

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-288503  
(P2005-288503A)

(43) 公開日 平成17年10月20日(2005.10.20)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

B23K 26/00  
B23K 26/06

F1

B23K 26/00 320E  
B23K 26/06 A

テーマコード(参考)

4E068

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2004-108300 (P2004-108300)	(71) 出願人	504221107 株式会社レーザーシステム 北海道札幌市北区北7条西4丁目1番地4
(22) 出願日	平成16年3月31日(2004.3.31)	(74) 代理人	100105050 弁理士 鷺田 公一
		(72) 発明者	三澤 弘明 北海道札幌市中央区北1条西14丁目1番3 パークホームズ知事公館304号
		(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 ポロー林207号
		(72) 発明者	坪井 泰之 北海道札幌市東区北43条東1丁目1番5 号
		Fターム(参考)	4E068 AE00 CB10 CC01 CD01 CD13 DB11

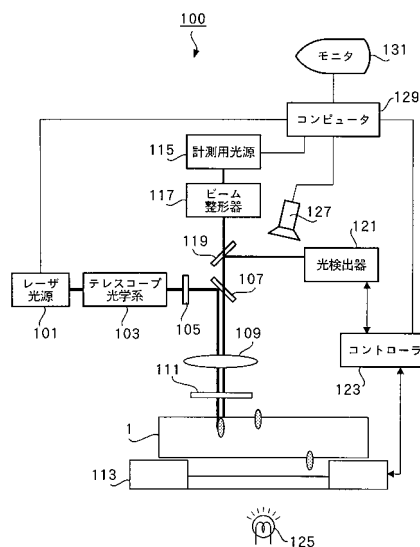
(54) 【発明の名称】 レーザ加工方法

(57) 【要約】

【課題】 サファイアなどの硬質結晶体に対しても、より高い精度で効率良く精密な切断を行うこと。

【解決手段】 レーザ光源101から出力される355nmパルスレーザー光を、光学系を介して、ステージ113上の加工対象物(例えば、サファイア)1に照射する。このとき、焦点位置を加工対象物1の内部に合わせる。355nmパルスレーザー光を照射することにより、加工対象物1の内部に3光子吸収による微小クラックを形成するとともに、そのクラックを自己収束効果により光軸方向に伸長させる。また、800nmやそれより長波長のベッセルビームを使用することにより、さらに光軸方向に長いクラックを形成することができる。

【選択図】 図3



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

光学系を介してレーザー光を加工対象物の内部に集光照射し、前記加工対象物の内部に多光子吸収を生起させ光軸方向に伸長した形状のクラックを形成し、単一の走査で前記加工対象物の切断を行うことを特徴とするレーザー加工方法。

## 【請求項 2】

前記レーザー光は、前記クラックを光軸方向に伸長する自己収束効果を生起させるパワーであることを特徴とする請求項 1 記載のレーザー加工方法。

## 【請求項 3】

前記光学系内のレンズは、前記クラックを光軸方向に伸長する自己収束効果を生起させる開口数であることを特徴とする請求項 1 記載のレーザー加工方法。 10

## 【請求項 4】

前記レンズは、開口数  $NA = 0.4$  のレンズであることを特徴とする請求項 3 記載のレーザー加工方法。

## 【請求項 5】

本来のレーザー光集光位置を、クラック形成予定位置よりも遠い位置に配置して、自己収束効果により生起されるクラックの形成位置を制御することを特徴とする請求項 1 記載のレーザー加工方法。

## 【請求項 6】

前記レーザー光はベッセルビームであることを特徴とする請求項 1 記載のレーザー加工方法。 20

## 【請求項 7】

前記ベッセルビームは、ガウシアンビームをアキシコンレンズにより整形して形成することを特徴とする請求項 6 記載のレーザー加工方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、レーザー加工方法に関し、特に、加工対象物を切断するのに好適なレーザー加工方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、この種の技術として、パルスレーザーを、加工対象物の内部領域に照射し、集光領域を改質させてクラックを発生させ、加工対象物を切断する技術が提案されている（特許文献 1）。

## 【0003】

特許文献 1 に開示された切断方法においては、 $1064\text{ nm}$  レーザ光を対物レンズにより加工対象物の内部に集光し、加工対象物の内部にクラックを形成する。このレーザー光を切断予定ラインに沿って走査すると、クラックが切断予定ラインに沿って整列する。次に、このような内部改質を行った加工対象物に対し、吸収性レーザーを照射することにより、内部に熱応力（ストレス）が発生し、加工対象物が切断される。 40

## 【0004】

特許文献 1 において例示されている加工対象物は、圧電素子ウェハや半導体ウェハ、ガラス基板などであり、使用されるレーザー光は、集光位置におけるピークパワー密度が  $1 \times 10^{-8} \text{ (W/cm}^2\text{)}$  の波長  $1064\text{ nm}$  のパルスレーザーである。

## 【0005】

特許文献 1 によれば、このような条件下で、加工対象物の集光領域が多光子吸収により改質されるとする。その態様として、(1) 改質領域がクラックとして形成される場合、(2) 改質領域が溶融処理領域である場合、(3) 改質領域が屈折率変化領域である場合、が提示されている。

## 【特許文献 1】特開 2002 - 192370 号公報

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

しかしながら、特許文献1記載の技術においては、集光領域における多光子吸収の発生状態および集光領域の改質のプロセスについての具体的検討がなされておらず、多光子吸収による領域改質の実態の詳細は不明である。

## 【0007】

さらに、加工対象物は、波長1064nmのパルスレーザに適した材料が選定されており、その他の硬質結晶体についての検討・言及はなされていない。

## 【0008】

本発明者の実験によれば、波長1064nmのパルスレーザによっては、サファイアを精密に切断することができなかった。すなわち、上記条件によれば、図11に示すように、発生するクラックの形状は、微小スポットにはならず、30 $\mu$ m程度の大スポットとなり、その周辺形状も不規則で乱れていた。そして、このクラックを起点として、サファイア基板の切断を行ったところ、「割れ」は切断予定ラインを逸脱し、その切断面も乱れたものとなった。

10

## 【0009】

また、このようなサイズが大きく(30 $\mu$ m)形状の乱れたクラックの部位は、加工対象物が切断に至る際には粉々に粉碎される可能性が高い。すなわち、30 $\mu$ mのクラックの部位は、加工対象物の切断に際しそのまま「切りしろ」になる可能性が高く、切断における加工対象物の歩留まりの低下を招く。例えば、加工対象物を300 $\mu$ m $\times$ 300 $\mu$ mに切断しようとした場合、およそ加工対象物の約20%が切りしろとして消費されてしまうことになる。

20

## 【0010】

特許文献1記載の技術におけるクラック形成機構は、電子なだれ破壊機構、つまり、レーザ誘起絶縁破壊現象によるものと考えられる。電子なだれ破壊では、レーザ集光スポットにおいて、原子核から遊離した自由な電子が多量に発生し、それぞれがレーザ光により加速され、大きな運動エネルギーを獲得した高温状態が発生する。その結果、レーザスポットサイズの周囲まで熱拡散が起こり、しかも、発生した高エネルギーの自由電子がスポットサイズの周囲まで散逸する。このような熱拡散・自由電子散逸により、結果的に、クラックサイズは、集光スポットサイズよりもはるかに大きくなり、30 $\mu$ m以上の不定形なサイズとなるのである。

30

## 【0011】

また、サファイアが結晶体であることが、乱れたクラックの原因の一つである。特許文献1記載の技術においては、ガラスは非結晶物質であり、また、シリコンもレーザ照射により溶融し非晶質として振舞うため、ある程度の加工精度が得られる。しかし、サファイアは結晶性を有するため、生成するクラックおよび切断面の制御を、より精密に行う必要がある。

## 【0012】

本発明は、かかる点に鑑みてなされたものであり、例えば、サファイアなどの硬質結晶体に対しても、より高い精度で効率良く精密な切断を行うことができるレーザ加工方法を提供することを目的とする。

40

## 【課題を解決するための手段】

## 【0013】

本発明は、光学系を介してレーザ光を加工対象物の内部に集光照射し、加工対象物の内部に多光子吸収を生起させ光軸方向に伸長した形状のクラックを形成し、単一の走査で加工対象物の切断を行うようにした。

## 【発明の効果】

## 【0014】

本発明によれば、例えば、サファイアなどの硬質結晶体に対しても、より高い精度で効

50

率良く精密な切断を行うことができるレーザ加工方法を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下、本発明の実施の形態について、図面を参照して詳細に説明する。

【0016】

(実施の形態1)

本発明者は、加工精度を向上させるためには、クラックのサイズ・形状を制御することが必要であることを見いだした。また、クラックのサイズ・形状を制御するためには、それが微小サイズであることを要するため、クラックの生成を、絶縁破壊による電子なだれにより生じられるものではなく、多光子吸収により生じられるものとする必要があること

10

【0017】

本発明は、1光子のエネルギーがバンドギャップの3分の1以上であるパルスレーザを使用して多光子吸収によりクラックを生じさせるものである。

【0018】

まず、本発明の原理を説明する。

【0019】

固体における本質的なレーザ損傷機構としては、1)電子なだれ、2)多光子吸収、の2つの機構が考えられる。ここにいう「電子なだれ」とは、「電気絶縁破壊」とほぼ同義である。この絶縁破壊による加工対象物内部の改質・破壊は、領域制御に困難を伴う。すなわち、絶縁破壊によって生ずる内部クラックは径が大きく、その周辺領域に不規則な凹凸が発生するため、精密微細な加工・改質には不適であると考えられる。

