

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2011 年 3 月 17 日(17.03.2011)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2011/030802 A1

(51) 国際特許分類:

B23K 26/38 (2006.01) B28D 5/00 (2006.01)
B23K 26/04 (2006.01) H01L 21/301 (2006.01)
B23K 26/067 (2006.01) C03B 33/09 (2006.01)
B23K 26/40 (2006.01)

[JP/JP]; 〒6060004 京都府京都市左京区岩倉北池田町6-1-12 フォトコーディング内 Kyoto (JP). 大村 悦二(OMURA, Etsuji) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘2-1 国立大学法人大阪大学大学院 工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻内 Osaka (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2010/065448

(22) 国際出願日: 2010 年 9 月 1 日(01.09.2010)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2009-208789 2009 年 9 月 10 日(10.09.2009) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): アイシン精機株式会社(AISIN SEIKI KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒4488650 愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 Aichi (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 渥美 貴文(ATSUMI, Takafumi) [JP/JP]; 〒4488650 愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシン精機株式会社内 Aichi (JP). 池田 優二(IKEDA, Yuji)

(74) 代理人: 大川 宏(OHKAWA, Hiroshi); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅3丁目2番5号 Aichi (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

[続葉有]

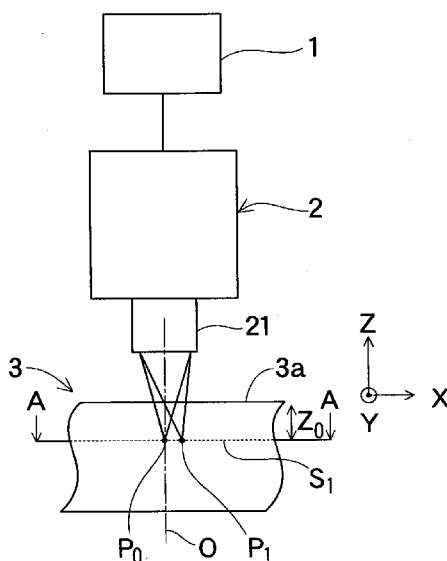
(54) Title: LASER PROCESSING METHOD AND LASER PROCESSING DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ加工方法及びレーザ加工装置

(57) Abstract: Disclosed is a laser processing device and laser processing method having a high processing speed and high energy efficiency. By means of the light axis (O) of a focusing lens (21) being moved relatively along a line (S₀) to be cut on a member (3) to be cut and thereby radiating focused laser light onto the member (3) to be cut, the laser processing method forms along the line (S₀) to be cut and on the inside of the member (3) to be cut a modification region that is to be the starting point of cutting, and the laser processing method is characterized by simultaneously forming at locations that are a predetermined depth from the surface (3a) of the member (3) to be cut a plurality of cross-sectional focused spots (P₀, P₁...) over a cross section (3b) that is parallel to the surface (3a) and perpendicular to the light axis (O) of the focusing lens (21), and at that time, forming at least one cross-sectional focused spot of the plurality of cross-sectional focused spots (P₀, P₁...) over the projection line to the cross section (3b) of the line (S₀) to be cut, thus forming one or a plurality of the aforementioned inside modification regions having a desired shape.

(57) 要約: 加工速度が高く、エネルギー効率の高いレーザ加工方法及びレーザ加工装置を提供する。集光レンズ21の光軸Oを被切断部材3の切断予定ラインS₀に沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材3に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を被切断部材3の内部に切断予定ラインS₀に沿うように形成するレーザ加工方法であって、被切断部材3の表面3aから所定の深さ位置で集光レンズ21の光軸Oと直交し表面3aと平行する断面3bの上に複数の断面集光スポットP₀、P₁...を同時に形成し、その際、複数の断面集光スポットP₀、P₁...のうち少なくとも一つの断面集光スポットを切断予定ラインS₀の断面3bへの射影線上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

図1





MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア
(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ
(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR,
GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT,
NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF,

BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE,
SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

レーザ加工方法及びレーザ加工装置

技術分野

本発明は、レーザ光を被切断部材の切断予定ラインに沿って集光照射して切断の起点となる改質領域を被切断部材の内部に形成するレーザ加工方法及びレーザ加工装置に関する。

背景技術

従来、半導体基板、圧電セラミック基板、サファイア基板、ガラス基板等の硬脆材料板体を切断するにあたり、被切断板体の内部に切断予定ラインに沿って板体に透明な波長を有する短パルスレーザ光を集光照射し、内部に微小クラックが群生した微細溶解痕（改質領域）を生成させ、その後応力を加えて、その微細溶解痕を起点に板体の厚さ方向に向かって生じるクラックを利用して切断していた（例えば、特許文献 1 参照。）。

また、一つのパルスレーザ光を三つに分割して時間差を付け（一つより二つ、二つより三つと遅延させ）、その後位置をずらして集光照射する加工法も知られている（例えば、特許文献 2 参照。）。

先行技術文献

特許文献

特許文献 1：特開 2005-271563 号公報

特許文献 2：特開 2006-167804 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

しかし、この従来のレーザ加工方法では、レーザ光が円形スポットに集光されるため、クラックを発生させて成長させる内部応力が等方的に働く。そのため、クラックが切断予定ラインに沿う方向以外にも発生、成長してしまい、クラックの発生、成長を切断予定ライン方向に集中させることができない。その結果、切断面の平坦度が損なわれる。また、円形スポットを切断予定ラインに沿って照射

する際、単位長さ当たりの照射スポットの数が多くなり、加工速度が低いという問題もある。さらに、被切断板体が厚い場合、焦点位置を厚み方向にずらして加工を繰り返す必要があるが、厚み方向にずらす量を少なくしなければならず、加工速度が益々低くなってしまう。

一つのパルスレーザ光を三つに分割して時間差を付け、その後位置をずらして集光照射する加工方法は、切断予定ライン方向に三つのスポットを繋げて形成することで、切断予定ライン方向の加工速度（集光レンズの光軸の相対移動速度）を高くできることが期待される。また、三つのスポットを厚み方向に繋げて形成することで焦点位置を厚み方向にずらす量を大きくでき、厚み方向の加工速度（集光レンズの厚み方向の相対移動速度）を高くできることが期待される。

しかしながら、時間差を付けて連続して照射される三つのパルス光のうち、最初に照射される一つ目のパルス光を除いて、後続のパルス光は、それより前に照射されたパルス光によって引き起こされる熱の影響を受けてしまう。すなわち、被切断部材である脆性材料はアモルファス転移が起こるような温度に熱せられると、延性材化するため、前のパルス光によって熱せられた領域付近に後続のパルス光が照射されても、温度差に伴う応力発生が生じにくくなると共に、材料物性の変化（例えば、溶解）が影響してクラックが成長し難くなる。その結果、期待されるほど程加工速度は高くない。

また、被切断部材である脆性材料のレーザ光に対する屈折率や吸収係数も温度によって変化するため、前のパルス光によって熱せられた領域付近に後続のパルス光が照射されても、レーザ光が集光点に至るまでに吸収されてしまい、集光点に十分なエネルギーが到達しない問題や、集光点の位置がずれてしまう問題も有している。集光点の位置がずれると、三つのスポットが厚み方向に繋がらず、焦点位置を厚み方向にずらす量を大きくできない。その結果、厚み方向の加工速度（集光レンズの厚み方向の相対移動速度）が低下する。

本発明は、上記の問題に鑑みてなされたものであり、加工速度が高く、エネルギー効率の高いレーザ加工方法及びレーザ加工装置を提供することを課題とする。課題を解決するための手段

上記の課題を解決するためになされた本発明のレーザ加工方法は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

また、上記の課題を解決するためになされた本発明の別のレーザ加工方法は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で深さ方向に複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

また、上記の課題を解決するためになされた本発明の別のレーザ加工方法は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成し、前記所定の深さ位置で深さ方向にも複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

上記のレーザ加工方法において、前記レーザ光は、超短パルスレーザ光が好ましい。

また、上記のレーザ加工方法において、前記複数の断面集光スポットを結ぶ図形が三角形であるとよい。

また、前記複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が三角形であるとよい。

また、前記複数の断面集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に位置するようにするとよい。

また、前記複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記集光レンズの光軸上に位置するようにするとよい。

また、前記複数の断面集光スポットの前記断面上での空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで前記所望の形状の前記内部改質領域を形成するようにするとよい。

また、前記複数の深さ集光スポットの前記切断予定ラインを含む面内の空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで前記所望の形状の前記内部改質領域を形成するようにするとよい。

上記の課題を解決するためになされた本発明のレーザ加工装置は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

また、上記の課題を解決するためになされた本発明の別のレーザ加工装置は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前

記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で深さ方向に複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

また、上記の課題を解決するためになされた本発明の別のレーザ加工装置は、集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成し、前記所定の深さ位置で深さ方向にも複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とする。

発明の効果

被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成するので、延性材化による応力発生や物性変化によるクラック伸展の抑制がなく、切断予定ライン方向の加工速度が高くなる。

被切断部材の表面から所定の深さ位置で深さ方向に複数の深さ集光スポットを同時に形成するので、延性材化による応力発生や物性変化によるクラック伸展の抑制がなく、厚み方向の加工速度が高くなる。

被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、所定の深さ位置で深さ方向にも複数の深さ集光スポットを同時に形成するので、切断予定ライン方向の加工速度及び厚み方向の加工速度を共に高くすることができる。

レーザ光が超短パルスレーザ光であると、一つのレーザ光を複数に分岐しても各レーザ光のパルスのピーク尖頭値は、アモルファスの相転移に必要な一定の閾値に対して十分余裕がある。また、熱源が生成するまでにパルス照射が完了し、パルス自身が熱の影響を受けずに安定的に所望の熱源によるクラック制御ができる。

複数の断面集光スポットを結ぶ図形が三角形であるので、切断予定ライン方向の一方向に楔効果が働き、切断予定ライン方向の加工速度を一層高めることができる。

複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が三角形であるので、厚み方向の一方向に楔効果が働き、厚み方向の加工速度を一層高めることができる。

複数の断面集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に位置させるので、切断予定ライン方向の両方向に楔効果が働き、切断予定ライン方向の加工速度をより一層高めることができる。

複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記集光レンズの光軸上に位置させるので、厚み方向の両方向に楔効果が働き、厚み方向の加工速度をより一層高めることができる。

複数の断面集光スポットの前記断面上での空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで、前記所望の形状の前記内部改質領域を形成されるので、切断予定ライン方向の楔効果の働きが自由に制御され得る。

複数の深さ集光スポットの前記切断予定ラインを含む面内の空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで、前記所望の形状の前記内部改質領域が形成されるので、厚み方向の楔効果の働きが自由に制御され得る。

図面の簡単な説明

図 1 は、本発明に係る実施形態 1 のレーザ加工装置の概略構成図である。

図 2 は、図 1 の被切断部材 3 の斜視図である。

図 3 は、図 1 の A-A 線断面図である。

図 4 は、実施形態 1 の変形態様を説明するための図 1 の A-A 線断面図である。

図 5 は、実施形態 1 の別の変形態様を説明するための図 1 の A-A 線断面図で

ある。

図 6 は、実施形態 1 のレーザ加工装置における光学系の一例を示す図である。

図 7 は、図 6 の光学系の変形態様を示す図である。

図 8 は、実施形態 2 のレーザ加工装置の概略構成図である。

図 9 は、図 8 の被切断部材 3 の斜視図である。

図 10 は、図 9 の B-B 線断面図である。

図 11 は、実施形態 2 の変形態様を説明するための図 9 の B-B 線断面図である。

図 12 は、実施形態 2 の別の変形態様を説明するための図 9 の B-B 線断面図である。

図 13 は、実施形態 2 のレーザ加工装置における光学系の一例を示す図である。

図 14 は、図 13 の光学系の変形態様を示す図である。

図 15 は、実施形態 3 のレーザ加工装置の概略構成図である。

図 16 は、図 15 の被切断部材 3 の斜視図である。

図 17 は、図 16 の A-A 線断面図及び B-B 線断面図である。

図 18 は、実施形態 3 のレーザ加工装置における光学系の一例を示す図である。

図 19 は、図 18 の光学系の変形態様を示す図である。

図 20 は、図 18 の光学系の別の変形態様を示す図である。

図 21 は、図 18 の光学系の別の変形態様を示す図である。

図 22 は、二つの集光スポット形成直後の熱源温度分布パターンである。

図 23 は、三つの集光スポットを時間差 τ を変えて形成した場合の 10 ns 後の熱源温度分布パターンである。

図 24 は、二つの集光スポット（スポット径： $2 \mu\text{m}$ ）間隔が $2 \mu\text{m}$ の場合の熱源温度分布パターンと応力分布パターンである。

図 25 は、二つの集光スポット（スポット径： $2 \mu\text{m}$ ）間隔が $4 \mu\text{m}$ の場合の熱源温度分布パターンと応力分布パターンである。

図 26 は、集光スポット間隔と応力の関係を示すグラフである。

図 27 は、応力の時間変化を示すグラフである。

図 28 は、実施例における集光スポットの空間配置を説明する図と、レーザ加工後のサファイアの透過写真である。

図 29 は、比較例における集光スポットの空間配置を説明する図と、レーザ加工後のサファイアの透過写真である。

符号の説明

21、201、2A1、20A1、20B1、2B1、2C1、2D1、2E1：集光レンズ、

O：光軸、

S0：割断予定ライン、

3：被割断部材

3a：表面

3b：断面

P0、P1、P2、P3：断面集光スポット

Q0、Q1、Q2、Q3：深さ集光スポット

2、20、2A、20A、20B、2B、2C、2D、2E：光学系

発明を実施するための形態

(実施形態1)

本発明を実施するための形態を図面に基づいて以下に詳しく説明する。

図1は、実施形態1のレーザ加工装置の概略構成図である。図2は、図1の被割断部材3の斜視図、図3は、図1のA-A線断面図である。

本実施形態のレーザ加工装置は、図1～図3に示すように、被割断部材3の表面3aから所定の深さ位置Z0で集光レンズ21の光軸Oと直交し表面3aと平行する断面3bの上に複数の断面集光スポットP0、P1を同時に形成し、その際、複数の断面集光スポットP0、P1のうち少なくとも一つの断面集光スポットを割断予定ラインS0の断面3bへの射影線S1上に形成する光学系2を備えている。

1は、被割断部材3に対し透明な波長を有する繰り返し超短パルスレーザ光を発生する光源である。光源1として、波長が $1\sim 2\mu\text{m}$ 、パルス幅が $10\text{fs}\sim 20\text{ps}$ 、繰り返し周波数が $100\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$ のレーザ光を発生するErまたはYbをドープしたモードロックファイバーレーザを用いることで、ガラス、

サファイア、水晶、シリコン等の被切断部材 3 の集光スポット位置でレーザ光が多光子吸収され内部改質領域が形成される。

本実施形態では、二つの集光スポット P0、P1 が切断予定ライン S0 の断面 3b への射影線 S1 上に形成される。図示しない移動ステージを X 方向に移動させることで、二つの集光スポット P0、P1 ペアが S1 上に順次形成される。

