

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6923284号
(P6923284)

(45) 発行日 令和3年8月18日 (2021.8.18)

(24) 登録日 令和3年8月2日 (2021.8.2)

(51) Int. Cl.	F I
C O 3 B 33/09 (2006.01)	C O 3 B 33/09
B 2 3 K 26/53 (2014.01)	B 2 3 K 26/53
B 2 3 K 26/064 (2014.01)	B 2 3 K 26/064 A
H O 1 S 3/00 (2006.01)	H O 1 S 3/00 B

請求項の数 13 (全 79 頁)

(21) 出願番号	特願2019-517001 (P2019-517001)	(73) 特許権者	397068274
(86) (22) 出願日	平成29年9月28日 (2017.9.28)		コーニング インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2019-532004 (P2019-532004A)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(43) 公表日	令和1年11月7日 (2019.11.7)		31 コーニング リヴァーフロント プ
(86) 国際出願番号	PCT/US2017/054168		ラザ 1
(87) 国際公開番号	W02018/064409	(74) 代理人	100073184
(87) 国際公開日	平成30年4月5日 (2018.4.5)		弁理士 柳田 征史
審査請求日	令和2年9月10日 (2020.9.10)	(74) 代理人	100123652
(31) 優先権主張番号	62/402,337		弁理士 坂野 博行
(32) 優先日	平成28年9月30日 (2016.9.30)	(74) 代理人	100175042
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		弁理士 高橋 秀明
早期審査対象出願		(72) 発明者	アカラブ, ラヴィンドラ クマール
			アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
			45 ホースヘッズ ハンターズ ラン
			15

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 非軸対称ビームスポットを用いて透明被加工物をレーザ加工するための装置及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

透明被加工物をレーザ加工するための方法であって、前記方法は：

前記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、前記輪郭線は、前記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップ

を含み、前記輪郭線を形成する前記ステップは：

ビーム経路に沿って z 方向に配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、前記ビーム経路から径方向にオフセットして位置決めされた非球面光学素子を通して前記透明被加工物内へと向けることにより、前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられた部分が、前記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、前記誘起吸収は、前記透明被加工物内に欠陥を生成し、また前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられた前記部分は：

波長 λ ；

前記ビームの強度が最大ビーム強度の $1/e^2$ まで低下する、前記ビーム経路からのいずれかの方向の最短径方向距離として定義される有効スポットサイズ $W_{0,e f f}$ ；並びに

断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, m i n}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, m i n}$ を含む、非軸対称ビーム断面を含む、ステップ

を含み、

$Z_{R x, m i n}$ 及び $Z_{R y, m i n}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0, eff}^2}{\lambda}$$

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数であり、前記非軸対称ビーム断面の形成及び最大スポットサイズの方法を所望の分割線に沿って配向することにより、前記欠陥を切断に沿った方向にする、方法。

【請求項 2】

前記透明被加工物及び前記パルスレーザビームを、前記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、前記透明被加工物内に前記輪郭線に沿った複数の前記欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 3】

前記非球面光学素子は、屈折アキシコン、反射アキシコン、ワキシコン、ネガティブアキシコン、空間光変調器、回折光学系、又は立方体状の光学素子を備える、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記無次元発散係数 F_D は、5.0 ~ 1500 の値を有する、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 5】

前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられる前記部分の前記非軸対称ビーム断面は、スポットサイズパラメータ $w_{0, m a x}$ を有する長軸と、スポットサイズパラメータ $w_{0, m i n}$ を有する短軸とを備え、

20

$w_{0, m a x}$ は $w_{0, m i n}$ より長く、 $w_{0, m i n}$ に対する $w_{0, m a x}$ のアスペクト比は 1.3 より大きい、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

透明被加工物をレーザ加工するための方法であって、前記方法は：

前記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、前記輪郭線は、前記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップ

を含み、前記輪郭線を形成する前記ステップは：

ビーム経路に沿って z 方向に配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通して、かつ光学遮断素子を越えて（ここで前記非球面光学素子及び前記光学遮断素子はそれぞれ、前記ビーム源と前記透明被加工物との間に位置決めされる）、前記透明被加工物内へと向けることにより、前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられた部分が、前記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、前記誘起吸収は、前記透明被加工物内に欠陥を生成し、また前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられた前記部分は：

30

波長；

前記ビームの強度が最大ビーム強度の $1/e^2$ まで低下する、前記ビーム経路からのいずれかの方向の最短径方向距離として定義される有効スポットサイズ $w_{0, e f f}$ ；並びに

40

断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, m i n}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, m i n}$ を含む非軸対称ビーム断面

を含む、ステップ

を含み、

$Z_{R x, m i n}$ 及び $Z_{R y, m i n}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0, eff}^2}{\lambda}$$

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数であり、前記非軸対称ビーム断面の形成及び最大スポットサイズの方法を所望の分割線に沿って配向することによ

50

り、前記欠陥を切断に沿った方向にする、方法。

【請求項 7】

前記方法は、前記透明被加工物及び前記パルスレーザビームを、前記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、前記透明被加工物内に前記輪郭線に沿った複数の前記欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

前記無次元発散係数 F_D は、5.0 ~ 1500 の値を有する、請求項 6 又は 7 に記載の方法。

【請求項 9】

透明被加工物をレーザ加工するための方法は、前記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、前記輪郭線は、前記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップを含み、前記輪郭線を形成する前記ステップは：

ビーム経路に沿って z 方向に配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通して向けるステップ；

前記ビーム源と前記透明被加工物との間に位置決めされたデコヒーレント化用光学素子を用いて、前記パルスレーザビームの第 1 のビーム部分を前記パルスレーザビームの第 2 のビーム部分からデコヒーレント化させるステップ；並びに

前記パルスレーザビームの前記第 1 のビーム部分及び前記第 2 のビーム部分を前記透明被加工物内へと向けることにより、前記パルスレーザビームの、前記透明被加工物内へと向けられた前記第 1 のビーム部分及び前記第 2 のビーム部分が、前記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、前記誘起吸収は、前記透明被加工物内に欠陥を生成し、また前記透明被加工物内へと向けられた前記第 1 のビーム部分及び前記第 2 のビーム部分の組み合わせは：

波長；

前記ビームの強度が最大ビーム強度の $1/e^2$ まで低下する、前記ビーム経路からのいずれかの方向の最短径方向距離として定義される有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ ；並びに

断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R,x,min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R,y,min}$ を含む非軸対称ビーム断面

を含む、ステップ

を含み、ここで $Z_{R,x,min}$ 及び $Z_{R,y,min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数であり、前記非軸対称ビーム断面の形成及び最大スポットサイズの方向を所望の分割線に沿って配向することにより、前記欠陥を切断に沿った方向にする方法。

【請求項 10】

前記透明被加工物及び前記パルスレーザビームを、前記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、前記透明被加工物内に前記輪郭線に沿った複数の前記欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記無次元発散係数 F_D は、1.0 ~ 2000 の値を有する、請求項 9 又は 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記デコヒーレント化用光学素子は光遅延プレートを備え、

前記第 1 のビーム部分を前記第 2 のビーム部分からデコヒーレント化する前記ステップは、前記パルスレーザビームの前記第 1 のビーム部分を、前記光遅延プレートを通して向けることにより、前記第 2 のビーム部分に対する前記第 1 のビーム部分の光位相差を誘発するステップを含む、請求項 9 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 13】

前記第1のビーム部分を前記第2のビーム部分からデコヒーレント化する前記ステップは：

前記パルスレーザビームの前記第1のビーム部分が前記透明被加工物において第1の偏光を備えるように、前記パルスレーザビームの前記第1のビーム部分を偏光させるステップ；及び

前記パルスレーザビームの前記第2のビーム部分が前記透明被加工物において第2の偏光を備えるように、前記パルスレーザビームの前記第2のビーム部分を偏光させるステップであって、前記第1の偏光は前記第2の偏光に対して垂直である、ステップを含む、請求項9～11のいずれか1項に記載の方法。

10

【発明の詳細な説明】**【優先権】****【0001】**

本出願は、米国特許法第119条の下で、2016年9月30日出願の米国仮特許出願第62/402,337号の優先権の利益を主張するものであり、上記仮特許出願の内容は信頼できるものであり、その全体が参照により本出願に援用される。

【技術分野】**【0002】**

本明細書は一般に、透明被加工物をレーザ加工するための装置及び方法に関し、より詳細には、透明被加工物を分割するために透明被加工物内に輪郭線を形成することに関する。

20

【背景技術】**【0003】**

材料のレーザ加工の領域は、様々なタイプの材料の切断、穿孔、フライス加工、溶接、溶融等を伴う広範な用途を包含する。これらのプロセスのうち特に関心の対象となるのは、薄膜トランジスタ(TFT)用のガラス、サファイア若しくは溶融シリカ、又は電子デバイス用のディスプレイ材料といった材料の製造において利用され得るプロセスにおける、様々なタイプの透明基板の切断又は分割である。

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】**

30

【0004】

プロセス開発及びコストの観点から、ガラス基板の切断及び分割を改善する多くの機会が存在する。現在市場において実施されているものよりも迅速であり、清潔であり、安価であり、再現性が高く、信頼性が高い、ガラス基板の分割方法を得ることが、大きな関心を集めている。従って、ガラス基板を分割するための代替的な改良された方法に対して需要が存在する。

【課題を解決するための手段】**【0005】**

一実施形態によると、透明被加工物をレーザ加工するための方法は、上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップを含み、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む。上記輪郭線を形成する上記ステップは、ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、上記ビーム経路から径方向にオフセットして位置決めされた非球面光学素子を通して上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップを含む。上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記部分は、波長、有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ 、及び非軸対称ビーム断面を含み、上記非軸対称ビーム断面は、断面x方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面y方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含む。更に、 $Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

40

50

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【 0 0 0 6 】

より大きく、ここで F_D は 1 0 以上の値を有する無次元発散係数である。

【 0 0 0 7 】

別の実施形態では、透明被加工物をレーザ加工するための方法は、上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップを含み、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む。上記輪郭線を形成する上記ステップは、ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通して、かつ光学遮断素子を越えて（ここで上記非球面光学素子及び上記光学遮断素子はそれぞれ、上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされる）、上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップを含む。上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記部分は、波長、有効スポットサイズ $w_{0,eff}$ 、及び非軸対称断面を含み、上記非軸対称断面は、断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含む。更に、 $Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

10

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

20

【 0 0 0 8 】

より大きく、ここで F_D は 1 0 以上の値を有する無次元発散係数である。

【 0 0 0 9 】

別の実施形態では、透明被加工物をレーザ加工するための方法は、上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップを含み、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む。上記輪郭線を形成する上記ステップは：ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通るように向けるステップ；上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされたデコヒーレント化用光学素子を用いて、上記パルスレーザビームの第 1 のビーム部分を上記パルスレーザビームの第 2 のビーム部分からデコヒーレント化させるステップ；並びに上記パルスレーザビームの上記第 1 のビーム部分及び上記第 2 のビーム部分を上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記第 1 のビーム部分及び上記第 2 のビーム部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップを含む。上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記透明被加工物内へと向けられた上記第 1 のビーム部分及び上記第 2 のビーム部分の組み合わせは、波長、有効スポットサイズ $w_{0,eff}$ 、及び非軸対称断面を含み、上記非軸対称断面は、断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含み、ここで $Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

30

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

40

【 0 0 1 0 】

より大きく、ここで F_D は 1 0 以上の値を有する無次元発散係数である。

【 0 0 1 1 】

更に別の実施形態では、加工方法は、パルスレーザビームを透明被加工物内に局在化させるステップを含み、上記パルスレーザビームは z 方向に伝播し、また：(i) 波長；(i i) 有効スポットサイズ $w_{0,eff}$ ；(i i i) 上記透明被加工物の損傷閾値を超えるために十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間；(i v) 第 1 の部分及び第 2 の部分（上記第 1 の部分は上記第 2 の部分に対して非コヒーレント状態である）；並びに (v

50

) x方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, \min}$ 及び y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, \min}$ を有する非軸対称ビーム断面を含む。更に、 $Z_{R x, \min}$ 及び $Z_{R y, \min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【0012】

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数である。

【0013】

本開示はまた、以下の項を含む：

10

1. ガラス基板等の透明被加工物をレーザ加工する方法であって、上記方法は：

透明被加工物を提供するステップ；

レーザビームを上記被加工物に向けることによって、上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、上記輪郭線に沿って上記透明被加工物は分割可能である、ステップ

を含み、

上記レーザビームは、レーザビーム源によって放出されるパルスレーザビームであり、上記パルスレーザビームは上記透明被加工物内に局在化され、上記パルスレーザビームはビーム経路に沿って z 方向に伝播し、

上記パルスレーザビームは：

20

波長；

非軸対称ビーム断面；

最大ビーム強度；

有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ (上記有効スポットサイズは、ビーム強度が上記最大ビーム強度の $1/e^2$ まで低下する、上記ビーム伝播経路 z からいずれの方向の最短径方向距離として定義される)；

上記透明被加工物の損傷閾値を超えることによって、上記透明被加工物内に上記輪郭線を形成する(ここで上記輪郭線は上記透明被加工物内の欠陥を含む)ために、十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間

を有し、

30

上記非軸対称ビーム断面は、x方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, \min}$ 及び y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, \min}$ を有し、

$Z_{R x, \min}$ 及び $Z_{R y, \min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【0014】

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数であり、上記 x 及び y 方向の上記最小レイリー範囲のうちの小さい方は、上記ビームの光学強度が上記最大ビーム強度の $1/2$ まで減少する、上記ビーム経路に沿った距離である、方法。

40

【0015】

2. 上記レーザビームは、上記透明被加工物の損傷閾値を超えることによって上記輪郭線を形成する(ここで上記輪郭線は上記透明被加工物内の欠陥を含む)ために、十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間を有し、上記輪郭線は上記透明被加工物内の欠陥を含み、

好ましくは、上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記透明被加工物内に、上記輪郭線に沿った複数の欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、項 1 に記載の方法。

【0016】

3. 上記非軸対称ビーム断面は、最大スポットサイズパラメータ $W_{0,max}$ 、最小ス

50

ポットサイズパラメータ $W_{o, \min}$ 、及びアスペクト比

$$\frac{W_{o, \max}}{W_{o, \min}}$$

【0017】

を有し、

上記アスペクト比は1.1、1.3若しくは2.0より大きいか、又は1.2～15.0であるか、又は1.5～3.0である、項1又は2に記載の加工方法。

【0018】

4. 上記レーザビームは第1の部分及び第2の部分を含み、上記第1の部分は上記第2の部分に対して非コヒーレント状態である、項1～3のいずれか1項に記載の方法。

【0019】

5. 上記レーザビームは、非球面光学素子を通るように向けられ、これにより、上記レーザビームが上記透明被加工物内で誘起吸収を生成し、

好ましくは、上記非球面光学素子は、上記ビーム経路から径方向にオフセットして位置決めされる、項1～4のいずれか1項に記載の方法。

【0020】

6. 上記非球面光学素子は上記ビーム経路から径方向に、あるオフセット距離だけオフセットされ、

上記オフセット距離は、上記パルスレーザビームと上記非球面光学素子との間の接触位置における上記パルスレーザビームの断面直径の約10%～約75%の距離である、項5に記載の方法。

【0021】

7. 上記無次元発散係数 F_D は約10～約2000の値を備え、好ましくは上記無次元発散係数 F_D は約50～約1500の値を備え、より好ましくは上記無次元発散係数 F_D は約100～約1000の値を備える、項1～6のいずれか1項に記載の方法。

【0022】

8. 上記欠陥は、中央欠陥領域と、上記透明被加工物内に向けられた上記パルスレーザビームの上記非軸対称ビーム断面の上記長軸に沿って上記中央欠陥領域から外向きに延在する少なくとも1つの径方向アームとを含む、項1～7のいずれか1項に記載の方法。

【0023】

9. 上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされたデコヒーレント化用光学素子を用いて、上記レーザビームの第1のビーム部分を上記レーザビームの第2のビーム部分からデコヒーレント化するステップを更に含み、

好ましくは、上記デコヒーレント化用光学素子は、上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間、又は上記ビーム源と上記非球面光学素子との間に位置決めされる、項1～8のいずれか1項に記載の方法。

【0024】

10. 上記デコヒーレント化用光学素子は光遅延プレートを備え、

上記第1のビーム部分を上記第2のビーム部分からデコヒーレント化する上記ステップは、上記パルスレーザビームの上記第1のビーム部分を、上記光遅延プレートを通るように向けることにより、上記第2のビーム部分に対する上記第1のビーム部分の位相差を誘発するステップを含む、項9に記載の方法。

【0025】

11. 上記第1のビーム部分を上記第2のビーム部分からデコヒーレント化する上記ステップは：

上記パルスレーザビームの第1のビーム部分が上記透明被加工物において第1の偏光を有するように、上記パルスレーザビームの第1のビーム部分を偏光させるステップ；及び

上記パルスレーザビームの第2のビーム部分が上記透明被加工物において第2の偏光を

10

20

30

40

50

有するように、上記パルスレーザービームの第2のビーム部分を偏光させるステップを含み、

上記第1の偏光は上記第2の偏光に対して垂直である、項10に記載の方法。

【0026】

12. 項1～11のいずれか1項に記載の方法を実施するためのシステムであって、上記システムは：

パルスレーザービームを供給するためのレーザービーム源；

上記源から供給された上記レーザービームを、非軸対称断面を有するレーザービームに変換するための手段

を備え、

10

上記非軸対称レーザービームは：

波長；

最大ビーム強度；

有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ （上記有効スポットサイズは、ビーム強度が上記最大ビーム強度の $1/e^2$ まで低下する、ビーム伝播経路 z からいずれの方向の最短径方向距離として定義される）；

透明被加工物の損傷閾値を超えることによって、上記透明被加工物内に上記輪郭線を形成する（ここで上記輪郭線は上記透明被加工物内の欠陥を含む）ために、十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間

を有し、

20

上記非軸対称ビーム断面は、 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を有し、

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【0027】

より大きく、ここで F_D は10以上の値を有する無次元発散係数であり、上記 x 及び y 方向の上記最小レイリー範囲のうちの小さい方は、上記ビームの光学強度が上記最大ビーム強度の $1/2$ まで減少する、上記ビーム経路に沿った距離である、システム。

30

【0028】

13. 上記レーザービームを準非回折レーザービームに変換するための手段を更に備える、項12に記載のシステム。

【0029】

14. 上記源から供給された上記レーザービームを、非軸対称断面を有するレーザービームに変換するための上記手段、及び上記レーザービームを準非回折レーザービームに変換するための上記手段は、上記ビーム伝播経路及びビームデコヒーレント化用素子に対してオフセットされた、好ましくはアキシコンレンズである非球面素子を含む、項13に記載のシステム。

【0030】

40

15. 上記レーザービーム源、

上記レーザービームを円偏光するための第1の $1/4$ 波長板；

アキシコンレンズ；

コリメートレンズ；

上記レーザービームの2つのセクションの、偏光ベースのデコヒーレンスを生成するための、第2の、好ましくは回転可能な分割 $1/4$ 波長板；及び

上記レーザービームを上記透明被加工物上に集束させるための集束レンズを備える、項14に記載のシステム。

【0031】

本明細書に記載のプロセス及びシステムの追加の特徴及び利点を、以下の「発明を実施

50

するための形態」に記載するが、その一部は、「発明を実施するための形態」から、又は以下の「発明を実施するための形態」、特許請求の範囲及び添付の図面を含む本出願に記載の実施形態を实践することによって、当業者には容易に明らかになるだろう。