20

【0020】

使用するレーザの波長が1060nmよりも長波長の場合、上記1)の「電子なだれ」による破壊理論が適用されると解される。一方、レーザの周波数が高くなり(つまり、波長が短くなり)、または、材料の禁止帯幅(バンドギャップ) $E_g$ が狭くなり、光子エネルギー $h\nu$ とバンドギャップ $E_g$ との関係が $h\nu > E_g/3$ となると(つまり、3光子のエネルギーがバンドギャップを越えると)、破壊機構は「電子なだれ」よりもむしろ「多光子

30

吸収」による機構となると考えられる。逆に言えば、純粋な多光子過程での破壊は3光子過程以上ではほとんど重要ではなく、4光子吸収や5光子吸収は、実際はほとんど無視できるといえる(以上、レーザー学会編「レーザーハンドブック」(昭和57年12月15日第一版第一刷発行、オーム社)455ページ~456ページ参照)。

【0021】

例えば、光子エネルギー $h\nu = 1.165\text{ eV}$ である波長1064nmレーザ光を用い、加工対象物質を、シリコン(バンドギャップ $E_g = 1.12\text{ eV}$ )やパイレックス(R)ガラス( $E_g = 4\text{ eV}$ 以上)とした場合には、多光子吸収は生じない。理由は、シリコンにおいては、1光子エネルギーが既にバンドギャップとほぼ等しくなっているため、多光子吸収ではなく、単純な1光子吸収により損傷が誘起されていると考えられ、また、パイレ

40

ックス(R)ガラスにおいては、そもそも上記の関係 $h\nu > E_g/3$ が成り立たないためである。光子エネルギー $h\nu = 1.165\text{ eV}$ である波長1064nmレーザ光を加工対象物のサファイア( $E_g = 8\text{ eV}$ )に照射した場合も、もちろん $h\nu > E_g/3$ の関係は成り立たない。この場合、 $7h\nu > E_g$ であり、多光子吸収を誘起するには7光子吸収を要することとなるが、そのような多光子吸収は実際にはほとんど無視できる。すなわち、これらにおけるレーザ損傷の機構は、いずれの場合も「多光子吸収」ではなく「電子なだれ」破壊機構によるものと考えられるのである。

【0022】

本実施の形態では、光子エネルギー $h\nu = 3.5\text{ eV}$ である波長355nmレーザ光を用い、これを加工対象物のサファイアに照射する。サファイアのバンドギャップ $E_g$ は約8

50

e Vである。この場合、 $h > E_g / 3$ の関係が成り立つ。波長355 nmレーザ光をバンドギャップ $E_g$ が約4 e V以上であるパイレックス(R)ガラスに照射する場合も $h > E_g / 3$ の関係は同様である。

【0023】

後述する実験例に示すように、波長355 nmのレーザ光をサファイアに照射すると、波長1064 nmのレーザ光を用いた場合と比べて、1/10以下の小さなクラックが形成された。これは、クラックの発生が、「多光子吸収」によって誘起されるレーザ損傷によるものであるからである。

【0024】

さらに、本発明においては、自己収束効果(self-focusing)を利用するため、本来の集光位置よりも手前に、光軸方向に伸長した形状のクラックを形成することができる。ここで、本来の集光位置とは、自己収束効果がない場合の集光位置(焦点位置)を意味する。このような光軸方向に長い形状のクラックを形成すれば、レーザ光を光軸と垂直な方向に移動することにより、少ない走査回数で加工対象物の切断を行うことが可能となるため、短時間で凹凸の少ない精密切断を行うことができる。

10

【0025】

ここで、自己収束効果について説明しておく。通常、レーザ光の、光軸に対して垂直な方向における強度分布はガウス型の関数に従い、このようなレーザ光をガウシアンビームという。ガウシアンビームでは、ビームの中央部で光の強度が最も高く、周辺に向かうにつれて光の強度が低くなる。ガウシアンビームがガラスやサファイアのような透明材料中を進行する場合、光の強度が低ければ、レーザ光は直進するのみであり、これをレンズで集光しても通常の幾何光学に従う角度で集光・発散される。

20

【0026】

しかし、光の強度が高い場合には、材料の屈折率はその光の強度に応じて変化する。これを非線形効果という。すなわち、材料の屈折率 $n$ は、通常の屈折率 $n_1$ と非線形屈折率 $n_2$ を用いて、 $n = n_1 + n_2 E^2$ と表される。ここで、 $E$ は光の電場強度である。ガウシアンビームがガラスやサファイアのような透明材料中を進行する場合には、この非線形効果により、ビームの中央部では屈折率が大きくなり、ビームの周辺部では屈折率は小さくなる。このような屈折率の分布はビームに対して凸レンズと同じ作用を及ぼす。その結果、ビームは、この凸レンズ作用により自発的に集光する。これが自己収束効果である。

30

【0027】

図1(A)は、パルスレーザ光(ガウシアンビーム)Lを対物レンズ3によって加工対象物1の内部に集光させた状態を示している。同図中、Pはパルスレーザ光Lの集光位置(焦点位置)である。加工対象物1は、例えば、サファイア基板である。

【0028】

図1(B)は、集光位置P付近の拡大図である。パルスレーザ光Lは、本来の集光位置 $P_0$ の手前で、所定サイズのスポット径に集光される。ここでは、例えば、加工対象物1の内部を進行するパルスレーザ光Lのうち3つのレーザ光 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ を示している。レーザ光 $L_1$ はビームの周辺部のレーザ光であり、 $L_3$ はビームの中央部のレーザ光であり、 $L_2$ は $L_1$ と $L_3$ の間のレーザ光である。この場合、光の強度はレーザ光 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ の順に高くなるため、屈折率は同じくレーザ光 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ の順に大きくなる。したがって、パルスレーザ光Lは、同図に示すように、本来の集光位置 $P_0$ の手前に集光し、加工対象物1の内部に光軸方向に長い異方的な形状のクラックCを形成する。

40

【0029】

図2は、自己収束効果が起こる場合の過程をより詳細に説明した図である。

【0030】

図2(A)は、図1(A)と同様に、パルスレーザ光(ガウシアンビーム)Lを対物レンズ3によって加工対象物(例えば、サファイア基板)1の内部に集光させた状態を示している。Pは、上記のように、パルスレーザ光Lの集光位置(焦点位置)である。

【0031】

50

図2(B)は、集光位置P付近の拡大図である。ビームの周辺部 $R_1$ では光の強度が低いため、屈折率はビームの中央部 $R_2$ よりも小さく、ビームの中央部 $R_2$ では光の強度が高いため、上記非線形効果により屈折率が大きくなる。このような屈折率分布の形成は、仮想的な凸レンズ5の形成と同じ効果を生起する(図2(C)参照)。

#### 【0032】

そして、非線形光学現象による凸レンズ効果により、パルスレーザー光Lは、図2(D)に示すように、自発的に集光する(自己収束効果)。この自己収束効果は、レーザー光のパワーが強く対物レンズの開口数(NA: Numerical Aperture)が小さいほど大きくなる。この自己収束効果により、ビームは細く集光され、本来の集光位置 $P_0$ の上方(手前)に、光子密度が高くなる領域(集光スポット) $R_3$ が形成される。すなわち、実際の集光位置は、本来の集光位置 $P_0$ の手前に存在することになる。これは、パルスレーザー光Lが加工対象物1の内部に進入した時点から自己収束効果が起きるためである。また、非線形効果は、光の強度が高い所、つまり、集光位置付近でより顕著になるため、集光スポット $R_3$ は、図示のように、光軸方向に伸張した形状となる。集光スポット $R_3$ では光子密度が高くなるため、多光子吸収が効率良く生起する。

10

#### 【0033】

そのため、図2(E)に示すように、加工対象物1の内部に、深さ方向に伸張した形状を有する微小なクラック7が形成される。実験によれば、加工対象物1がサファイア基板の場合、クラックの、光軸と垂直方向のサイズは、 $1\mu\text{m}$ 程度にまで小さくできた。この値は、 $1064\text{nm}$ レーザー光の場合の $1/30$ であり、スポットサイズの大きさ( $355\text{nm}$ の光は $1064\text{nm}$ の光よりも $1/3$ まで小さく集光できる)から予想される値( $30\mu\text{m} \times 1/3 = 10\mu\text{m}$ )よりも一桁小さいため、極めて高精度の加工ができることになる。

20

#### 【0034】

さらに、上記クラックの形成を加工態様に応じて制御する。例えば、ある加工対象物を切断する場合に、本来の集光位置の上方に形成されるクラックが加工対象物の中央に位置するように、本来の集光位置が加工対象物の中央よりも下方に位置するようにする。加工対象物の表面または裏面に到達する位置にクラックを形成する場合にも、本来の集光位置と実際にクラックが発生する位置との距離を考慮した上で、レーザー光の集光位置を制御すればよい。

30

#### 【0035】

以上のように、本発明は、バンドギャップと光子エネルギーとの関係を考慮した上で、積極的に自己収束効果を誘起させるようにしたのである。サファイアに対して $355\text{nm}$ レーザー光を使用することにより、効率的に多光子吸収を生起することができるとともに自己収束効果を誘起して、サファイア内部に深さ方向に伸張した形状を有する微小なクラックを形成することができる。しかし、 $1064\text{nm}$ レーザー光では、クラックの発生はそもそも多光子吸収機構ではなく電子なだれによるものであり、しかも、自己収束効果を誘起することができないため、 $355\text{nm}$ レーザー光を用いた場合のような形状、サイズのクラックを形成することはできない。