二つの集光スポット P0、P1 は、互いに接触あるいは近接しているので、図 3 (a) に示すように短時間内で融合して楕円状熱源温度分布パターン e になる。二つの集光スポット P0、P1 が射影線 S1 上にあるので、楕円状熱源温度分布パターン e の長軸も射影線 S1 上にある。その結果、応力の異方性、すなわち、長軸方向にクラックを成長させる応力が被切断部材 3 内に発生するので、次の二つのスポット P0、P1 を形成する間隔を大きくすることができる。すなわち、移動ステージの X 軸方向への送り速度（切断方向の加工速度）を高くすることができる。

また、二つの集光スポット P0、P1 は同時に形成されるので、集光点に十分なエネルギーが到達しない問題や、集光点の位置がずれてしまうといった問題がない。

次に、実施形態 1 の変形態様を説明する。図 3 (b) に示すように、二つの集光スポット P0、P1 の間隔を広げて所定の間隔になるように形成してもよい。すると、もはや二つの集光スポット P0、P1 は融合せず、独立した円形状熱源温度分布パターン γ_0 、 γ_1 になる。独立した円形状熱源温度分布パターン γ_0 、 γ_1 間には、引張応力が働き、射影線 S1 方向（切断方向）へのクラックの伸展が助長される。

また、図 4 に示すように、三つの集光スポット P0、P1、P2 を同時に形成してもよい。このとき、P0、P1、P2 に注入されるエネルギー密度を E0、E1、E2 として、 $E_0 > E_1$ 、 $E_0 > E_2$ を満たすようにすることで、応力の異方性（楔効果）が高まり、一層加工速度を高くすることができる。

また、図 5 (a) に示すように、三つの集光スポット P0、P1、P2 を結ぶ図形が三角形を描くようにするとよい。三つの集光スポット P0、P1、P2 が融合して三角形熱源温度分布パターン f となり、楔効果を左方向に作用させること

ができる。

また、図5（b）に示すように、四つの集光スポットP0、P1、P2、P3を結ぶ図形が平行四辺形を描くようにし、平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点P0、P3を射影線S1上に位置させてもよい。四つの集光スポットP0、P1、P2、P3が融合して平行四辺形状熱源温度分布パターンgとなり、楔効果が左右に作用し、割断方向の加工速度を一層高くすることができる。

ここで、本発明における複数の集光スポットを同時に形成する事項における「同時」について説明する。複数の集光スポットを空間的に異なる位置に全く同時に形成することは不可能であり、複数の集光スポットの間には自ずと時間幅（時間差） τ がある。そこで、時間差 τ がどこまで許容されるかをシミュレーション実験で調べてみた（後述のシミュレーション2参照。）。その結果、被割断部材が典型的なサファイアの場合、 $\tau = 0.3 \text{ nsec}$ を得た。そこで、本発明では、 $0 \sim \text{サブnsec}$ の範囲を「同時」と定義する。

本実施形態のように、超短パルスレーザ光を用いることで、熱の発生を極めて局所的に且つ非常に高温にできるため、本実施形態は次の二つのメリットを有する。

まず、熔融領域が局所のため、延性材化する範囲が狭く、その周りの脆性が保たれる。その結果、熱応力が作用したときに良好にクラックが伸展する。パルス幅が長いと、熔融範囲が広がるため、延性材化によるクラック伸展の抑制がある。

次に、ピークパワーが高いため、温度勾配が急峻になる。したがって、大きな熱応力が発生する。パルス幅が長いと、ピークパワーが小さいため、温度勾配がなだらかになる上、熱拡散しながら入熱が続く状態となり、温度勾配はますますなだらかになり、熱応力が発生しにくくなる。

なお、複数のビームが同時に照射され且つ各スポットの間隔が波長の5倍程度以下と狭い場合、お互いのビームが干渉し合い、その程度に応じて強度分布が変動する可能性があるため、その影響を加味した加工を行う必要がある。したがって、意図した強度分布を維持し、より効率的に所望の熱源温度分布パターンを得るためには、各ビームをパルス幅程度の時間差を設けて照射することが望ましい。本実施形態のように、超短パルスレーザ光を用いることで、本発明で定義す

る「同時」の範囲の中でパルス幅程度の時間差を付けて照射することが可能になるため、時間的に前に照射されたパルスによって生じる熱の影響を回避できるメリットがある。

本実施形態のレーザ加工方法における光学系 2 としては、例えば、図 6 に示すものがある。図中 22 と 23 は、ビームスプリッタ、24 と 25 はミラーである。

光源 1 から射出されたレーザ光は、ビームスプリッタ 22 で二つに分割される。ビームスプリッタ 22 で反射されたレーザ光は、ミラー 24 で反射されて集光レンズ 21 に光軸 O と θ_0 をなして入射される。ビームスプリッタ 22 を透過したレーザ光は、次のビームスプリッタ 23 でさらに二つに分割される。ビームスプリッタ 23 で反射されたレーザ光は、ミラー 25 で反射されて集光レンズ 21 に光軸 O と θ_1 をなして入射される。ビームスプリッタ 22 を透過したレーザ光は、光軸 O 上を進み集光レンズ 21 に入射される。

光軸 O 上を進んで入射されたレーザ光は、射影線 S1 と光軸 O の交点に集光され、集光スポット P0 となる。光軸 O と θ_0 をなして入射されたレーザ光は、射影線 S1 上で集光スポット P0 から X0 離れた位置に集光され、集光スポット P2 となる。光軸 O と θ_1 をなして入射されたレーザ光は、射影線 S1 上で集光スポット P0 から X1 離れた位置に集光され、集光スポット P1 となる。

集光レンズ 21 の焦点距離を F とすると、

$$X0 = F \tan \theta_0$$

$$X1 = F \tan \theta_1$$

の関係があるので、 θ を変えることで三つの集光スポット P0、P1、P2 の間隔を変えることができる。

なお、図 6 の光学系 2 では、三つの集光スポット P0、P1、P2 を形成するレーザ光の光路が異なるが、上記の同時を満たすように光路差を小さくする必要がある。光遅延媒質を用いることで光路差を調整することができる。

次に、光学系 2 の変形態様を説明する。光学系 2 として、図 7 に示す光学系 20 を用いることができる。AOM（音響光学変調器）202 によって波長シフトを起こしたビーム（1 次光）と波長シフトを起こさないビーム（0 次光）を生成し、グレーティングペア 203 に挿入する。グレーティングペア 203 によって

同時に満たすように二つのビームの光路差が調整される。AOM 202の音波振動数を変えることで θ を変化させるか、またはグレーティングペア 203の格子の本数（ピッチ）、次数を調整することによって集光レンズ 201に入射する角度を変化させ、集光スポットのX方向の位置を変化させる。

外部からの電気信号によって、AOM 202の音波振動数を変化させることで、集光スポットの位置を制御することができる。

（実施形態 2）

図 8 は、実施形態 2 のレーザ加工装置の概略構成図である。図 9 は、図 8 の被割断部材 3 の斜視図、図 10 は、図 9 の B-B 線断面図である。

本実施形態のレーザ加工装置は、図 8～10 に示すように、被割断部材 3 の表面 3a から所定の深さ Z0 位置で深さ方向に複数の深さ集光スポット Q0、Q1 を同時に形成し、その際、複数の深さ集光スポット Q0、Q1 のうち少なくとも一つの深さ集光スポットを集光レンズ 2A1 の光軸 O 上に形成する光学系 2A を備えている。

本実施形態では、集光スポット Q0 が光軸 O 上の表面 3a から Z0 の深さに形成され、集光スポット Q1 が光軸 O 上で集光スポット Q0 より深さ方向（Z 方向）に深い位置に形成される。図示しない移動ステージを X 方向に移動させることで、二つの集光スポット Q0、Q1 が X 方向に順次形成される。

二つの集光スポット Q0、Q1 は、一部重なる、接する或いは近接しているので、図 10（a）に示すように融合して楕円状スポット e になる。二つの集光スポット Q0、Q1 が光軸 O 上にあるので、楕円状スポット e の長軸も光軸 O 上にある。その結果、応力の異方性、すなわち、長軸方向（深さ方向）にクラックを成長させる応力が発生され、深さ方向に別のスポット Q0、Q1 を同時に形成する深さ方向の間隔を大きくすることができる。すなわち、移動ステージの Z 軸方向への送り速度（厚み方向の加工速度）を高くすることができる。

また、二つの集光スポット Q0、Q1 は同時に形成されるので、集光点に十分なエネルギーが到達しない問題や、集光点の位置がずれてしまうといった問題がない。

次に、実施形態 2 の変形態様を説明する。図 10（b）に示すように、二つの

集光スポットQ0、Q1を所定の間隔以上あけて形成してもよい。すると、もはや二つの集光スポットQ0、Q1は融合せず、独立した円形状熱源温度分布パターン γ_0 、 γ_1 になる。独立した円形状熱源温度分布パターン γ_0 、 γ_1 間には、引張応力が働き、光軸O方向（厚さ方向）へのクラックの伸展が助長される。

また、図11に示すように、三つの集光スポットQ0、Q1、Q2を同時に形成してもよい。このとき、Q0、Q1、Q2に注入されるエネルギー密度をE0、E1、E2として、 $E_0 > E_1$ 、 $E_0 > E_2$ を満たすようにすることで、応力の異方性（楔効果）が高まり、一層加工速度を高くすることができる。

また、図12（a）に示すように、三つの集光スポットQ0、Q1、Q2を結ぶ図形が三角形を描くようにするとよい。三つの集光スポットQ0、Q1、Q2が融合して三角形形状熱源温度分布パターンfとなり、楔効果を上方向に作用させることができる。

また、図12（b）に示すように、四つの集光スポットQ0、Q1、Q2、Q3を結ぶ図形が平行四辺形を描くようにし、平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点Q0、Q3を光軸O上に位置させてもよい。四つの集光スポットQ0、Q1、Q2、Q3が融合して平行四辺形状熱源温度分布パターンgとなり、楔効果が上下に作用し、厚み方向の加工速度を一層高くすることができる。

本実施形態のレーザ加工装置における光学系2Aとしては、例えば、図13に示すものがある。図中2A2と2A3はビームスプリッタ、2A4と2A5はミラーである。2A6は、リレーレンズである。

光源1から射出されたレーザ光は、ビームスプリッタ2A2で二つに分割される。ビームスプリッタ2A2を透過したレーザ光は、ビームスプリッタ2A3を透過して集光レンズ2A1に入射される。ビームスプリッタ2A2で反射されたレーザ光は、リレー光学系2A6で拡がり角 α のレーザ光に変換され、その後ビームスプリッタ2A3で反射されて集光レンズ2A1に入射される。

ビームスプリッタ2A3を透過したレーザ光は、図13（b）に示すように集光レンズ2A1の焦点位置に集光され、集光スポットQ0となる。ビームスプリッタ2A3で反射されたレーザ光は、集光スポットQ0よりZ1下方に集光され、集光スポットQ1となる。

ビームスプリッタ 2A3 で反射されたレーザ光の集光レンズ 2A1 でのビーム半径を R とすると、

$$Z1 = \{ R F / (R - F \tan \alpha) \} - F$$

の関係があるので、拡がり角 α を変えることで、集光スポット Q0、Q1 の間隔を変えることができる。

なお、図 13 の光学系 2A では、二つの集光スポット Q0、Q1 を形成するレーザ光の光路が異なるが、上記の同時を満たすように光遅延媒質等を用いて光路差を小さくする必要がある。

次に、光学系 2A の変形態様を説明する。光学系 2A として、図 14 に示す光学系 20A、20B を用いることができる。

図 14 (a) に示すように、中心部と周辺部で曲率の異なる多焦点レンズ 20A1 を用いることで、集光スポットを分離することができる。図では Z 方向の集光スポットを分離する方法を例示しているが、X 方向の集光スポットを分離することもできる。

また、図 14 (b) に示すように、回折レンズ（フレネルレンズ）20B1 を用いることで、Z 方向の集光スポットを分離できる。回折レンズ 20B1 の溝形状を調整することで各々の回折光による集光スポットの強度を調整できる。

（実施形態 3）

図 15 は、実施形態 3 のレーザ加工装置の概略構成図である。図 16 は、図 15 の被切断部材 3 の斜視図、図 17 (a) は、図 16 の A-A 線断面図、図 17 (b) は、図 16 の B-B 線断面図である。

本実施形態のレーザ加工装置は、図 15 ～ 17 に示すように、被切断部材 3 の表面 3a から所定の深さ位置 Z0 で集光レンズ 2B1 の光軸 O と直交し表面 3a と平行する断面 3b の上に複数の断面集光スポット P0、P1 を同時に形成し、その際、複数の断面集光スポット P0、P1 のうち少なくとも一つの断面集光スポットを切断予定ライン S0 の断面 3b への射影線 S1 上に形成し、所定の深さ位置 Z0 で深さ方向にも複数の深さ集光スポット Q0、Q1 を同時に形成し、その際、複数の深さ集光スポット Q0、Q1 のうち少なくとも一つの深さ集光スポットを集光レンズ 2B1 の光軸 O 上に形成する光学系 2B を備えている。

本実施形態では、二つの集光スポットP0、P1が割断予定ラインS0の断面(XY平面)3bへの射影線S1上に形成され、集光スポットQ0が光軸O上で表面3aからZ0の深さに形成され、集光スポットQ1が光軸O上で集光スポットQ0より深い位置(表面3aから(Z0+Z1))に形成される。

二つの集光スポットP0、P1は、互いに接触あるいは近接しているので、図17(a)に示すように、短時間内に融合して楕円スポットe1になる。二つの集光スポットP0、P1が射影線S1上にあるので、楕円状熱源温度分布パターンe1の長軸も射影線S1上にある。その結果、応力の異方性、すなわち、長軸方向にクラックを成長させる応力が発生され、次の二つのスポットP0、P1を形成する間隔を大きくすることができる。したがって、移動ステージのX軸方向への送り速度(割断方向の加工速度)を高くすることができる。

また、二つの集光スポットQ0、Q1は、一部重なる、接する或いは近接しているので、図17(b)に示すように、短時間内に融合して楕円状スポットe2になる。二つの集光スポットQ0、Q1が光軸O上にあるので、楕円状熱源温度分布パターンe2の長軸も光軸O上にある。その結果、応力の異方性、すなわち、長軸方向(深さ方向)にクラックを成長させる応力が発生され、深さ方向に別のスポットQ0、Q1を同時に形成する深さ方向の間隔を大きくすることができる。すなわち、焦点位置を厚み方向にずらす量を大きくでき、厚み方向の加工速度(集光レンズの厚み方向の相対移動速度)を高くすることができる。

本実施形態のレーザ加工装置における光学系2Bとしては、例えば、図18に示すものがある。図中2B2、2B3、2B4、2B5はビームスプリッタ、2B6、2B7、2B8、2B9はミラー、2B10と2B11はリレーレンズである。