【0032】

上述の「発明の概要」及び以下の「発明を実施するための形態」の両方は、様々な実施形態を説明するものであり、請求対象の主題の性質及び特徴を理解するための概観又は枠組みを提供することを意図したものであることを理解されたい。添付の図面は、これらの様々な実施形態の更なる理解を提供するために含まれており、また本明細書に組み込まれて本明細書のいち部を構成する。これらの図面は、本明細書に記載の上記様々な実施形態を図示し、本記載と併せて、請求対象の主題の原理及び動作を説明する役割を果たす。

10

【0033】

図面に記載の実施形態は説明的及び例示的な性質のものであり、特許請求の範囲によって定義される主題を限定することを意図したものではない。これらの説明的な実施形態に関する以下の「発明を実施するための形態」は、以下の図面と併せて読んだ場合に理解できるものであり、これらの図面では、同様の構造は同様の参照番号で示される。

【図面の簡単な説明】

【0034】

【図1A】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による欠陥の輪郭線の形成の概略図

【図1B】透明被加工物、本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、透明被加工物の加工中の例示的なパルスレーザビーム焦線の概略図

20

【図2】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、透明被加工物内に輪郭線を形成するための所望の分割線を通過する非軸対称ビームスポットの概略図

【図3】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、パルスレーザ加工のための光学アセンブリの従来の実施形態の概略図

【図4】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、オフセット非球面光学素子を備える、パルスレーザ加工のための光学アセンブリのある実施形態の概略図

【図5A】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、光学遮断素子を備える、パルスレーザ加工のための光学アセンブリのある実施形態の概略図

【図5B】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、2つの光学遮断素子を備える、パルスレーザ加工のための光学アセンブリのある実施形態の概略図

30

【図6】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、光遅延プレートを備える、パルスレーザ加工のための光学アセンブリのある実施形態の概略図

【図7A】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、分割1/4波長板を備える、パルスレーザ加工のための光学アセンブリのある実施形態の概略図

【図7B】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、図7Aの分割1/4波長板の概略図

【図7C】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、時間に対するある例示的なパルスバースト内のレーザパルスの相対強度のグラフ

【図7D】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、別の例示的なパルスバースト内の、時間に対するレーザパルスの相対強度のグラフ

40

【図8A】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図8B】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による、例示的なパルスレーザビームのフーリエ変換面の対数強度プロット

【図8C】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの近接場顕微鏡写真

【図9】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図10】本明細書に記載の1つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

50

【図 1 1 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの 2 次元断面強度プロット

【図 1 1 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 1 1 A の 2 次元断面強度プロットの 1 次元水平線断面及び 1 次元垂線断面のセット

【図 1 1 C】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 1 1 A の 2 次元断面強度プロットの 1 次元水平線断面及び 1 次元垂線断面の別のセット

【図 1 1 D】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームのフーリエ変換面の対数強度プロット

【図 1 1 E】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの近接場顕微鏡写真

10

【図 1 2 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 2 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 2 C】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 2 D】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 1 2 A ~ 1 2 C の強度プロットの 1 次元断面のグラフ

【図 1 2 E】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、例示的な S g n ステップ関数のフーリエ変換のグラフ

20

【図 1 2 F】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 2 G】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 1 2 F の 2 次元断面強度プロットの 1 次元 X 断面及び 1 次元 Y 断面のグラフ

【図 1 2 H】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 2 I】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 1 2 H の 2 次元断面強度プロットの 1 次元 X 断面及び 1 次元 Y 断面のグラフ

【図 1 3 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

30

【図 1 3 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 C】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 D】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 E】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 F】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

40

【図 1 3 G】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 H】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 I】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 J】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 3 K】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

50

【図 1 4】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの近接場顕微鏡写真

【図 1 5】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの近接場顕微鏡写真

【図 1 6】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、例示的な光学アセンブリ内に位置決めされた光学遮断素子によって形成された、結果として得られる例示的な非軸対称ビームスポット

【図 1 7 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 7 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット 10

【図 1 7 C】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 7 D】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 7 E】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 7 F】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 1 8】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、例示的な光学アセンブリ内に位置決めされた 2 つの光学遮断素子によって形成された、結果として得られる例示的な非軸対称ビームスポット 20

【図 1 9 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面画像

【図 1 9 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 2 0 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 2 0 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 2 0 A の 2 次元断面強度プロットの 1 次元 X 断面及び 1 次元 Y 断面のグラフ 30

【図 2 1 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 2 1 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 2 1 A の 2 次元断面強度プロットの 1 次元 X 断面及び 1 次元 Y 断面のグラフ

【図 2 2 A】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による例示的なパルスレーザビームの断面強度プロット

【図 2 2 B】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、図 2 2 A の 2 次元断面強度プロットの 1 次元 X 断面及び 1 次元 Y 断面のグラフ

【図 2 3】本明細書に記載の 1 つ以上の実施形態による、例示的な光学アセンブリ内に位置決めされた分割 1 / 4 波長板によって形成された、結果として得られる例示的な非軸対称ビームスポット 40

【図 2 4】非軸対称ビームに関するレイリー範囲

【図 2 5】非対称準非回折ビームを生成するための光学系

【図 2 6】非対称準非回折ビームを生成するための光学系

【図 2 7】分割 1 / 4 波長板 (S Q W P)

【図 2 8】ビームをデコヒーレント化するための偏光方法を用いた非対称 Q N D B の生成の概略図

【図 2 9】微小穿孔及び割れ制御の例示的な画像

【図 3 0】4 つの異なる S Q W P 回転角度において作製された微小穿孔による星型パターン 50

【発明を実施するための形態】

【0035】

これより、ガラス被加工物等の透明被加工物をレーザ加工するためのプロセスの実施形態について詳細に言及する。上記透明被加工物の例は添付の図面に図示されている。可能な限り、図面全体を通して、同一又は同様の部分を指すために同一の参照番号を使用する。本明細書に記載の1つ以上の実施形態によると、透明被加工物をレーザ加工することによって、上記透明被加工物内に輪郭線を形成でき、上記輪郭線は、上記透明被加工物の、2つ以上の部分への意図した分割線を画定する、一連の欠陥を含む。一実施形態によると、長軸及び短軸を有するビーム断面を有する非軸対称に延在する焦線を上記透明被加工物上に投射するパルスレーザビームを利用して、上記透明被加工物内に一連の欠陥を生成することにより、上記輪郭線を画定してよい。これらの欠陥は、本明細書中の様々な実施形態において、上記被加工物内の線状欠陥、穿孔又は微小穿孔と呼ばれる場合がある。更にこれらの欠陥は、中央欠陥領域と、上記非軸対称ビームスポットの上記長軸に沿って主に形成される径方向アームとを含んでよい。いくつかの実施形態では、上記プロセスは更に、例えば上記透明被加工物の上記輪郭線に隣接する領域を加熱するよう、又は上記透明被加工物に曲げ、罫書き若しくはその他の機械的応力を印加するよう構成された、赤外線レーザ又は他のレーザを用いて、上記透明被加工物を上記輪郭線に沿って分割するステップを含んでよい。他の実施形態では、上記透明被加工物に機械的応力を印加することによって分割を引き起こすことができ、又は分割は自発的に発生し得る。理論によって制限されることを望むものではないが、上記輪郭線において上記透明被加工物に応力を印加すると、上記輪郭線に沿って割れを伝播させることができる。上記輪郭線に沿った各上記欠陥の上記径方向アームの方向を制御することによって、割れの伝播をより良好に制御できる。透明被加工物を加工するための方法及び装置の様々な実施形態を、添付の図面を具体的に参照して本明細書において説明する。

【0036】

本明細書中で使用される場合、句「透明被加工物 (transparent work piece)」は、透明なガラス又はガラスセラミックから形成された被加工物を意味し、本明細書中で使用される場合、用語「透明 (transparent)」は、材料が、指定されたパルスレーザ波長に関して材料深さ1mmあたり約20%未満の光吸収率、例えば材料深さ1mmあたり約10%未満の光吸収率、又は例えば指定されたパルスレーザ波長に関して材料深さ1mmあたり約1%未満の光吸収率を有することを意味する。1つ以上の実施形態によると、透明被加工物の厚さは約50マイクロメートル～約10mm (例えば約100マイクロメートル～約5mm、又は約0.5mm～約3mm) であってよい。

【0037】

1つ以上の実施形態によると、本開示は被加工物を加工するための方法を提供する。本明細書中で使用される場合、「レーザ加工 (laser processing)」は、被加工物内に輪郭線を形成するステップ、被加工物を分割するステップ、又はこれらの組み合わせを含んでよい。透明被加工物は、ボロシリケートガラス、ソーダライムガラス、アルミノシリケートガラス、アルカリアルミノシリケートガラス、アルカリ土類アルミノシリケートガラス、アルカリ土類ボロアルミノシリケートガラス、溶融シリカ、又はサファイア、ケイ素、ガリウムヒ素若しくはこれらの組み合わせといった結晶質材料等の、ガラス組成物から形成された、ガラス被加工物を含んでよい。いくつかの実施形態では、ガラスをイオン交換してよく、これによりガラス組成物は、上記透明被加工物のレーザ加工前又は後に、機械的強化のためのイオン交換を受けることができる。例えば上記透明被加工物は、イオン交換済み及びイオン交換性ガラス、例えばCorning Incorporated (ニューヨーク州コーニング) から入手可能なCorning Gorilla (登録商標) ガラス (例えばコード2318、コード2319及びコード2320) を含んでよい。更にこれらのイオン交換済みガラスは、約6ppm/ ～約10ppm/ の熱膨張係数 (CTE) を有してよい。いくつかの実施形態では、上記透明被加工物の

ガラス組成物は、約 1 . 0 モル % 超のホウ素、及び / 又は限定するものではないが B_2O_3 を含むホウ素含有化合物を含んでよい。別の実施形態では、上記透明被加工物を形成するガラス組成物は、約 1 . 0 モル % 以下の、ホウ素及び / 又はホウ素含有化合物の酸化物を含む。更に上記透明被加工物は、レーザの波長に対して透明である他の成分、例えばサファイア又はセレン化亜鉛等の結晶を含んでよい。

【 0 0 3 8 】

いくつかの透明被加工物を、ディスプレイ及び / 又は T F T (薄膜トランジスタ) 基板として利用してよい。ディスプレイ又は T F T の用途に好適なこのようなガラス又はガラス組成物のいくつかの例は、C o r n i n g I n c o r p o r a t e d (ニューヨーク州コーニング) から入手可能な E A G L E X G (登録商標)、C O N T E G O、及び C O R N I N G L O T U S (商標) である。アルカリ土類ボロアルミノシリケートガラス組成物は、T F T 用基板を含むがこれに限定されない、電子工学用途のための基板としての使用に好適となるように配合できる。T F T と組み合わせて使用されるガラス組成物は典型的には、ケイ素と同様の C T E (例えば $5 \times 10^{-6} / K$ 未満、又は更には $4 \times 10^{-6} / K$ 未満、例えばおよそ $3 \times 10^{-6} / K$ 、又は約 $2.5 \times 10^{-6} / K \sim$ 約 $3.5 \times 10^{-6} / K$) を有し、またガラス内に低レベルのアルカリを有する。T F T 用途において低レベルのアルカリ (例えば約 0 重量 % ~ 2 重量 %、例えば 1 重量 % 未満、例えば 0 . 5 重量 % 未満といった微量) しか使用できないが、これは、いくつかの条件下において、アルカリドーパントがガラスから漏出して T F T を汚染する又は「害する (p o i s o n)」、場合によっては T F T を動作不能にするためである。実施形態によると、本明細書に記載のレーザ切断プロセスを用いて、無視できる程度のデブリ、最小の欠陥、及び縁部に対する小さな表面下損傷しか伴わずに、被加工物の完全性及び強度を保持して、透明被加工物を制御下で分割できる。

【 0 0 3 9 】

本明細書中で使用される場合、句「輪郭線 (c o n t o u r l i n e)」は、透明被加工物の表面上の所望の分割線に沿って形成される線 (例えば直線、曲線等) を指し、透明被加工物は、適当な加工条件への曝露時に、上記分割線に沿って複数の部分に分割されることになる。上記輪郭線は一般に、様々な技法を用いて上記透明被加工物内に導入された 1 つ以上の欠陥からなる。本明細書中で使用される場合、「欠陥 (d e f e c t)」は、上記透明被加工物内の、(バルク材料に対して) 修正された材料の領域、空所、擦過傷、傷、孔、又は他の変形を含んでよく、これらにより、更なる加工によって、例えばレーザ加工、機械的応力又は他の分割プロセスによって、分割を実施できる。更に各欠陥は、中央欠陥領域と、上記透明被加工物の撮像表面に沿って上記中央欠陥領域から外向きに延在する 1 つ以上の径方向アームとを備えてよい。本明細書中で使用される場合、上記透明被加工物の「撮像表面 (i m a g i n g s u r f a c e)」は、上記パルスレーザビームが上記透明被加工物に初めて接触する、上記透明被加工物の表面である。以下で更に詳細に説明するように、1 つ以上の径方向アームの径方向長さは、パルスレーザビームによって上記透明被加工物上に投射されるビームスポットの形状によって制御できる。一例として、一般に長軸及び短軸を備える非軸対称ビームスポットを備えるパルスレーザビームを、上記透明被加工物の撮像平面に照射することにより、上記非軸対称ビームスポットの上記長軸及び上記短軸の交点に形成された中央欠陥領域と、上記非軸対称ビームスポットの上記長軸の方向に形成された 1 つ以上の径方向アームとを備える、欠陥を生成できる。

【 0 0 4 0 】

ガラス基板等の透明被加工物は、まず上記被加工物の表面に輪郭線を形成し、その後、例えば赤外線レーザを用いて、上記被加工物の上記表面を上記輪郭線上において加熱することによって、熱応力等の応力を上記被加工物内に生成することによって、複数の部分に分割できる。上記応力は最終的には、上記輪郭線に沿った上記被加工物の自発的な分割をもたらす。更に、ビームの長軸が所望の分割線に沿って延在するように配向された、非軸対称ビームスポットを有するパルスレーザビームを用いて、各欠陥を形成すると、上記輪郭線に沿って上記透明被加工物内の欠陥に応力を印加することによって引き起こされた割

れの伝播が、上記所望の分割線の方向に延在し得る。上記所望の分割線の方向に延在する径方向アームを有する欠陥を形成することにより、上記欠陥を、ランダムに延在する径方向アームを有する又は径方向アームを有しない欠陥よりも大きな間隔距離で離間させることができ、分割後の透明被加工物の縁部（分割前にはここに上記輪郭線が存在していた）に対して損傷が生じない。更に、上記所望の分割線の方向に延在する径方向アームを有する欠陥を形成することにより、上記被加工物に印加されるエネルギー、例えば熱エネルギーをより少なくして、割れの伝播を生成でき、分割後の透明被加工物の縁部（分割前にはここに上記輪郭線が存在していた）の損傷が限定される。対照的に、欠陥が、ランダムに延在する径方向アームを含む又は径方向アームを含まない場合、割れは、分割後の縁部から、分割後の透明被加工物の縁部に対して概ね垂直な（即ち上記輪郭線によって示される、意図した分割線に対して概ね垂直な）方向に伝播し得、これにより、分割後の透明被加工物の縁部が弱くなる。

【0041】

ここで例として図1A及び1Bを参照すると、本明細書に記載の方法による加工を受ける、ガラス被加工物又はガラスセラミック被加工物等の透明被加工物160が、概略図で示されている。図1A及び1Bは、透明被加工物160内の輪郭線170の形成を示し、これは上記透明被加工物に対してパルスレーザビーム112を並進移動方向101に並進移動させることによって形成できる。図1A及び1Bは、ビーム経路111に沿ったパルスレーザビーム112を示し、これは、このパルスレーザビーム112を、レンズ（例えば以下で説明される第2のレンズ132）によって、透明被加工物160内のパルスレーザビーム焦線113に集束させることができるように配向される。更に、パルスレーザビーム焦線113は、以下で更に詳細に定義されるような、準非回折ビームの一部分である。図1A及び1Bは、パルスレーザビーム112が、透明被加工物160の撮像表面162上に投射された非軸対称ビームスポット114を形成する様子を示す。更に、パルスレーザビーム焦線113は、パルスレーザビーム112の伝播軸に対して垂直な（例えばビーム経路111に対して垂直な）パルスレーザビーム焦線113の断面において、非軸対称である。本明細書中で使用される場合、「軸対称（axisymmetric）」は、中心軸の周囲に作製されたいずれの任意の回転角度に関して対称である、即ち同一に見える形状を指し、「非軸対称（non-axisymmetric）」は、中心軸の周囲に作製されたいずれの任意の回転角度に関して対称でない形状を指す。回転軸（例えば中心軸）はほとんどの場合、上記レーザビームの伝播軸として理解される。また本明細書中で使用される場合、「ビームスポット（beam spot）」は、あるレーザビーム（例えばパルスレーザビーム112）の、ある被加工物（例えば透明被加工物160）と最初に接触する点における断面を指す。

【0042】

また図2を参照すると、輪郭線170は所望の分割線165に沿って延在し、意図した分割線を描き、上記意図した分割線の周辺において、透明被加工物160を2つ以上の部分に分割できる。輪郭線170は複数の欠陥172を含み、これらは、透明被加工物160の表面内へと延在して、透明被加工物160を輪郭線170に沿った複数の分割部分に分割するための割れの伝播のための経路を確立する。図1A及び図2では、輪郭線170は略直線として図示されているが、曲線、パターン、規則的な幾何学的形状、不規則形状を含むがこれらに限定されない他の構成が考えられ、またこれら他の構成が可能であることを理解されたい。

【0043】

図2に示すように、各欠陥172は、中央欠陥領域174と、ビーム経路111に対して略垂直な方向に（例えば図1A、1B及び2に示されているX及び/又はY方向に）外向きに延在する1つ以上の径方向アーム176とを含む。動作時、例えば本明細書に記載の方法及びシステムを用いて輪郭線170の欠陥172が形成された後、欠陥172は更に、後続の分割ステップにおいて機能して、輪郭線170に沿った透明被加工物160の自発的な分割を誘発できる。この後続の分割ステップは、透明被加工物160のタイプ、

厚さ及び構造に応じて、機械的な力、熱応力を誘発する力、又は透明被加工物内に存在する応力によって発生する自発的な破壊を使用するステップを含んでよい。例えば、透明被加工物 160 内に応力が存在する場合があります、この応力が、更なる加熱又は機械的分割ステップを要することなく、自発的な分割を引き起こす場合がある。