#### 【0036】

図3は、本発明の実施の形態1に係るレーザー加工装置の構成を示すブロック図である。

40

#### 【0037】

このレーザー加工装置100は、上記の原理に基づき、特定のレーザー光を利用して加工対象物を切断する装置であって、例えば、レーザー光源101、テレスコープ光学系103、偏光板105、ダイクロイックミラー107、対物レンズ109、保護用窓プレート111、ステージ113、計測用光源115、ビーム整形器117、ハーフミラー119、光検出器121、コントローラ123、照明用光源125、CCDカメラ127、コンピュータ129、およびモニタ131を有する。このレーザー加工装置100による加工対象物1は、例えば、サファイア/GaN/粘着シートからなる三層構造体である。

#### 【0038】

50

レーザ光源 101 は、加工用のレーザ光を発生する。レーザ光源としては、サファイアに対して効率的に多光子吸収を起こすことができるナノ秒パルス発振のパルスレーザを用いる。例えば、レーザ光源 101 は、波長 355 nm、パルス幅 10 ナノ秒、発振繰り返し周波数 50 ~ 100 kHz のパルスレーザ光を発生する Nd : YAG レーザである。上記のように、サファイアは、355 nm のレーザ光に対して透明である（つまり、吸収を持たない）。

#### 【0039】

なお、レーザ光源 101 に用いることができるレーザとしては、Nd : YAG レーザ以外に、Nd : YVO<sub>4</sub> レーザ、Nd : YLF レーザ、チタンサファイアレーザなどがある。また、使用する波長としては、サファイアに対して 3 光子吸収を誘起する 355 nm 以外に、サファイアに対して 2 光子吸収を誘起する 266 nm でもよい。すなわち、3 光子吸収の条件から、使用する波長は 460 nm 以下であればよい。

10

#### 【0040】

テレスコープ光学系 103 は、好ましい加工形状を得るために、レーザ光源 101 から出力された加工用レーザ光のビーム径を最適化する。

#### 【0041】

偏光板 105 は、好ましい加工形状を得るために、加工予定ラインに対して平行 / 垂直な直線偏光や、円偏光に、テレスコープ光学系 103 を通過したレーザビームを調整する。

#### 【0042】

ダイクロイックミラー 107 は、偏光板 105 を通過した加工用レーザ光をほぼ 100 % 反射し、計測用光源 115 からの計測用レーザ光をほぼ 100 % 透過するミラーである。

20

#### 【0043】

対物レンズ 109 は、顕微鏡用の対物レンズであって、ダイクロイックミラー 107 で反射された加工用レーザ光を集光する。対物レンズ 109 の開口数 (NA) によって集光特性が異なる。本実施の形態のように自己収束効果を積極的に活用するレーザ加工の場合、例えば、NA < 0.4 の対物レンズ 109 を用いる。なお、集光位置は、加工位置に応じて加工対象物 1 の内部、前方表面、または後方表面である。

#### 【0044】

保護用窓プレート 111 は、加工対象物 1 の表面を加工する場合に、加工によって表面から飛散する微小な破片などから対物レンズ 109 を保護するために設けられる。

30

#### 【0045】

ステージ 113 は、図示しない載置台を有し、この載置台の上に、対物レンズ 109 によって集光されたレーザ光が照射される加工対象物 1 が載置される。また、ステージ 113 は、載置台を XYZ 軸方向に移動させるとともに XYZ 軸の回りに回転させることができる駆動機構（図示せず）を有する。この駆動機構によって、ステージ 113 は、ステージ 113 上の加工対象物 1 に対して加工予定ライン (XY 軸方向) および加工予定位置 (Z 軸方向) に沿ってクラックが形成されるよう、XYZ 軸方向に駆動 (平行移動および回転) される。

40

#### 【0046】

具体的には、Z 軸方向は加工対象物 1 の表面に直交する方向、つまり、加工対象物 1 に入射するレーザ光に対して平行な方向 (加工対象物 1 の深さ方向) であるため、ステージ 113 を Z 軸方向に移動させることによって加工対象物 1 に対するレーザ光の集光位置を所定の Z 軸方向の位置に合わせることができる。また、加工対象物 1 に対するレーザ光の照射位置の走査は、ステージ 113 を XY 軸方向 (つまり、水平方向) に移動させることによって行う。ステージ 113 の傾き制御は、ステージ 113 を XYZ 軸の回りに回転させることによって行う。このようなステージ 113 によって加工対象物 1 の位置と姿勢が三次元制御される。なお、図 3 には、加工対象物 1 の内部、前方表面、後方表面に加工を施した様子が模式的に示されている。

50

## 【0047】

計測用光源115は、ステージ113上の加工対象物1の表面の位置を計測するためのレーザ光を発生する。

## 【0048】

ビーム整形器117は、計測用レーザ光を最適化するために、計測用光源115から出力されたレーザ光のビーム形状を調整する。

## 【0049】

ハーフミラー119は、計測用レーザ光を半透明に反射/透過するミラーである。ビーム整形器117を通過した計測用レーザ光は、ハーフミラー119、ダイクロイックミラー107、および対物レンズ109を透過して加工対象物1の表面に到達し、反射される。この反射光は、再び対物レンズ109およびダイクロイックミラー107を透過し、一部がハーフミラー119で反射されて光検出器121に到達する。

10

## 【0050】

光検出器121は、加工対象物1の表面からの反射光を検出して加工対象物1の表面位置を検出する。検出結果は、コントローラ123に出力される。

## 【0051】

コントローラ123は、フィードバック回路を有し、光検出器121によって得られた加工対象物1の表面位置の情報に基づいて、加工用レーザ光の集光位置が加工予定ライン(XY軸方向)および加工予定位置(Z軸方向)に合うように、ステージ113をフィードバック制御する。

20

## 【0052】

照明用光源125は、ステージ113の下方に配置され、ステージ113上の加工対象物1の加工部位を観察するための照明光を発生する。

## 【0053】

CCDカメラ127は、照明用光源125から放射され加工対象物1を透過した照明光を取り込んで、加工対象物1の加工部位を撮像し、撮像データをコンピュータ129に出力する。

## 【0054】

コンピュータ129は、レーザ光源101、計測用光源115、コントローラ123、およびCCDカメラ127に接続されており、これら各部を総合的に制御する。例えば、コンピュータ129は、所定のプログラムに従って、コントローラ123によるフィードバック制御を通じてステージ113を駆動させることにより、レーザ光の集光位置を任意の加工予定ラインおよび加工予定位置に沿って走査させる。

30

## 【0055】

モニタ131は、CCDカメラ127が撮像した映像を表示する。すなわち、加工対象物1の加工部位(例えば、形成されたクラック)は、CCDカメラ127およびモニタ131によって観察される。

## 【0056】

なお、加工対象物1としては、サファイアのほか、シリカガラス(Eg 9 eV)やパイレックス(R)ガラスなどのガラス類、ダイヤモンド(Eg 5.5 eV)などでもよい。

40

## 【0057】

次いで、上記構成を有するレーザ加工装置100を用いた加工工程について、図4に示すフローチャートを用いて説明する。なお、適宜、図5に示す説明図も参照する。ここでは、加工対象物1は、サファイア/GaN/粘着シートからなる三層構造体である。この三層構造体は、図5(A)に示すように、サファイア基板11と半導体(GaN)層13と粘着シート層15から構成されている。

## 【0058】

まず、ステップS1000では、加工対象物1に対するレーザ光源101の最適なレーザ強度を決定する。上記のように、355nmレーザ光は多光子吸収を効率良く誘起する

50



ことができる。したがって、この場合、355nmレーザ光を用いるため、クラックを発生させるのに、1064nmレーザ光に比べて、低いレーザ出力で済む。例えば、単位体積当たりの注入エネルギー ( $w/cm^2$ ) を同じにしようとした場合、355nmレーザは1064nmレーザの1/10のパルスエネルギーで済む。さらに、サファイア基板11の結晶軸に沿ってクラックが生成し生長する効果のため、加工用レーザ光の出力はさらに低減される。この結果、半導体層13や粘着シート層15に与える光学的損傷を大幅に回避することができる。

**【0059】**

そして、ステップS1100では、加工用レーザ光の集光位置を決定する。集光位置の決定は、例えば、加工対象物1の厚さおよび屈折率に基づいて行う。このとき、集光位置は、自己収束効果を考慮して決定される。

10

**【0060】**

そして、ステップS1200では、コンピュータ129に対して切断予定ラインのプログラミングを行う。

**【0061】**

そして、ステップS1300では、加工対象物1をステージ113の載置台に載置して位置決めを行う。このとき、計測用光源115および照明用光源125をオンする。

**【0062】**

そして、ステップS1400では、レーザ光源101をオンして355nmレーザ光を加工対象物1の切断予定ラインに照射する。そして、切断予定ラインに沿うようにステージ113をXY軸方向(水平方向)に走査して、クラックを切断予定ラインに沿うように加工対象物1に形成する。

20

**【0063】**

例えば、図5(A)は、加工対象物1の内部(ここでは、サファイア基板11の内部)に355nmレーザ光の集光位置を合わせて当該レーザ光を照射した様子を示している。このとき、上記のように、レーザ光の焦点位置近傍において多光子吸収および自己収束効果が誘起される。この結果、図5(B)に示すように、レーザ光の焦点位置近傍に微小(2 $\mu$ m以下)かつ深さ方向に伸張したクラック17が形成される。