光源1から射出されたレーザ光は、ビームスプリッタ2B2で二つに分割され、一方のレーザ光はビームスプリッタ2B3でさらに分割される。

ビームスプリッタ2B2を透過したレーザ光は、ビームスプリッタ2B3、2B4、2B5を透過して集光レンズ2B1に入射され、集光スポットP0(Q0)を形成する。

ビームスプリッタ2B2で反射されたレーザ光は、リレーレンズ2B10で拡がり角 α のレーザ光に変換さる。その後、ビームスプリッタ2B4で反射されて集光レンズ2B1に入射され、集光スポットQ1を形成する。なお、リレーレンズ2B10

のレンズ間隔（Z方向の距離）を変えることで拡がり角を変えることができる。

ビームスプリッタ 2 B3 で反射されたレーザ光は、リレーレンズ 2 B11 で伝搬方向が変えられる。その後、ビームスプリッタ 2 B5 で反射されて集光レンズ 2 B1 に光軸 O と θ をなす方向から入射され、集光スポット P1 を形成する。なお、リレーレンズ 2 B11 の倍率が高い場合は、リレーレンズ 2 B11 の煽り角を変えることで伝搬方向をかえることができる。

なお、図 1 8 の光学系 2 B では、三つの集光スポット P0 (Q0)、P1、Q1 を形成するレーザ光の光路が異なるが、上記の同時を満たすように光路差を小さくする必要がある。

次に、光学系 2 B の変形態様を説明する。光学系 2 B を図 1 9 に示すような光学系 2 C としてもよい。回折格子 2 C2 によって得られる複数次の回折光を独立にミラー 2 C3～2 C7 で反射させ、戻り光を集光レンズ 2 C1 で集光する。

各 n 次光を独立に反射するミラー 2 C3～2 C7 を配置し、各ミラーの入射ビームに対する角度を調節することで、戻り光の集光レンズ 2 C1 への入射角を各々変化させることが可能になり、集光スポット P0、P1 が被割断部材 3 の割断予定ライン S0 の断面（XY 平面）への射影線 S1 上に形成される。

ミラー 2 C7 の調節角 α と集光レンズ 2 C1 への入射角 β との間には

$$\beta = 2 \alpha \cos \theta_t / \cos \theta_i$$

の関係があるので、 α を調節することで入射角 β を変えることができる。ここで、 θ_i は回折格子 2 C2 への入射角、 θ_t は回折格子 2 C2 からの射出角である。

また、各ミラー 2 C3～2 C7 の反射面の曲率を調整することで、戻り光の集光レンズ 2 C1 に入射する際の拡がり角（または、窄まり角）を各々変化させることが可能になり、Z 方向に対して所望の空間的に分離された集光スポットを形成することができる。

回折格子 2 C2 の格子形状を調節することで、各 n 次光の強度を所望の強度に最適化することができる。

また、光学系 2 B を図 2 0 に示すような光学系 2 D としてもよい。光源 1 から射出される一つのビームがビームエキスパンダ 2 D2 で拡げられ、多数のアパーチャ 2 D3～2 D5 に取り付けられたガラス棒 2 D6～2 D8 に入射される。ガラス棒 2 D6

～2D8の射出側の端面角度を変えることで、集光レンズ2D1に入射するビームの角度を変化させ、集光スポットのX方向の位置を変化させることができる。

また、ガラス棒2D6～2D8の射出側端面の曲率を調整することで、集光レンズ2D1に入射する際の拡がり角（または、窄まり角）を各々変化させ、Z方向の位置を変化させることができる。あるいは、単なるガラス棒の代わりにセルフオックレンズ（径の外側に行くほど屈折率が小さくなる屈折率分布を有するレンズ）を用いることによって集光レンズ2D1に入射する際の拡がり角（または、窄まり角）を各々変化させることができ、Z方向の位置を変化させることもできる。

アパーチャ2D3～2D5にガラス棒2D6～2D8を取り付ける代わりに、六角形のガラスをスタックさせてフライアイレンズのようにすればケラレ部分が無くなるため、ロスが抑えられてさらに望ましい。

通常のガウシアンビームでは、分離後の各焦点間の強度分布もガウシアンに準じたものになってしまう。各集光スポットの強度分布を均一にするためには、アパーチャ2D3～2D5の上流に、トップハット分布変換光学系を置いて各アパーチャに入射するビームの強度を等しくする必要がある。

さらに、光学系2Bを図21に示すような光学系2Eとしてもよい。穴あきアキシコンミラーペア2E2を用いて光源1から射出されるビームを中心の小さなビームとドーナツ型のビームに分離して、集光レンズ2E1で集光する。アキシコンミラーペア2E2内で折り返されたレーザ光と中心の穴から抜けるレーザ光の集光レンズ2E1への到達時間をそろえるために、遅延媒質2E3の長さは、アキシコンミラーペア2E2内での折り返しの光路長と、遅延媒質2E3内の実効光路長が揃うように調整されている。遅延媒質2E3の射出側端面角度を変えることで、集光レンズ2E1に入射するビームの角度を変化させ、集光スポットのX方向の位置を変化させることができる。また、遅延媒質2E3の射出側端面の曲率を調整することで、集光レンズに入射する際の拡がり角（または、窄まり角）を各々変化させ、Z方向の位置を変化させることができる。あるいは、遅延媒質2E3として単なる均一媒質の代わりにセルフオックレンズを用いることによって、集光レンズ2E1に入射する際の拡がり角（または、窄まり角）を各々変化させることができ、Z方向の位置を変化させることもできる。

次に、本発明のシミュレーション結果と実験結果を説明する。

〔シミュレーション 1〕 実施形態 1 のレーザ加工装置によって同時且つ複数形成される集光スポットが短時間内に融合して一つの楕円状熱源温度分布パターンになる様子が「内部円筒熱源列による熱伝導数値解析モデル」を使用してシミュレーションされた。

主なシミュレーション条件は、以下の通り。

被切断部材：サファイア

集光スポット形成深さ Z_0 : $20\ \mu\text{m}$

集光スポット径 : $2\ \mu\text{m}$

集光スポット中心間隔 : $2\ \mu\text{m}$

集光スポット数 : 3

集光スポット当たりのレーザパルスエネルギー : $0.25\ \mu\text{J}$

シミュレーション結果を図 22 に示す。レーザパルスを照射後約 $10\ \text{ps}$ 経過すると、図 22 (a) に示す楕円状熱源温度分布パターンが形成された。図 22 (b) は、図 22 (a) から $10\ \text{ns}$ 経過した楕円状熱源温度分布パターンを示している。中心の最も黒い領域は約 4000°K 、外側の白っぽい領域は約 1500°K 、中間領域は $2500\sim3000^\circ\text{K}$ であった。

このシミュレーションから、レーザパルスが複数同時に集光照射されると、ほとんど瞬時（約 $10\ \text{ps}$ 後）に融合して楕円状熱源温度分布パターンが発現することがわかる。

〔シミュレーション 2〕 三つの集光スポットを時間差ゼロ ($\tau=0$) で形成した場合の熱源温度分布パターンの形状寸法と、時間差 $0.003\ \text{ns}$ 、 $0.03\ \text{ns}$ 、 $0.3\ \text{ns}$ で形成した場合の熱源温度分布パターンの形状寸法とが、「内部円筒熱源列による熱伝導数値解析モデル」を使用してシミュレーションされた。

主なシミュレーション条件は、以下の通り。

被切断部材：サファイア

集光スポット形成深さ Z_0 : $5\ \mu\text{m}$

集光スポット径 : $2\ \mu\text{m}$

集光スポット中心間隔：2 μ m

集光スポット数：3

集光スポットの時間差：0 sec、0.003 nsec、0.03 nsec、0.3 nsec

集光スポット当たりのレーザパルスエネルギー：1 μ J

シミュレーション結果を図23に示す。図23は、三つの集光スポットを形成してから10 nsec後の熱源の温度分布パターンであり、(a)は三つの集光スポットを時間差ゼロで形成した場合の熱源の温度分布パターン、(b)は真ん中の集光スポットを両側の集光スポットより0.003 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、(c)は両側の集光スポットを真ん中の集光スポットより0.003 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、(d)は真ん中の集光スポットを両側の集光スポットより0.03 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、(e)は両側の集光スポットを真ん中の集光スポットより0.03 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、(f)は真ん中の集光スポットを両側の集光スポットより0.3 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、(g)は両側の集光スポットを真ん中の集光スポットより0.3 nsec遅らせて形成した場合の熱源の温度分布パターン、である。

図23より、本シミュレーションで最も大きく遅らせた $\tau = 0.3$ nsecの場合の温度分布パターン(f)、(g)でも $\tau = 0$ の場合の温度分布パターン(a)と形状及び寸法が同じであることがわかる。従って、複数の集光スポットをサファイアに形成する場合、複数の集光スポットの時間差が少なくとも0.3 nsec以内であれば、同時に(時間差ゼロで)形成した場合と同じ形状寸法の熱源温度分布パターンが得られる。

〔シミュレーション3〕二つの集光スポット間隔を変化させた場合の熱源の温度分布パターンが「内部円筒熱源列による熱伝導数値解析モデル」を使用してシミュレーションされた。次に、その時の応力分布が「有限要素法による応力解析モデル」を使用して求められた。

主なシミュレーション条件は、以下の通り。

被切断部材：サファイア

集光スポット形成深さ Z_0 : $20\ \mu\text{m}$

集光スポット径 : $2\ \mu\text{m}$

集光スポット中心間隔 : $2\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$

集光スポット数 : 2

集光スポット当たりのレーザパルスエネルギー : $1\ \mu\text{J}$

解析領域 : $5\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$

要素 : 2次元4節点線形要素

要素数 : 5000

節点数 : 5151

初期温度 : 0°C

シミュレーション結果を図24～図26に示す。図24及び図25は、集光スポット中心間隔が $2\ \mu\text{m}$ 及び $4\ \mu\text{m}$ の場合の熱源温度分布パターン及び応力分布パターンをそれぞれ示している(集光スポット中心間隔が $6\ \mu\text{m}$ の場合は割愛)。図26は、図24等の応力分布パターンの最大応力を縦軸にとり、横軸に集光スポット間隔をとってグラフ化したものである。

図24及び図25からスポット間隔が $2\ \mu\text{m}$ の場合は、熱源が発現してから20 ns 後には融合して楕円状熱源温度分布パターンになるが、スポット間隔が少なくとも $4\ \mu\text{m}$ 以上になると、もはや融合しなくなることがわかる。

また、スポット間隔が $2\ \mu\text{m}$ の場合は、熱源の外側にのみ引張応力が発生するのに対し、スポット間隔が少なくとも $4\ \mu\text{m}$ 以上になると、二つの円形熱源の間に引張応力が働くことがわかる。

〔シミュレーション4〕実施形態1のレーザ加工装置によって発現した楕円状熱源温度分布パターンにより発生する応力が「有限要素法による応力解析モデル」を使用して求められた。

主なシミュレーション条件は、以下の通り。

被切断部材 : サファイア

楕円状熱源の長径×短径 : $2\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$

楕円状熱源当たりのレーザパルスエネルギー : $1\ \mu\text{J}$

シミュレーション結果を図27に示す。レーザパルスを照射後約100 ps 後

に熱源の中心温度が 9843°K に達し、その時（図 27 の横軸 0 ns 時点）、最大応力を示した。曲線アが Y 方向の応力、曲線イが X 方向の応力を示しているが、図 27 から楕円状熱源温度分布パターンの長軸と直交する方向（Y 方向）の引張応力が長軸方向（X 方向）の引張応力より大きいことがわかる。

図 27 には円熱源の応力曲線ウも示してある。これから楕円熱源温度分布パターン発生直後は、円熱源よりも大きな引張応力が作用するが、円熱源より冷却スピードが速いため、所定時間経過後は円熱源より引張応力が小さくなることもわかる。

これらのことから、最大応力が作用するタイミングで長軸と直交する方向の応力が被割断部材の破壊閾値を超え、一方、長軸方向の応力が被割断部材の破壊閾値以下であるような熱源温度分布パターンが生じるようにパルスレーザを集光照射することで、楕円の長軸方向にのみクラックを生じさせることが可能になる。

また、時間の経過とともに応力は減っていき、初期の、温度が高い状態のとき最も大きな応力が作用するので、クラックを生じる破壊応力が作用し得る限界時間までに楕円プロファイルを有する熱源を形成させておく必要があることが判る。

<実施例>

実施形態 1 のレーザ加工装置で加工実験を行った。加工条件は以下の通りである。

光源 1：下記仕様・性能のモードロックファイバレーザ（米国イムラ社、モデル D1000）

中心波長	: 1045 nm
ビーム径	: 4 mm
モード	: シングル（ガウシアン）
パルス幅	: 700 fs
パルスエネルギー	: 10 μJ （最大）
繰り返し周波数	: 100 kHz（最大）
平均パワー	: 1000 mW（最大）

集光レンズ 21：顕微鏡用対物レンズ（焦点距離：4 mm、開口数：0.65）

集光スポット径：2 μm

被切断部材 3 : サファイア

同時集光スポット数 : 2

集光スポット中心間隔 : $2\ \mu\text{m}$

ステージ走査速度 : 1000 mm/s (隣り合う二つの集光スポットの間隔が $10\ \mu\text{m}$ 、図 28 (a) 参照。)

図 28 (b) は、サファイアを内部加工した透過像である。二つの同時集光スポットから切断方向にきれいにクラックが延びているのがわかる。

<比較例>

上記実施例の加工条件において、同時集光スポット数を 1 にしたこととステージ走査速度を 500 mm/s (スポット間隔が $5\ \mu\text{m}$ 、図 29 (a) 参照。) にしたこと以外は、上記実施例と同じ加工条件である。

図 29 (b) は、サファイアを内部加工した透過像である。集光スポットを繋ぐ方向とは異なる方向 (結晶方位) に、切断に寄与しない余分なクラックが発生していることがわかる。

請 求 の 範 囲

1. 集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、

前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とするレーザ加工方法。

2. 集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、

前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で深さ方向に複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とするレーザ加工方法。

3. 集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工方法であって、

前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成し、

前記所定の深さ位置で深さ方向にも複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成して所望の形状の前記内部改質領域を一つ或い

は複数形成することを特徴とするレーザ加工方法。

4. 前記複数の断面集光スポットを結ぶ図形が三角形である請求項1または3に記載のレーザ加工方法。

5. 前記複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が三角形である請求項2または3に記載のレーザ加工方法。

6. 前記複数の断面集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記割断予定ラインの前記断面への射影線上に位置させる請求項1または3に記載のレーザ加工方法。

7. 前記複数の深さ集光スポットを結ぶ図形が平行四辺形であり、前記平行四辺形の鋭角をなす二つの頂点を前記集光レンズの光軸上に位置させる請求項2または3に記載のレーザ加工方法。

8. 前記複数の断面集光スポットの前記断面上での空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで前記所望の形状の前記内部改質領域を形成する請求項1、3、4及び6のいずれか1項に記載のレーザ加工方法。

9. 前記複数の深さ集光スポットの前記割断予定ラインを含む面内の空間位置と該集光スポットのエネルギー密度との組み合わせを用いることで前記所望の形状の前記内部改質領域を形成する請求項2、3、5及び7のいずれか1項に記載のレーザ加工方法。