【0044】

図 1 A、1 B、及び 2 を参照すると、本明細書に記載の実施形態では、(透明被加工物 160 上に投射される非軸対称ビームスポット 114 を有する)パルスレーザビーム 112 を、透明被加工物 160 に向けることができる(例えば透明被加工物 160 の厚さの少なくとも一部分を貫通する高アスペクト比の線状焦点へと集光できる)。これは、非軸対称ビームスポット 114 と相関する非軸対称断面を有するパルスレーザビーム焦線 113 を形成する。特に、非軸対称ビームスポット 114 は、パルスレーザビーム焦線 113 の例示的な断面であり、パルスレーザビーム焦線 113 は、パルスレーザビーム焦線 113 が透明被加工物 160 の少なくとも一部分を貫通する際、非軸対称のままである。更にパルスレーザビーム 112 を透明被加工物 160 に対して(例えば並進移動方向 101 に)並進移動させることによって、輪郭線 170 の複数の欠陥 172 を形成できる。パルスレーザビーム 112 を透明被加工物 160 内へと向けることにより、透明被加工物 160 の複数の部分の破断を引き起こし、例えば所望の分割線 165 に沿った複数の離間した場所に、透明被加工物 160 内の化学結合を破壊するために十分なエネルギーを投入して、欠陥 172 を形成する。1 つ以上の実施形態によると、透明被加工物 160 の運動(例えば透明被加工物 160 に連結された並進移動ステージ 190 の運動)、上記パルスレーザビームの運動(例えばパルスレーザビーム焦線 113 の運動)、又は透明被加工物 160 及びパルスレーザビーム焦線 113 両方の運動によって、上記パルスレーザビームを、透明被加工物 160 を横断するように並進移動させることができる。パルスレーザビーム 113 を透明被加工物 160 に対して並進移動させることにより、透明被加工物 160 内に複数の欠陥 172 を形成できる。

【0045】

図 2 に示すように、非軸対称ビームスポット 114 は、長軸 116、短軸 115、非軸対称ビームスポット 114 の中央に位置決めされ得る軸交点 118、及びビームスポット外周 119 を備える。実施形態によると、長軸 116 は、非軸対称ビームスポット 114 内の中央から最長の距離を有する、非軸対称ビームスポット 114 の軸として定義され、短軸 115 は、非軸対称ビームスポット 114 内の中央から最短の距離を有する、非軸対称ビームスポット 114 の軸として定義される。図 2 では、非軸対称ビームスポット 114 は楕円として図示されているが、例えば非楕円形状等のいずれの非軸対称形状が考えられることを理解されたい。更に、非軸対称ビームスポット 114 は、複数のビームスポットの集合を含んでよい。更に、本明細書中では非軸対称ビームスポット 114 について実質的に議論するが、透明被加工物 160 内のパルスレーザビーム焦線 113 の他の断面も非軸対称であり、非軸対称ビームスポット 114 に関して上述したように短軸及び長軸を備えることを理解されたい。

【0046】

例として、上記長軸に沿った非軸対称ビームスポット 114 の中央からの距離は、約 0.25 μm ~ 約 20 μm 、例えば約 1 μm ~ 約 10 μm 、約 2 μm ~ 約 8 μm 、又は約 3 μm ~ 約 6 μm であってよい。更に上記短軸に沿った非軸対称ビームスポット 114 の中央からの距離は、約 0.01 μm ~ 約 10 μm 、約 0.1 μm ~ 約 10 μm 、又は約 0.7 μm ~ 約 3 μm であってよい。例えば、上記短軸に沿った非軸対称ビームスポット 114 の中央からの距離は、上記長軸に沿った非軸対称ビームスポット 114 の中央からの距離の約 5% ~ 約 95%、例えば上記長軸に沿った非軸対称ビームスポット 114 の中央からの距離の約 10% ~ 約 50%、約 20% ~ 約 45%、又は約 30% ~ 約 40% であってよい。ビームスポットサイズを決定するための方法は以下で開示される。

【0047】

図 1 B 及び図 3 に示す光学アセンブリは、軸対称性を有するガウスビームレーザを用い

て動作させる場合（例えばビーム源 1 1 0 がガウスビームを出力する場合）、当該技術分野においてガウス ベッセルビームとして知られる光学ビームを透明被加工物 1 6 0 において形成することになる。このようなビームは、（以下で更に詳細に定義される）準非回折ビームの一形態である。ガウスビームの軸対称性が崩れると、それがわずかしき崩れていなくても、上記ビームは非軸対称ガウス ベッセルビームと呼ばれ得る。しかしながら、本明細書に記載の原理及び効果は、ガウス ベッセル強度プロファイルを有するビーム以外にも広がり、また非軸対称準非回折レーザビーム一般にまで及ぶ。しかしながら、準非回折ビームの非対称性の測定は、より伝統的なガウスビームの非対称性の測定ほど簡単には実施できないことに留意されたい。例えば、準非回折ビームは典型的には、単調に減少するガウスビームに比べて、振動性の横方向プロファイルを有する。ガウスビームの直径は典型的には、強度の $1/e^2$ の低下によって定義される。対照的に、準非回折ビームの強度は、径方向距離の関数として、 $1/e^2$ の強度閾値の上下に複数回変動する場合がある。従って、径方向に対称な準非回折ビームであっても、そのサイズを定義するのは困難である。

10

【0048】

更に、非対称ガウスビームは当該技術分野において公知であるものの、これらはほとんどの場合単一スポットとして議論され、ここではガウスビームは、例えば y 方向より x 方向が大きな直径を有することができる。しかしながら、高次ガウスビーム及び準非回折ビームの両方に関して、ビームの断面は、単一の単調に減少するコア又はスポットを有しない場合がある。このような状況では、ビームの「長い (long)」又は「短い (short)」断面軸は容易には明らかでなく、これにより、ビームの非対称性の測定方法の定義が更に困難となる。

20

【0049】

理論によって制限されることを望むものではないが、上述の動機から、準非回折ビーム、及び準非回折の非対称性の測定方法の両方を定義するために以下の議論が行われる。この議論は、単調な強度プロファイルを有する単純な低次ガウスビームであるか、又は複数のスポットを投射する若しくは振動挙動を示す更に複雑な準非回折ビームであるかにかかわらず、全ての形態のレーザビームに広く適用可能である。ガウスビームの場合、結果は、スポットサイズ及びレイリー範囲の定義に関するガウスビームの文献から知られている比較的簡単な形式に縮減される。

30

【0050】

再び図 1 A ~ 2 を参照すると、欠陥 1 7 2 の形成に使用されるパルスレーザビーム 1 1 2 は、強度分布 $I(X, Y, Z)$ を更に有し、ここで、これらの図面に図示されているように、Z はパルスレーザビーム 1 1 2 の伝播の方向であり、X 及び Y は上記伝播の方向に対して垂直な方向である。X 方向及び Y 方向は断面方向と呼ばれる場合もあり、X-Y 平面は断面平面と呼ばれる場合がある。断面平面におけるパルスレーザビーム 1 1 2 の強度分布を、断面強度分布と呼ぶことができる。

【0051】

ここでもまた図 2 を参照すると、非軸対称ビームスポット 1 1 4 は、非軸対称の断面強度分布を有する。例えば非軸対称ビームスポット 1 1 4 は、非軸対称ビームスポット 1 1 4 の短軸 1 1 5 に沿った領域よりも、非軸対称ビームスポット 1 1 4 の長軸 1 1 6 に沿った領域において、パルスレーザビーム 1 1 2 からの累積エネルギーの強度が高く、従って分布が大きくなり得る。即ち非軸対称ビームスポット 1 1 4 の長軸 1 1 6 が所望の分割線 1 6 5 と整列している場合、パルスレーザビーム 1 1 2 は、所望の分割線 1 6 5 に隣接する領域に対してよりも、所望の分割線 1 6 5 に沿って多くのエネルギーを伝達でき、所望の分割線 1 6 5 に沿っていない方向に延在する径方向アーム 1 7 6 よりも、所望の分割線 1 6 5 に沿って延在する径方向アーム 1 7 6 が長い、欠陥 1 7 2 が形成される。本明細書中で使用される場合、「累積エネルギー (cumulated energy)」は、パルスレーザビーム 1 1 2 を透明被加工物 1 6 0 に照射したときにパルスレーザビーム 1 1 2 が透明被加工物 1 6 0 の特定の領域に伝達する全てのエネルギーを指す。

40

50

【 0 0 5 2 】

更に、非軸対称ビームスポット 1 1 4 におけるパルスレーザビーム 1 1 2 は、準非回折ビーム、例えば図 3 ~ 7 A に示す光学アセンブリ 1 0 0 に関して以下で更に詳細に説明するように、非球面光学素子 1 2 0 を通してパルスレーザビーム 1 1 2 を伝播させることにより、以下で数学的に定義される低いビーム発散を有するビームを含むことができる。ビーム発散は、ビーム伝播方向（即ち Z 方向）におけるビーム断面の拡大率を指す。本明細書中で使用される場合、句「ビーム断面（beam cross section）」は、パルスレーザビーム 1 1 2 の伝播に対して垂直な平面に沿った、例えば X - Y 平面に沿った、パルスレーザビーム 1 1 2 の断面を指す。本明細書で議論されるビーム断面の一例は、透明被加工物 1 6 0 上に投射されたパルスレーザビーム 1 1 2 のビームスポット（例えば非軸対称ビームスポット 1 1 4 ）である。

10

【 0 0 5 3 】

回折は、パルスレーザビーム 1 1 2 の発散につながる 1 つの因子である。他の因子としては、パルスレーザビーム 1 1 2 を形成する光学系によって引き起こされる集束若しくはデフォーカス、又は界面における屈折及び散乱が挙げられる。輪郭線 1 7 0 の欠陥 1 7 2 を形成するためのパルスレーザビーム 1 1 2 は、小さな非軸対称ビームスポット 1 1 4 を有してよく、その発散は小さく、また回折は弱い。パルスレーザビーム 1 1 2 の発散はレイリー範囲 Z_R によって特性決定され、これは、パルスレーザビーム 1 1 2 の強度分布の分散²及びビーム伝播係数 M^2 に関連する。以下の議論では、式は直交座標系を用いて提示される。他の座標系に関する対応する式は、当業者に公知の数学的技法を用いて得ることができる。ビーム発散に関する更なる情報は、A. E. Siegman 「New Developments in Laser Resonators」(SPIE Symposium Series Vol. 1224, p. 2 (1990))、並びに R. Borghi 及び M. Santarsiero 「 M^2 factor of Bessel Gauss beams」(光学系 Letters, Vol. 22(5), 262 (1997))に見出すことができ、これらの開示はその全体が参照により本出願に援用される。更なる情報は、国際規格 ISO 11146 1:2005(E) 「Lasers and laser related equipment Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams」、ISO 11146 2:2005(E) 「Lasers and laser related equipment Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios Part 2: General astigmatic beams」、及び ISO 11146 3:2004(E) 「Lasers and laser related equipment Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods」にも見出すことができ、これらの開示はその全体が参照により本出願に援用される。

20

30

40

【 0 0 5 4 】

時間平均強度プロファイル $I(x, y, z)$ を有するパルスレーザビーム 1 1 2 の強度プロファイルの重心の空間座標は、以下の式で与えられる：

【 0 0 5 5 】

【数 1】

$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) dx dy} \quad (1)$$

【0056】

【数 2】

$$\bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) dx dy} \quad (2)$$

10

【0057】

これらはウィグナー分布の最初の瞬間としても知られており、ISO 11146-2 : 2005 (E) の第 3.5 節に記載されている。その測定については、ISO 11146-2 : 2005 (E) の第 7 節に記載されている。

【0058】

分散は、ビーム伝播方向における位置 z の関数としての、パルスレーザビーム 112 の強度分布の断面 (X - Y) 平面における幅の測定値である。任意のレーザビームに関して、 X 方向の分散は Y 方向の分散とは異なり得る。 $\sigma_x^2(z)$ 及び $\sigma_y^2(z)$ をそれぞれ X 方向及び Y 方向の分散とする。特に関心の対象となるのは、近接場及び遠距離場の極限における分散である。 $\sigma_{0x}^2(z)$ 及び $\sigma_{0y}^2(z)$ をそれぞれ、近接場の極限における X 方向及び Y 方向の分散とし、 $\sigma_x^2(z)$ 及び $\sigma_y^2(z)$ をそれぞれ、遠距離場の極限における X 方向及び Y 方向の分散とする。時間平均強度プロファイル $I(x, y, z)$ を有するレーザビームに関して、フーリエ変換

20

$$\tilde{I}(v_x, v_y)$$

30

【0059】

(ここで v_x 及び v_y はそれぞれ X 方向及び Y 方向の空間周波数である) を用いると、 x 方向及び y 方向の近接場及び遠距離場分散は、以下の式によって与えられる：

【0060】

【数 3】

$$\sigma_{0x}^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) dx dy} \quad (3)$$

40

【0061】

【数 4】

$$\sigma_{0y}^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) dx dy} \quad (4)$$

【0062】

【数 5】

$$\sigma_{\infty x}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_x^2 \tilde{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y} \quad (5)$$

【0063】

【数 6】

$$\sigma_{\infty y}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_y^2 \tilde{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y} \quad (6)$$

10

【0064】

分散量 $\sigma_{0x}^2(z)$ 、 $\sigma_{0y}^2(z)$ 、 $\sigma_x^2(z)$ 及び $\sigma_y^2(z)$ は、ウィグナー分布の対角要素としても知られている (ISO 11146-2:2005(E) を参照)。これらの分散は、ISO 11146-2:2005(E) の第7節に記載の測定技法を用いて、実験用レーザビームに関して定量化できる。簡潔に述べると、この測定は、線形不飽和ピクセル化検出器を用いて、分散及び重心座標を定義する積分方程式の無限積分領域を近似する有限空間領域にわたって、 $I(x, y)$ を測定する。測定領域の適切な範囲、バックグラウンドの減算、及び検出器のピクセル分解能は、ISO 11146-2:2005(E) の第7節に記載されている反復測定手順の収束によって決定される。等式 1 ~ 6 によって与えられる以上の式の数値は、ピクセル化検出器によって測定される一連の複数の強度値から数値的に計算される。

20

【0065】

等式 3 ~ 等式 6 で使用される x 、 y 座標系の原点は、レーザビームの重心であることにも留意されたい。

【0066】

任意の光ビームに関する横方向振幅プロファイル

$$\tilde{u}(x, y, z)$$

【0067】

ここで

$$I(x, y, z) \equiv |\tilde{u}(x, y, z)|^2$$

【0068】

と、任意の光ビームに関する空間周波数分布

$$\tilde{P}(v_x, v_y, z)$$

40

【0069】

ここで

$$\tilde{I}(v_x, v_y) \equiv |\tilde{P}(v_x, v_y, z)|^2$$

【0070】

との間のフーリエ変換関係により、以下を示すことができる：

【0071】

50

【数 7】

$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) + \lambda^2 \sigma_{\infty x}^2(z - z_{0x})^2 \quad (7)$$

【0072】

【数 8】

$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) + \lambda^2 \sigma_{\infty y}^2(z - z_{0y})^2 \quad (8)$$

【0073】

10

等式(7)及び(8)において、 $\sigma_{0x}^2(z_{0x})$ 及び $\sigma_{0y}^2(z_{0y})$ は $\sigma_x^2(z)$ 及び $\sigma_y^2(z)$ の最小値であり、これらはそれぞれx方向及びy方向におけるウェスト位置 z_{0x} 及び z_{0y} において発生し、また λ はビームの波長である。等式(7)及び(8)は、 $\sigma_x^2(z)$ 及び $\sigma_y^2(z)$ が、ビームのウェスト位置に関連付けられた最小値から各方向に、 z の2次式として増加することを示している。

【0074】

等式(7)及び(8)は、ビーム伝播係数 M^2 に関して書き換えることができ、ここでx方向及びy方向に関して別個のビーム伝播係数 M_x^2 及び M_y^2 が以下のように定義される

【0075】

20

【数 9】

$$M_x^2 \equiv 4\pi\sigma_{0x}\sigma_{\infty x} \quad (9)$$

【0076】

【数 10】

$$M_y^2 \equiv 4\pi\sigma_{0y}\sigma_{\infty y} \quad (10)$$

【0077】

30

式(9)及び(10)の再編成及び式(7)及び(8)への代入により：

【0078】

【数 11】

$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) + \frac{\lambda^2 M_x^4}{(4\pi\sigma_{0x})^2} (z - z_{0x})^2 \quad (11)$$

【0079】

【数 12】

40

$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) + \frac{\lambda^2 M_y^4}{(4\pi\sigma_{0y})^2} (z - z_{0y})^2 \quad (12)$$

【0080】

が得られ、これらは：

【0081】

【数 1 3】

$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) \left[1 + \frac{(z - z_{0x})^2}{Z_{Rx}^2} \right] \quad (13)$$

【 0 0 8 2】

【数 1 4】

$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) \left[1 + \frac{(z - z_{0y})^2}{Z_{Ry}^2} \right] \quad (14)$$

10

【 0 0 8 3】

として書き換えることができ、ここで x 方向及び y 方向それぞれのレイリー範囲 Z_{Rx} 及び Z_{Ry} は、以下によって与えられる：

【 0 0 8 4】

【数 1 5】

$$Z_{Rx} = \frac{4\pi\sigma_{0x}^2}{M_x^2\lambda} \quad (15)$$

20

【 0 0 8 5】

【数 1 6】

$$Z_{Ry} = \frac{4\pi\sigma_{0y}^2}{M_y^2\lambda} \quad (16)$$

30

【 0 0 8 6】

上記レイリー範囲は、レーザビームの分散が（ビームのウエストの位置における分散に対して）2 倍になる、（ISO 11146-1:2005 (E) の第 3.12 節で定義されるようなビームのウエストの位置に対する）距離に対応し、レーザビームの断面積の発散の尺度となる。レイリー範囲はまた、光強度がビームのウエスト位置（最大強度位置）において観察される値の 1/2 まで減少する、ビーム軸に沿った距離としても観察できる。大きなレイリー範囲を有するレーザビームは発散が少なく、伝播方向における距離と共に、レイリー範囲が小さいレーザビームよりもゆっくりと拡散される。

【 0 0 8 7】

上述の式は、レーザビームを説明する強度プロファイル $I(x, y, z)$ を用いることにより、（ガウスビームだけではない）いずれのレーザビームに適用できる。ガウスビームの TEM₀₀ モードでは、強度プロファイルは：

40

【 0 0 8 8】

【数 1 7】

$$I(x, y) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} w_0 e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w_0^2}} \quad (17)$$

【 0 0 8 9】

によって与えられ、ここで w_0 は、（ビーム強度がビームのウエスト位置 z_0 における該

50

ビームのピークビーム強度の $1/e^2$ まで低下する半径として定義される)半径である。
等式(17)及び上述の式から、TEM₀₀ ガウスビームに関して以下の結果が得られる
:

【0090】

【数18】

$$\sigma_{0x}^2 = \sigma_{0y}^2 = \frac{w_0^2}{4} \quad (18)$$

【0091】

10

【数19】

$$\sigma_{\infty x}^2 = \sigma_{\infty y}^2 = \frac{1}{4\pi^2 w_0^2} \quad (19)$$

【0092】

【数20】

$$M_x^2 = 4\pi\sigma_{0x}\sigma_{\infty x} = 1 \quad (20)$$

20

【0093】

【数21】

$$M_y^2 = 4\pi\sigma_{0y}\sigma_{\infty y} = 1 \quad (21)$$

【0094】

【数22】

$$Z_{Rx} = \frac{4\pi\sigma_{0x}^2}{M_x^2\lambda} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (22)$$

30

【0095】

【数23】

$$Z_{Ry} = \frac{4\pi\sigma_{0y}^2}{M_y^2\lambda} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (23)$$