**【0064】**

ステップS1500では、切断を確実なものとするため、別工程にて、当該レーザ光の集光位置を加工対象物1の前方表面に設定してスクライビングを行うことにより、図5(B)に示すように、加工対象物1の前方表面(サファイア基板11の表面)にシャープなエッチング19を施す。なお、この処理はオプションであって、常に行う必要はない。ただし、加工対象物1の厚さによっては、この処理を追加することにより、確実に切断を行うことが可能になる。

30

**【0065】**

すなわち、ステップS1400およびステップS1500を通じて、加工対象物1の内部に微小かつ深さ方向に伸張したクラック17が形成され、加工対象物1の前方表面にエッチング19が施される(図5(B)参照)。そして、ステップS1600で、このようにして形成されたクラック17(場合によっては表面のシャープなエッチング19との協働)によって、自発的に瞬時に切断に至る(図5(C)参照)。特にサファイアは結晶性であるため、当該クラック17を起点として、瞬時に切断に至る。このようなレーザ光照射プロセスを切断予定ラインに沿って加工対象物1を水平方向に走査しながら繰り返し行うことにより、切断予定ラインに沿った精密切断が達成される。これにより、加工対象物1(ここではサファイア基板11とGaN層13)は微小なチップに切断(分割)される。

40

**【0066】**

そして、ステップS1700では、粘着シート層15を伸張して、切断された加工対象物を、取り扱い易いように適度に引き離す(図5(D)参照)。

**【0067】**

50

このように、本実施の形態によれば、確実にかつ効率的に多光子吸収および自己収束効果を誘起可能なレーザ光を利用するため、多光子吸収により微小なクラックを形成するとともに、自己収束効果によりクラックを深さ方向（レーザ光の進行方向）に伸張した形状にすることができ、サファイアなどの硬質結晶体に対しても、より高い精度で効率良く精密な切断を行うことができる。

【0068】

例えば、サファイアに対し、深さ方向にレーザ光の集光位置を走査したり、応力を加えたりすることなく、5  $\mu\text{m}$ 以下精度で精密な切断を行うことができる。このとき、形成されるクラックの幅は5  $\mu\text{m}$ 以下であり、切りしろも5  $\mu\text{m}$ 程度に低減することができ、歩留まりも大きく向上することができる。この場合、切りしろとして消費されるのは4%以下であり、1064 nmレーザ光を用いた場合の切りしろ消費率（約20%）と比べて大幅に少なく、材料の有効利用を図ることができる。

10

【0069】

この点、特許文献1には、自発的に成長したクラックにより応力なしでも切断に至る場合があることを示す記載がなされている。しかし、これは、次の点で問題がある。クラックが自発的に成長する場合、クラックの成長の向きはランダムな方向であり、その方向を制御することは極めて困難である。したがって、このようにランダムな方向に成長したクラックを起点にして加工対象物を切断すれば、そのランダムさを反映して切断面は大きく乱れ、しかも切りしろは大きくなってしまふ。例えば、水平方向の左右方向に長さ10  $\mu\text{m}$ のクラックがランダムに成長すれば、切断面の乱れの凹凸は10  $\mu\text{m}$ 以上になり、切りしろも10  $\mu\text{m}$ 以上必要になってしまふ。すなわち、切断面の乱れを小さくし、しかも切りしろを少なくするには、成長した（異方向的に長く形成した）クラックの方向も、レーザ光の進行方向に揃える必要がある。そのような「一方向に伸張した形状のクラック」を形成できるのが、本発明での自己収束効果の活用である。自己収束効果により形成した、深さ方向に伸張方向の揃った形状のクラックを形成することにより、深さ方向にレーザ光の集光位置を走査したり、応力を加えたりすることなく、5  $\mu\text{m}$ 以下の精度での精密切断が初めて可能になる。

20

【0070】

また、本実施の形態によれば、多光子吸収を効率的に誘起できるため、クラックを形成するのに比較的低いレーザ出力で済むことになり、周辺への損傷を回避することができる。例えば、加工対象物がサファイア/GaN/粘着シートからなる三層構造体の場合、レーザ光の照射によりサファイアにのみクラック（損傷）を形成することができ、GaN（半導体層）や粘着シートへの損傷を回避することができる。

30

【0071】

本発明者は、本発明の効果（特許文献1に記載の発明に対する優位性）を実証するために実験を行った。

【0072】

（実験例1）

実験例1では、本発明のレーザ加工方法を用いて形成したクラックのサイズを実験により求めた。条件は、次の通りである。

40

- ・加工対象物：サファイア
- ・レーザ：波長355 nm、パルス幅10ナノ秒
- ・パルスエネルギー：0.1 mJ / パルス ~ 0.02 mJ / パルス
- ・対物レンズ：開口数 (NA) = 0.2
- ・集光スポットサイズ：7.9  $\times 10^{-7}$   $\text{cm}^2$ （半径5  $\mu\text{m}$ の円）
- ・集光位置における電界強度：1.1  $\times 10^{10}$  ~ 0.22  $\times 10^{10}$   $\text{W} / \text{cm}^2$
- ・単発照射

【0073】

特許文献1に記載の発明では、NA > 0.5の対物レンズを使用しているが、本実験例では、NA 0.4の対物レンズを用いることにより、顕著な自己収束効果を生起するこ

50

とに成功した。その結果、形成したクラック 17 のサイズは、水平方向に 2 ~ 5  $\mu\text{m}$ 、深さ方向に 10 ~ 40  $\mu\text{m}$  となり、微小でかつ深さ方向に伸張したクラック 17 を形成することに成功した (図 6 参照)。

【0074】

このように、深さ方向のクラックのサイズは、40  $\mu\text{m}$  (パルスエネルギーが 0.1 mJ / パルスの時) にも達する。このサイズは、切断対象となるサファイア基板の厚さ (例えば、100  $\mu\text{m}$ ) に近い。したがって、厚さ 100  $\mu\text{m}$  のサファイア基板の場合、深さ方向にレーザ光の集光位置を走査することなく、サファイア基板をレーザの単発照射で切断することができる。

【0075】

(実験例 2)

実験例 2 では、本発明のレーザ加工方法を用いて実際にサファイア基板を切断した (図 7 参照)。条件は、次の通りである。

- ・加工対象物：厚さ 400  $\mu\text{m}$  のサファイア基板
- ・レーザ：波長 355 nm、パルス幅 10 ナノ秒
- ・パルスエネルギー：1 mJ / パルス
- ・対物レンズ：開口数 (NA) = 0.25
- ・集光スポットサイズ：7.9  $\times 10^{-7}$   $\text{cm}^2$  (半径 5  $\mu\text{m}$  の円)
- ・集光位置における電界強度：1.1  $\times 10^{11}$   $\text{W} / \text{cm}^2$
- ・水平方向走査速度：50 mm / s
- ・深さ方向の集光位置：サファイア基板の丁度真ん中

【0076】

図 8 は、切断後の電子顕微鏡写真である。この場合、加工対象物の厚さが厚いため、レーザ照射後、応力を加えて切断を行った。

【0077】

(実験例 3)

実験例 3 では、本発明のレーザ加工方法を用いて実際にサファイア基板表面のスクライピングを行った (図 9 参照)。その結果、サファイア基板表面に微小なクラック 21 が形成された。条件は、次の通りである。

- ・加工対象物：サファイア基板 (表面)
- ・レーザ：波長 355 nm、パルス幅 10 ナノ秒
- ・パルスエネルギー：0.1 mJ / パルス以下
- ・対物レンズ：開口数 (NA) = 0.25
- ・集光スポットサイズ：7.9  $\times 10^{-7}$   $\text{cm}^2$  (半径 5  $\mu\text{m}$  の円)
- ・集光位置における電界強度：1.1  $\times 10^{10}$   $\text{W} / \text{cm}^2$  以下
- ・水平方向走査速度：50 mm / s

【0078】

図 10 は、スクライピング後の電子顕微鏡写真である。

【0079】

(比較例 1)

比較例 1 では、特許文献 1 に記載のレーザ加工方法を用いて形成したクラックのサイズを実験により求めた。条件は、次の通りである。

- ・加工対象物：サファイア
- ・レーザ：波長 1064 nm、パルス幅 9 ナノ秒
- ・パルスエネルギー：2 mJ / パルス以下
- ・対物レンズ：開口数 (NA) = 0.1
- ・集光スポットサイズ：7.0  $\times 10^{-6}$   $\text{cm}^2$  (半径 15  $\mu\text{m}$  の円)
- ・集光位置における電界強度：1.2  $\times 10^{10}$   $\text{W} / \text{cm}^2$
- ・単発照射

【0080】

上記の照射条件では、図 1 1 に示すように、加工対象物には直径 30  $\mu\text{m}$  もの大きなクラックが形成された。このクラックのサイズは、特許文献 1 の図 7 に示されているクラックの最小サイズと一致する。すなわち、1064 nm レーザを使用すれば、クラックのサイズは最小でも 30  $\mu\text{m}$  であることが分かる。

【0081】

(実施の形態 2)

本実施の形態は、いわゆるベッセルビーム (Bessel beam) を用いて加工対象物の切断を行う場合である。すなわち、実施の形態 1 では、レーザ光 (ガウシアンビーム) の自己収束効果を利用して深さ方向に長い改質領域を形成するのに対し、本実施の形態では、ベッセルビームを利用してより積極的に深さ方向に長い改質領域を形成する。