10. 集光レンズの光軸を被割断部材の割断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被割断部材に集光照射することにより、割断の起点となる改質領域を前記被割断部材の内部に前記割断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、

前記被割断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記割断予定ラインの前記断面への射影線上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とするレーザ加工装置。

11. 集光レンズの光軸を被割断部材の割断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被割断部材に集光照射することにより、割断の起点となる改質領

域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、

前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で深さ方向に複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とするレーザ加工装置。

1 2. 集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工装置であって、

前記被切断部材の表面から所定の深さ位置で前記集光レンズの光軸と直交し前記表面と平行する断面上の位置に複数の断面集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の断面集光スポットのうち少なくとも一つの断面集光スポットを前記切断予定ラインの前記断面への射影線上に形成し、前記所定の深さ位置で深さ方向にも複数の深さ集光スポットを同時に形成し、その際、前記複数の深さ集光スポットのうち少なくとも一つの深さ集光スポットを前記集光レンズの光軸上に形成する光学系を備え、所望の形状の前記内部改質領域を一つ或いは複数形成することを特徴とするレーザ加工装置。

1 3. 前記光学系はビームスプリッタ、ミラー及び集光レンズを備え、

前記レーザ光を前記ビームスプリッタにより分割し、分割したレーザ光を前記ミラーにより反射させて光軸に対して所定角度 θ_0 を成して前記集光レンズに入射させることにより、前記切断予定ラインに沿うよう複数の断面集光スポットを形成するようにした請求項10に記載のレーザ加工装置。

1 4. 前記光学系は音響光学変調器、グレーティングペア及び集光レンズを備え、

前記レーザ光を前記音響光学変調器により波長シフトした1次光ビームと波長シフトを起こさない0次光ビームを生成し、前記グレーティングペアにより光路差を設けて、前記集光レンズに入射させることにより、前記切断予定ラインに沿

うよう複数の断面集光スポットを形成するようにした請求項 10 に記載のレーザ加工装置。

15. 前記光学系はビームスプリッタ、ミラー、リレーレンズ及び集光レンズを備え、

前記レーザ光を前記ビームスプリッタを介して前記集光レンズに入射させると共に、前記ビームスプリッタにより反射させたレーザ光を前記リレーレンズで広がり角 α のレーザ光にして前記集光レンズに入射させることにより、深さ方向に複数の深さ集光スポットを形成するようにした請求項 11 に記載のレーザ加工装置。

