} = \frac{D}{2 \sin(\gamma)} ,$$

30

【0069】

ここで、 $Z_{RB} = \frac{D}{2 \sin(\gamma)}$ は、個別リングのアシンプトチック (asymptotic) 幅に関するレイリー距離である。ベッセルビームのリングに関するエネルギー束は、他のリング、または、中央スポットのエネルギー束に等しいので、最適中央スポット照度効率は、次のようになる。

【0070】

【数15】

40

$$\epsilon_{opt} = \frac{P_{ring}}{P_{total}} = \frac{2}{e^{1/2}} \frac{\lambda}{w_0 \sin(\gamma)}$$

【0071】

50

ここで、 w_0 は、ガウスビーム強度の $1/e^2$ 半径である。ベッセルガウスビームでは、多数のリングが形成されるので、中央スポット（又は任意のリング）でのエネルギーは、ガウスビームに比べると非常に小さい。最終的な効率は、典型的には非常に小さいが、他のベッセルガウスビーム変換方法を用いて得られた効率と比べるとかなり大きい。なお、射影レンズシステムを用いても、レンズシステムでの伝送損失を無視すると、リング間の距離の変化によっては、各リングのスループットに影響は生じない。

【0072】

そして、このレーザ支援加工方法の実施においては、上述のように、チャーブ変調によるパルス増幅に基づくフェムト秒チタン-サファイアレーザ発振器を用いる。このレーザ発振器は、アルゴンイオンレーザによって励起されるモードロックされたチタン-サファイアレーザであり、基準発振波長 = 795 ± 10 nm で動作する。ネオジム：YLF レーザによって励起されるチタン-サファイア増幅器は、フェムト秒パルスをパルスエネルギー安定性 5 % でエネルギー 0.5 mJ / パルスに増幅する。パルスの繰り返し周波数は、1 kHz である。

【0073】

入射レーザ輻射の空間強度プロフィールと拡大ベッセルガウスビーム強度プロフィールは、図 5 に示すように、 $11 \mu m \times 13 \mu m$ 画素サイズの CCD カメラ 11 で監視される。くさび角 = 175 mrad のガラスアキシコンレンズ 16 ($n_{ax} = 1.511$) は、錐体角 92 mrad のベッセルガウスビームを形成するのに用いられる。ビームは、上述したように、第 1 及び第 2 の正レンズ 17, 18 からなる望遠鏡によって被加工材料 1 にイメージされる。したがって、アキシコンレンズ 16 によって生成されたベッセルガウスビームは、第 1 及び第 2 のレンズ 17, 18 の組み合わせによって変換され、錐体角が次の式に従い連続的に変化する他のベッセルガウスビームになる。

【0074】

【数 16】

$$\gamma' = \sin(\gamma) \frac{f_1}{f_2}$$

【0075】

この式によると、試料の外側における最終的なベッセルガウスビームの錐体角は、約 30 0 mrad である。

【0076】

最初に、入射輻射の特性を測定した。強度プロフィールとパルス持続時間の推定を、それぞれ図 7 中の (a) 及び (b) に示す。横方向強度分布のガウスフィットによって、1.5 mm (FWHM) の火面径が得られた。図 7 中の (b) に示すように、自己相関のトレースは、約 100 fsec (FWHM) 持続時間について、セチ 2 乗 (sech^2) 関数によってフィットされた。測定された火面径により、望遠鏡の前後の最大焦点深度 z_{max} が算出できるようになり、それぞれ約 14 mm 及び 4 mm であることが分かった。両方の場合とも、【数 15】によると、ベッセルガウスビーム中央最大照度効率は、 8.6×10^{-3} になると推定される。

10

20

30

40

50

【0077】

ベッセルガウスピームによって誘起される光学降伏を、3つの物質について調べる。物質は、(i) (240 ± 10) μm 厚の乾燥 v-SiO_2 、(ii) (150 ± 1) μm 厚の結晶質サファイア、及び、(iii) 4 mm乃至10 mm厚の光学用プレキシガラスである。試料は全て洗浄し、2座標マイクロメータ移動ステージの金属製ターゲット支持部材にマウントした。石英ガラスとプレキシガラスの試料は、横から構造の微視的分析ができるように研磨する。