10

【0082】

特許文献 1 記載の技術に関連する特開 2002 - 205180 号公報に記載の技術では、集光位置の深さを変えて複数回の走査を行うことにより加工対象物の切断を行う。この方法は、単一焦点により深さ方向に複数列形成された改質領域を利用するものであるため、切断を完了するための複数回走査に時間がかかるばかりでなく、切断面に不規則な凹凸が生ずるため、加工精度が要求される微細加工に適用することは難しい。また、パルスレーザを所定の深さの集光位置で走査した後に別途切断用レーザを照射しまたは応力を加えて加工対象物の切断を行う方法も考えられるが、この方法も加工精度が低いという点では上記従来技術以上の不都合がある。

【0083】

ここで、改質領域とは、空洞状のクラックの場合があり、例えば、各種ガラスなどでは、このような空洞上のクラックが形成される場合が多い。一方、結晶性固体であるサファイアを対象にフェムト秒レーザを集光して形成される改質領域は、空洞状態ではなくアモルファス相であることを本発明者は最近見いだした。空洞性クラックの場合はもちろんであるが、アモルファス相の改質領域も照射前の状態 (サファイアの場合は結晶) と比べて、その機械的強度は低下している。したがって、空洞状の改質領域も、アモルファス状の改質領域も、どちらでも加工対象物の切断へ向けての起点になり得ることを本発明者は確信し、本発明を着想するに至った。

20

【0084】

そこで、本実施の形態では、レーザパルスの光軸方向に長い形状のレーザ光を形成し、これを軸と垂直方向に移動することにより、短時間で凹凸のない切断面を有する精密切断を行うようにしている。

30

【0085】

このような形状のレーザ光を形成する方法として、例えば、後述するアキシコンレンズを用いる方法が考えられる。レーザ光の進行方向の長さに対応する部分は、複数回走査を要せず一度の走査で切断されるため、短時間で凹凸のない精密切断を行うことができる。

【0086】

まず、原理を説明する。

【0087】

通常のパルスレーザの出力は、特殊な場合を除き、上記のように、ガウシアンビームとなっている。そのため、光軸と垂直方向のビームの光強度分布は、中央の光強度が最も高く、数学的に定義されるガウシアン分布曲線に従い、その強度は中心部から外側に向かって低くなる。図 1 2 (A) は、通常の特物レンズ 201 を用いた光学系 200 を示しており、通常の特物レンズ 201 を用いた場合、ガウシアンビームの入力 203 に対して同じガウシアンビームの出力 205 が得られる様子を示している。すなわち、同図に示すように、ガウシアンビーム 203 を通常の特物レンズ 201 などの組み合わせレンズや、単レンズを用いて絞り込むと、焦点面のスポットにおいてもやはりガウシアンビーム 205 となり、光軸と垂直方向の光強度は絞り込む前と同じ分布となる。光軸方向の光強度分布も垂直方向の場合と比べてやや広がるものの、やはりスポットの中心部から外側に向かって低くなる。したがって、開口数の大きい (開口数が 1 以上の) 特物レンズを用いてガウシ

40

50

アンビームを絞り込むと、スポットサイズは、光軸およびそれに垂直方向のいずれもほぼレーザの波長程度になり、切断を試みる基板の厚さ（数十 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ ）に比べてはるかに小さなサイズとなる。したがって、これらの基板を切断する場合には集光スポットを基板の厚み方向に数回走査する必要があり、レーザダイシングの生産性の低下の大きな原因となっている。

#### 【0088】

これを改善するために、本実施の形態では、例えば、アキシコンレンズや回折光学素子、ホログラム光学素子などの特殊な光学素子を用いて、ガウシアンビームをベッセルビームに変換し、これをレーザダイシングに用いる。図12(B)は、上記特殊な光学素子（アキシコンレンズ、回折光学素子、ホログラム光学素子）251を用いた光学系250を示しており、当該光学素子251を用いた場合、ガウシアンビームの入力253に対してベッセルビームの出力255が得られる様子を示している。ベッセルビームは、ガウシアンビームと異なり、光軸と垂直方向のビーム形状が同心円状となっている。また、図12(B)に示すように、光軸方向には非常に長いビーム形状となり、用いる光学素子（アキシコンレンズ、回折光学素子、ホログラム光学素子）によっても異なるが、同心円の中心のビーム径を1 $\mu\text{m}$ 以下にした場合でも数mmにすることが可能である。したがって、ベッセルビームを用いれば、サファイアやダイヤモンドなどの基板に対して光軸方向に非常に伸びた光学損傷を誘起することが可能になる。このような現象を利用すれば、ビームスポットを基板の垂直方向に走査することなくレーザダイシングを行うことが可能になり、ガウシアンビームを用いたレーザダイシングに比べて大幅に生産性の向上を図ることができる。

10

20

#### 【0089】

図13は、アキシコンレンズを用いてガウシアンビームをベッセルビームに変換する光学系を含むレーザ加工装置の構成を示す図である。ここで、アキシコンレンズとは、軸線を光軸上に位置させた円錐型レンズのことである。

#### 【0090】

このレーザ加工装置300は、アキシコンレンズ305を用いた集光光学系により集光させたレーザ光（ベッセルビーム）Lを、透明材料からなる加工対象物1に照射し、改質領域を発生させるものである。

#### 【0091】

レーザ光Lは、レーザ光源301から出力されたパルスの持続時間がフェムト秒ないしピコ秒オーダーであるパルスレーザである。また、加工対象物1としては、例えば、シリカガラスやサファイア、ダイヤモンドなどである。

30

#### 【0092】

レーザ光源301から出力されたレーザ光Lは、パルス反復率とエネルギーをシャッタおよび中立密度減衰器303によって制御され、アキシコンレンズ305により一旦集光され、再び拡散する。図13中、 $Z_{max}$ は、焦点深度（depth of focus）である。アキシコンレンズ305による集光においては、図14に示すように、光軸方向に伸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307（例えば、 $f_1 = 100\text{mm}$ ）によって収束された後、さらに、第2のレンズ309（例えば、 $f_2 = 30\text{mm}$ ）によって収束される。この第2のレンズ309によるレーザ光Lの収束点上に、加工対象物1が置かれる。本実施の形態では、レーザ光Lは、光軸方向に長さを有する領域に収束されるため、加工対象物1の深さ方向に走査をしなくとも、ある長さを有した改質領域を形成することができる。

40

#### 【0093】

そして、この加工対象物1を透過したレーザ光Lは、第3のレンズ311（例えば、焦点距離16mm）を経て、CCDカメラ313によって撮像される。

#### 【0094】

図15は、図13の矢印Aで示す位置のレーザ光、つまり、シャッタおよび中立密度減衰器303を通過しアキシコンレンズ305に入射するレーザ光の様子を示している。図

50

16は、図13の矢印Bで示す位置のレーザー光、つまり、CCDカメラ313で撮像されたレーザー光を示している。図16に示すCCDカメラ像から明らかなように、光軸と垂直方向には同心円状のビームパターンが形成されている。この各同心円のビームの光強度は同一であるが、同心円の外側に向かって面積が大きくなるため、単一面積当たりのレーザー強度（レーザーフルエンス）は、中心のビームが最も高くなる。したがって、レーザー加工にしきい値が存在する材料では、中心部のビームがそのしきい値を越えるレーザー強度に設定すれば、中心部にのみ光学損傷を誘起することが可能になる。

【0095】

このようなレーザー強度を設定して透明材料であるサファイア（ $Al_2O_3$ ）基板およびシリカガラス（ $SiO_2$ ）基板にそれぞれ光学損傷を誘起させた例を、図17および図18に示す。このときの加工条件は、次の通りである。

【0096】

レーザー光源301は、波長800nm、パルス幅170fs（フェムト秒）のチタンサファイアレーザー（Ti:Sapphire laser）である。レーザー光の照射回数は、10パルスである。

【0097】

加工対象物1がサファイアの場合、レーザー光により与えられるエネルギーは、 $8.2 J/cm^2$ （加工対象物1の厚さ150 $\mu m$ 、アキシコンレンズ305に入射するレーザー光のエネルギーは、1パルス当たり、約30 $\mu J$ ）である。

【0098】

加工対象物1がシリカガラスの場合、レーザー光により与えられるエネルギーは、 $6.8 J/cm^2$ （加工対象物1の厚さ240 $\mu m$ 、アキシコンレンズ305に入射するレーザー光のエネルギーは、1パルス当たり、約25 $\mu J$ ）である。

【0099】

また、図19は、プロキシガラスと呼ばれるアクリル系の高分子材料（アクリル樹脂）を加工した例である。このとき、レーザー光により与えられるエネルギーは、 $8.9 J/cm^2$ （加工対象物1の厚さ10mm、アキシコンレンズ305に入射するレーザー光のエネルギーは、1パルス当たり、約33 $\mu J$ ）である。これ以外の条件は、図17および図18の場合と同様である。この場合、光軸方向の損傷は、4mmにも達している。

【0100】

なお、シリコンやGaN、GaAsなど、上記透明材料に比べてバンドギャップが小さい材料を加工する場合は、より長波長側で発振するレーザーを適宜使用すればよい。例えば、波長1.5 $\mu m$ のEr:YAGレーザー第二高調波などである。

【0101】

このような光軸方向に長く誘起された光学損傷を連続的に基板内部に形成することが可能になれば、ビームスポットを基板内の厚さ方向に走査しなくてもレーザーダイシングを行うことが可能になる。

【0102】

このように、本実施の形態によれば、レーザーパルスの光軸方向に長い形状のレーザー光（ベッセルビーム）を形成し、これを利用して加工対象物の内部に光軸方向に長いクラックを形成するため、レーザー光を光軸と垂直な方向に移動することにより、短時間で凹凸のない切断面を有する精密切断を行うことができる。