図1

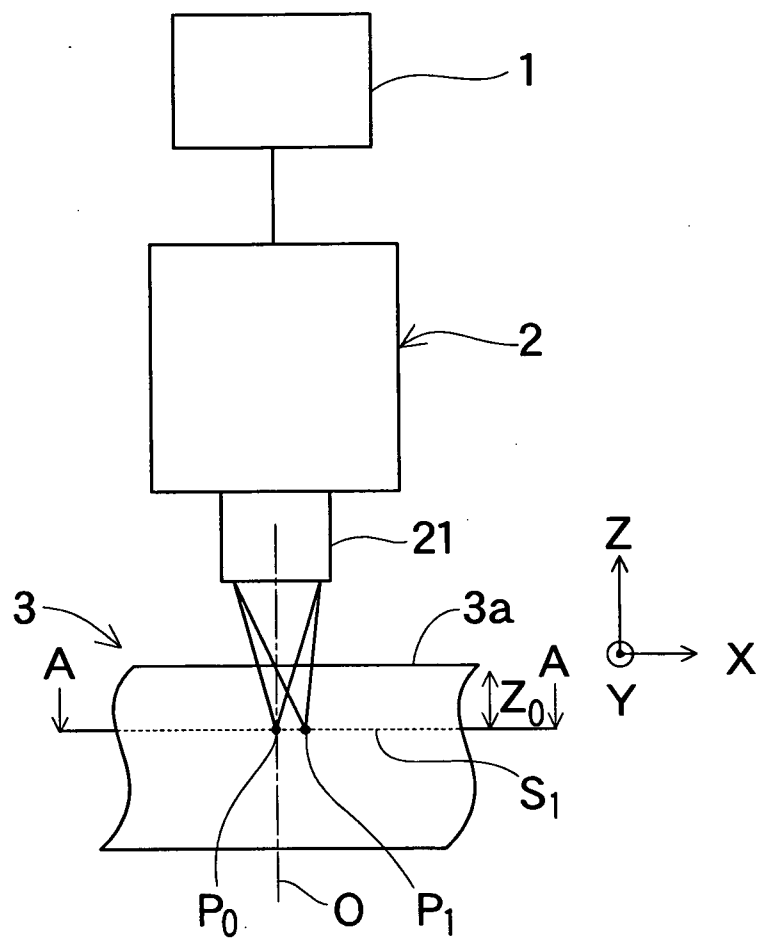


図2

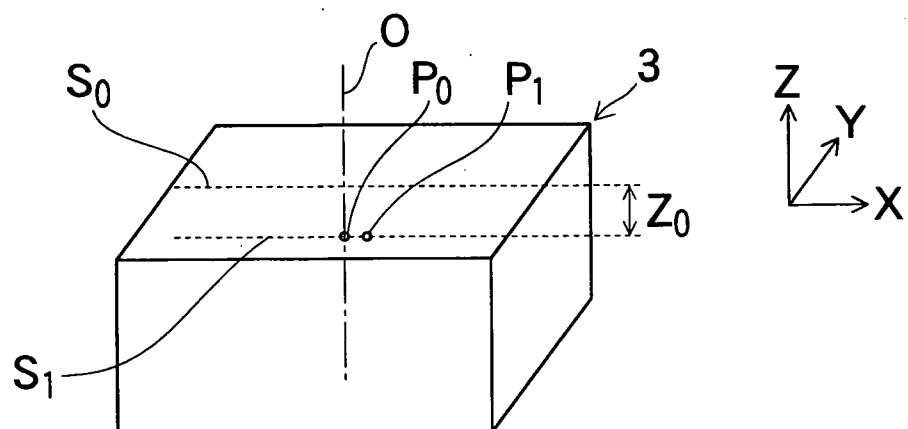


図3

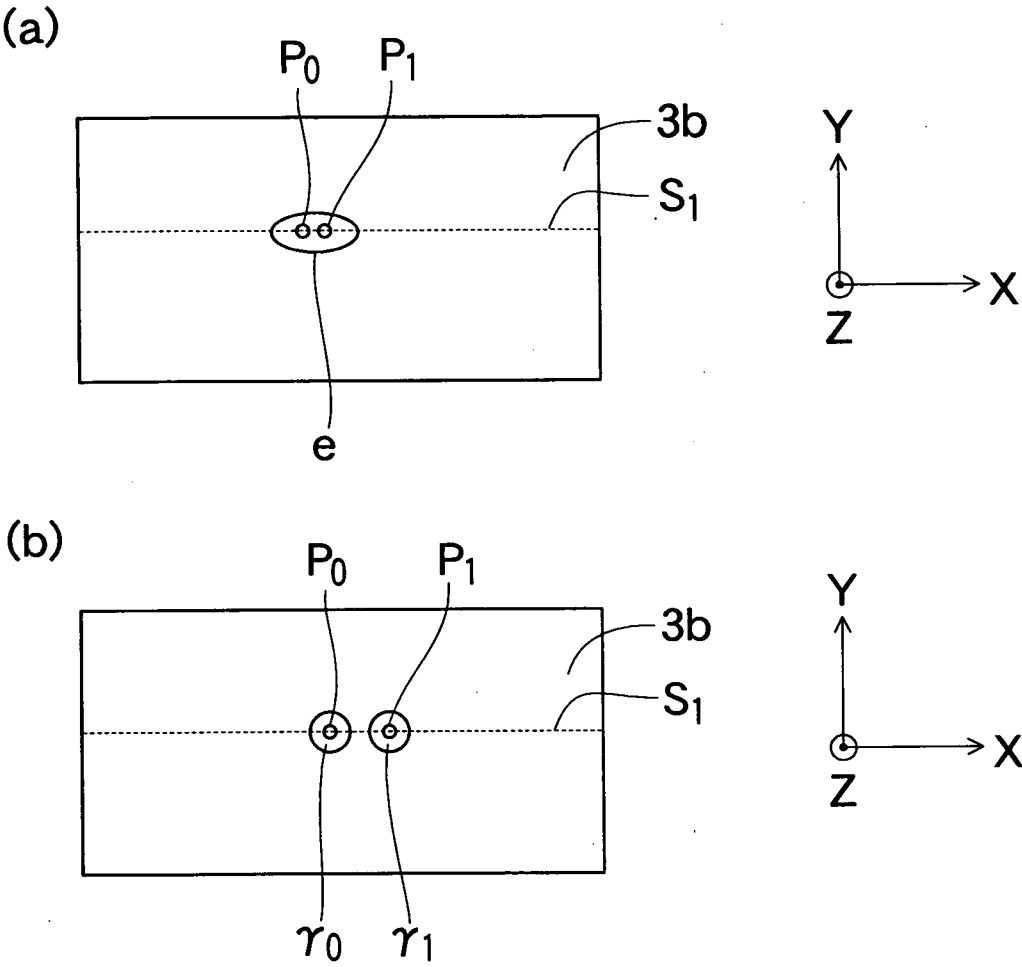


図4

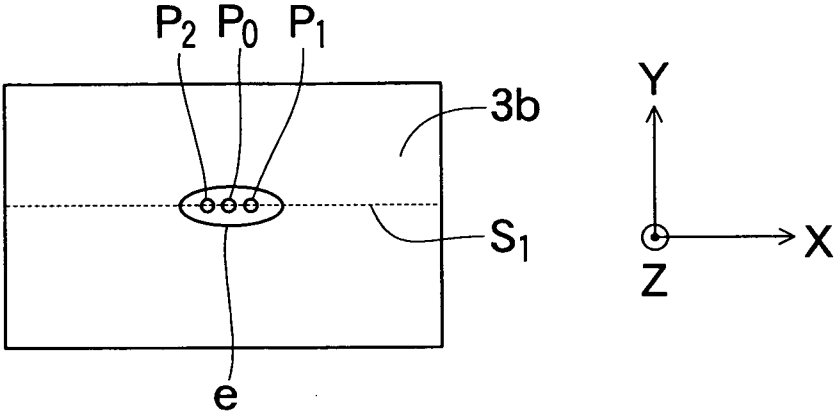


図5

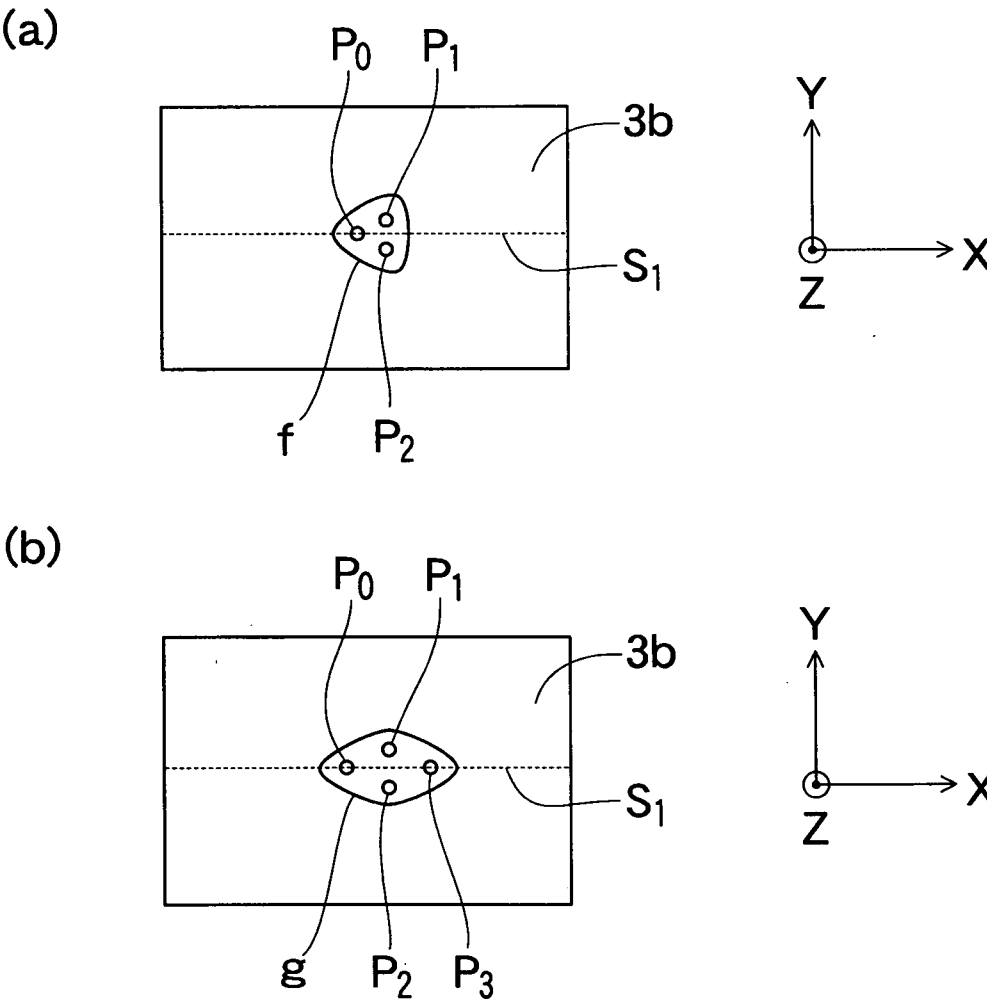


図6

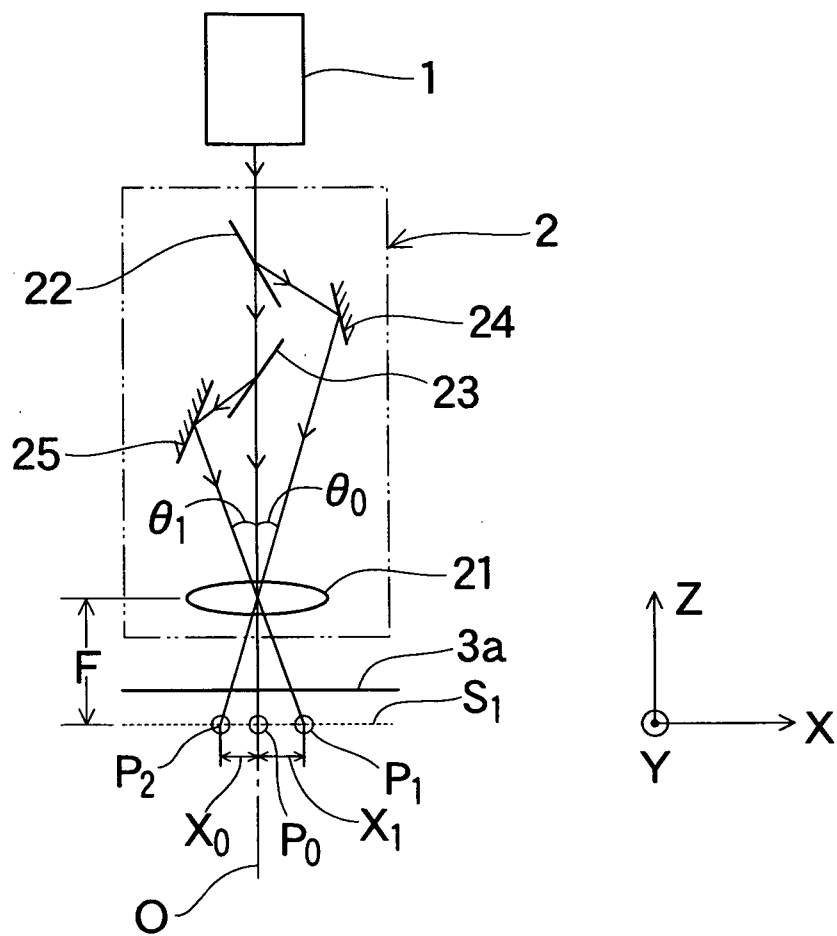


図7

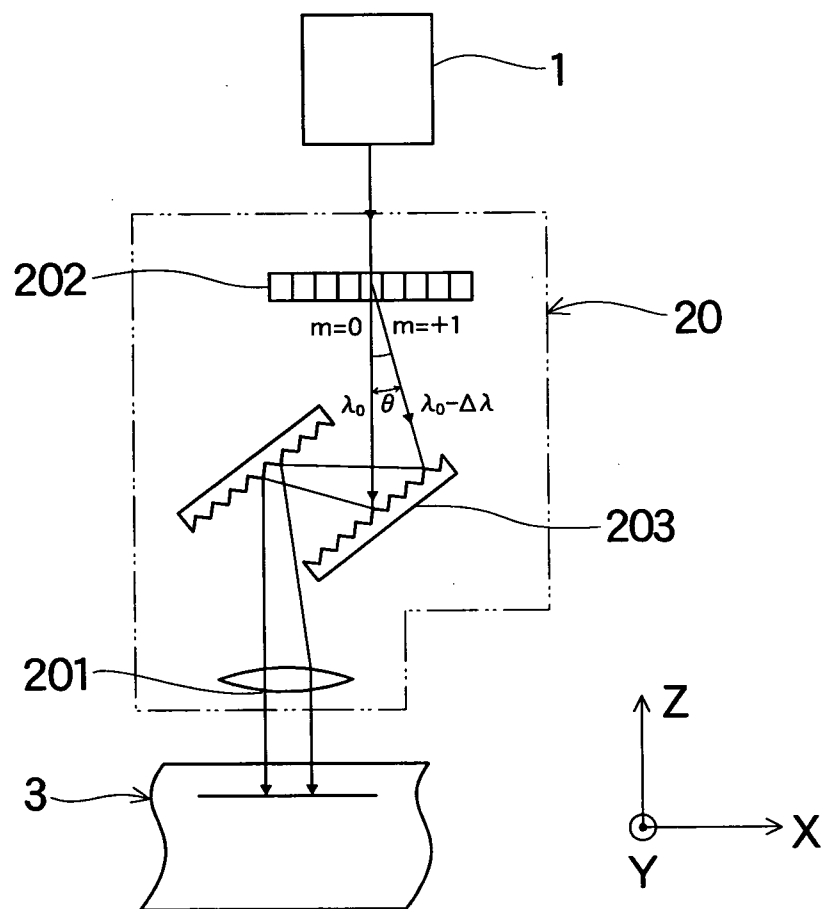


図8

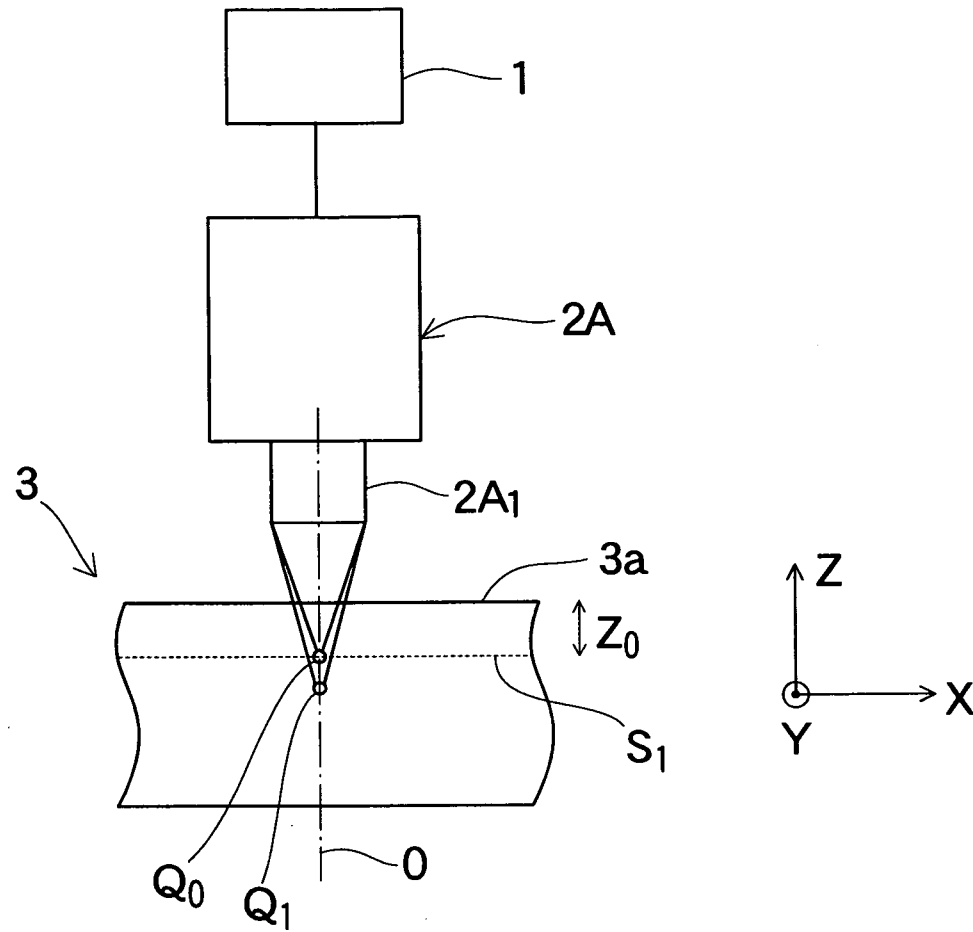


図9

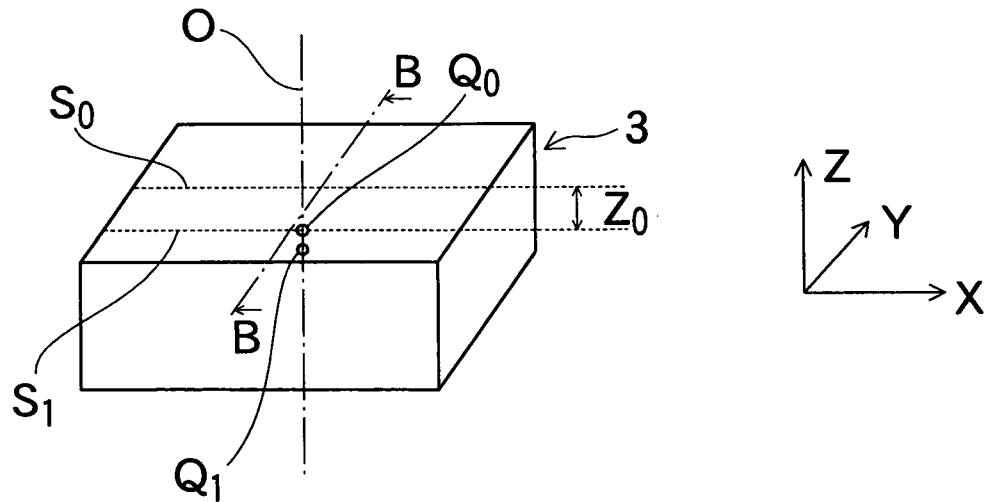
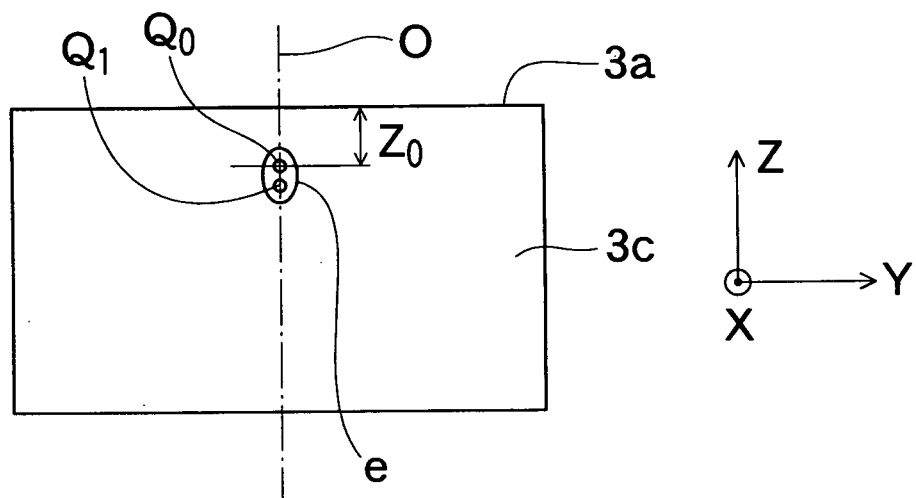


図10

(a)



(b)

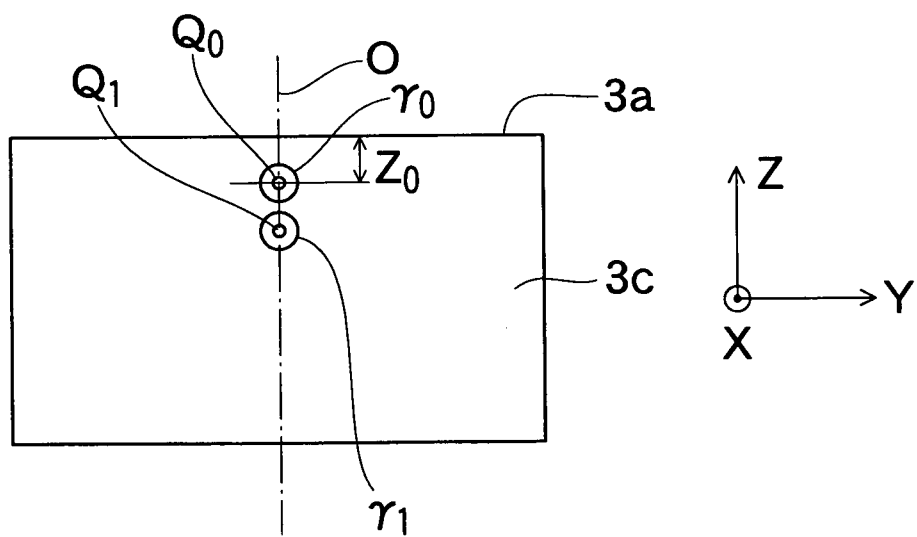


図11

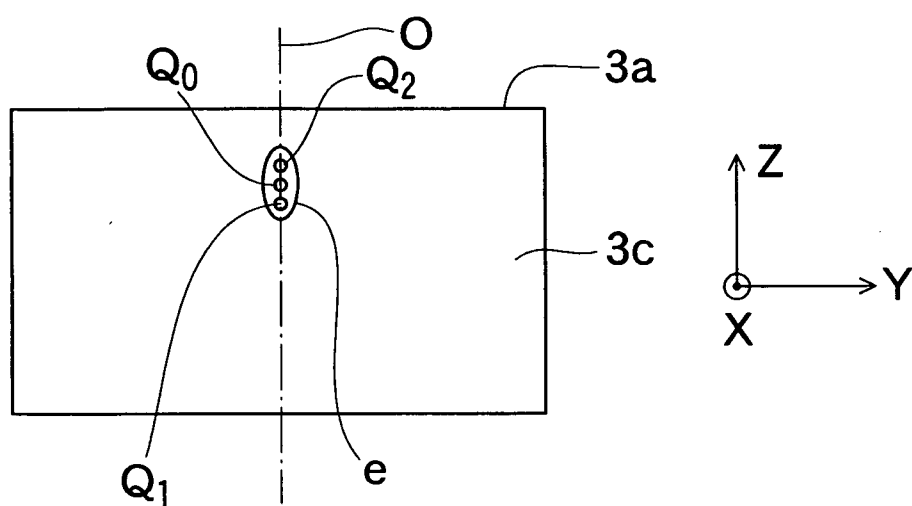
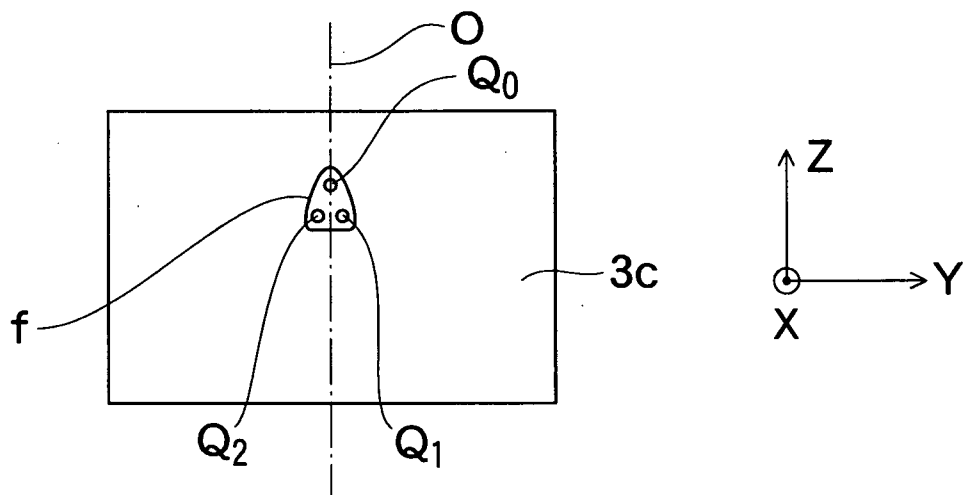


図12

(a)



(b)