【0078】

ここで、(焦点の最大深度 z_{max} について)線状損傷(構造変化)についての光誘起損傷閾値(LIDT)は、1スポット当たりレーザショットを10回照射した後、光学顕微鏡で認識できる物質伝送の恒久変化が観測されるため必要になる最小のエネルギーとして定義する。試料の検査は、約1 μm (40倍拡大、NA = 0.55の対物レンズ)の最大横分解能の倒立顕微鏡(170倍)によって行う。

10

【0079】

上述のようにして本発明に係るレーザ支援加工方法を実施し検査するために、まず、ビームが非回折であることを確認するため、アキシコンレンズの後の幾つかの距離において、変換された光場の空間強度分布 $I(\cdot, z)$ を測定した。これらの検査では、強度分布を拡大するため、第3のレンズとして、開口数(NA) = 0.4の顕微鏡対物レンズを用いた。

【0080】

20

この測定によると、アキシコンレンズから約13.5 mmの距離における中央スポット強度に鋭い減少が見られた。この値は、算出した焦点深度 $z_{\text{max}} = 14 \text{ mm}$ によく一致する。また、距離11 mmにおける変換ビーム強度の空間分布を、60倍に拡大して、図8の(a)、(b)に示す。第1のリングの強度分布は、少し歪んでいるが、中央スポットと周囲の他のリングは、回転対称性を維持している。このような歪みは、アキシコンレンズの収差、すなわち乱視に帰される。範囲1 mm乃至13 mmの距離において、 $d_0 = 7.6 \pm 2 \mu\text{m}$ で測定された中央ロープの径は、実験精度内では一定で、[数13]によって算出された値 $d_0^{\text{ca1}} = 6.8 \mu\text{m}$ とよく一致する。半径3 μm のベッセルビームを $w_0 = 3 \mu\text{m}$ のガウスピームと比較すると、後者のスポットは100レイリー範囲(3.6 mm)の伝播後に、100 w_0 程度まで広がる。逆に、ベッセルビームの中央スポットは、同じ距離の伝播後には狭くなる。なお、スポットサイズは、 z_{max} 限界で最小になる。

30

【0081】

ベッセルガウスピームの径方向強度分布をより詳細に調べるため、アキシコンレンズから固定距離における実験により確認された径方向強度分布を、[数11]に基づく理論モデルの結果と比較する。この関数の零点と実験で測定された横方向強度分布は、よく一致する。測定された強度ピークの第2の極大は、[数11]の極大と異なっているが、これは、算出強度依存性は、一様強度分布の交差波についてのみ成立するからである。実験の場合、交差波は、収差による一様強度分布を保存しない。この結果から、アキシコンレンズによって生成されたビームは、非回折ベッセルガウスピームによってよく近似できることが分かった。

40

【0082】

また、第1及び第2のレンズ17, 18(望遠鏡)によって変換されたビームの空間強度分布を調べた。最初に、遠隔場強度プロフィールからビーム錐体角を決定した。ベッセルガウスピームの錐体角 $\theta' = 320 \text{ mrad}$ は、[数16]から得られる理論的予測値を超えており、この状況は、この表式が錐体角の定性的予測にのみ用いることができるることを示している。変換ビームの空間強度分布を、40倍に拡大したものを、図8中の(b)に示す。中央スポット径と焦点深度は、それぞれ $d_0 = 2 \mu\text{m}$ 及び $z_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$ である。したがって、このようなビームの構成によって予期される最大アスペクト比は、 $z_{\text{max}} / d_0 = 2 \times 10^3$ である。

50

【0083】

上述のようなベッセルガウスビームの微細構造検査において、全ての試料は、ビームの非回折伝播の範囲 z_{max} に設置した。最終的な線形形状の典型的な光学伝送イメージは、図9に示すように、最初に、プレキシガラスにおける錐体角 9.2 mrad のベッセルガウスビームについて構成されるLIDTよりパターンを決定した。測定結果によると、プレキシガラスにおける線状パターン形状についてマルチショットLIDTは、約 0.9 J/cm^2 である。図9中(a)、(b)及び(c)に示すように、ビーム入射板の損傷(構造変化)領域の径は、出射面より約6倍大きく、すなわち、ビームの入射径は、ビームの強度分布における第1のリングの径と同程度である。ここで、試料表面の中央スポット径は、 $7.6 \mu\text{m}$ である。物質で観測された炭化現象は、幾つかの連続したレーザパルスを吸収して熱せられ、最終的に、大きな損傷スポットを生じたものと説明される。10