【0096】

【数24】

40

$$w^2(z) = w_0^2 + \frac{\lambda^2}{(\pi w_0)^2} (z - z_0)^2 = w_0^2 \left[1 + \frac{(z - z_0)^2}{Z_R^2} \right] \quad (24)$$

【0097】

ここで $Z_R = Z_{Rx} = Z_{Ry}$ である。ガウスビームに関して、 $M^2 = M_x^2 = M_y^2 = 1$ であることに更に留意されたい。

【0098】

ビーム断面は、形状及び寸法によって特性決定される。上述のように、非軸対称ビーム
スポット114であるビームスポットを透明被加工物160に投射することが望ましい場

50

合が多い。例示的な非軸対称断面としては、楕円形断面が挙げられる。ビーム断面の寸法は、ビームのスポットサイズによって特性決定される。ガウスビームに関して、スポットサイズは多くの場合、等式(17)で w_0 として表されるように、ビームの強度がその最大値の $1/e^2$ まで低下する径方向範囲として定義される。ガウスビームの最大強度は、強度分布の中央($x = 0$ 及び $y = 0$ (直交座標系)又は $r = 0$ (円柱座標系))において発生し、スポットサイズの決定に使用される径方向範囲は、この中央に対して測定される。

【0099】

軸対称の(即ちビーム伝播軸 z に関して回転対称の)断面を有するビームは、ISO 11146-1:2005(E)の第3.12節に明記されているように、ビームのウエスト位置において測定される単一の寸法又はスポットサイズによって特性決定できる。ガウスビームに関して、等式(17)は、スポットサイズが w_0 に等しいことを示しており、これは等式(18)から、 $2\sigma_{0x}$ 又は $2\sigma_{0y}$ に対応する。スポットサイズは、軸対称ビームと違って σ_{0x} 、 σ_{0y} である非軸対称ビーム断面に関しても同様に定義できる。従って、非軸対称ビームの断面寸法を、それぞれ x 方向及び y 方向の w_{0x} 及び w_{0y} という2つのスポットサイズパラメータを用いて特性決定することが必要となり、ここで：

【0100】

【数25】

$$w_{0x} = 2\sigma_{0x} \quad (25)$$

【0101】

【数26】

$$w_{0y} = 2\sigma_{0y} \quad (26)$$

【0102】

である。

【0103】

非軸対称ビームに関して、軸対称性(即ち任意の回転角度での対称性)が欠如していることは、 σ_{0x} 及び σ_{0y} の計算結果が x 軸及び y 軸の配向の選択に左右されることを意味する。いくつかの実施形態では、 x 軸は非軸対称ビームスポット114の長軸116であってよく、 y 軸は短軸115であってよい。他の実施形態では、 x 軸は短軸115であってよく、 y 軸は長軸116であってよい。ISO 11146-1:2005(E)はこれらの基準軸を力密度分布の主軸と呼んでおり(第3.3~3.5節)、以下の議論において、 x 及び y 軸はこれらの主軸と整列されていると仮定する。更に、断面平面において x 軸及び y 軸が回転する角度(例えば x 軸及び y 軸それぞれに関する基準位置に対する、 x 軸及び y 軸の角度)を用いて、非軸対称ビームに関するスポットサイズパラメータの最小値($w_{0,min}$)及び最大値($w_{0,max}$):

【0104】

【数27】

$$w_{0,min} = 2\sigma_{0,min} \quad (27)$$

【0105】

【数28】

$$w_{0,max} = 2\sigma_{0,max} \quad (28)$$

【0106】

を定義してよく、ここで $2\sigma_{0,min} = 2\sigma_{0x}(\sigma_{0,min,x}) = 2\sigma_{0y}(\sigma_{0,min,y})$ 、かつ $2\sigma_{0,max} = 2\sigma_{0x}(\sigma_{0,max,x}) = 2\sigma_{0y}(\sigma_{0,max,y})$

10

20

30

40

50

である。ビーム断面の軸対称性の強さは、アスペクト比によって定量化でき、ここでアスペクト比は、 $w_{0, \min}$ に対する $w_{0, \max}$ の比として定義される。非軸対称ビーム断面のアスペクト比は 1.0 であり、楕円形及び他の非軸対称ビーム断面のアスペクト比は、1.0 超、例えば 1.1 超、1.2 超、1.3 超、1.4 超、1.5 超、1.6 超、1.7 超、1.8 超、1.9 超、2.0 超等である。

【0107】

ビーム断面は、パルスレーザビーム 112 によって透明被加工物 160 内に形成される欠陥 172 の断面形状に影響を及ぼす。欠陥 172 の断面形状は、パルスレーザビーム 112 の伝播の方向に対して垂直な方向における欠陥の形状を指す。例えばレーザビームが透明被加工物 160 の撮像表面 162 に対して垂直に入射する場合、欠陥 172 の断面形状は、撮像表面 162 における、又は上記被加工物の、撮像表面 162 の平面に対して平行ないずれの平面における、欠陥 172 の形状に相当する。一例として、円形ビーム断面を有するレーザビームは、円形の欠陥 172 を形成し、また非円形ビーム断面を有するレーザビームは、非円形の欠陥 172 を形成する。

【0108】

ビーム断面の制御は、切断効率の向上、欠陥の数の減少、及び分割後の部品の縁部強度の向上をもたらす。ビーム断面の制御としては、スポットサイズ、断面形状、及びビーム断面の配向の制御が挙げられる。理論によって束縛されることを望むものではないが、所望の分割線 165 に沿って（又は略沿って）配向された最大スポットサイズパラメータ $w_{0, \max}$ を有する非軸対称ビーム断面は、割れの配向を切断の軌跡に沿った方向とすることにより、切断を改善すると考えられる。軸対称ビーム断面の場合、損傷領域の形成に関連する応力は損傷領域付近に集中するが、その配向がランダムであると考えられる。ランダムな応力の配向は、意図されている切断の軌跡から離れた方向での破断につながると考えられ、これは分割後の部品内に、微小割れ及び他の欠陥として現れる。このような微小割れ及び欠陥は、分割後の部品のバルク及び／又は縁部の機械的強度を低下させると考えられる。非軸対称ビーム断面及びビームスポットを採用し、最大スポットサイズ $w_{0, \max}$ （例えば長軸 116）の方向を所望の分割線 165 に沿って配向することにより、損傷領域の形成に関連する欠陥又は割れを、切断に沿った方向とすることができ、所望の分割線 165 から離れた方向の割れ又は欠陥を少なくすることができると考えられる。所望の分割線 165 と整列した割れの欠陥は、所望の分割線 165 から離れた方向の欠陥又は割れよりも好ましい。

【0109】

欠陥 172 の形成に使用されるパルスレーザビーム 112 のビーム断面のアスペクト比

$$\frac{w_{0, \max}}{w_{0, \min}}$$

【0110】

（例えば非軸対称ビームスポット 114 のアスペクト比）は、1.1 超、1.3 超、1.5 超、2.0 超、2.5 超、3.0 超、3.5 超、4.0 超、5.0 超、7.5 超、10.0 超、1.1 ~ 20.0、1.2 ~ 15.0、1.3 ~ 10.0、1.3 ~ 7.5、1.3 ~ 5.0、1.5 ~ 7.5、1.5 ~ 5.0、1.5 ~ 3.0、1.75 ~ 5.0、2.0 ~ 4.0 等であってよい。

【0111】

レーザ伝播（例えば透明被加工物 160 の深さ寸法）の方向における欠陥 172 の均一性を促進するために、発散が小さいパルスレーザビーム 112 を使用してよい。1 つ以上の実施形態では、発散が小さい非軸対称レーザビームを、欠陥 172 の形成に利用してよい。上述のように、発散はレイリー範囲によって特性決定できる。非軸対称ビームに関して、主軸 X 及び Y に関するレイリー範囲は、x 軸及び y 軸それぞれに関する等式（15）及び（16）によって定義され、ここでいずれの実際のビームに関して、 $M_x^2 > 1$ 及び

$M_y^2 > 1$ であることを示すことができ、また σ_{0x}^2 及び σ_{0y}^2 は、レーザビームの強度分布によって決定される。対称ビームに関して、レイリー範囲はX方向及びY方向において同一であり、ガウス強度分布を有するビームに関して等式(22)又は等式(23)によって表される。発散が小さいことは、レイリー範囲の値が大きいこと、及びレーザビームの回折が弱いことと相関する。

【0112】

ガウス強度プロファイルを有するビームは、欠陥を形成するためのレーザ加工には比較的好ましくない場合がある。というのは、利用可能なレーザパルスエネルギーによってガラス等の材料を修正できるように、十分に小さいスポットサイズ(例えば約1~5マイクロメートル又は約1~10マイクロメートルといった、数マイクロメートル範囲のスポットサイズ)に収束させた場合、上記ビームは強く回折して、短い伝播距離にわたって強く発散するためである。低発散を達成するために、パルスレーザビームの強度分布を制御又は最適化することにより、回折を低減することが望ましい。パルスレーザビームは、非回折性又は弱回折性とすることができる。弱回折レーザビームとしては、準非回折レーザビームが挙げられる。代表的な弱回折レーザビームとしては、ベッセルビーム、ガウスベッセル、エアリービーム、ウェーバービーム、及びマシュービームが挙げられる。

【0113】

非軸対称ビームに関して、レイリー範囲 Z_{Rx} 及び Z_{Ry} は等しくない。等式(15)及び(16)は、 Z_{Rx} 及び Z_{Ry} がそれぞれ σ_{0x} 及び σ_{0y} に依存することを示しており、また上述のように、 σ_{0x} 及び σ_{0y} の値は、X軸及びY軸の配向に左右される。従って Z_{Rx} 及び Z_{Ry} の値は変動することになり、これらはそれぞれ、上記主軸に対応する最小値及び最大値を有することになり、 Z_{Rx} の最小値は $Z_{Rx, min}$ として表され、 Z_{Ry} の最小値は $Z_{Ry, min}$ として表される。軸対称ガウスビームのレイリー範囲を特性決定する式(等式(22)又は等式(23))と同様に、任意のビームに関して、プロファイル $Z_{Rx, min}$ 及び $Z_{Ry, min}$ は：

【0114】

【数29】

$$Z_{Rx, min} = \frac{4\pi\sigma_{0, min}^2}{M_x^2\lambda} \quad (29)$$

【0115】

及び

【0116】

【数30】

$$Z_{Ry, min} = \frac{4\pi\sigma_{0, min}^2}{M_y^2\lambda} \quad (30)$$

【0117】

によって与えられることを示すことができる。

【0118】

ガウスビームに関して、この曲線は z_{0x} に関して対称であると予想される。

【0119】

(図24に示すように)非対称である場合、 $Z_{Rx, min}$ 及び $Z_{Rx, max}$ が存在し、これらはいずれも、 z_{0x} での最小値から、 $\sigma_{0x, min}$ が2倍増加した z 値まで測定される。 $Z_{Rx, min}$ はこれら2つの値の明らかに小さい方であり、 $Z_{Rx, max}$ は大きい方である。垂直な y 軸についても同一の分析を実施できる。

【0120】

レーザビームの発散は、最小のレイリー範囲を有する方向において比較的短い距離にわ

10

20

30

40

50

たって発生するため、切断に使用されるパルスレーザービームの強度分布を制御することにより、 Z_{R_x} 及び Z_{R_y} の最小値を可能な限り大きくすることができる。 Z_{R_x} の最小値 $Z_{R_x, min}$ 及び Z_{R_y} の最小値 $Z_{R_y, min}$ は、非軸対称ビームに関しては異なるため、損傷領域の形成時に $Z_{R_x, min}$ 及び $Z_{R_y, min}$ のうちの小さい方を可能な限り大きくする強度分布を有するレーザービームを使用してよい。

【0121】

異なる実施形態では、 $Z_{R_x, min}$ 及び $Z_{R_y, min}$ のうちの小さい方は、 $50\mu\text{m}$ 以上、 $100\mu\text{m}$ 以上、 $200\mu\text{m}$ 以上、 $300\mu\text{m}$ 以上、 $500\mu\text{m}$ 以上、 1mm 以上、 2mm 以上、 3mm 以上、 5mm 以上、 $50\mu\text{m} \sim 10\text{mm}$ 、 $100\mu\text{m} \sim 5\text{mm}$ 、 $200\mu\text{m} \sim 4\text{mm}$ 、 $300\mu\text{m} \sim 2\text{mm}$ 等である。

10

【0122】

本明細書で明記した $Z_{R_x, min}$ 及び $Z_{R_y, min}$ のうちの小さい方の値及び範囲は、等式(27)で定義されたスポットサイズパラメータ $w_{0, min}$ の調整によって、上記被加工物がそれに対して透明となるような様々な波長に関して達成できる。異なる実施形態では、スポットサイズパラメータ $w_{0, min}$ は、 $0.25\mu\text{m}$ 以上、 $0.50\mu\text{m}$ 以上、 $0.75\mu\text{m}$ 以上、 $1.0\mu\text{m}$ 以上、 $2.0\mu\text{m}$ 以上、 $3.0\mu\text{m}$ 以上、 $5.0\mu\text{m}$ 以上、 $0.25\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 、 $0.25\mu\text{m} \sim 5.0\mu\text{m}$ 、 $0.25\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $0.50\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 、 $0.50\mu\text{m} \sim 5.0\mu\text{m}$ 、 $0.50\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $0.75\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 、 $0.75\mu\text{m} \sim 5.0\mu\text{m}$ 、 $0.75\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 等である。

20

【0123】

損傷領域の形成に使用されるレーザービームのレイリー範囲は、同一波長を有するガウスビームのレイリー範囲より大きくなり得る。従って、共通の波長における、(等式(22)又は(23)において明記されているような)ガウスビームのレイリー範囲 Z_R に対する $Z_{R_x, min}$ 及び $Z_{R_y, min}$ のうちの小さい方の比は、2以上、5以上、10以上、25以上、50以上、100以上、250以上、500以上、1000以上、2~1500、5~1250、10~1000、25~1000、100~1000 等であってよい。

【0124】

非回折又は準非回折ビームは一般に、半径に対して非単調減少するもの等の、複雑な強度プロファイルを有する。ガウスビームと同様に、有効スポットサイズ $w_{0, eff}$ は、非軸対称ビームに関して、最大強度の径方向位置 ($r=0$) からの、強度が最大強度の $1/e^2$ まで低下するいずれの方向における最短径方向距離として定義できる。有効スポットサイズ $w_{0, eff}$ に基づくレイリー範囲に関する基準は、損傷領域の形成のための非回折又は準非回折ビームに関して：

30

【0125】

【数31 - 1】

$$Z_{Rx, min}, Z_{Ry, min} \text{ のうちの小さい方} > F_D \frac{\pi w_{0, eff}^2}{\lambda} \quad (31)$$

40

【0126】

のように具体化でき、ここで F_D は、少なくとも10、少なくとも50、少なくとも100、少なくとも250、少なくとも500、少なくとも1000、10~2000、50~1500、100~1000の値を有する無次元発散係数である。等式(31)を等式(22)又は(23)と比較することにより、非回折又は準非回折ビームに関して、有効ビームサイズが2倍になる距離、即ち式(31)中の「 $Z_{R_x, min}$ 、 $Z_{R_y, min}$ のうちの小さい方」が、仮に典型的なガウスビームを使用する場合に予想される距離の F_D 倍となることを確認できる。

【0127】

50

上述のように、レイリー範囲は、ビームのピーク強度が1 / 2 倍に下降する距離を測定することによっても決定できる。本明細書ではこれを、レイリー範囲を決定するための強度法と呼ぶ。

【0128】

本発明者らは、有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ に基づくレイリー範囲に関する基準を、損傷領域の形成のための非回折又は準非回折ビームに関して：

【0129】

【数31-2】

$$Z_{R,min} > F_D \frac{\pi \omega_{0,eff}^2}{\lambda} \quad (31')$$

10

【0130】

のように具体化することもできることを発見した。

【0131】

レイリー範囲を決定する際、分散法、即ち等式(31)若しくは(31')を利用する方法を用いることができ、又は強度法を用いることができる。強度法を用いる場合、xとyとの間に差がないため、1つの解答、即ち最小レイリー範囲に関して1つの値しか存在しない。

20

【0132】

無次元発散係数 F_D は、レーザビームが準非回折性であるかどうかを決定するための基準を提供する。本明細書中で使用される場合、「レーザビーム(laser beam)」は、該レーザビームが、 F_D の値10において式(31)を満たす場合に、準非回折性とみなされる。 F_D の値が増加するに従って、レーザビームは、非回折状態に更に完璧に近づく。

【0133】

ここで図3~7Aを参照すると、準非回折性のパルスレーザビーム112を生成する(図3~7A)、及びいくつかの実施形態では透明被加工物160において非軸対称ビームスポット114を生成する(図4~7A)、光学アセンブリ100が図示されている。例えば図3は、例えば準非回折性のパルスレーザビーム112を生成するための、パルスレーザ加工用の従来の光学アセンブリ100が示されている。更に図4~7Aはそれぞれ、図3に示されていない追加の構成要素及び構成を備える、透明被加工物160において非軸対称ビームスポット114を形成するための光学アセンブリ100を示す。例えば図4の光学アセンブリ100は、ビーム経路111に対してオフセットされた非球面光学素子120を備え、図5A及び5Bの光学アセンブリ100は、ビーム経路111内に位置決めされた1つ以上の光学遮断素子140を含む。更に、図6及び7Aの光学アセンブリ100はそれぞれ、パルスレーザビーム112の第1のビーム部分をパルスレーザビーム112の第2のビーム部分からデコヒーレント化する要構成された、1つ以上のデコヒーレント化用光学素子を備える。特に、図6の光学アセンブリ100のデコヒーレント化用光学素子は、ビーム経路111内に位置決めされた光遅延プレート142を備え、図7Aの光学アセンブリ100のデコヒーレント化用光学素子は、ビーム経路111内に位置決めされた(図7Bにも図示されている)分割1/4波長板150を備える。本明細書中で使用される場合、「デコヒーレント化する(decohere)」は、パルスレーザビームの第1の部分を、パルスレーザビームの第2の部分と非コヒーレント状態とすることを意味する。

30

40

【0134】

図3~7Aはそれぞれ、ビーム源110、非球面光学素子120(例えばアキシコンレンズ)、第1のレンズ130、及び第2のレンズ132を備える。更に、透明被加工物160は、ビーム源110が出力したパルスレーザビーム112が例えば非球面光学素子1

50

20と、それに続いて第1のレンズ130及び第2のレンズ132とを横断した後で、透明被加工物160に照射されるように、位置決めしてよい。光軸102はビーム源110と透明被加工物160との間に、Z軸に沿って延在する。更に、図3～7Aの光学アセンブリ100は任意に、ビーム経路111内において非球面光学素子120と透明被加工物160との間に位置決めされた、ドーププリズム180を備えてよい。ドーププリズム180は図5A、5B及び6に示されているが、本明細書に記載のいずれの光学アセンブリ100がドーププリズム180を備えてよいことを理解されたい。更に、光軸102の周りでドーププリズム180の回転は、パルスレーザビーム112のビーム断面（例えば非軸対称ビームスポット114）を回転させることができる。非軸対称ビームスポット114の回転により、非軸対称ビームスポット114の長軸116の、透明被加工物160の所望の分割線165に沿った配向が促進される。以下の実施形態において説明されるように、非軸対称ビームスポット114を回転させる他の方法も考えられる。