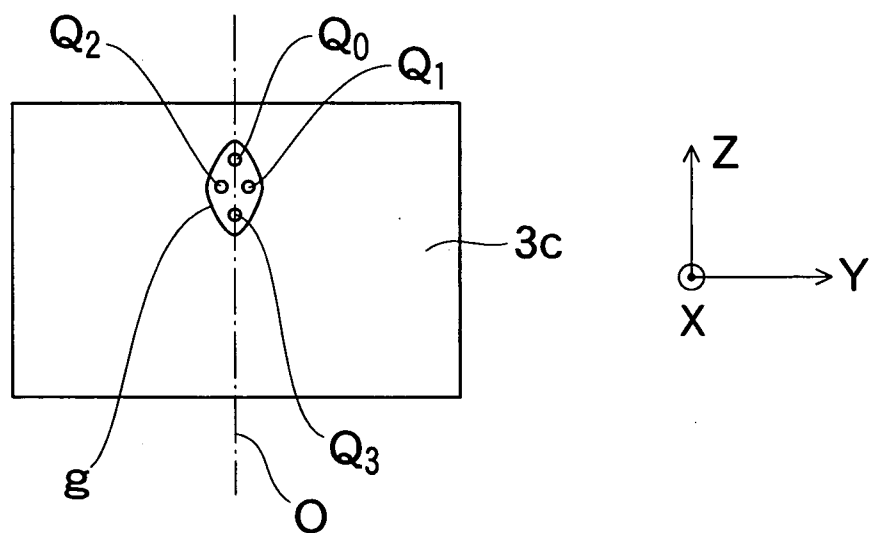
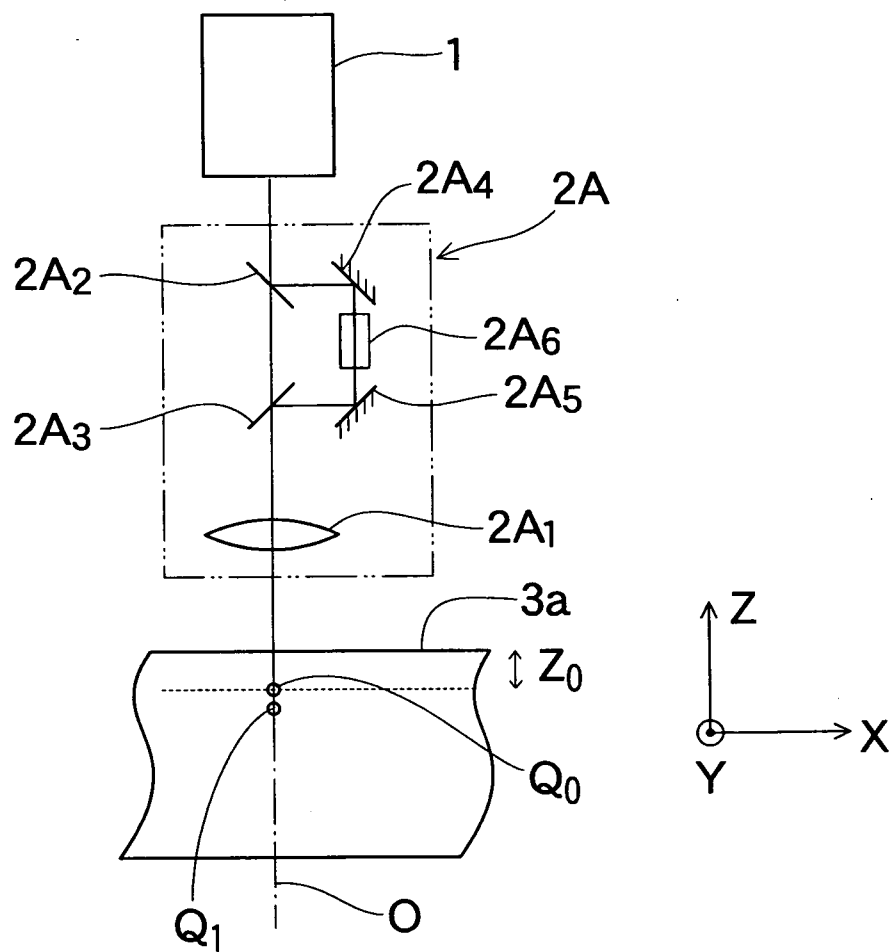


図13

(a)



(b)

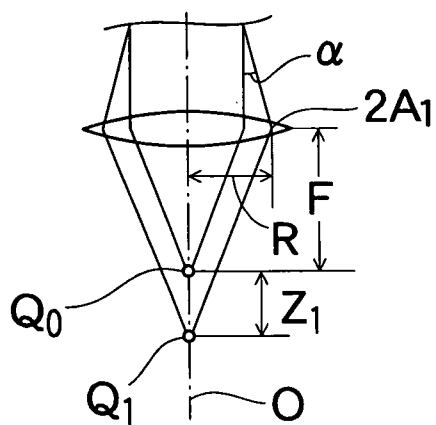
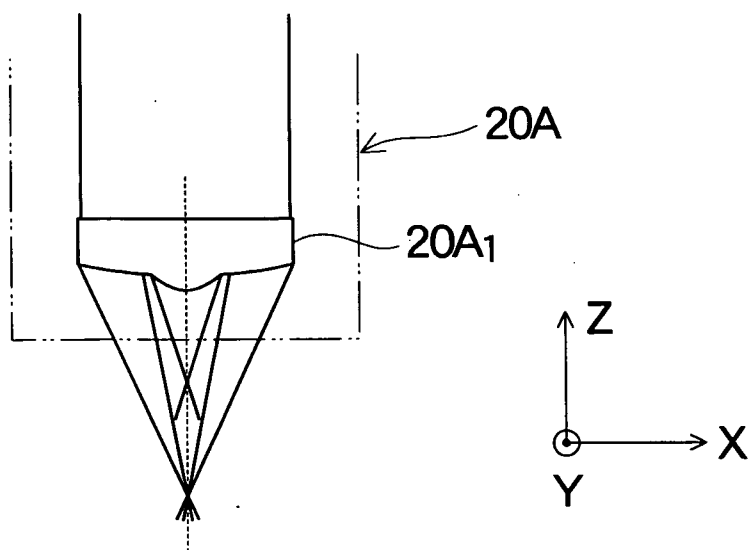


図14

(a)



(b)

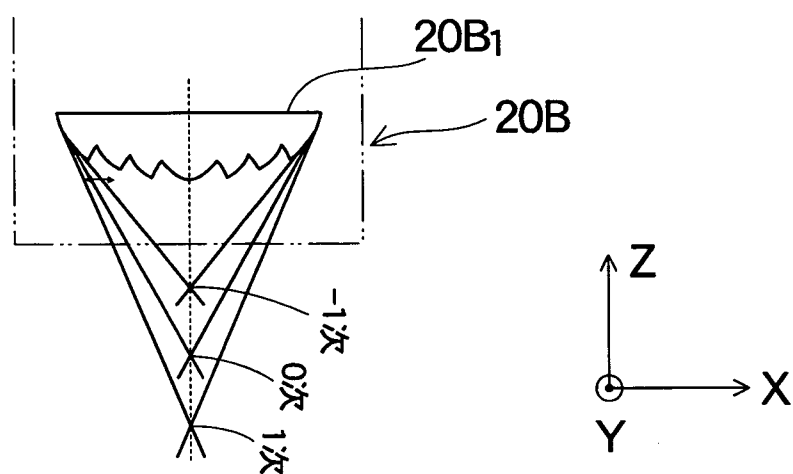


図15

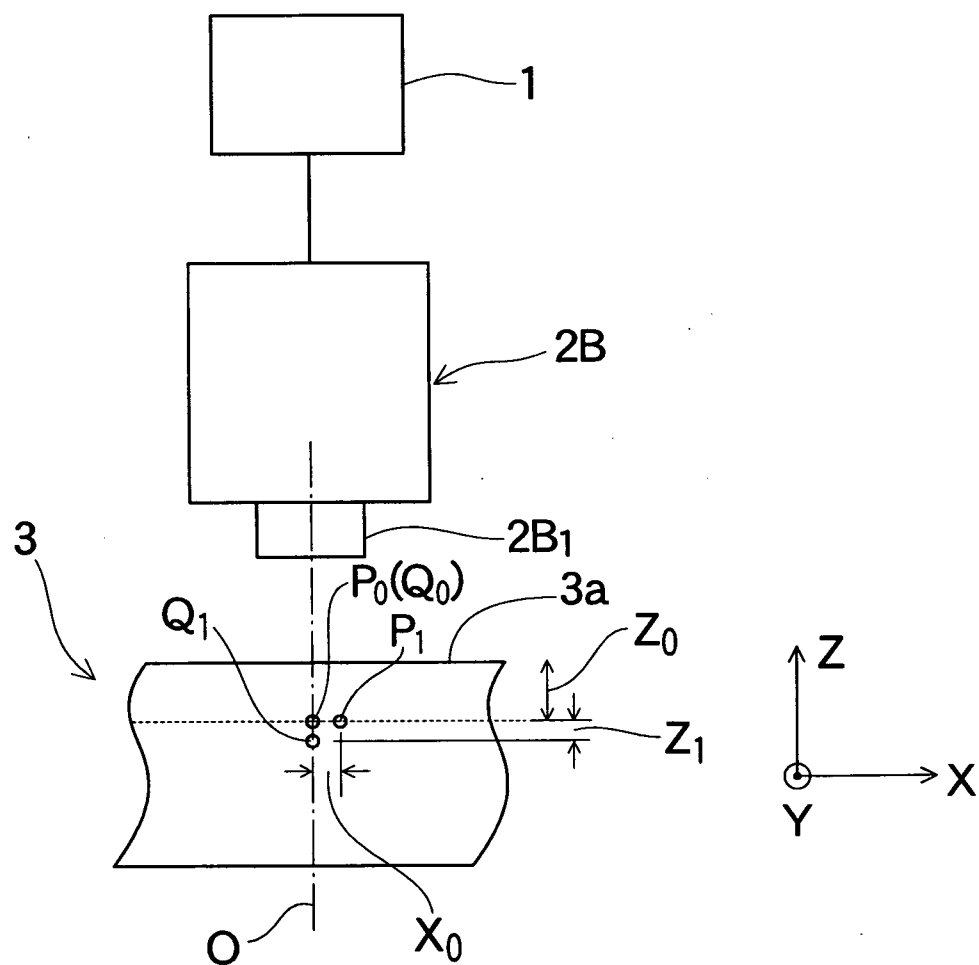


図16

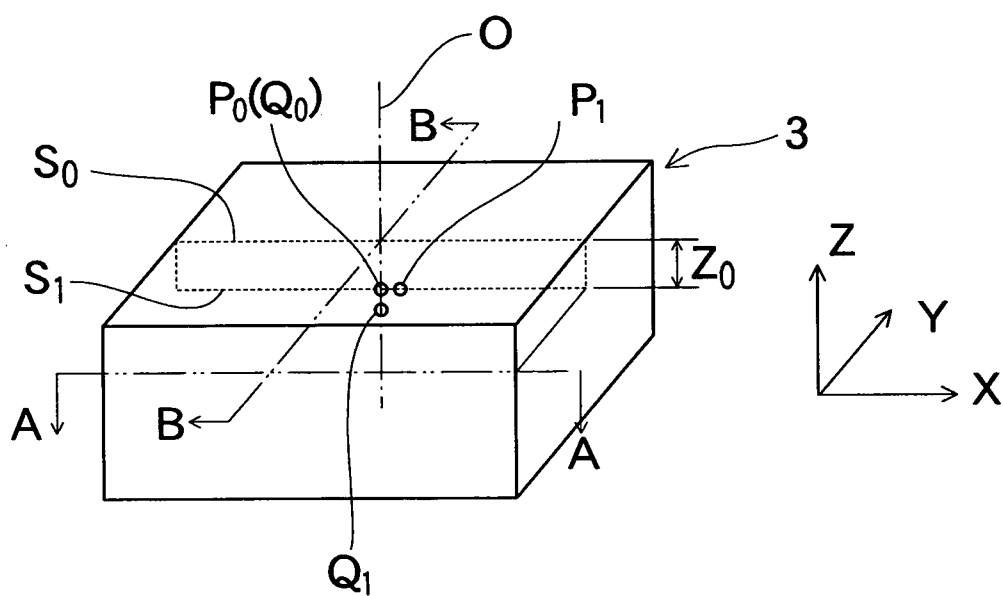
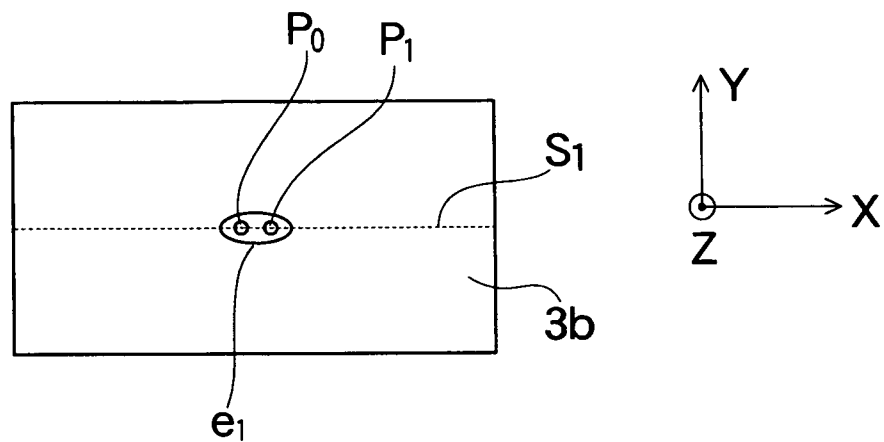


図17

(a)



(b)