【産業上の利用可能性】

【0103】

本発明に係るレーザー加工方法は、より高い精度で効率良く精密な切断を行うことができるレーザー加工方法として有用である。

【図面の簡単な説明】

【0104】

【図1】（A）パルスレーザー光を加工対象物の内部に集光させた状態を示す図、（B）集光位置付近の拡大図

10

20

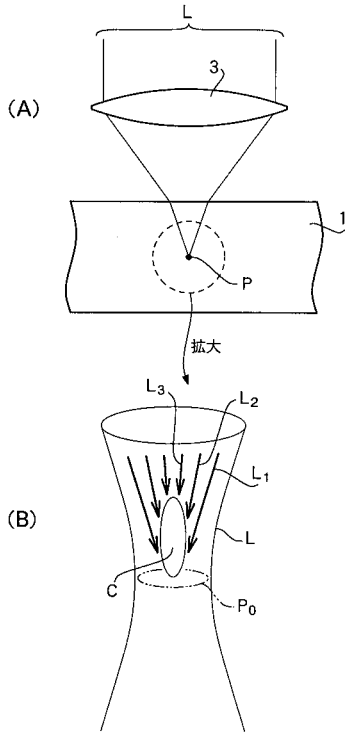
30

40

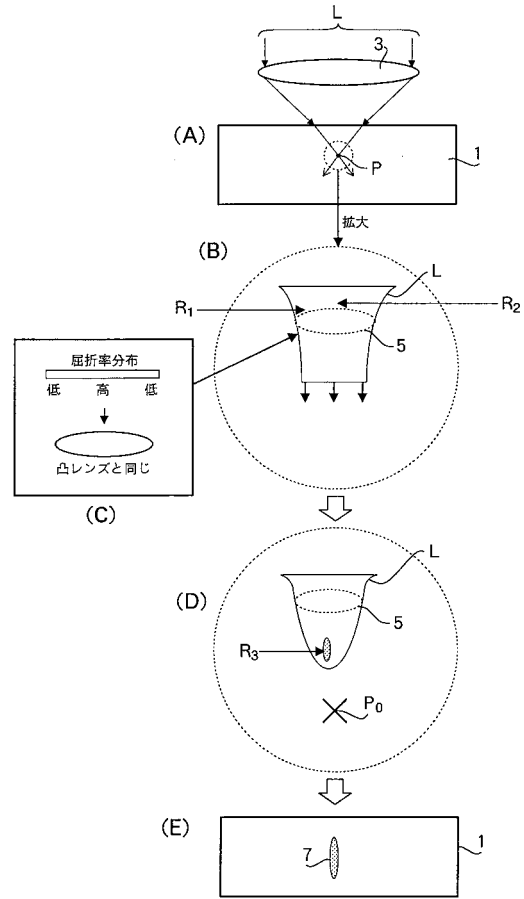
50

- 【図 2】自己収束効果が起こる場合の過程を説明するための図
- 【図 3】本発明の実施の形態 1 に係るレーザ加工装置の構成を示すブロック図
- 【図 4】本発明の実施の形態 1 における加工工程を示すフローチャート
- 【図 5】本発明の実施の形態 1 における加工工程を示す工程別概略図
- 【図 6】本発明の実施の形態 1 における実験例 1 の説明に供する図
- 【図 7】本発明の実施の形態 1 における実験例 2 の説明に供する図
- 【図 8】本発明の実施の形態 1 における実験例 2 におけるサファイア基板切断後の電子顕微鏡写真
- 【図 9】本発明の実施の形態 1 における実験例 3 の説明に供する図
- 【図 10】本発明の実施の形態 1 における実験例 3 におけるサファイア基板（表面）スクライビング後の電子顕微鏡写真 10
- 【図 11】比較例として従来技術により形成されたクラックを示す電子顕微鏡写真
- 【図 12】（A）通常の対物レンズを用いた光学系を示す図、（B）アキシコンレンズを用いた光学系を示す図
- 【図 13】本発明の実施の形態 2 に係るレーザ加工装置の構成を示すブロック図
- 【図 14】本発明の実施の形態 2 におけるアキシコンレンズによる集光状態を示す側面図
- 【図 15】本発明の実施の形態 2 におけるアキシコンレンズに入射するレーザ光を光軸方向から見た写真
- 【図 16】本発明の実施の形態 2 におけるアキシコンレンズにより集光され加工対象物に照射されるレーザ光を光軸方向から見た写真 20
- 【図 17】本発明の実施の形態 2 におけるベッセルビームによるサファイアの加工例を示す写真
- 【図 18】本発明の実施の形態 2 におけるベッセルビームによるシリカガラスの加工例を示す写真
- 【図 19】本発明の実施の形態 2 におけるベッセルビームによるアクリル樹脂の加工例を示す写真
- 【符号の説明】
- 【0105】
- 1 加工対象物
- 100、300 レーザ加工装置 30
- 101、301 レーザ光源
- 103 テレスコープ光学系
- 105 偏光板
- 107 ダイクロイックミラー
- 109 対物レンズ
- 111 保護用窓プレート
- 113 ステージ
- 115 計測用光源
- 117 ビーム整形器
- 119 ハーフミラー 40
- 121 光検出器
- 123 コントローラ
- 125 照明用光源
- 127、313 CCDカメラ
- 129 コンピュータ
- 131 モニタ
- L パルスレーザ光