【0084】

石英と結晶質サファイアの加工については、錐体角 3.20 mrad のベッセルガウスビームを用いた。測定されたLIDTは、石英とサファイアについて、それぞれ 6.8 J/cm^2 及び 8.2 J/cm^2 であった。石英について単一ショットLIDTは、高い開口数の対物レンズによって集光されたガウスビームの場合、 5 J/cm^2 であった。最近、マルチショット照射後、LIDTが減少することが報告されている。したがって、ベッセルガウスビームによるレーザ加工は、物質の破壊について高いフルエンスを要する。上述のLIDTの定義によると、 10^3 倍大きい体積のガラスが同時に励起されなければならないので、驚くことはない。両方の物質、すなわち、石英について図9中の(d)、(e)及び(f)、サファイアについて図9中の(g)、(h)及び(i)に示すように、線形パターンの観測された形状は、プレキシガラスにおける形状と類似しているが、径の測定された差異は $2 \mu\text{m}$ だけである。また、図9中の(h)に示すように、サファイアにおいては、損傷スポットの径は、表面でのみ通常の顕微鏡で測定することができる。20

【0085】

図10中の(a)、(b)に示す原始間力顕微鏡(AMF)による画像は、フルエンスを2倍にしたLIDTを用いたレーザ加工の後の石英の入射側(図10中(a))と出射側(図10中(b))の表面の具体例を示している。表面におけるベッセルガウスビームの径は、 $d_0 = 2 \mu\text{m}$ であった。入射側及び出射側表面における径は、それぞれ約 $2 \mu\text{m}$ 及び $1.2 \mu\text{m}$ であった。石英試料の中央スポットの周囲の他の変化は、ベッセルガウスビームの高次の強度の極大によって、表面が刻印されたことを示している。これらさらなる同心円上のピット $d_1 = 4 \mu\text{m}$ の径と位置は、図8中の(b)に示すように、ベッセルガウスビームの第1のリングの直径と、この内側の強度分布とほぼ等しい。したがって、構造のサイズは、表面におけるレーザビームのサイズと同程度である。除去されたピットの周縁において、溶融した物質は観測されなかった。30

【0086】

伝播方向に沿って、スポットサイズは、観測によると減少しているが、これは、暫定的にはフェムト秒パルスの自己集光によって説明することができる。しかし、測定したLIDT値に対応する照射パワーは、プレキシガラスのLIDTを P_{cr} とすると、サファイアのLIDTが $0.69 P_{cr}$ 、石英のLIDTが $0.42 P_{cr}$ というガウスビームの臨界自己集光パワー P_{cr} より低い。自己集光の影響を確認するため、 $1 P_{cr}$ 乃至 $6 P_{cr}$ の範囲のパワーレベルで 1 cm 厚のプレキシガラス試料の内側に線形パターンを記録した。各パワーレベルにおいて、幾つかのパターンが記録された。測定によると、パターンの長さは、 $1 P_{cr}$ から約 $1.5 P_{cr}$ のパワーに応じて、約 2 mm から 4 mm に増加している。より高いパワーレベルでも、パターンの長さには変化が見られず、径の緩慢な増加だけが見られた。これは、線形の損傷長は、ベッセルガウスビームの焦点深度にのみ依存していることを示す明白な証拠である。40

【0087】

【発明の効果】

上述のように、本発明に係るレーザ支援加工方法は、透明材料からなる被加工材料に対

しレーザビームを集光して照射し、このレーザビームの照射位置を該被加工材料内において少なくとも1箇所は該被加工材料の表面上である位置を含めて走査させ、この被加工材料のレーザビームが照射された部分をエッティング処理により取り除き、該部分を孔とすることを特徴とする。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、シリカ硝子、サファイヤ、または、ダイヤモンドのいずれかであることとしたものである。また、本発明は、エッティング処理においては、エッチャントとして、弗酸溶液、または、アルゴンガスプラズマを使用することを特徴とするものである。