10

【0135】

ここでもまた図3～7Aを参照すると、ビーム源110は、パルスレーザビーム112を出力するよう構成された、いずれの公知の又はまだ開発されていないビーム源110を備えてよい。動作時、輪郭線170の欠陥172が、透明被加工物160と、ビーム源110が出力したパルスレーザビーム112との相互作用によって製造される。いくつかの実施形態では、ビーム源110は、例えば1064nm、1030nm、532nm、530nm、355nm、343nm、又は266nm、又は215nmの波長を備えるパルスレーザビーム112を出力してよい。更に、透明被加工物160内に欠陥172を形成するために使用されるパルスレーザビーム112は、選択されたパルスレーザ波長に対して透明である材料に対して十分に好適となり得る。

20

【0136】

欠陥172の形成に好適なレーザ波長は、透明被加工物160による吸収及び散乱を合わせた損失が十分に小さい波長である。実施形態では、該波長における、透明被加工物160による吸収及び散乱を合わせた損失は、20%/mm未満、又は15%/mm未満、又は10%/mm未満、又は5%/mm未満、又は1%/mm未満であり、ここで寸法「/mm」は、パルスレーザビーム112の伝播の方向（例えばZ方向）における透明被加工物160内の距離1ミリメートルあたりを意味する。多くのガラス被加工物に関する代表的な波長としては、 Nd^{3+} （例えば1064nm付近の基本波長並びに532nm、355nm及び266nm付近の高次高調波長を有する Nd^{3+} ：YAG又は Nd^{3+} ：YVO₄）の基本波長及び高調波長が挙げられる。所与の基板材料に関して吸収及び散乱を合わせた損失の要件を満たす、スペクトルの紫外部分、可視部分及び赤外部分の他の波長も、使用できる。

30

【0137】

動作時、ビーム源110が出力したパルスレーザビーム112は、透明被加工物160内に多光子吸収（multi photon absorption：MPA）を生成できる。MPAは、分子をある状態（通常はグラウンド状態）からより高いエネルギーの電子的状態（即ちイオン化）に励起する、同一の又は異なる周波数の2つ以上の光子の同時吸収である。これに関与する分子の低エネルギー状態と高エネルギー状態との間のエネルギーの差は、関与する光子のエネルギーの合計に等しい。誘起吸収とも呼ばれるMPAは、2次又は3次（又はより高次）プロセスであってよく、これは例えば、線形吸収よりも数桁弱い。これは、2次誘起吸収の強度が光強度の2乗に比例し得、従って非線形光学プロセスであるという点で、線形吸収とは異なる。

40

【0138】

輪郭線170を形成する穿孔ステップは、ビーム源110（例えば超短パルスレーザ）を、図3～7Aに図示され以下で説明される光学系と組み合わせて利用して、透明被加工物160上に非軸対称ビームスポット114を投射し、図1Bのパルスレーザビーム焦線113を生成できる。パルスレーザビーム焦線113は、上で定義したような非軸対称ガウスベッセルビーム等の準非回折ビームを含み、これにより、透明被加工物160を完

50

全に穿孔して、透明被加工物 160 内に一連の欠陥 172 を形成する。いくつかの実施形態では、個々のパルスのパルス持続時間は、約 1 ピコ秒～約 100 ピコ秒、例えば約 5 ピコ秒～約 20 ピコ秒であり、また個々のパルスの繰り返し数は、約 1 kHz～4 MHz、例えば約 10 kHz～約 3 MHz、又は約 10 kHz～約 650 kHz であってよい。

【0139】

図 7C～7D も参照すると、上述の個々のパルス繰り返し数における単一パルスの動作に加えて、パルスを、2つのパルス 500 A（例えばサブパルス）以上（例えば 1 回のパルスバーストあたり、3 パルス、4 パルス、5 パルス、10 パルス、15 パルス、20 パルス、又はより多数のパルス、例えば 1 回のパルスバースト 500 あたり 1～30 パルス、又は 1 回のパルスバースト 500 あたり 5～20 パルス）のパルスバースト 500 で生成してよい。パルスバースト 500 内のパルス 500 A は、約 1 nsec～約 50 nsec、例えば約 10 nsec～約 30 nsec、例えば約 20 nsec の持続時間によって隔てられていてよい。他の実施形態では、パルスバースト 500 内のパルス 500 A は、最高 100 psec（例えば、0.1 psec、5 psec、10 psec、15 psec、18 psec、20 psec、22 psec、25 psec、30 psec、50 psec、75 psec、又はこれらの間のいずれの範囲）の持続時間によって隔てられていてよい。所与のレーザに関して、パルスバースト 500 内の隣接するパルス 500 A の間の時間間隔 T_p （図 7D）は、比較的均一（例えば互いの約 10% 以内）であってよい。例えばいくつかの実施形態では、パルスバースト 500 内の各パルス 500 A は、後続のパルスからおおよそ 20 nsec（50 MHz）だけ時間的に隔てられている。例えば各パルスバースト 500 間の時間は、約 0.25 マイクロ秒～約 1000 マイクロ秒、例えば約 1 マイクロ秒～約 10 マイクロ秒、又は約 3 マイクロ秒～約 8 マイクロ秒であってよい。

【0140】

本明細書に記載のビーム源 110 の例示的な実施形態のうちのいくつかでは、時間間隔 T_b （図 7D）は、バースト繰り返し数が約 200 kHz であるパルスレーザビーム 112 を出力するビーム源 110 に関して、約 5 マイクロ秒である。レーザバースト繰り返し数は、あるバースト内の最初のパルスから、次のバースト内の最初のパルスまでの時間 T_b に関連する（レーザバースト繰り返し数 = $1/T_b$ ）。いくつかの実施形態では、レーザバースト繰り返し数は約 1 kHz～約 4 MHz であってよい。実施形態では、レーザバースト繰り返し数は例えば約 10 kHz～650 kHz であってよい。各バースト内の最初のパルスから、次のバースト内の最初のパルスまでの時間 T_b は、約 0.25 マイクロ秒（4 MHz のバースト繰り返し数）～約 1000 マイクロ秒（1 kHz のバースト繰り返し数）、例えば約 0.5 マイクロ秒（2 MHz のバースト繰り返し数）～約 40 マイクロ秒（25 kHz のバースト繰り返し数）、又は約 2 マイクロ秒（500 kHz のバースト繰り返し数）～約 20 マイクロ秒（50 kHz のバースト繰り返し数）であってよい。正確なタイミング、パルス持続時間、及びバースト繰り返し数は、レーザの設計に応じて変動し得るが、高強度の短パルス（ $T_d < 20$ psec、及びいくつかの実施形態では、 $T_d = 15$ psec）が特に良好に動作することが分かっている。

【0141】

バースト繰り返し数は、約 1 kHz～約 2 MHz、例えば約 1 kHz～約 200 kHz であってよい。バースト形成又はパルスバースト 500 の生成は、パルス 500 A の放出が均一かつ安定した流れにならず、パルスバースト 500 の密集したクラスタとなるような、レーザ動作の 1 タイプである。パルスバーストレーザビームは、透明被加工物 160 の材料に基づいて、透明被加工物 160 の材料が該波長において略透明となるように動作するよう選択された、波長を有してよい。材料において測定されるバーストあたりの平均レーザ出力は、材料の厚さ 1 mm あたり少なくとも約 40 μ J であってよい。例えば実施形態では、バーストあたりの平均レーザ出力は、約 40 μ J/mm～約 2500 μ J/mm、又は約 500 μ J/mm～約 2250 μ J/mm であってよい。ある具体例では、厚さ 0.5 mm～0.7 mm の Corning EAGLE XG 透明被加工物に関して、

約 $300 \mu\text{J}$ ~ 約 $600 \mu\text{J}$ のパルスバーストが被加工物を切断及び / 又は分割でき、これは約 $428 \mu\text{J} / \text{mm}$ ~ 約 $1200 \mu\text{J} / \text{mm}$ (即ち 0.7 mm の EAGLE XG ガラスに関して $300 \mu\text{J} / 0.7 \text{ mm}$ 、及び 0.5 mm の EAGLE XG ガラスに関して $600 \mu\text{J} / 0.5 \text{ mm}$) という例示的な範囲に対応する。

【0142】

透明被加工物 160 の修正に必要なエネルギーは、バーストエネルギー (即ちあるパルスバースト 500 内に内包されたエネルギー (ここで各パルスバースト 500 は一連のパルス 500 A を内包する)) に関して、又は単一のレーザパルス (これが多数集まって 1 つのパーストを構成できる) 内に内包されるエネルギーに関して、記述できる。パルスバーストあたりのエネルギーは、約 $25 \mu\text{J}$ ~ 約 $750 \mu\text{J}$ 、例えば約 $50 \mu\text{J}$ ~ 約 $500 \mu\text{J}$ 、又は約 $50 \mu\text{J}$ ~ 約 $250 \mu\text{J}$ であってよい。いくつかのガラス組成物に関して、パルスバーストあたりのエネルギーは約 $100 \mu\text{J}$ ~ 約 $250 \mu\text{J}$ であってよい。しかしながら、ディスプレイ又は TFT 用ガラス組成物に関して、パルスバーストあたりのエネルギーはより高くなり得る (例えば、透明被加工物 160 の具体的なガラス組成に応じて、約 $300 \mu\text{J}$ ~ 約 $500 \mu\text{J}$ 、又は約 $400 \mu\text{J}$ ~ 約 $600 \mu\text{J}$)。このようなバーストを生成できるパルスレーザビーム 112 の使用は、例えばガラスである透明材料の切断又は修正に有利である。単一パルスレーザの繰り返し数によって時間的に隔てられた単一パルスの使用とは対照的に、バースト内の複数のパルスの迅速なシーケンスにわたってレーザエネルギーを拡散するバーストシーケンスの使用により、材料との高強度の相互作用のタイムスケールを、単一パルスレーザによって可能なものよりも大きくすることができる。

【0143】

再び図 3 ~ 7 A を参照すると、非球面光学素子 120 は、ビーム源 110 と透明被加工物 160 との間において、ビーム経路 111 内に位置決めされる。動作時、パルスレーザビーム 112、例えば入射してくるガウスビームを、非球面光学素子 120 を通して伝播させることにより、非球面光学素子 120 を越えて伝播するパルスレーザビーム 112 の部分が上述のように準非回折性となるように、パルスレーザビーム 112 を変化させることができる。非球面光学素子 120 は、非球面形状を備えるいずれの光学素子を含んでよい。いくつかの実施形態では、非球面光学素子 120 は、アキシコンレンズ、例えば負屈折アキシコンレンズ、正屈折アキシコンレンズ、反射アキシコンレンズ、回折アキシコンレンズ、プログラマブル空間光変調器アキシコンレンズ (例えば位相アキシコン) 等の、円錐波面生成光学素子を含んでよい。

【0144】

いくつかの実施形態では、非球面光学素子 120 は少なくとも 1 つの非球面表面を備え、その形状は数学的に： $z' = (cr^2/1) + (1 - (1+k)(c^2r^2))^{1/2} + (a_1r + a_2r^2 + a_3r^3 + a_4r^4 + a_5r^5 + a_6r^6 + a_7r^7 + a_8r^8 + a_9r^9 + a_{10}r^{10} + a_{11}r^{11} + a_{12}r^{12})$ のように記述され、ここで z' は上記非球面表面の表面サグであり、 r は、径方向における (例えば x 方向又は y 方向における)、上記非球面表面と光軸 102 の距離であり、 c は上記非球面表面の表面曲率 (即ち $c_i = 1/R_i$ (ここで R は上記非球面表面の表面半径である)) であり、 k は円錐定数であり、係数 a_i は、上記非球面表面を記述する 1 次 ~ 12 次非球面係数又はより高次の非球面係数 (多項式非球面) である。例示的な実施形態では、非球面光学素子 120 の少なくとも 1 つの非球面表面は、それぞれ： -0.085274788 ; 0.065748845 ; 0.077574995 ; -0.054148636 ; 0.022077021 ; -0.0054987472 ; 0.0006682955 である係数 $a_1 \sim a_7$ を含み、また非球面係数 $a_8 \sim a_{12}$ は 0 である。この実施形態では、少なくとも 1 つの非球面表面は、円錐定数 $k = 0$ を有する。しかしながら、 a_1 の係数は非ゼロ値を有するため、これは非ゼロ値の円錐定数 k を有することと同等である。従って、非ゼロの円錐定数 k 、非ゼロの係数 a_1 、又は非ゼロの k と非ゼロの係数 a_1 との組み合わせを指定することによって、同等の表面を記述できる。更にいくつかの実施形態では、少なくとも 1 つの非球面表面は、非ゼロ値を有する少なくとも 1 つの高次非球面係数 $a_2 \sim a_{12}$ (即ち

a_2 、 a_3 、... a_{12} のうちの少なくとも1つ 0) によって記述又は定義される。例示的な一実施形態では、非球面光学素子120は、立方体状の光学素子等の3次非球面光学素子を含み、これは非ゼロの係数 a_2 を備える。

【0145】

いくつかの実施形態では、上記非球面光学素子がアキシコンからなる場合、上記アキシコンは、約1.2°、例えば約0.5°~約5°、又は約1°~約1.5°、又は約0.5°~約20°でさえある角度を有するレーザ出力表面126（例えば円錐表面）を備え、上記角度は、パルスレーザビーム112がアキシコンレンズに入るレーザ入力表面124（例えば平坦表面）に対して測定される。更に、レーザ出力表面126は、円錐の頂点で終端する。更に、非球面光学素子120は、レーザ入力表面124からレーザ出力表面126まで延在して円錐の頂点で終端する、中心線軸122を含む。他の実施形態では、非球面光学素子120はワキシコン、空間光変調器等の空間位相変調器、又は光回折格子からなってもよい。動作時、非球面光学素子120は、入射するパルスレーザビーム112（例えば入射するガウスビーム）を準非回折ビームに成形し、続いてこれは、第1のレンズ130及び第2のレンズ132を通るように向けられる。

【0146】

ここでもまた図3~7Aを参照すると、第1のレンズ130及び第2のレンズ132は、第1のレンズ130と第2のレンズ132との間のコリメート空間134内において、パルスレーザビーム112をコリメートしてよい。更に第2のレンズ132はパルスレーザビーム112を透明被加工物160内へと集束させてよく、これは撮像平面104に位置決めしてよい。いくつかの実施形態では、第1のレンズ130及び第2のレンズ132はそれぞれ平凸レンズからなる。第1のレンズ130及び第2のレンズ132がそれぞれ平凸レンズからなる場合、第1のレンズ130及び第2のレンズ132の曲率はそれぞれ、コリメート空間134に向かって配向してよい。他の実施形態では、第1のレンズ130は他のコリメートレンズからなってもよく、また第2のレンズ132は、メニスカスレンズ、非球面レンズ、又は別の高次補正集束レンズからなってもよい。

【0147】

更に、第1のレンズ130は第1の焦点距離 F_1 を備え、第2のレンズ132は第2の焦点距離 F_2 を備える。本明細書中で使用される場合、「焦点距離 (focal length)」は、レンズとレンズの焦点との間の距離として定義される。いくつかの実施形態では、第1の焦点距離 F_1 及び第2の焦点距離 F_2 は等しくてよい。他の実施形態では、第1の焦点距離 F_1 及び第2の焦点距離 F_2 は異なっていてよく、例えば第2の焦点距離 F_2 は第1の焦点距離 F_1 未満であってよく、あるいは第1の焦点距離 F_1 より大きくてよい。いくつかの実施形態では、第1のレンズ130及び第2のレンズ132は、それぞれ約10mm~約200mm（例えば約25mm~約200mm、又は約50mm~150mm、又は約75mm~約100mm、又は約25mm~約50mm等）の焦点距離 F_1 、 F_2 を有してよい。

【0148】

いくつかの実施形態では、第1のレンズ130は第2のレンズ132から、第1の焦点距離 F_1 及び第2の焦点距離 F_2 の合計だけ離間していてよく、これにより、第1のレンズ130と第2のレンズ132との間のコリメート空間134に共通の焦点面105が位置決めされる。しかしながら、他の空間的構成も考えられることを理解されたい。共通の焦点面105は、第1のレンズ130と第2のレンズ132との間のビーム経路111に沿った、第1のレンズ130から下流に第1の焦点距離 F_1 だけ離間し、かつ第2のレンズ132から上流に第2の焦点距離 F_2 だけ離間した場所である。本明細書中で使用される場合、「上流 (upstream)」及び「下流 (downstream)」は、ビーム源110に対する、ビーム経路111に沿った2つの場所又は構成部品の相対位置を指す。例えば、パルスレーザビーム112が、第2の構成部品を横断する前に第1の構成部品を横断する場合、第1の構成部品は第2の構成部品から上流にある。更に、パルスレーザビーム112が、第1の構成部品を横断する前に第2の構成部品を横断する場合、第1

の構成部品は第2の構成部品から下流にある。

【0149】

ここで図4を参照すると、径方向（例えばビーム伝播方向に対して垂直な、パルスレーザビーム112の半径に沿った方向）において、パルスレーザビーム112のビーム経路111に対してオフセットして位置決めされた、非球面光学素子120を備える、光学アセンブリ100の実施形態が図示されている。非球面光学素子120をビーム経路111に対してオフセットさせることにより、透明被加工物160上に投射される、結果として得られるビームスポットは、図2に示す非軸対称ビームスポット114からなるものとすることができる。非球面光学素子120は、オフセット距離aだけ、ビーム経路111からオフセットして（例えばX-Y平面内でオフセットして）位置決めしてよい。特に、オフセット距離aは、パルスレーザビームを非球面光学素子120のレーザ入力表面124に照射したときの、非球面光学素子120の中心線軸122と、パルスレーザビームの断面中心との間の、X-Y平面内での距離である。非球面光学素子120と上記ビーム経路との間の相対的なオフセットは、非球面光学素子120をX-Y平面に沿って変位させること、ビーム源110をX-Y平面に沿って変位させること、又はこれら両方によって達成できる。結果として得られるビームスポットの対称性を十分に破壊するために必要なオフセットの大きさは、パルスレーザビーム112の直径に左右され、入力されるレーザビームの直径が小さいほど、対称性を十分に破壊するために必要なオフセットは小さくなる。いくつかの実施形態では、オフセット距離aは、約10マイクロメートル～約500マイクロメートル、例えば、20マイクロメートル、50マイクロメートル、100マイクロメートル、250マイクロメートル等であってよい。いくつかの実施形態では、オフセット距離aは、約20マイクロメートル～約100マイクロメートル、又は約50マイクロメートル～約100マイクロメートル等であってよい。いくつかの実施形態では、上記オフセット距離は、パルスレーザビーム112と非球面光学素子120との間の接触位置における（例えば非球面光学素子120のレーザ入力表面124における）パルスレーザビーム112の断面直径の約10%～約75%の距離であってよい。