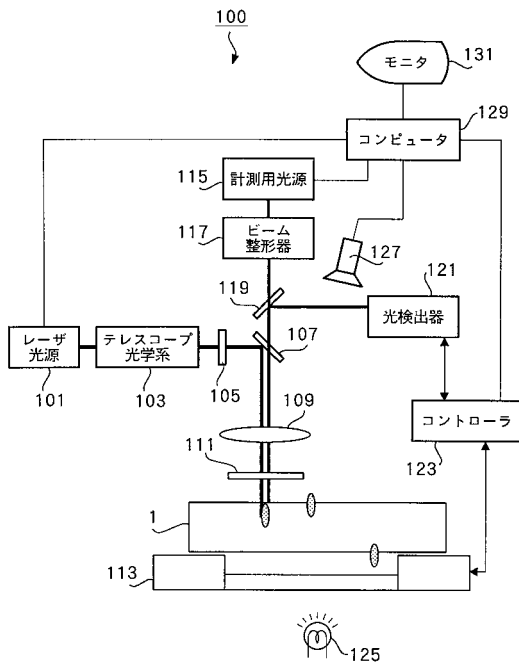
【 図 1 】



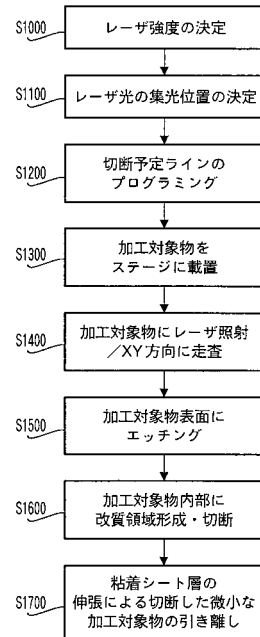
【 図 2 】



【 図 3 】

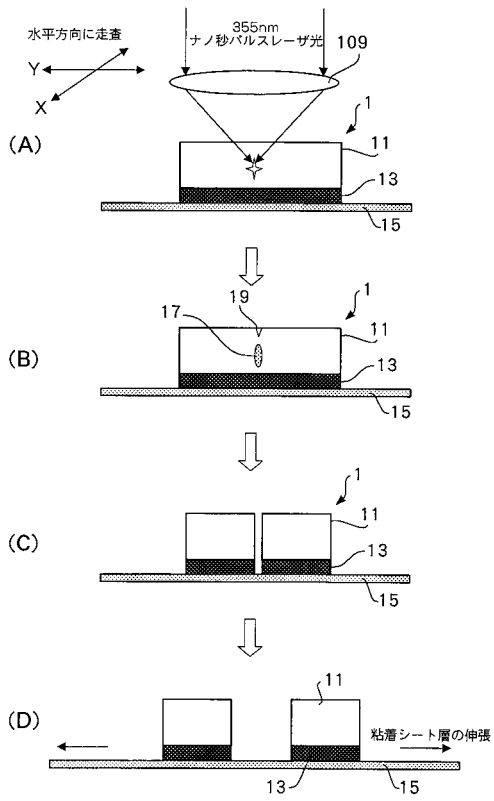


【 図 4 】

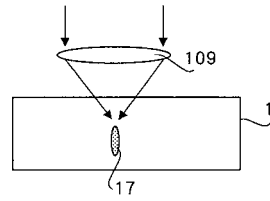




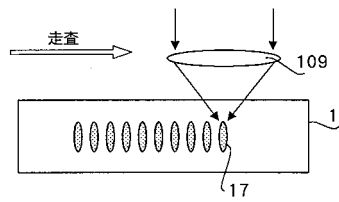
【 図 5 】



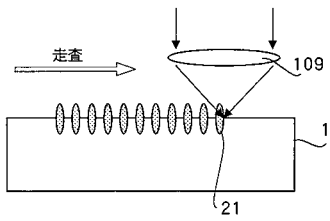
【 図 6 】



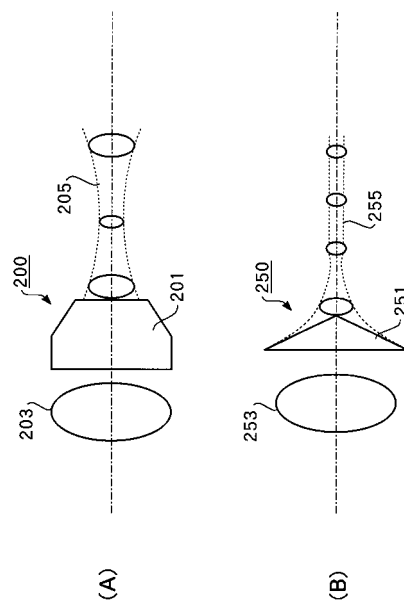
【 図 7 】



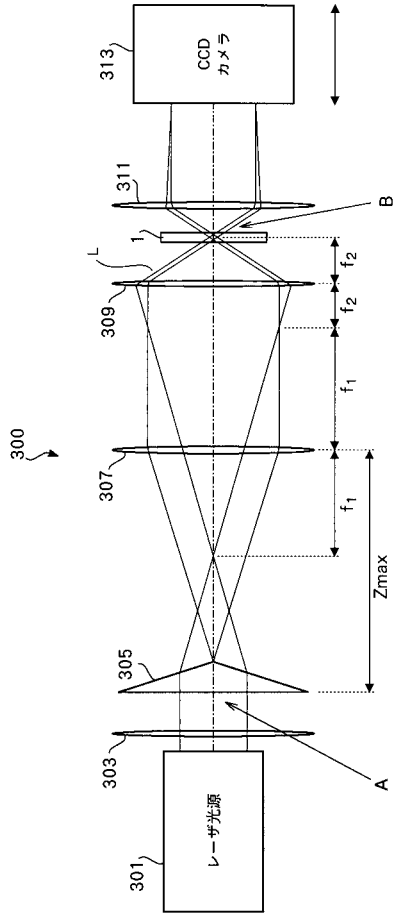
【 図 9 】



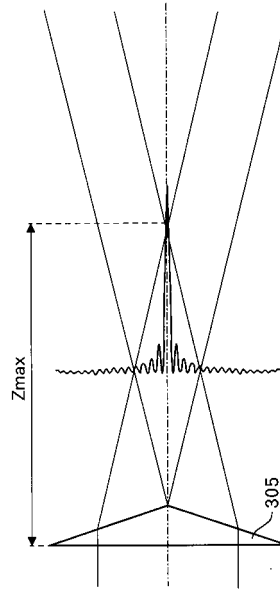