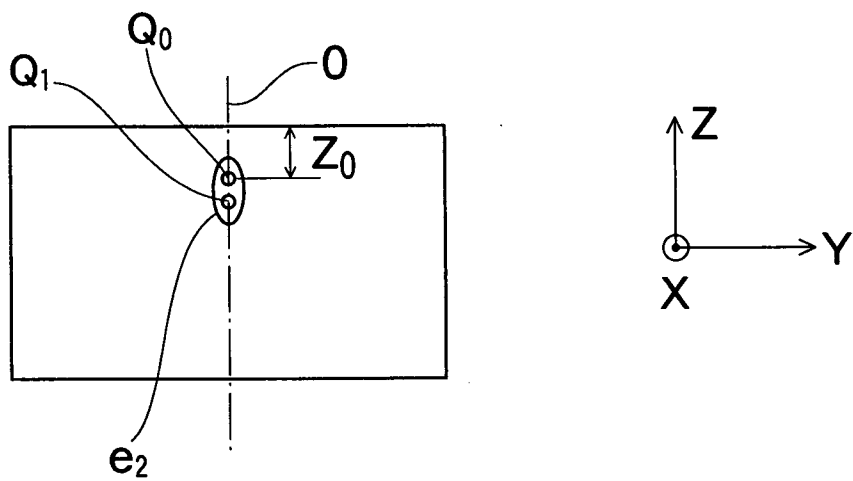


図18

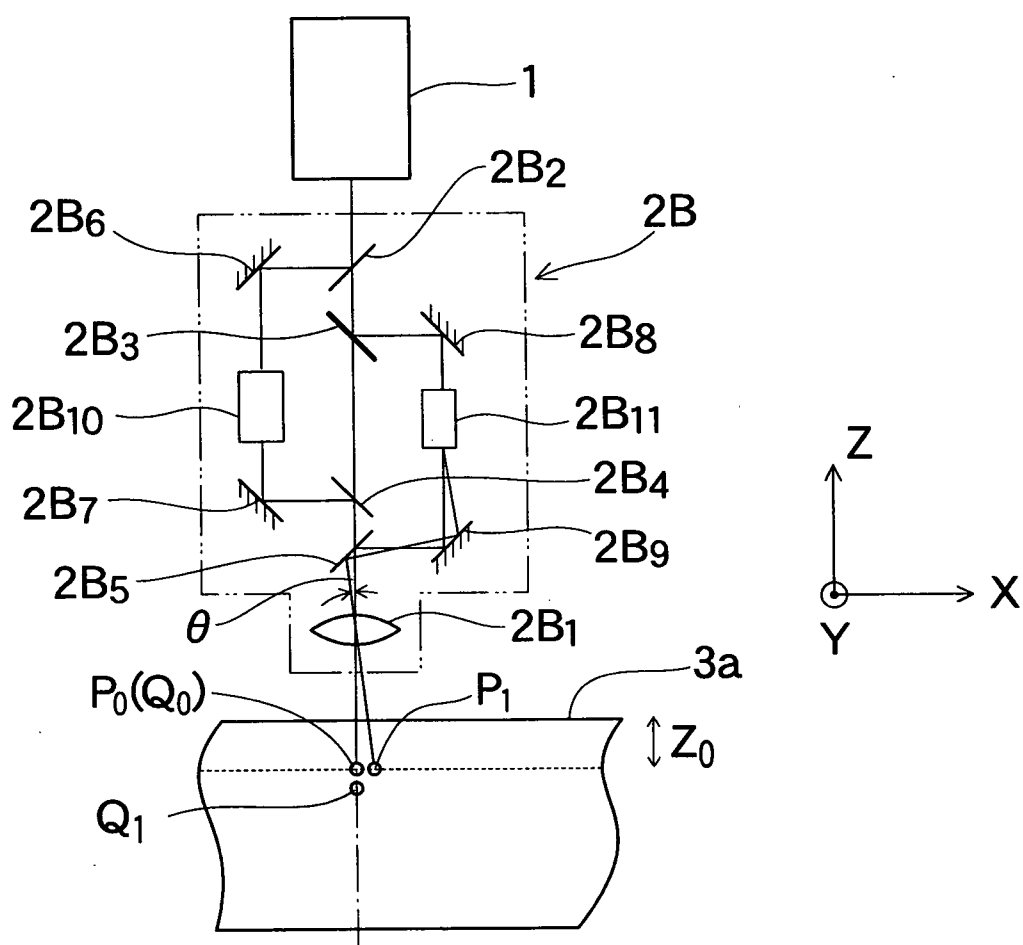


図19

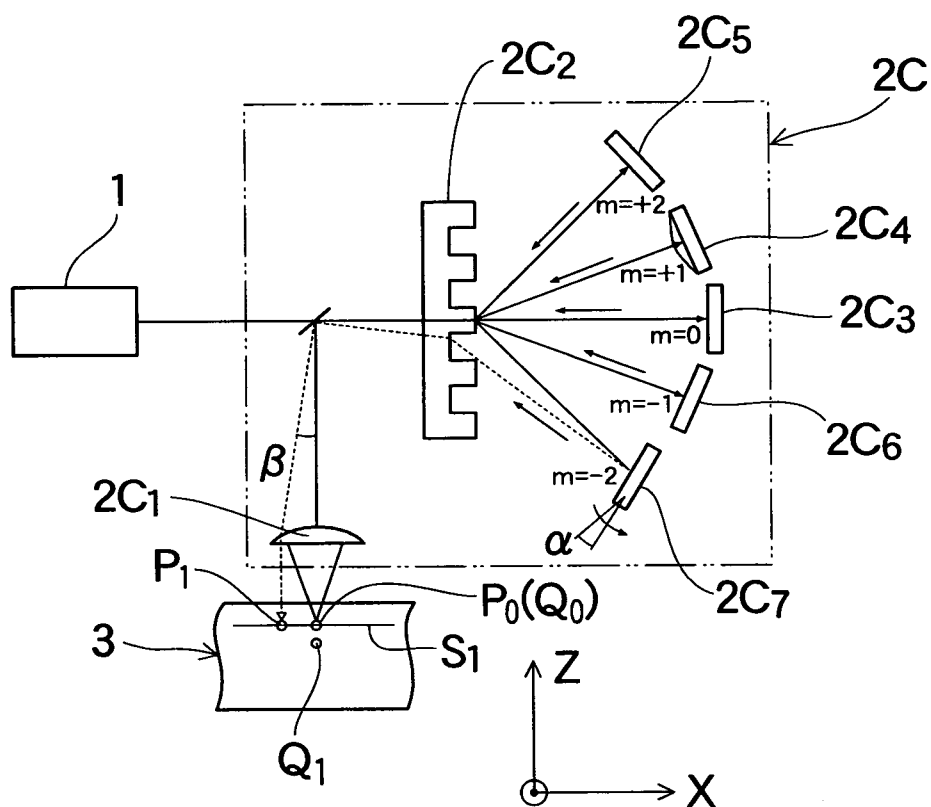


図20

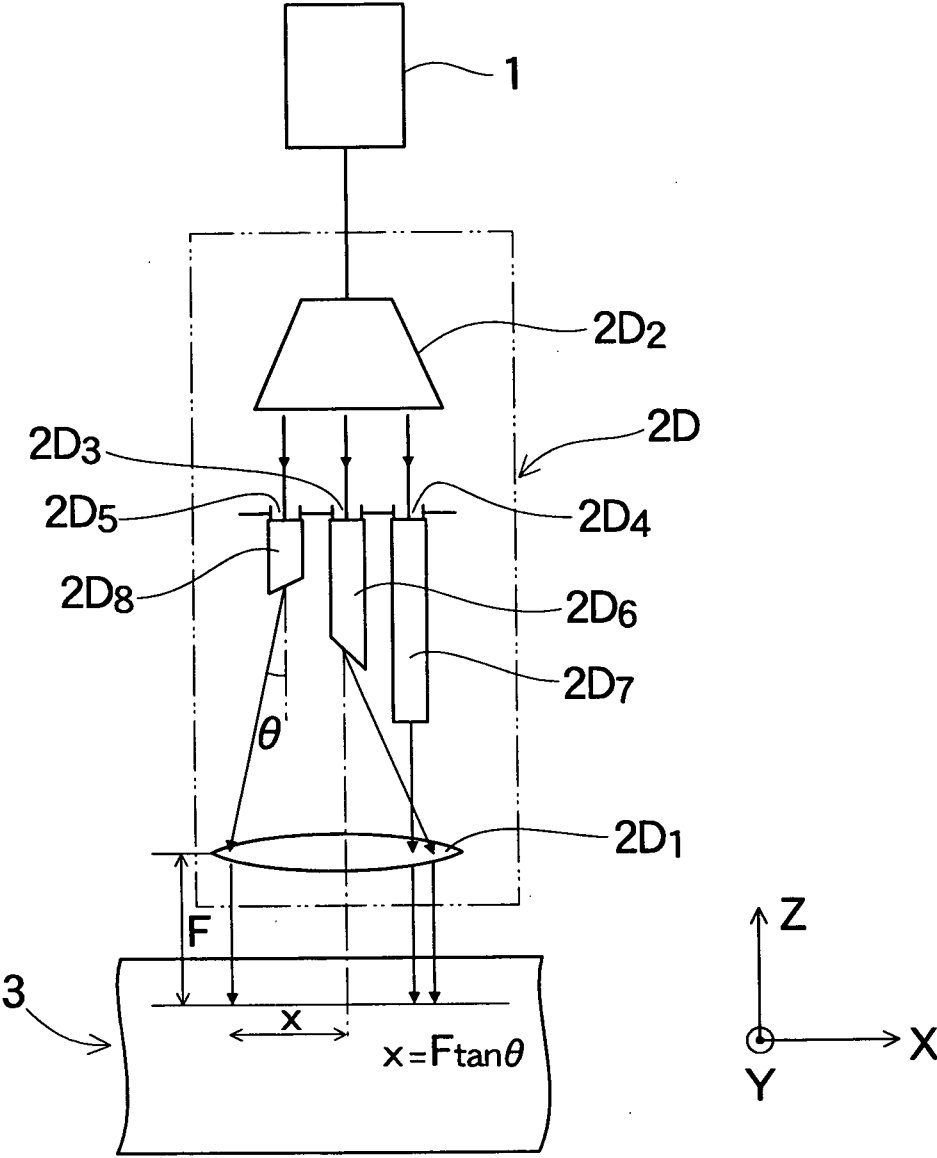


図21

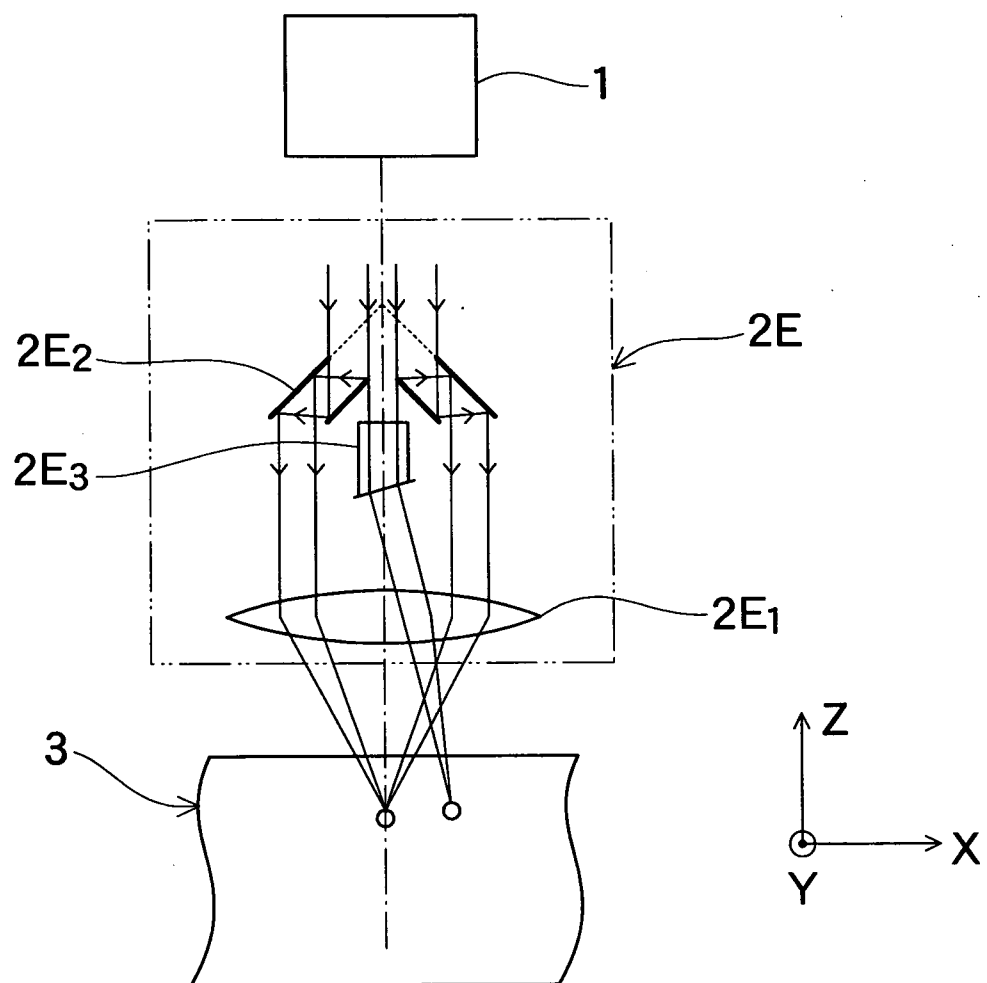
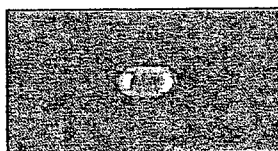
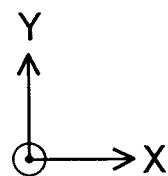


図22

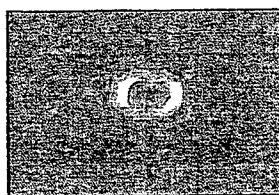
(a)



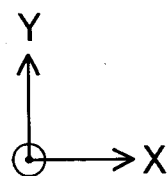
5 μ m



(b)