【0150】

非球面光学素子120をビーム経路111に対してオフセットさせることにより、結果として得られるパルスレーザビーム112は、全体としての強度が、例えば約4倍低下し得る。更に、パルスレーザビーム112の断面は、X-Y平面内でX方向、Y方向、又はこれらの組み合わせにおいて、約1.2～約2倍、例えば1.4倍、1.6倍、1.8倍等だけ広がり得る。パルスレーザビーム112の断面を広げることにより、この広がりの方に長軸116を有する非軸対称ビームスポット114が形成される。結果として得られるパルスレーザビーム112は、光線の非軸対称円錐を含んでよく、これは、第1のレンズ130を横断した後、コリメート空間134内に非軸対称リングを形成する。更に、パルスレーザビーム112の断面（例えば非軸対称ビームスポット114）は、非球面光学素子120を光軸102の周りで回転させることによって、回転させることができる。

【0151】

ここで図5A及び5Bを参照すると、ビーム源110と透明被加工物160との間で伝播するパルスレーザビーム112の一部分を遮断する、ビーム経路111に沿った1つ以上の遮断位置141に位置決めされた、1つ以上の光学遮断素子140（例えば不透明光学素子）を備える、光学アセンブリ100の実施形態が図示されている。いくつかの実施形態では、光学遮断素子140は不透明プレートからなっており、これは更にアパーチャを備えてよい。例えば光学遮断素子140は、金属プレート、又は破損若しくは損傷することなくパルスレーザビーム112に耐えることができる他の物質からなっており、光学遮断素子140は、光学遮断素子140が、パルスレーザビーム112のビーム強度の約5%～約95%、例えば少なくとも約10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、85%、90%等を遮断するように、ビーム経路111内に位置決めしてよい。一例として、光学遮断素子140は、パルスレーザビーム112のビーム強度の約25%～約80%を遮断する。パルスレーザビーム112のビーム強度の、比較的高

いパーセンテージを遮断することにより、非軸対称ビームスポット 114 の短軸 115 に対する、非軸対称ビームスポット 114 の長軸 116 の長さが増大する。しかしながら、パルスレーザビーム 112 のビーム強度の、比較的高いパーセンテージを遮断することにより、光学遮断素子 140 において失われる、パルスレーザビーム 112 の力の量が増大する。

【0152】

いくつかの実施形態では、光学遮断素子 140 は、パルスレーザビーム 112 のある断面セクタ（即ちパルスレーザビーム 112 の中心位置からパルスレーザビーム 112 の最外直径まで延在する、パルスレーザビーム 112 の方位角範囲又は「パイスライス（pie slice）」によって画定される、セクタ）を遮断してよい。セクタの形態の光学遮断素子 140 は、パルスレーザビーム 112 の全半径において同一パーセンテージの光線を遮断するという利点を有する。このような光学アセンブリでは、光学系は、特定の半径の光線を、パルスレーザビーム焦線 113 に沿った対応する具体的な位置へとマッピングする。図 5 A 及び 5 B に示す例示的实施形態では、非球面光学素子 120 の近傍の低半径光線が、パルスレーザビーム焦線 113 の上流端部の複数の位置にマッピングされることになり、また非球面光学素子 120 の近傍の高半径光線が、パルスレーザビーム焦線 113 の下流端部の複数の位置にマッピングされることになる。光学遮断素子 140 が、大きな半径におけるものよりも小さな半径における光線を大きな割合で切り取る場合、パルスレーザビーム焦線 113 の断面（一例として非軸対称ビームスポット 114）の楕円率の大きさ又はアスペクト比は、その長さ全体にわたって変化することになる。従って、光学遮断素子 140 をパイスライスの形状に成形することにより、パルスレーザビーム焦線 113 の、結果として得られる断面が、パルスレーザビーム焦線 113 の全長を通して一定の楕円率を維持することが保証される。

【0153】

他の実施形態では、光学遮断素子 140 は、パルスレーザビーム 112 の断面弦部分を遮断してよく、ここでパルスレーザビーム 112 の断面弦部分は、パルスレーザビーム 112 の断面の周と、パルスレーザビーム 112 の任意の断面弦とによって境界が画定される。更にこの例示的实施形態では、ビーム経路 111 内に位置決めされた光学遮断素子 140 の一部分は、任意の断面弦と連続している。更に、光学遮断素子 140 は、パルスレーザビーム 112 のいずれの任意の断面部分を遮断してよいことを理解されたい。

【0154】

更に光学遮断素子 140 は、ビーム源 110 と透明被加工物 160 との間に位置決めしてよい。光学遮断素子 140 がビーム源 110 と透明被加工物 160 との間に位置決めされるため、動作時、パルスレーザビーム 112 は、非球面光学素子 120 を通り、光学遮断素子 140 を越えて進むことになる（例えばパルスレーザビーム 112 の遮断されなかった部分は光学遮断素子 140 を超えて進むが、パルスレーザビーム 112 の遮断される部分は光学遮断素子 140 を越えて進まない）。更にパルスレーザビーム 112 は、ビーム伝播方向（例えば Z 方向）に沿った非球面光学素子 120 及び光学遮断素子 140 の位置決めの相対的な順序にかかわらず、非球面光学素子 120 を通り、光学遮断素子 140 を越えて進むことになる。例えば光学遮断素子 140 を非球面光学素子 120 から上流に位置決めしてよく、これにより光学遮断素子 140 は、ビーム源 110 と非球面光学素子 120 との間に位置決めされる。更に、光学遮断素子 140 を非球面光学素子 120 から下流に位置決めしてよく、これにより光学遮断素子 140 は、非球面光学素子 120 と透明被加工物 160 との間に位置決めされる。

【0155】

いくつかの実施形態では、光学遮断素子 140 は、第 1 のレンズ 130 と第 2 のレンズ 132 との間のコリメート空間 134 内において、例えば共通の焦点面 105 に位置決めしてよい。更にパルスレーザビーム焦線 113 の断面（例えば非軸対称ビームスポット 114）は、光学遮断素子 140 を光軸 102 の周りで回転させることによって、回転させることができる。いくつかの実施形態では、非軸対称ビームスポット 114 は、非球面光

光学素子 1 2 0 をビーム経路 1 1 1 に対してオフセットすること、及びパルスレーザビーム 1 1 2 の一部分を光学遮断素子 1 4 0 によって遮断することの両方によって形成できる。非球面光学素子 1 2 0 のオフセットを用いて、レーザビームエネルギーのうちのより多くの部分を、光学遮断素子 1 4 0 を通るように向ける場合、オフセットと遮断との上記組み合わせは、楕円形又はその他の非軸対称ビームスポット 1 1 4 が生成されて透明被加工物 1 6 0 上に投射されることを依然として保証したまま、光学遮断素子 1 4 0 によって引き起こされる力の損失の量を低減できる。

【 0 1 5 6 】

更に図 5 B に示すように、いくつかの実施形態では、光学アセンブリ 1 0 0 は、第 1 の光学遮断素子 1 4 0 a 及び第 2 の光学遮断素子 1 4 0 b を備えてよい。第 1 の光学遮断素子 1 4 0 a は、第 1 の遮断位置 1 4 1 a においてビーム経路 1 1 1 内に位置決めされ、上記第 2 の光学遮断素子は、第 2 の遮断位置 1 4 1 b においてビーム経路 1 1 1 内に位置決めされる。第 1 の光学遮断素子 1 4 0 a 及び第 2 の光学遮断素子 1 4 0 b は、これらがそれぞれ、ビーム経路 1 1 1 の一部分、例えばビーム経路 1 1 1 の異なる部分を遮断するように、位置決めしてよい。いくつかの実施形態では、第 1 の光学遮断素子 1 4 0 a 及び第 2 の光学遮断素子 1 4 0 b はそれぞれ、パルスレーザビーム 1 1 2 の異なる断面セグメントを遮断してよい。例えば光学遮断素子 1 4 0 a 、 1 4 0 b は、パルスレーザビーム 1 1 2 の断面の対向する側を遮断するよう平行に位置決めされた、各被遮断断面セグメントの断面弦部分を画定してよい。あるいは別の例では、光学遮断素子 1 4 0 a 、 1 4 0 b は、パルスレーザビーム 1 1 2 の断面の対向する側を遮断するよう、円の異なる複数のセクタを画定してよい。

【 0 1 5 7 】

いくつかの実施形態では、第 1 の遮断位置 1 4 1 a 及び第 2 の遮断位置 1 4 1 b は、図 5 B に示すように、光軸 1 0 2 に沿って同一の Z 軸位置に位置決めされる。他の実施形態では、第 1 の遮断位置 1 4 1 a 及び第 2 の遮断位置 1 4 1 b は、光軸 1 0 2 に沿って異なる位置であってよい。更に、第 1 の遮断素子 1 4 0 a 及び第 2 の遮断素子 1 4 0 b は合わせて、パルスレーザビーム 1 1 2 の強度の約 5 % ~ 約 7 5 % を遮断できる。更に、第 1 の遮断素子 1 4 0 a 及び第 2 の遮断素子 1 4 0 b は、パルスレーザビーム 1 1 2 の強度の同一のパーセンテージ、又はパルスレーザビーム 1 1 2 の強度の異なるパーセンテージを遮断できる。

【 0 1 5 8 】

更に、図 5 A 及び 5 B の遮断位置 1 4 1 、 1 4 1 a 、 1 4 1 b はそれぞれ、ビーム源 1 1 0 と非球面光学素子 1 2 0 との間に図示されているが、遮断位置 1 4 1 、 1 4 1 a 、 1 4 1 b は、ビーム源 1 1 0 と透明被加工物 1 6 0 との間の、例えば第 1 のレンズ 1 3 0 と第 2 のレンズ 1 3 2 との間の、例えば共通の焦点面 1 0 5 のいずれの位置であってよいことを理解されたい。理論によって制限されることを望むものではないが、パルスレーザビーム 1 1 2 を複数の（例えば 2 つの）光学遮断素子 1 4 0 で遮断することにより、複数のビームスポットを透明被加工物の撮像表面 1 6 2 上に投射でき、上記複数のビームスポットは、複数のビームスポットが全体として、透明被加工物 1 6 0 において図 2 に示すような非軸対称ビームスポット 1 1 4 を画定するように成形される。

【 0 1 5 9 】

ここで図 6 を参照すると、ビーム源 1 1 0 と透明被加工物 1 6 0 との間に位置決めされた 1 つ以上の光遅延プレート 1 4 2 を備える、光学アセンブリ 1 0 0 の例示的实施形態が図示されている。動作時、光遅延プレート 1 4 2 をビーム経路 1 1 1 内に位置決めすると、パルスレーザビーム 1 1 2 の一部分に光減少遅延を誘発して、パルスレーザビーム 1 1 2 の第 1 の部分を上記光遅延プレートを通るように向けることで上記第 1 のビーム部分の位相差を誘発することによって、パルスレーザビーム 1 1 2 の第 1 のビーム部分を第 2 のビーム部分からデコヒーレント化することにより、図 2 に示す非軸対称ビームスポット 1 1 4 を形成できる。光遅延プレート 1 4 2 は、パルスレーザビーム 1 1 2 の約 5 0 % （例えばパルスレーザビーム 1 1 2 の強度の約 5 0 % ）が光遅延プレート 1 4 2 を横断するよ

うに、ビーム経路 1 1 1 内に位置決めしてよい。理論によって制限されることを望むものではないが、パルスレーザビーム 1 1 2 の半分にわたる光遅延は、透明被加工物 1 6 0 における非軸対称ビームスポット 1 1 4 を一体として画定する 2 つのビームを形成できる。更に、パルスレーザビーム 1 1 2 の断面（例えば非軸対称ビームスポット 1 1 4）は、光遅延プレート 1 4 2 を光軸 1 0 2 の周りで回転させることによって、回転させることができる。更に、光遅延プレート 1 4 2 は、非球面光学素子 1 2 0 の上流又は下流に位置決めしてよい。例えばいくつかの実施形態では、光遅延プレート 1 4 2 は非球面光学素子 1 2 0 と透明被加工物 1 6 0 との間に位置決めされ、他の実施形態では、光遅延プレート 1 4 2 はビーム源 1 1 0 と非球面光学素子 1 2 0 との間に位置決めされる。

【0160】

パルスレーザビーム 1 1 2 の一部分（例えば 1 / 2）を光遅延させることにより、上記ビームの、光遅延プレート 1 4 2 を横断する部分と、上記ビームの、光遅延プレート 1 4 2 を横断しない部分とが、非コヒーレント状態で組み合わせられる場合、単一の非軸対称ビームスポット 1 1 4 を形成できる。非コヒーレント状態を達成するために、パルスレーザビーム 1 1 2 のコヒーレンス長は、光遅延プレート 1 4 2 の光学的厚さより短くしてよい。このような場合、2 つのビームの光遅延は、いずれの正確な量に設定する又は精密に制御する必要がなく、上記光遅延はレーザパルスのコヒーレンス時間より大きいだけでよい。これは、レーザビームのこれら 2 つの部分の間の光位相差をランダム化することと略同等である。ある個別のレーザパルスのコヒーレンス時間 T_c は、当該技術分野で公知の方法を用いて計算でき、数学的には $T_c = \lambda^2 / c \Delta\lambda$ として記述され、ここで λ は放射の波長であり、 c は光の速度であり、 $\Delta\lambda$ は該レーザパルスのスペクトル帯域幅である。光遅延プレート 1 4 2 によって供給される厚さの差は、レーザパルスのコヒーレンス時間より大きくてよく、又はこれと同等のものとして、プレート内のレーザパルスのコヒーレンス長より大きくてよく、上記コヒーレンス長は、数学的に：

$$L_c = \sqrt{2 \ln 2 / \pi n} (\lambda^2 / \Delta\lambda)$$

【0161】

として記述され、ここで n は光遅延プレート 1 4 2 の材料の屈折率である。例えばスペクトルパルス幅が 1 2 . 2 nm の 1 0 3 0 nm レーザに関して、コヒーレンス時間 T_c は約 2 9 0 p s e c となり、ビームをデコヒーレント化するために必要な $n = 1 . 5$ のガラスプレートの厚さは、3 8 マイクロメートル超となる。別の例では、スペクトルパルス幅が 0 . 3 8 nm の 1 0 6 4 nm レーザに関して、コヒーレンス時間は約 2 9 0 p s e c となり、ビームをデコヒーレント化するために必要な $n = 1 . 5$ のガラスプレートの厚さは、1 . 3 mm 超となる。

【0162】

理論によって制限されることを望むものではないが、正確なコヒーレンス時間及びコヒーレンス長は、レーザパルスの正確な時間的及び空間的形状に左右され、従って上述の式は近似値である。よって、上述の式によって計算された値よりわずかに小さくてよい（例えば約 1 0 % 小さい、約 2 5 % 小さい、約 5 0 % 小さい等）厚さで、遅延プレートの十分なデコヒーレント化機能を達成できる。

【0163】

更にいくつかの実施形態では、ビームの 2 つの部分を実験的にデコヒーレント化するのではなく、光遅延プレート 1 4 2 を、特定の光遅延を誘発するように構成してよく、例えば光遅延プレート 1 4 2 は、パルスレーザビーム 1 1 2 の半分にわたって 1 8 0 度の位相差（ここでレーザ波長の 1 つの光周期は 2 π ラジアン）の光位相をカバーすると考えられるため、1 8 0 度である位相差は光周期の 1 / 2 の遅延である）、パルスレーザビーム 1 1 2 の半分にわたって 0 . 8 7 5 π の位相差、及びいくつかの実施形態では、レーザビームの半分にわたって 0 . 5 π の位相差を誘発してよい。単にビームの 2 つの部分の間の正確な光位相遅延を調整す

10

20

30

40

50

ることによって、ビームの強度断面の正確なプロファイルを、ビームの中心付近の２つの等しい高強度スポットというものから、ビームの中心付近の一方のスポットがより高い強度を有し、かつもう一方がより低い強度を有するというものへ、そして他の更に複雑な干渉パターンへと変化させることができる。光遅延プレート１４２が誘発する特定の光位相差は、光遅延プレート１４２の光学的厚さと相関する。しかしながら、このような系が非軸対称ビームスポット１１４を生成するものの、得られるビームスポットは、２つのビーム部分の正確な光経路長に影響されやすく、これは温度及び湿度といった環境変化によって変化し得る。更にこのようなマルチスポットパターンは、複雑な多軸応力集中を有し、これは、割れの形成の制御のために、楕円形コアを有するビームほど有用な応力集中ではない場合がある。

10

【０１６４】

ここで図７Ａ及び７Ｂを参照すると、ビーム源１１０と透明被加工物１６０との間に位置決めされた分割１／４波長板１５０を備える、光学アセンブリ１００の実施形態が図示されている。分割１／４波長板１５０は、第１の速軸１５６ａ及び第１の遅軸１５８ａを有する第１のプレート部分１５２を備える。分割１／４波長板１５０はまた、第２の速軸１５６ｂ及び第２の遅軸１５８ｂを有する第２のプレート部分１５４を備える。更に、第１の速軸１５６ａは第２の速軸１５６ｂに対して垂直であり、第１の遅軸１５８ａは第２の遅軸１５８ｂに対して垂直である。パルスレーザビーム１１２が分割１／４波長板１５０を横断すると、第１の速軸１５６ａ及び第１の遅軸１５８ａを有する第１のプレート部分１５２は、パルスレーザビーム１１２の第１のビーム部分を第１の偏光（例えば特定の水平、垂直又は円偏光）に偏光させ、第２の速軸１５６ｂを有する第２のプレート部分１５４は、パルスレーザビーム１１２の第２のビーム部分を第２の偏光（例えば別の特定の水平、垂直又は円偏光）に偏光させる。第１のビーム部分を第１の偏光に偏光させ、第２のビーム部分を、第２のビーム部分に対して垂直な第２の偏光に偏光させることにより、第１のビーム部分を第２のビーム部分からデコヒーレント化する。

20

【０１６５】

更に、第１の偏光を第２の偏光に対して垂直とすることにより、第１のビーム部分及び第２のビーム部分は分割１／４波長板１５０から下流において非コヒーレント状態で組み合わせられて、図２に示す非軸対称ビームスポット１１４を形成する。理論によって制限されることを望むものではないが、直交する偏光（例えば垂直と水平、右回りの円と左回りの円）を有する２つのパルスレーザビーム部分は干渉せず、それぞれが透明被加工物１６０上に投射された場合、各ビーム部分は非コヒーレント状態で組み合わせられて、合わせて非軸対称ビームスポット１１４（例えば楕円形）を形成する。ある説明的な例として、第１の偏光及び第２の偏光はそれぞれ、約９０°離間して位置決めされたポアンカレ球上の位置を構成し、従ってこれらは直交する。第１のビーム部分と第２のビーム部分との間の非コヒーレント状態の組み合わせは、いずれの２つの直交する偏光で起こり得ることを理解されたい。

30

【０１６６】

図７Ａに示すように、光学アセンブリ１００は、偏光子１４４及び１／４波長板１４６を更に備えてよい。偏光子１４４及び１／４波長板１４６はそれぞれ、ビーム経路１１１内においてビーム源１１０と分割１／４波長板１５０との間に位置決めされ、従ってパルスレーザビーム１１２は、分割１／４波長板１５０を横断する前に偏光子１４４及び１／４波長板１４６を横断する。動作時、偏光子１４４は、１つ以上の特定の變更を、偏光子１４４の横断からフィルタリング（例えば横断を防止）できる。１／４波長板１４６は、パルスレーザビーム１１２を単一の偏光へと偏光させることができ、これによりパルスレーザビーム１１２は、パルスレーザビーム１１２が分割１／４波長板１５０に到達するとき、右回り円偏光又は左回り円偏光といった単一の偏光を含む。更に図７Ａに示すように、分割１／４波長板１５０はビーム経路１１１内において、１／４波長板１４６と透明被加工物１６０との間に位置決めされる。分割１／４波長板１５０は、非球面光学素子１２０の上流又は下流に位置決めしてよい。例えばいくつかの実施形態では、分割１／４波長