【0088】

さらに、本発明に係るレーザ支援加工方法は、アキシコンレンズを用いた集光光学系により集光させたレーザビームを、透明材料からなる被加工材料に対し、この被加工材料の表面上である位置を含み該被加工材料の内部に亘る領域に照射し、この被加工材料のレーザビームが照射された部分を取り除き、該部分を孔とすることを特徴とする。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、シリカ硝子であることとしたものである。

10

【0089】

また、本発明は、上記レーザ支援加工方法において、被加工材料のレーザビームが照射された部分を取り除くことを、エッティング処理により行うこととしたものである。そして、本発明は、このレーザ支援加工方法において、被加工材料を、サファイヤ、または、ダイヤモンドのいずれかであることとしたものである。また、本発明は、エッティング処理においては、エッチャントとして、弗酸溶液、または、アルゴンガスプラズマを使用することを特徴とするものである。

20

【0090】

そして、本発明は、上述の各レーザ支援加工方法において、レーザビームは、パルスの持続時間がフェムト秒乃至ピコ秒オーダーであるパルスレーザであることとしたものである。

【0091】

すなわち、本発明は、ダイヤモンドやサファイヤの如き硬質の被加工材料に対しても、極微小な孔を形成する加工を容易、かつ、確実に行うことができ、また、被加工材料の内部にまで亘る3次元的な加工を行うことができ、さらに、平滑な加工面を形成することができるレーザ支援加工方法を提供することができるものである。

30

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るレーザ支援加工方法を実施する装置の構成を示す側面図である。

【図2】上記レーザ支援加工方法により形成された孔を示す側面図である。

【図3】上記レーザ支援加工方法におけるエッティング速度を示すグラフである。

【図4】上記レーザ支援加工方法により形成された孔を示す斜視図である。

【図5】アキシコンレンズを用いる本発明に係るレーザ支援加工方法を実施する装置の構成を示す側面図である。

【図6】(a)は、上記アキシコンレンズによる集光状態を示す側面図であり、(b)は、上記アキシコンレンズにより集光されたビームの強度分布を示すグラフである。

40

【図7】(a)は、上記アキシコンレンズへの入射レーザビームの近接強度分布を示すグラフであり、(b)は、第2高調波によって得られたレーザパルスによる自己相関図形を示すグラフである。

【図8】実験的に確認された異なる円錐角のベッセルガウスビームの拡大強度分布を示すグラフ及び正面図であり、(a)は、 $\theta = 9.2 \text{ mrad}$ の場合であり、(b)は、 $\theta = 3.2 \text{ mrad}$ の場合である。

【図9】(a)(b)(c)は、プレキシガラスにおいて、(d)(e)(f)は、シリカガラスにおいて、(g)(h)(i)は、サファイヤにおいて、ベッセルガウスビームによって生成された損傷スポットの光学透過像を示す正面図である。