5 μ m



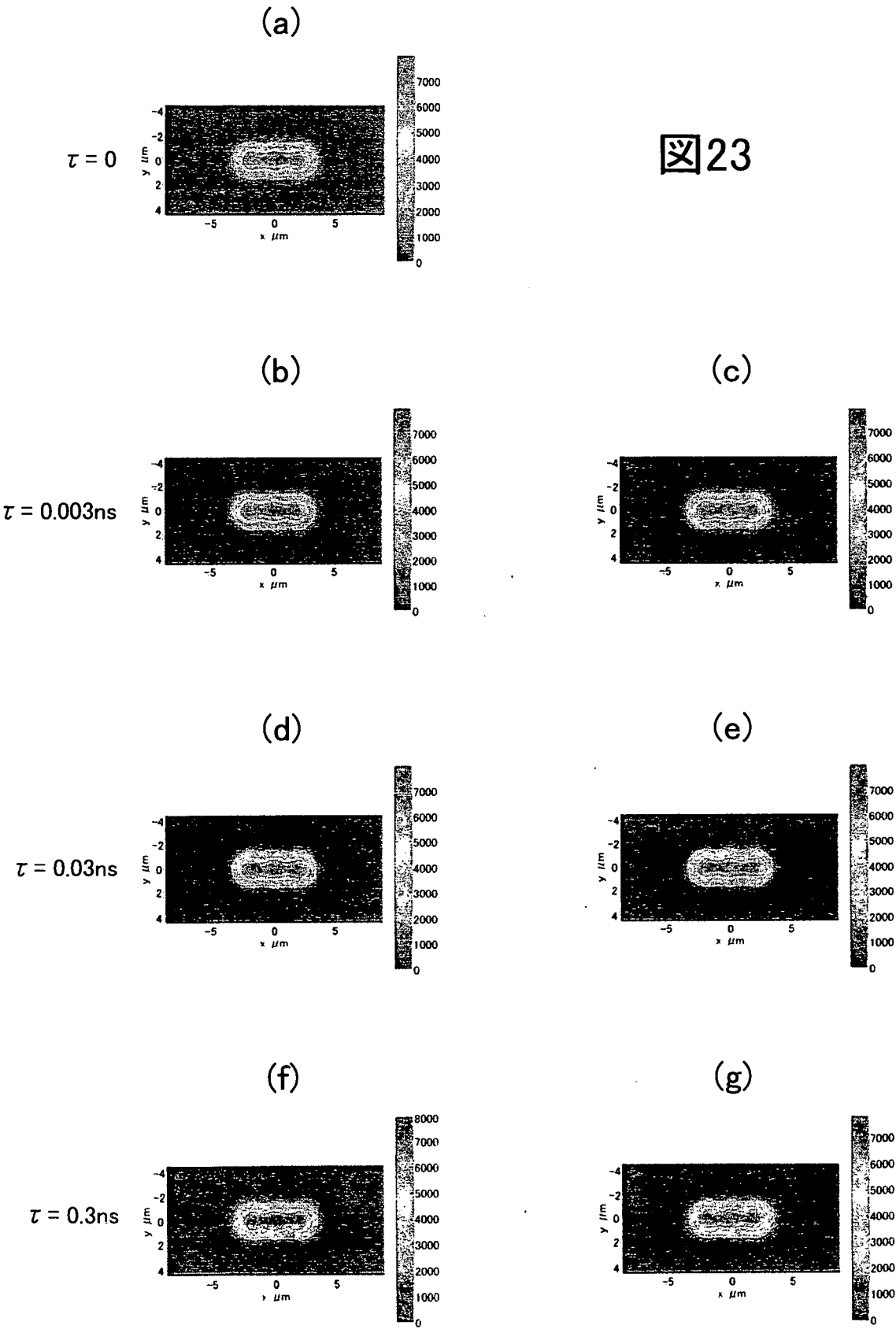


図24

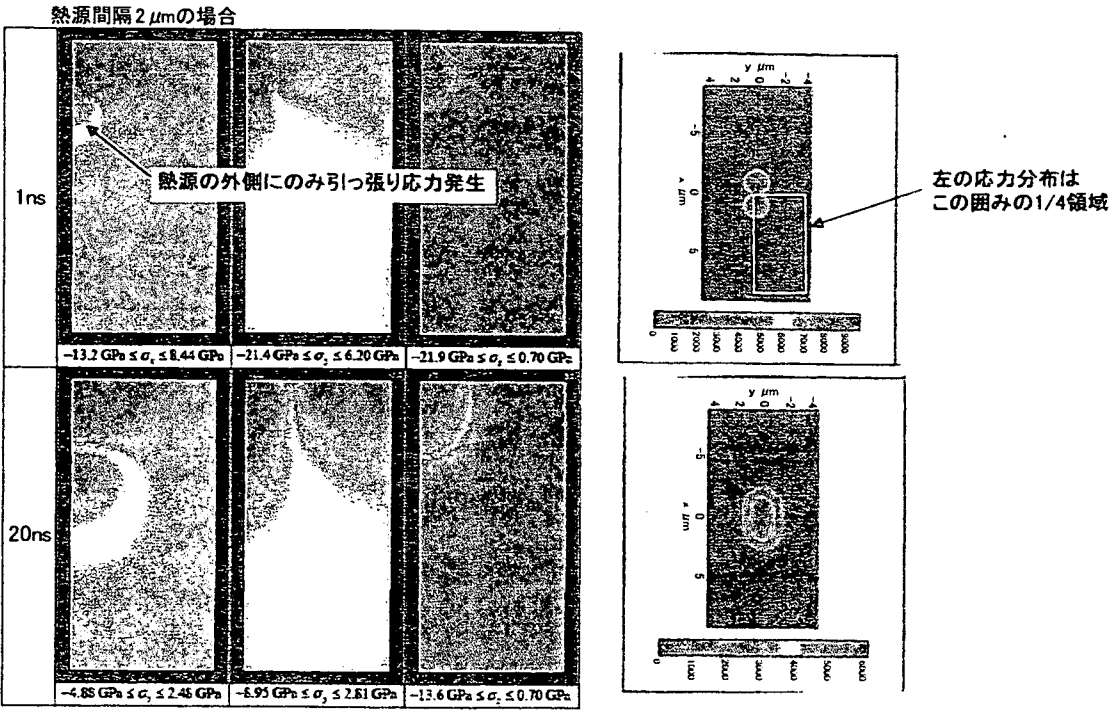


図25

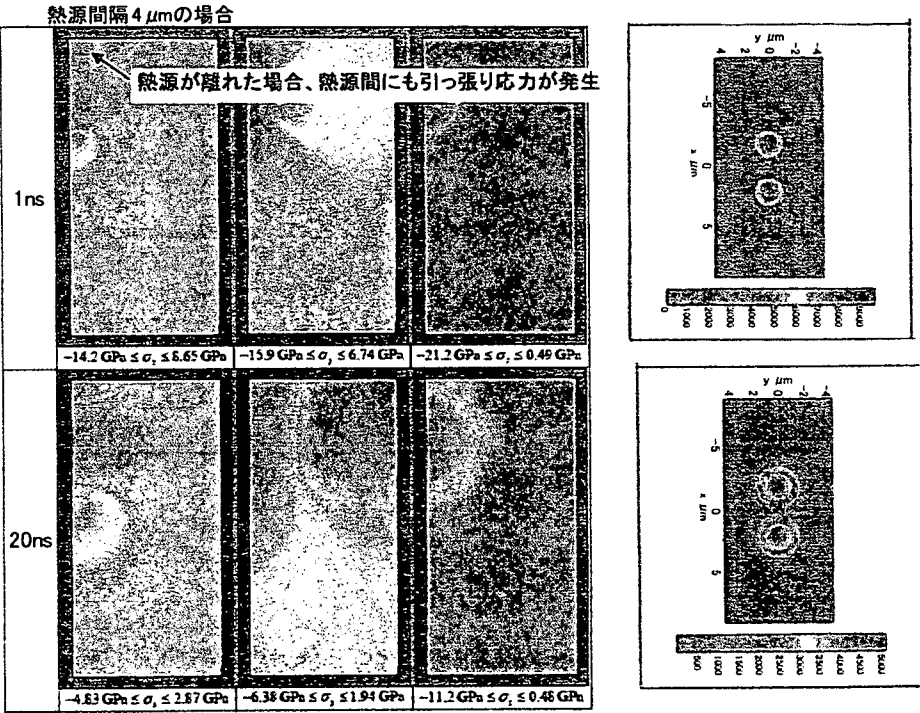


図26

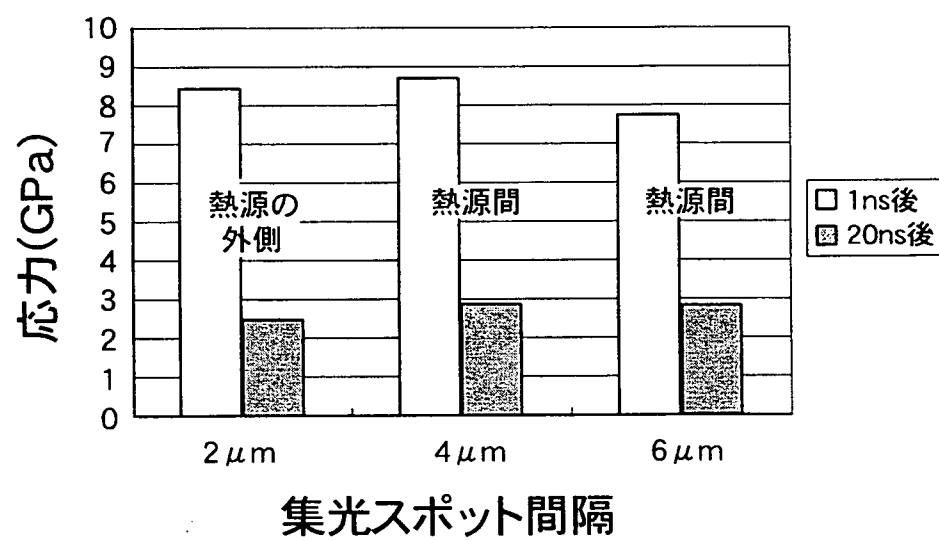


図27

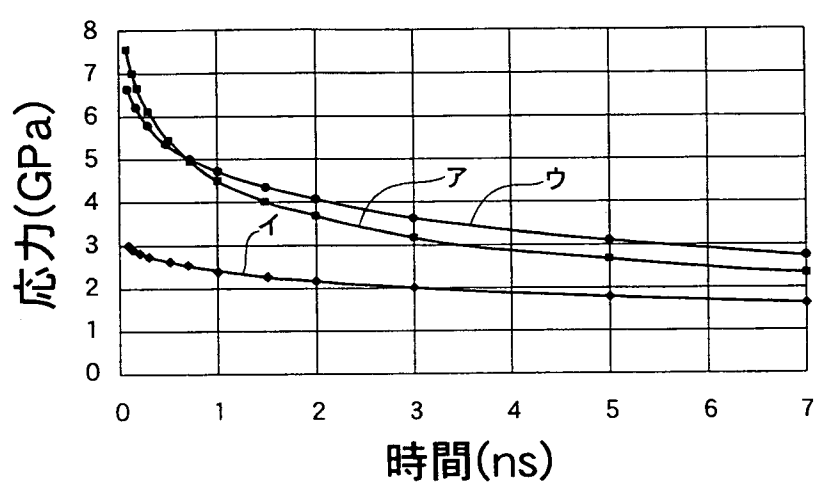


図28

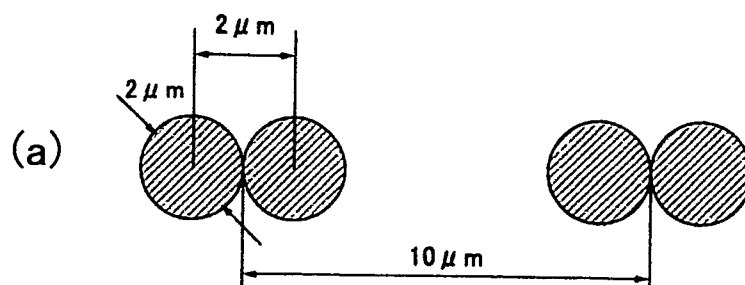
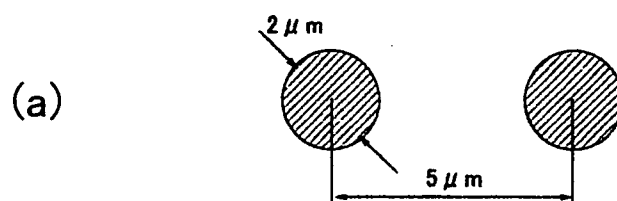


図29



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065448

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K26/38(2006.01)i, B23K26/04(2006.01)i, B23K26/067(2006.01)i, B23K26/40(2006.01)i, B28D5/00(2006.01)i, H01L21/301(2006.01)i, C03B33/09(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B23K26/38, B23K26/04, B23K26/067, B23K26/40, B28D5/00, H01L21/301, C03B33/09

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2010
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2010	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2010

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2004-111946 A (Tokyo Seimitsu Co., Ltd.), 08 April 2004 (08.04.2004), paragraphs [0041] to [0060]; all drawings (Family: none)	1-3, 10-12 13, 15 4-9, 14
X Y A	JP 2007-142000 A (Denso Corp.), 07 June 2007 (07.06.2007), paragraphs [0013] to [0014]; all drawings & US 2007/0202619 A1 & DE 102006053898 A & CN 1967783 A & KR 10-2007-0052227 A	2, 11 15 1, 3-10, 12-14
Y	JP 2009-125777 A (Hitachi Via Mechanics, Ltd.), 11 June 2009 (11.06.2009), paragraph [0034]; fig. 1 (Family: none)	13



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 December, 2010 (07.12.10)

Date of mailing of the international search report
21 December, 2010 (21.12.10)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065448

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2008-080346 A (Sony Corp.), 10 April 2008 (10.04.2008), paragraph [0017]; fig. 3 (Family: none)	13
Y	JP 2009-021597 A (Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.), 29 January 2009 (29.01.2009), paragraphs [0041] to [0047]; fig. 6 & US 2009/0016400 A1 & DE 102008031937 A & KR 10-0862481 B1	15
Y	JP 2006-187783 A (Disco Inc.), 20 July 2006 (20.07.2006), paragraphs [0024] to [0025]; fig. 6 to 7 & US 2006/0148210 A1 & DE 102006000720 A & CN 1799753 A	15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065448

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

See extra sheet.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/065448

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

The invention of claim 1 and the invention of claims 2-15 have a common technical feature in "a laser processing for focusing and irradiating a laser beam on a member to be cut, by moving the optical axis of a focusing lens relatively along a cut-planned line of the to-be-cut member, thereby to form a modification region as a cut-starting point, in said to-be-cut member along said cut-planned line, wherein a plurality of focal spots are simultaneously formed in said to-be-cut member".

In the light of the disclosed contents of document 1 or document 2, however, said technical feature cannot be accepted as any special technical feature, since it makes no contribution over the prior art.

Between those inventions, moreover, there is no other same or corresponding special technical feature.

And, the claims contain the two invention groups, as specified in the following.

- | | |
|---------------|--|
| (Invention 1) | Invention of claims 1, 3-10, 12 and 14 |
| (Invention 2) | Invention of claims 2, 11 and 13 |

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. B23K26/38(2006.01)i, B23K26/04(2006.01)i, B23K26/067(2006.01)i, B23K26/40(2006.01)i, B28D5/00(2006.01)i, H01L21/301(2006.01)i, C03B33/09(2006.01)n

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. B23K26/38, B23K26/04, B23K26/067, B23K26/40, B28D5/00, H01L21/301, C03B33/09

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 0 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 0 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 0 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2004-111946 A（株式会社東京精密）2004.04.08, 段落 【0041】－【0060】, 全図（ファミリーなし）	1－3, 10－12
Y		13, 15
A		4－9, 14

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 7 . 1 2 . 2 0 1 0

国際調査報告の発送日

2 1 . 1 2 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

青木 正博

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 6 4

3 P

3 9 3 5

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2007-142000 A (株式会社デンソー) 2007.06.07, 段落	2, 11
Y	【0013】－【0014】, 全図 & US 2007/0202619 A1	15
A	& DE 102006053898 A & CN 1967783 A & KR 10-2007-0052227 A	1, 3－10, 12－14
Y	JP 2009-125777 A (日立ビアメカニクス株式会社) 2009.06.11, 段落【0034】, 【図1】 (ファミリーなし)	13
Y	JP 2008-080346 A (ソニー株式会社) 2008.04.10, 段落【0017】, 【図3】 (ファミリーなし)	13
Y	JP 2009-021597 A (三星電機株式会社) 2009.01.29, 段落【0041】－【0047】, 【図6】 & US 2009/0016400 A1 & DE 102008031937 A & KR 10-0862481 B1	15
Y	JP 2006-187783 A (株式会社ディスコ) 2006.07.20, 段落【0024】－【0025】, 【図6】－【図7】 & US 2006/0148210 A1 & DE 102006000720 A & CN 1799753 A	15

第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（P C T 17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求項 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。
つまり、
2. ☐ 請求項 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求項 _____ は、従属請求の範囲であってP C T規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところこの国際調査機関は認めた。
特別ページ参照。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- ☐ 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。

請求項 1 に係る発明、請求項 2 - 1 5 に係る発明は、「集光レンズの光軸を被切断部材の切断予定ラインに沿って相対的に移動させてレーザ光を被切断部材に集光照射することにより、切断の起点となる改質領域を前記被切断部材の内部に前記切断予定ラインに沿うように形成するレーザ加工であって、前記皮下中断部材の内部に複数の集光スポットを同時に形成する」という共通の技術的特徴を有している。

しかしながら、当該技術的特徴は、文献 1 又は文献 2 の開示内容に照らして、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、当該技術的特徴は、特別な技術的特徴であるとはいえない。

また、これらの発明の間には、ほかに同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。そして、請求の範囲には以下に示す 2 の発明群が含まれる。

(発明 1) 請求項 1, 3 - 1 0, 1 2, 1 4 に係る発明

(発明 2) 請求項 2, 1 1, 1 3 に係る発明