40

50

板 1 5 0 は、非球面光学素子 1 2 0 と透明被加工物 1 6 0 との間に位置決めされ、また他の実施形態では、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 はビーム源 1 1 0 と非球面光学素子 1 2 0 との間に位置決めされる。

【 0 1 6 7 】

図 7 A に示す比限定的な例では、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 を、第 1 のレンズ 1 3 0 と第 2 のレンズ 1 3 2 との間のコリメート空間 1 3 4 内に位置決めしてよく、例えば共通の焦点面 1 0 5 に位置決めしてよく、これにより、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 の第 1 のプレート部分 1 5 2 と第 2 のプレート部分 1 5 4 との間の接触位置での相互作用による、パルスレーザビーム 1 1 2 の力の損失の量が最小となる。

【 0 1 6 8 】

分割 1 / 4 波長板 1 5 0 を、2 つのプレート部分（例えば第 1 のプレート部分 1 5 2 及び第 2 のプレート部分 1 5 4 ）を備えるものとして図示しているが、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 の他の実施形態は、いずれの数のプレート部分を備えてよい。上述の遮断素子と同様、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 のこれらの部分は、断面弦部分、又はより好ましくはセクタの形態で作製してよい。これらの実施形態では、第 1 の複数のプレート部分は、第 1 の速軸 1 5 6 a 及び第 1 の遅軸 1 5 8 a を備え、第 2 の複数のプレート部分は、第 2 の速軸 1 5 6 b 及び第 2 の遅軸 1 5 8 b を備える。更に、第 1 の複数のプレート部分は合わせて、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 の約 5 0 % を構成してよく、また第 2 の複数のプレート部分は合わせて、分割 1 / 4 波長板 1 5 0 の残りの 5 0 % を構成してよい。

【 0 1 6 9 】

再び図 1 A ~ 7 B を参照すると、所望の分割線 1 6 5 に沿って欠陥 1 7 2 を含む輪郭線 1 7 0 を形成する方法は、ビーム経路 1 1 1 に沿って配向され、ビーム源 1 1 0 によって出力されたパルスレーザビーム 1 1 2 を、透明被加工物 1 6 0 内へと向けることにより、パルスレーザビーム 1 1 2 の、透明被加工物 1 6 0 内へと向けられた部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成し、上記誘起吸収が透明被加工物 1 6 0 内に欠陥 1 7 2 を生成するステップを含む。例えば、パルスレーザビーム 1 1 2 は、透明被加工物 1 6 0 の損傷閾値を超えるために十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間を備えてよい。いくつかの実施形態では、パルスレーザビーム 1 1 2 を透明被加工物 1 6 0 内へと向ける上記ステップは、パルスレーザビーム 1 1 2 を、ビーム源 1 1 0 による出力から、ビーム伝播方向（例えば Z 軸）に沿って配向されたパルスレーザビーム焦線 1 1 3 へと集束させるステップを含む。透明被加工物 1 6 0 を、パルスレーザビーム 1 1 2 のパルスレーザビーム焦線 1 1 3 に少なくとも部分的に重なるように、ビーム経路 1 1 1 内に位置決めする。このようにしてパルスレーザビーム焦線 1 1 3 は、透明被加工物 1 6 0 内へと向けられる。パルスレーザビーム 1 1 2、例えばパルスレーザビーム焦線 1 1 3 は、透明被加工物 1 6 0 内で誘起吸収を生成することにより、透明被加工物 1 6 0 内に欠陥 1 7 2 を生成する。いくつかの実施形態では、第 1 のレンズ 1 3 0 及び / 又は第 2 のレンズ 1 3 2 がパルスレーザビーム 1 1 2 を集束させてよい。他の実施形態、例えば第 1 のレンズ 1 3 0 及び第 2 のレンズ 1 3 2 を含まない実施形態では、非球面光学素子 1 2 0（例えばアキシコンレンズ）がパルスレーザビーム 1 1 2 を集束させてよい。いくつかの実施形態では、個々の欠陥 1 7 2 を、数百キロヘルツ（即ち 1 秒あたり数十万個の欠陥）の速度で生成できる。

【 0 1 7 0 】

動作時、パルスレーザビーム焦線 1 1 3 の位置は、パルスレーザビーム 1 1 2 を透明被加工物 1 6 0 に対して好適に位置決めする及び / 又は整列させることにより、並びに光学アセンブリ 1 0 0 のパラメータを好適に選択することにより、制御できる。更に、パルスレーザビーム焦線 1 1 3 は、約 0 . 1 mm ~ 約 1 0 0 mm 又は約 0 . 1 mm ~ 約 1 0 mm の長さを有してよい。様々な実施形態は、長さ l が約 0 . 1 mm、約 0 . 2 mm、約 0 . 3 mm、約 0 . 4 mm、約 0 . 5 mm、約 0 . 7 mm、約 1 mm、約 2 mm、約 3 mm、約 4 mm、又は約 5 mm、例えば約 0 . 5 mm ~ 約 5 mm のパルスレーザビーム焦線 1 1 3 を有するように構成してよい。

【 0 1 7 1 】

ここでもまた図1A～7Aを参照すると、所望の分割線165に沿って欠陥172を含む輪郭線170を形成する方法は、透明被加工物160をパルスレーザビーム112に対して並進移動させる（又はパルスレーザビーム112を透明被加工物160に対して、例えば図1A及び2に示す並進移動方向101に並進移動させてもよい）ことによって、欠陥172を有する所望の部分の形状をトレースした輪郭線170を形成するステップを含んでよい。欠陥172は、ガラスの深さ全体を貫通してよい。本明細書で開示される欠陥172は、「孔(hole)」又は「孔状(hole like)」として記載される場合もあるが、一般には空所でなくてよく、本明細書に記載のレーザ加工によって修正された被加工物の部分であることを理解されたい。いくつかの実施形態では、欠陥172は一般に、約5マイクロメートル～約20マイクロメートルの距離だけ互いから離間してよい。例えば、欠陥172の間の好適な間隔は、TF T / ディスプレイ用ガラス組成物に関して、約0.1マイクロメートル～約30マイクロメートル、例えば約5マイクロメートル～約15マイクロメートル、約5マイクロメートル～約12マイクロメートル、約7マイクロメートル～約15マイクロメートル、又は約7マイクロメートル～約12マイクロメートルであってよい。更に、パルスレーザビーム112に対する透明被加工物160の並進移動は、1つ以上の並進移動ステージ190を用いて透明被加工物160及び/又はビーム源110を移動させることによって実施してよい。

【0172】

単一の透明被加工物160の穿孔だけではなく、本プロセスは、ガラスのシートの積層体といった透明被加工物160の積層体に穿孔するためにも使用でき、合計高さが最大数mmのガラス積層体に、単回のレーザパスで完全に穿孔できる。単一のガラス積層体は、例えばCorning code 2318ガラスの1つ以上の層が重ねられたソーダライムガラスの1つ以上の層といった、上記積層体内の様々なガラスタイプで構成できる。ガラス積層体は更に、様々な位置に空隙を有してよい。別の実施形態によると、接着剤等の延性の層をガラス積層体の間に配置してよい。しかしながら、本明細書に記載のパルスレーザプロセスは依然として、このような積層体の上側及び下側両方のガラス層に、単回のパスで完全に穿孔する。

【0173】

更に、透明被加工物160内の輪郭線170の形成に続いて、応力誘発源、例えば機械的源又は熱源を利用して、透明被加工物160を輪郭線170に沿って分割してよい。実施形態によると、熱源、例えば赤外線レーザビームを用いて、熱応力を生成することにより、透明被加工物160を輪郭線170で分割してよい。実施形態では、赤外線レーザを用いて自発的な分割を開始させてよく、続いて分割を機械的に完了させてよい。ガラス内に熱応力を生成するための好適な赤外線レーザは典型的には、ガラスが容易に吸収する波長を有し、典型的には1.2マイクロメートル～13マイクロメートル、例えば4マイクロメートル～12マイクロメートルの波長を有する。二酸化炭素レーザ(「CO₂レーザ」)、一酸化炭素レーザ(「COレーザ」)、固体レーザ、レーザダイオード又はこれらの組み合わせが生成するレーザビーム等の赤外線レーザビームは、透明被加工物160の温度を輪郭線170において又は輪郭線170の付近において迅速に上昇させる、被制御熱源である。この迅速な加熱は、輪郭線170上又は輪郭線170の付近において、透明被加工物160内に圧縮応力を形成し得る。加熱されるガラス表面の面積は、透明被加工物160の全表面積に比べて相対的に小さいため、加熱される領域は比較的迅速に冷却される。結果的な温度勾配は、透明被加工物160内に、輪郭線170に沿って、及び透明被加工物160の厚さを通るように、割れを伝播させるために十分な引張応力を誘発し、これにより、輪郭線170に沿った透明被加工物160の完全な分割が得られる。理論によって束縛されるものではないが、引張応力は、比較的高い局所温度を有する上記被加工物の部分におけるガラスの膨張(即ち密度変化)によって引き起こされ得ると考えられる。

【0174】

以上の説明に鑑みて、所望の分割線に沿った欠陥を含む輪郭線の形成は、非軸対称ビー

10

20

30

40

50

ムスポットを所望の分割線に沿って被加工物上に投射するように成形されたパルスレーザビームを利用して増強できることを理解されたい。

【実施例】

【0175】

実施例 1

実施例 1 は、波長が 532 nm のパルスレーザビームを、ビーム経路と整列された（例えばオフセットのない）非球面光学素子を有する例示的な光学アセンブリへと出力した場合の、モデル化された結果である。パルスレーザビームは対称ガウスビームとして出力され、上記非球面光学素子によって準非回折ビームへと成形される。図 8 A は、パルスレーザビーム焦線（例えば準非回折パルスレーザビーム焦線）の例示的な断面強度プロットを示す。図 8 A に示すように、オフセットがない場合、ビームスポットは半径に関して対称である。図 8 A の断面強度プロットの半値全幅（FWHM）は、3.8 マイクロメートルである。図 8 B は、オフセットさせずに形成された準非回折パルスレーザビームのフーリエ変換面の対数強度プロットを示す。更に図 8 C は、ピーク線焦点位置における、オフセットさせずに形成された準非回折パルスレーザビーム焦線の実験的な近接場顕微鏡写真を示す。

10

【0176】

実施例 2

実施例 2 は、波長が 1064 nm のパルスレーザビームを、ビーム経路に対して X 方向に 20 マイクロメートルのオフセット距離だけオフセットされた非球面光学素子を有する例示的な光学アセンブリへと出力した場合の、モデル化された結果である。パルスレーザビームは非対称ガウスビームとして出力され、上記非球面光学素子によって準非回折ビームへと成形される。図 9 は、非球面光学素子とビーム経路との間のオフセットによって形成された、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の、例示的な断面強度プロットを示す。

20

【0177】

実施例 3

実施例 3 は、波長が 1064 nm のパルスレーザビームを、ビーム経路に対して X 方向に 50 マイクロメートルのオフセット距離だけオフセットされた非球面光学素子を有する例示的な光学アセンブリへと出力した場合の、モデル化された結果である。パルスレーザビームは非対称ガウスビームとして出力され、上記非球面光学素子によって準非回折ビームへと成形される。図 10 は、非球面光学素子とビーム経路との間のオフセットによって形成された、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の、例示的な断面強度プロットを示す。

30

【0178】

実施例 4

実施例 4 は、波長が 1064 nm のパルスレーザビームを、ビーム経路に対して X 方向に 100 マイクロメートルのオフセット距離だけオフセットされた非球面光学素子を有する例示的な光学アセンブリへと出力した場合の、モデル化された結果である。パルスレーザビームは非対称ガウスビームとして出力され、上記非球面光学素子によって準非回折ビームへと成形される。図 11 A は、非球面光学素子とビーム経路との間のオフセットによって形成された、結果的なモデル化された非軸対称パルスレーザビーム焦線の、例示的な断面強度プロットを示す。図 11 B は、パルスレーザビーム焦線の長さに沿った略中央の位置である、最もよく集束する軸方向位置における、図 11 A のモデル化された結果の断面強度プロットの断面を示す。図 11 C は、図 11 B の最もよく集束する軸方向位置から約 200 マイクロメートルだけ変位させた軸方向位置における、図 11 A のモデル化された結果の断面強度プロットの X 及び Y 断面を示す。図 11 C の強度プロットの FWHM は、 7.0×4.5 マイクロメートルであり、これは約 1.6 の非対称性を示す。図 11 D は、100 マイクロメートルのオフセットを用いて形成されたパルスレーザビーム（例えば準非回折パルスレーザビーム）のフーリエ変換面のモデル化された対数強度プロットを

40

50

示す。図 1 1 D に示すように、対数強度プロットは一樣ではない。更に図 1 1 E は、ピーク線状焦点位置における実施例 4 のパルスレーザビーム焦線の実験的な近接場顕微鏡写真を示す。

【 0 1 7 9 】

実施例 5

実施例 5 は、例示的な光学アセンブリが、非球面光学素子としてのアキシコンと、第 1 のレンズと第 2 のレンズとの間に、パルスガウス ベッセルビームの強度の 5 0 % を遮断するように位置決めされた、光学遮断素子とを含む場合の、モデル化された結果である。パルスガウス ベッセルビームの強度の 5 0 % を遮断することにより、上記パルスガウス

ベッセルビームのフーリエ変換に 1 次元のヘビサイドステップ関数を乗算したものと同一の数学的な結果が生成される。2 D 画像空間では、これは、1 次元ヘビサイドステップ関数 $H(x)$ のフーリエ変換で畳み込まれた 2 D ガウス ベッセルビームを生成する。ヘビサイドステップ関数は、 $H(x) = 1/2 (Sgn(x) + 1)$ によって、 Sgn ステップ関数に関連付けられる。フーリエ変換の表は、2 次元において：

【 0 1 8 0 】

【 数 3 2 】

$$\mathfrak{F}_{xy}(Sgn(k_x)) = \frac{-i}{\pi x} \delta(k_y) \quad (32)$$

【 0 1 8 1 】

であることにより：

【 0 1 8 2 】

【 数 3 3 】

$$\mathfrak{F}_{xy}(H(k_x)) = \frac{1}{2} (\delta(x) + \mathfrak{F}_{xy}(Sgn(k_x))) \delta(y) \quad (33)$$

【 0 1 8 3 】

となることを示す。

【 0 1 8 4 】

デルタ関数で畳み込まれたガウス ベッセルビームは、原点でのガウス ベッセルを数学的に記述する。説明のために、図 1 2 A は、デルタ関数で畳み込まれたベッセル ガウスビームの (X Y 平面に沿った) 断面強度プロットを示す。更に図 1 2 B は、 $i/2$ x で畳み込まれたガウス ベッセルビームの (X Y 平面に沿った) 断面強度プロットを示す。更に等式 3 3 は、 Sgn 関数のフーリエ変換でのガウス ベッセルビームの畳み込みを数学的に記述し、これはガウス ベッセルビームの強度の 5 0 % の遮断と数学的に同等である。図 1 2 C は、等式 3 3 で数学的に記述されているようなヘビサイドステップ関数のフーリエ変換で畳み込まれたガウス ベッセルビームの (X Y 平面に沿った) 断面強度プロットを示す。図 1 2 C の (X Y 平面に沿った) 断面強度プロットはまた、ビーム経路の 5 0 % の遮断によって形成されたパルスレーザビーム焦線の結果的な断面強度プロットである。従って結果として得られる非軸対称パルスレーザビーム焦線の強度のスポット又はピークの間隔は、アキシコン角度及び望遠鏡倍率 (例えばレンズ 1 3 0 の焦点距離に対するレンズ 1 3 2 の焦点距離の比によって生成される倍率) によって左右され、光学系の傾き、オフセット又は収差によってではない。更に図 1 2 D は、図 1 2 A ~ 1 2 C の強度プロットの X 軸断面をグラフで示し、図 1 2 E は、例示的な Sgn ステップ関数のフーリエ変換をグラフで示す。

【 0 1 8 5 】

図 1 2 F は、パルスレーザビームがアキシコンを横断し、パルスレーザビームのビーム強度の 5 0 % が、ビーム経路に沿って第 1 のレンズと第 2 のレンズとの間の中央に位置決めされた光学遮断素子によって遮断された場合に形成される、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の、断面強度プロットを示す。図 1 2 G は、図 1 2 F の強度プロットの X

及びY断面をグラフで示す。図12Hは、ビーム源に位置決めされた（例えばZ = 0の位置に位置決めされた）光学遮断素子によってビーム強度の50%が遮断された場合の、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面強度を示す。図12Iは、図12Hの強度プロットのX及びY断面をグラフで示す。図12F ~ 12Iに示すように、ビーム経路に沿った光学遮断素子のZ軸位置は、結果として得られるパルスレーザビーム焦線に対して最小の影響しか有しない。これは、光学遮断素子がアキシコンより前に位置するか、又はアキシコンより後ろ、例えば2つのレンズ130及び132の間のコリメート空間134内に位置するかにかかわらず、光学遮断素子が有効となり得ることを示している。従って、光学遮断素子を用いて非軸対称パルスレーザビーム焦線を生成することが好ましくなり得る。

10

【0186】

実施例6

実施例6は、 $1/e^2$ 直径が600マイクロメートルであるパルスレーザビームの断面セグメントを段階的に遮断した場合の、モデル化された結果である。特に実施例6は、パルスレーザビームの異なる複数の断面セグメント（それぞれについて最大遮断幅が増大している）を遮断することを含み、用語「最大遮断幅（maximum blocked width）」は、遮断される断面セグメントの断面弦部分の midpoint から垂直に測定した、パルスレーザビームの遮断される部分（例えばビーム経路の遮断される部分）の幅として定義される。図13Aは、パルスレーザビームを遮断せずに結果として得られるパルスレーザビーム焦線のX-Y平面における例示的な強度プロットを示す。図13Aに示すように、遮断が実施されない場合、断面パルスレーザビーム焦線は軸対称である。図13B ~ 13Kは、最大遮断幅が増大する複数の遮断される断面セグメントを有する、X-Y平面における例示的な強度プロットを示す。例えば図13Bの最大遮断幅は50マイクロメートルであり、図13Cの最大遮断幅は100マイクロメートルであり、図13Dの最大遮断幅は150マイクロメートルであり、図13Eの最大遮断幅は200マイクロメートルであり、図13Fの最大遮断幅は250マイクロメートルであり、図13Gの最大遮断幅は300マイクロメートルであり（例えばパルスレーザビームの半分を遮断する）、図13Hの最大遮断幅は350マイクロメートルであり、図13Iの最大遮断幅は400マイクロメートルであり、図13Jの最大遮断幅は450マイクロメートルであり、図13Kの最大遮断幅は500マイクロメートルである。

20

30

【0187】

実施例7

実施例7では、波長が532nmの準非回折パルスレーザビームを、上記パルスレーザビームの50%を遮断するよう位置決めされた光学遮断素子を有する例示的な光学アセンブリ内へと出力する。図14は、実施例7のパルスレーザビームの50%を遮断することによって形成された非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面の近接場顕微鏡写真を示す。