【 図 1 2 】



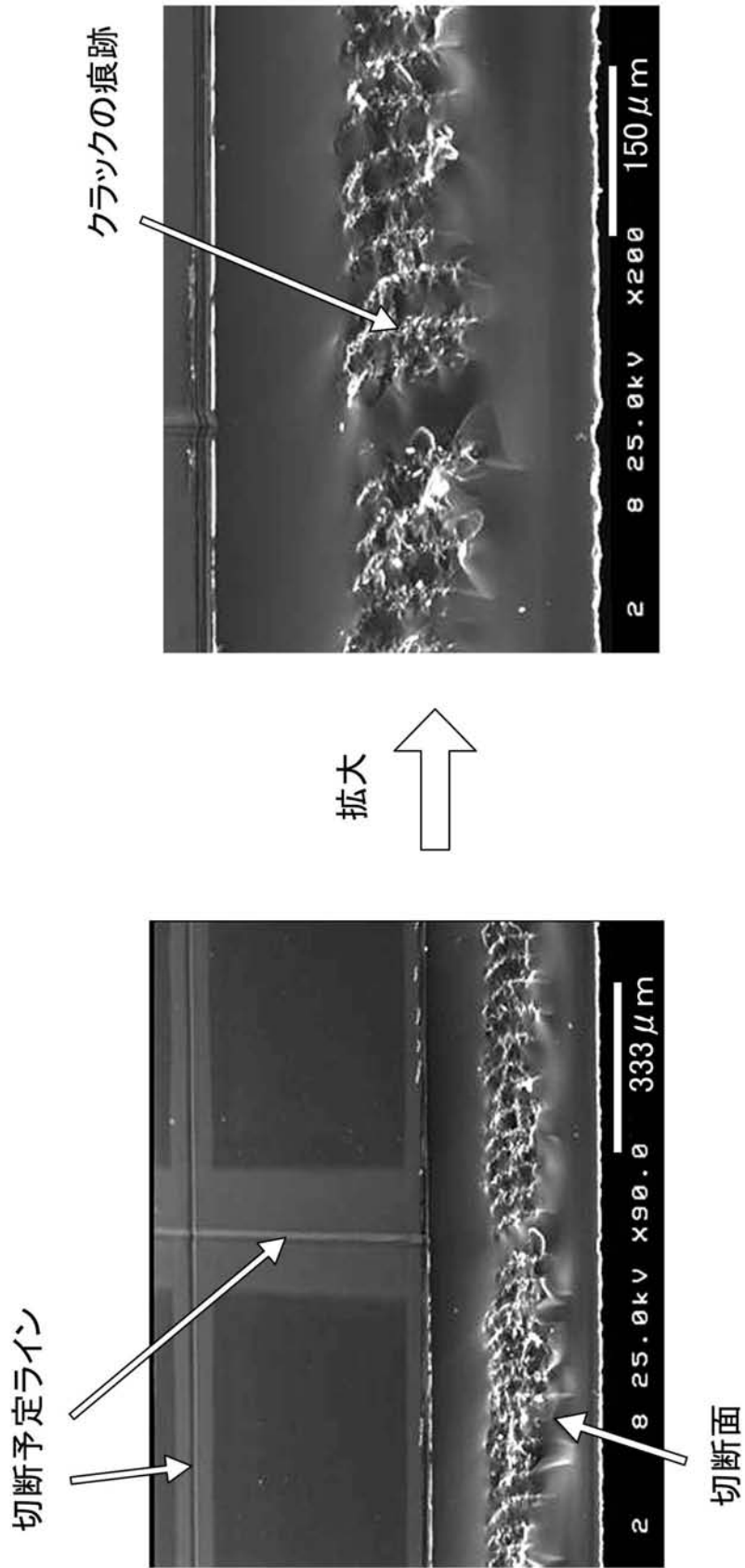
【 図 1 3 】



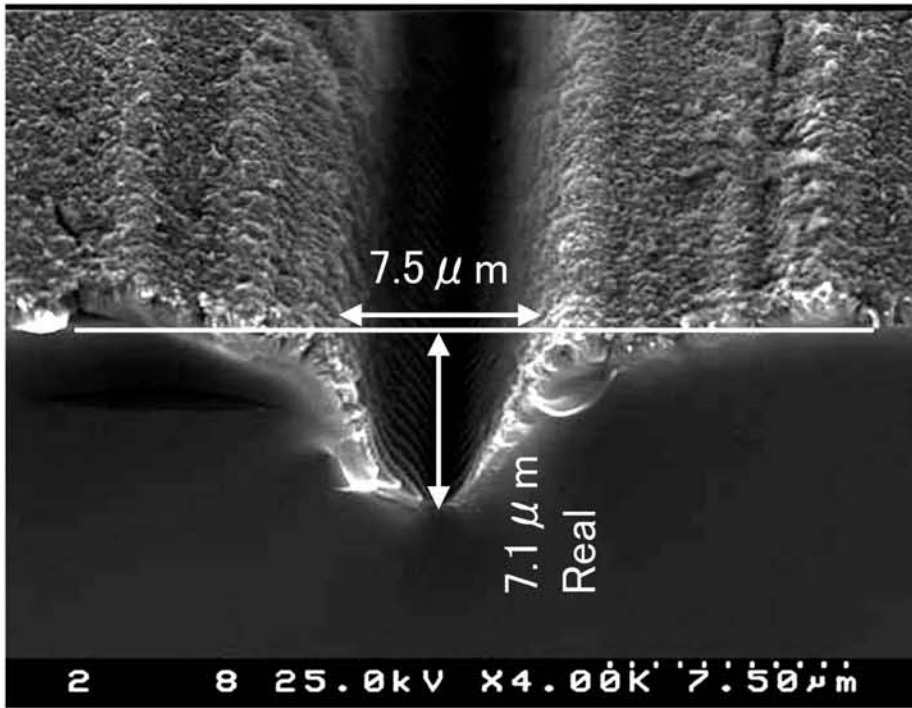
【 図 1 4 】



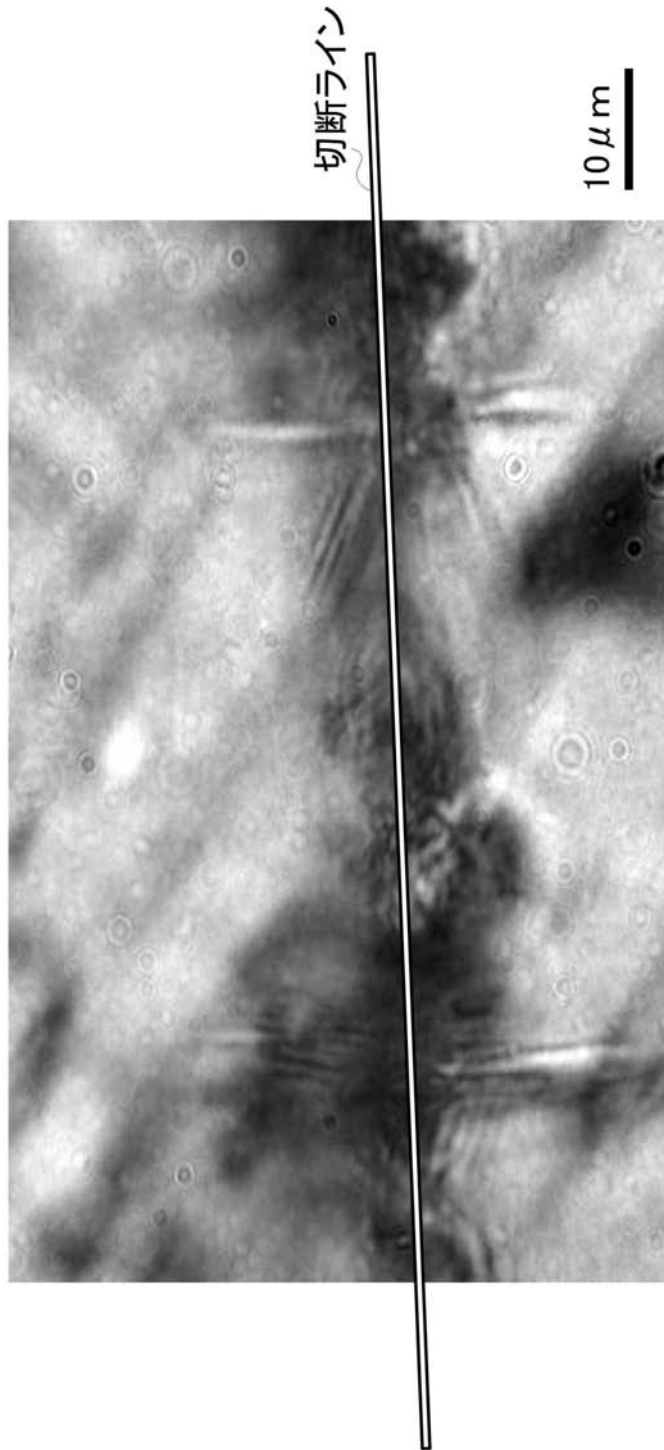
【 図 8 】



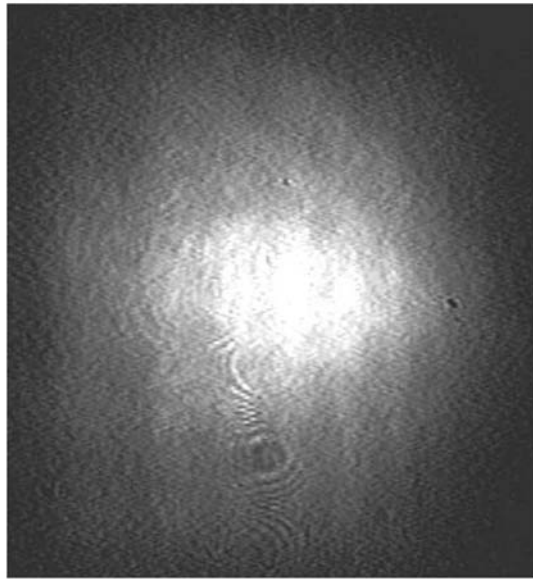
【 図 1 0 】



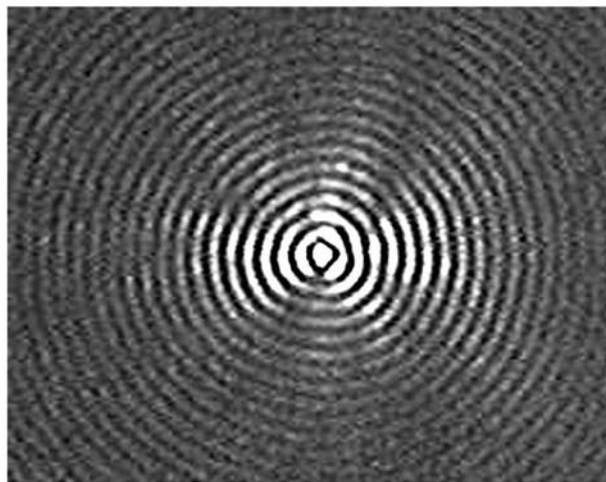
【図 11】



【 図 1 5 】

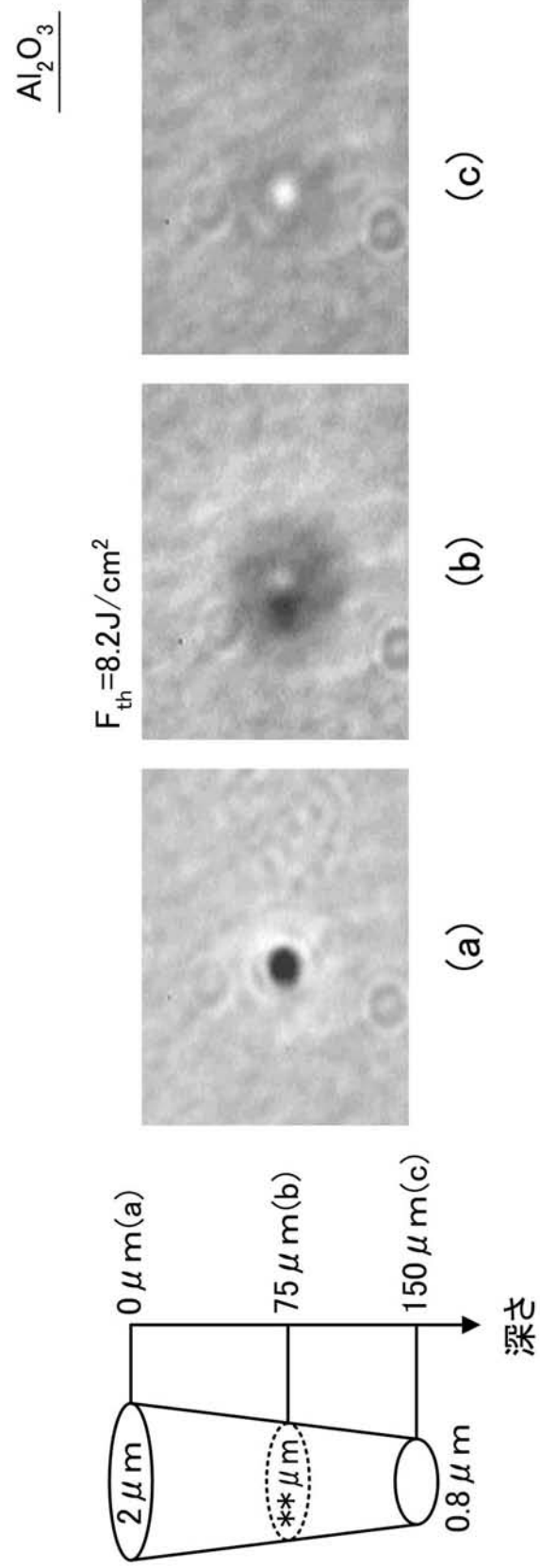


【 図 1 6 】

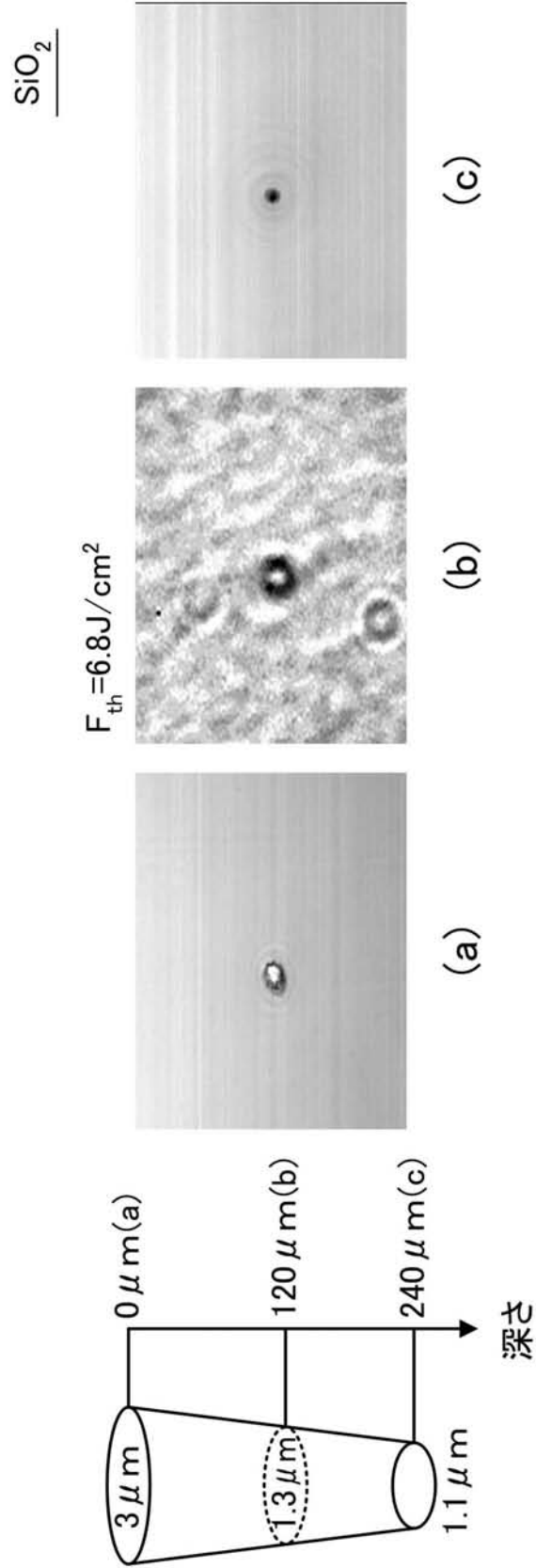


6  $\mu$ m

【 図 17 】



【 図 1 8 】





【 図 19 】