【図10】ベッセルガウスビームにより石英へ10回のレーザショットにより形成された微細なホールを、ビーム入射側(a)及びビーム出射側(b)において示すAFM画像を

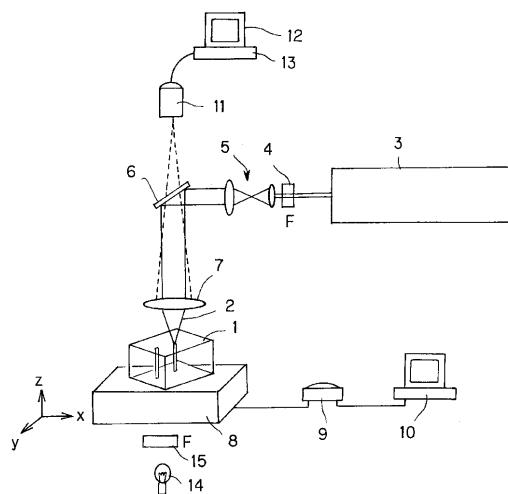
50

示す正面図である。

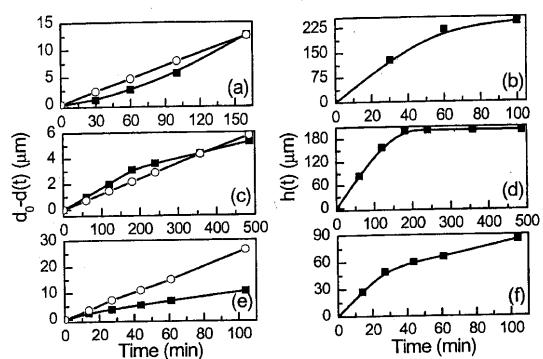
【符号の説明】

1 被加工材料、2 レーザビーム、3 レーザ光源、7 対物レンズ、8 X - Y - Z
ステージ、16 アキシコンレンズ

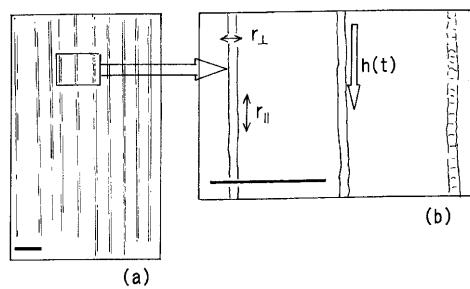
【図 1】



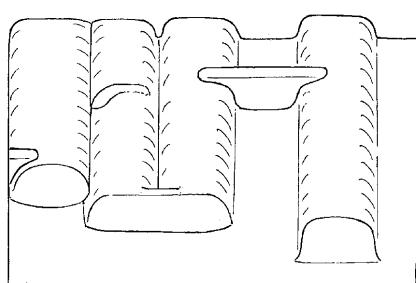
【図 3】



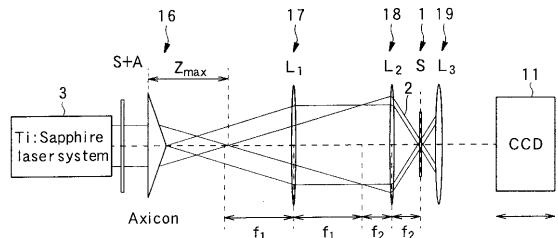
【図 2】



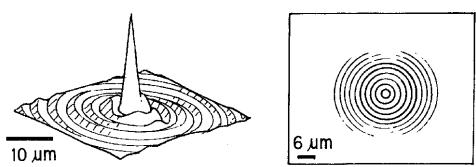
【図 4】



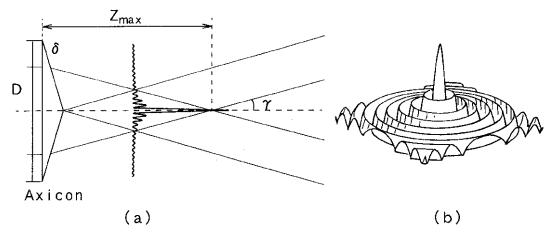
【図5】



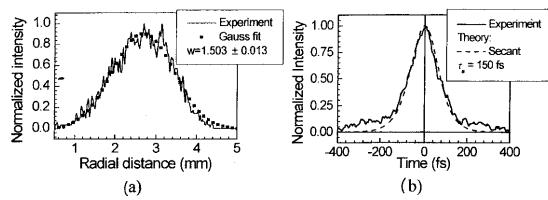
【図8】



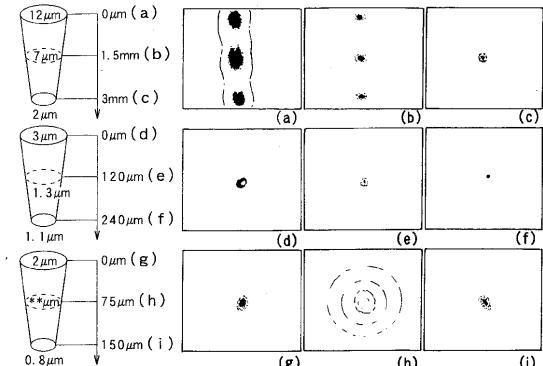
【図6】



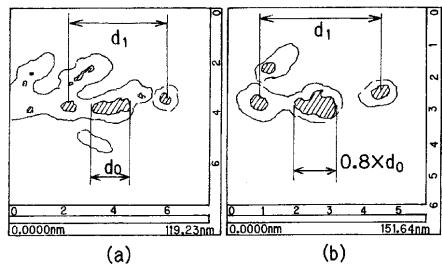
【図7】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

審査官 馬場 進吾

(56)参考文献 特開2000-343714(JP, A)

特開2000-288766(JP, A)

特開2000-056112(JP, A)

特開平09-258012(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B28D 5/04

B23K 26/00