【0188】

実施例8

実施例8では、波長が532nmの準非回折パルスレーザビームを、上記パルスレーザビームの75%を遮断するよう位置決めされた光学遮断素子を有する例示的な光学アセンブリ内へと出力する。図15は、実施例8のパルスレーザビームの75%を遮断することによって形成された非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面の近接場顕微鏡写真を示す。実施例8の非軸対称パルスレーザビーム焦線は、実施例7の非軸対称パルスレーザビーム焦線より大きなアスペクト比を有することに留意されたい。

40

【0189】

実施例9

実施例9では、光学遮断素子は、上記光学遮断素子が断面パルスレーザビームの1/4のセクタを遮断する（従ってパルスレーザビームの強度の25%を遮断する）ように、例示的な光学アセンブリ内に位置決めされる。図16は、光軸の周り（例えばパルスレーザビームの伝播方向の周り）で上記光学遮断素子を段階的に45°回転させた場合に上記光

50

学遮断素子によって形成される、結果として得られる例示的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面を示す。

【 0 1 9 0 】

実施例 1 0

実施例 1 0 は、第 1 のレンズと第 2 のレンズとの間の共通の焦点面において 6 0 0 マイクロメートルの $1 / e^2$ 直径を有するパルスレーザビームの 2 つの断面セグメントの、2 つの光学遮断素子を用いた遮断をモデル化したものであり、上記 2 つの光学遮断素子は、それぞれ平行な弦において終端し、かつ等しい（実施例 6 に関して既に定義された）最大遮断幅を有する、パルスレーザビームの断面弦部分を遮断するように、配向される。図 1 7 A は、パルスレーザビームを遮断せずに結果として得られるパルスレーザビーム焦線の X-Y 平面における例示的な強度プロットを示す。図 1 7 A に示すように、遮断が実施されない場合、パルスレーザビーム焦線の断面は軸対称である。図 1 7 B ~ 1 7 F は、最大遮断幅が増大し、かつ最大遮断幅が等しい、2 つの平行な遮断される断面セグメントを有する、X-Y 平面における例示的な強度プロットを示す。例えば図 1 7 B の各最大遮断幅は 5 0 マイクロメートルであり、図 1 7 C の各最大遮断幅は 1 0 0 マイクロメートルであり、図 1 7 D の各最大遮断幅は 1 5 0 マイクロメートルであり、図 1 7 E の各最大遮断幅は 2 0 0 マイクロメートルであり、図 1 7 F の各最大遮断幅は 2 5 0 マイクロメートルである。なお、図 1 7 A ~ 1 7 F のパルスレーザビーム焦線断面は、複数の干渉縞を示し、レーザエネルギーの大半は、図 1 7 B に関してでさえ、パルスレーザビームの中心コアスポットの外側に投入される。これは、中心スポットが比較的低い強度を有し、透明被加工物の切断を促進するためには、光学系の入力においてより多くの力が必要とされ得ることを意味する。図 1 7 B ~ 1 7 F の中心でない干渉縞に存在する多量のエネルギーはまた、透明被加工物において応力を集中させない異なる複数の応力プロファイルを生成することになり、これは光エネルギーのほとんどが中心の楕円に内包される場合も同様である。

【 0 1 9 1 】

実施例 1 1

実施例 1 1 は、実施例 1 0 のモデル化された結果の実験による確認であり、これは 6 3 2 nm の HeNe レーザを含む例示的な光学アセンブリを用いて実施されている。実施例 1 1 では、2 つの光学遮断素子が、2 つのレンズ 1 3 0 及び 1 3 2 の間のコリメート空間 1 3 4 内のパルスレーザビームの断面セグメントをそれぞれ遮断するように、例示的な光学アセンブリ内に位置決めされており、ここでコリメートされるビームのリングの直径は約 2 2 mm であり、各光学遮断素子が形成する断面弦部分は、約 9 mm 離間して平行に位置決めされた弦において終端する。図 1 8 は、光軸の周り（例えばパルスレーザビームの伝播方向の周り）で上記例示的な光学遮断素子を段階的に 4 5 ° 回転させた場合に各上記光学遮断素子によって形成される、結果として得られる例示的な（それぞれ複数のビームスポットを有する）非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面を示す。

【 0 1 9 2 】

実施例 1 2

実施例 1 2 では、光学遮断素子を例示的な光学アセンブリ内に位置決めし、上記例示的な光学アセンブリは、パルスレーザビームの光経路に対してオフセットされた非球面光学素子も含む。例えば図 1 9 A は、パルスレーザビームが、ビーム経路から 5 0 マイクロメートルだけオフセットされたアキシコンと、非オフセット系においてパルスレーザビームの 5 0 % を遮断するよう位置決めされたハーフアパーチャ光学遮断素子とを横断した後の、パルスレーザビームの断面画像を示す。図 1 9 B は、図 1 9 A に示す遮断及びシフト構成によって形成された結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の、例示的な断面強度プロットを示す。

【 0 1 9 3 】

実施例 1 3

実施例 1 3 では、ある光遅延を誘発する光遅延プレートをビーム経路内に位置決めすることにより、パルスレーザビームの 5 0 % が上記光遅延プレートを横断し、ある

光遅延を受ける。図 20 A は、パルスレーザビームの 50 % が だけ光遅延することによって形成される、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面強度プロットを示す。図 20 B は、図 20 A の断面強度プロットの断面を示す。

【 0 1 9 4 】

実施例 1 4

実施例 1 4 では、0.875 である光遅延を誘発する光遅延プレートをビーム経路内に位置決めすることにより、パルスレーザビームの 50 % が上記光遅延プレートを横断し、である光遅延を受ける。図 21 A は、パルスレーザビームの 50 % が 0.875 だけ光遅延することによって形成される、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面強度プロットを示す。図 21 B は、図 21 A の断面強度プロットの断面を示す。

10

実施例 1 5

実施例 1 5 では、0.5 である光遅延を誘発する光遅延プレートをビーム経路内に位置決めすることにより、パルスレーザビームの 50 % が上記光遅延プレートを横断し、である光遅延を受ける。図 22 A は、パルスレーザビームの 50 % が 0.5 だけ光遅延することによって形成される、結果的な非軸対称パルスレーザビーム焦線の断面強度プロットを示す。図 22 B は、図 22 A の断面強度プロットの断面を示す。

【 0 1 9 5 】

実施例 1 6

実施例 1 6 では、上述のような分割 1 / 4 波長板を、HeNe レーザが出力するレーザビームのビーム経路内に、HeNe レーザビームの第 1 のビーム部分が第 1 の偏光へと偏光され、HeNe レーザビームの第 2 のビーム部分が第 1 の偏光に対して垂直な第 2 の偏光へと偏光されるように、位置決めしてよい。図 23 は、光軸の周り（例えばパルスレーザビームの伝播方向の周り）で上記例示的な分割 1 / 4 波長板を段階的に 45 ° 回転させた場合に上記分割 1 / 4 波長板によって形成される、結果として得られる例示的な非軸対称パルスレーザビーム焦線を示す。

20

【 0 1 9 6 】

実施例 1 7

この実施例は、偏光法を用いて非対称準非回折ビームを生成するための光学系を説明する。この実施例の概要は以下の通りである。

【 0 1 9 7 】

概要：

A. 使用した系

光学系及び距離

レーザビーム

分割 1 / 4 波長板 (SQWP)

B. 微小穿孔及び割れ方向制御の例示的な結果

C. ビームが非対称 QNDB であるかどうかを確立するためのビーム測定方法

走査した LFC の説明

ビームプロファイルの実験的測定

D. 結果

以下の実験的測定：

$W_{0,eff}$

レイリー範囲（強度法を用いて）

本出願の等式 31 を満たす F_D

モデル化された結果

レイリー範囲（ビーム分散法を用いて）

40

【 0 1 9 8 】

使用したシステム。図 25 に示す光学系は全体として、ビームの非対称性を破壊するために偏光法を用いる、非対称準非回折ビームを生成するために使用できる系を概説する。この光学系は、ガラス等の基板の切断に好適である。

50

【 0 1 9 9 】

光学系 / レーザビーム。代表的なレーザは、パルス幅が 9 p s e c の 1 0 6 4 n m パルスレーザであり、これは、直線偏光（例えば C o h e r e n t 製の H y p e r R a p i d 5 0 ）によってガウス型出力ビームを提供する。望遠鏡を用いて、ビームがアキシコンに入る前に、ビームを $1 / e^2$ 直径が 5 . 5 m m となるようにコリメートする。ビームがアキシコンに入射する前に、ビームに $1 / 4$ 波長板を通過させて該ビームを円偏光する。 $1 / 4$ 波長板（Q W P）からアキシコン、分割 $1 / 4$ 波長板（S Q W P）及びレンズを通して延在する全光学系は、入力されたガウスビームを非対称準非回折ビーム（Q N D B）に変換するよう設計される。アキシコン及びレンズはそれら自体で、場合によってはガウス ベッセルビームとして知られるものを形成し、これは軸対称強度分布を有する Q N D B である。 $1 / 4$ 波長板は S Q W P と組み合わせられて、系の回転対称性を破壊する役割を果たし、これらは非対称 Q N D B の生成を可能にする素子である。

10

【 0 2 0 0 】

図 2 5 に示した比較的一般的な系とは対照的に、本文書中でこれ以降に使用される特定の系では、2 つの $f = 1 5 0 \text{ mm}$ のレンズを用いて、アキシコンの後ろにおいて光をコリメートする。この系は図 2 6 に示されている。2 つの $f = 1 5 0 \text{ mm}$ のレンズは対となって機能し、第 1 のレンズは主に（アキシコン焦点に近い位置にあるため光学的な力はほとんどない）フィールドレンズとして機能し、またこれらの間に距離を与えることにより、これらは、アキシコンからおおよそ 1 焦点距離だけ離して配置された、焦点距離が 1 4 0 m m の単一のレンズとしての正味の効果を生成する。レンズをこのように正確に選択することは重要ではない。多くの異なる焦点距離及びスタイルのレンズを使用できる。1 つ以上のコリメートレンズの重要な点は、これらに対物レンズと組み合わせると、アキシコンのすぐ後ろに形成される焦線を光学的に中継する（直径、長さ）ことにより、最後の集束レンズの後ろに上記焦線の拡大された（又は縮小された）画像を形成する、望遠鏡として機能することである。これにより、アキシコンを変更する必要なく、焦線のサイズをより柔軟に拡大縮小でき、また焦線を、最後の光学系から比較的大きな物理的隔たり又は動作距離を有する場所に投射でき、これはアキシコンの直近に焦線を有する生産環境において極めて便利である。

20

【 0 2 0 1 】

この実施例で示されている設定は、全体のパッケージサイズを比較的短く保ちながら、コリメートレンズの長い有効焦点距離を実現できるように選択されている。これが、2 つのコリメートレンズが近接した、第 1 のレンズが「フィールドレンズ」として機能する構成を用いた理由である。この具体的なコリメートレンズの選択は、Q N D B 又は非対称 Q N D B の作製には必要ない。単一のコリメートレンズ、又は他の焦点距離を有するレンズを用いてもよい。

30

【 0 2 0 2 】

ビームは S Q W P に入る際に環へと概ねコリメートされ、この S Q W P は、本明細書に記載されているような偏光の変更によってビームの対称性を破壊する役割を果たす。S Q W P は系の光軸の周りで回転することによって、非対称な集束スポットの好ましい方位角的配向を変更できる。1 つの円形波長板の 2 つの半体を一体に取り付けて構成される S Q W P の場合、形成される非対称スポットの長軸は、S Q W P 内の分割線に対して垂直となる。S Q W P の回転は電動化でき、配向の角度は、基板の所望の切断経路方向に従うように同期させることができる。

40

【 0 2 0 3 】

$f = 3 0 \text{ mm}$ の複レンズを図 2 6 に示されている系において使用することにより、上記環をベッセル様ビームへと集束させるが、これは、S Q W P（2 つの別個の片に分割され、そのうちの一方が反転されている、 $1 / 4$ 波長板）の効果によって、楕円形断面を有するように作製される。

【 0 2 0 4 】

本実施形態で使用される S Q W P は、非対称 Q N D B の生成において重要である。S Q

50

WPは、レーザビームの2つのセクションの、偏光をベースとしたデコヒーレント化をもたらす。SQWPは既に図7bに図示されているが、図23に更に明確に図示されている。SQWPは1/4波長板の2つのセクションからなり、これらのセクションは、各セクションの光軸が、SQWPの他方のセクションの光軸に対して垂直となるように、組み付けられる。円偏光された光がSQWPに入射すると、SQWPの各部分が、各部分を通して光を、他方の部分からの偏光に対して常に垂直となる偏光へと変換する。例えば第1の部分が放出する光は直線状かつ垂直であってよく、第2の部分が放出する光は直線状かつ水平であってよい。あるいは第1の部分が放出する光は右回りの円形であってよく、ここで第2の部分が放出する光は左回りの円形である。2つの直交偏光されたビーム部分を組み合わせる場合、これらは決して干渉しない。このデコヒーレント化により、ビームの2つの部分の独立した挙動が実現され、従ってQND Bの対称性が破壊される。ビーム部分がコヒーレント状態で組み合わせられると、強い干渉効果が発生し、これらの干渉効果が非対称QND Bの拡張されたレイリー範囲を台無しにしてしまい、干渉によって生成されたピーク及び谷が存在してしまうことになる。SQWP法の重要な特徴は、SQWPの全ての可能な回転配向において、円偏光された光がSQWPに入射すると仮定した場合、2つの部分から出た光の直交性が保証されることである。

10

【0205】

図27は、SQWP、及びSQWPを構築するための方法を示す。2つのセクションは、左側の（斜線が引かれた）半体が速軸を有し、これが右側の半体（この画像の白いセクション）の速軸に対して垂直となるように、組み付けられる。SQWPは2つの均等な半体である必要はない。しかしながら、2つのセクションの光軸の直交性は重要である。

20

【0206】

図28は、ビームをデコヒーレント化するための偏光法を用いた非対称QND Bの生成を概略図で示す。基本的な機構は、以下の通りである：

- ・直線偏光された光が1/4波長板に入射する。

【0207】

- ・アキシコンが焦線を形成する。

【0208】

- ・1つ以上のコリメートレンズが光のリング又は環を生成する。

【0209】

- ・上記環がSQWPを通過する。

30

【0210】

・集束レンズが光を再集束させて、焦線又はQND Bを形成する。QND Bは非対称（又は楕円形）であるが、これは、SQWPがビームの2つの直交偏光された部分を生成し、これらはもはやコヒーレント状態で組み合わせることができないためである。

【0211】

30mm複レンズの後ろでの、図26に示されている系におけるビームの開口数（NA）は、およそ0.37である。これは、ビームの短軸（又は最小断面）にわたる予想スポットサイズが約2マイクロメートルであることを意味する。ある集束ビームに関する予想スポットサイズは、該ビームのNAの関数であり、以下の式：

40

$$d = \frac{2.405\lambda_0}{2\pi N A n_0}$$

【0212】

によって与えられ、ここでdはスポット直径であり、 λ_0 は波長であり、 n_0 は媒体の屈折率である。即ちスポットサイズは、波長、NA、及びビーム形状に関連する定数の関数である。

【0213】

50

微小穿孔及び割れ方向制御の例示的な結果。図29は、図26の光学系を用いて行われた、微小穿孔及び割れ制御の例示的な画像を示す。SQWP光学系を用いて作製された、イオン交換されていないCorning Code 2318ガラス内の、微小穿孔された孔が示されている。各画像において、孔の「十字(cross)」が形成されており、これはステージ/レーザビームが垂直(y)方向及び水平(x)方向に移動していることを示す。各画像において、ステージの運動のx又はy方向とは独立した、偏向した割れ方向を確認でき、この割れ方向は赤色の矢印で強調されている。各画像間を進んで行くと、SQWPの分割は、水平(x)方向に対して平行に配向されて始まり、これにより、左上の画像に示されている略垂直(y)な割れを伴う微小穿孔を作製し、続いてSQWPは、後続の複数の画像においてそれぞれ45°ずつ段階的に回転される。矢印は、各画像の偏向した割れの、観察された方向を示す。

10

【0214】

図30は、4つの異なるSQWP回転角度(0°、45°、90°、135°)において作製された微小穿孔ラインによる星型パターンを示す。各ラインを作製するために、SQWPを異なる回転角度に設定することにより、偏向した割れ方向がステージの運動方向に対して平行となるように制御した。注目すべきは、個々の微小穿孔間の割れの伝播が、意図されている方向に正確に従っていることである。

【0215】

ビーム測定方法。準非回折ビームのプロファイルの測定は、 $NA = 0.8$ の、前方に60×の顕微鏡対物レンズを有するCCDカメラを用いて実施した。

20

【0216】

上記顕微鏡対物レンズは、焦線の断面を拡大してCCDカメラ上に結像させる役割を果たした。

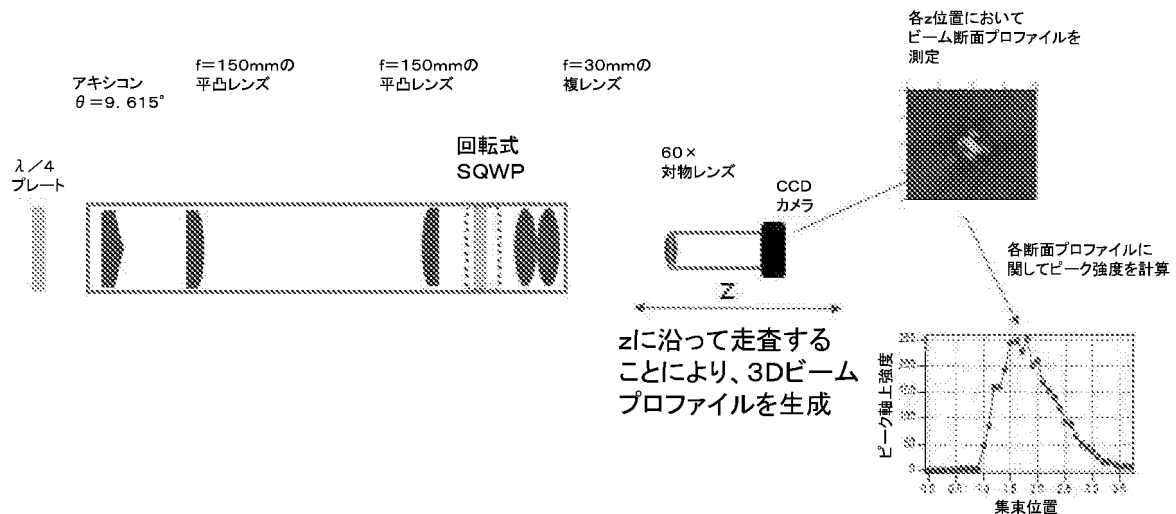
【0217】

この倍率は、各カメラピクセルが、焦線の所与の断面平面におけるわずか ~ 0.027 マイクロメートルのサイズに対応するような倍率であり、これによりマイクロメートルスケールのビーム断面でさえ、高い忠実度で部分解像できる。

【0218】

次に、上記顕微鏡対物レンズ及びCCDカメラで、ビームの光軸に沿って走査することにより、ビームの断面プロファイルをzの関数としてキャプチャする。

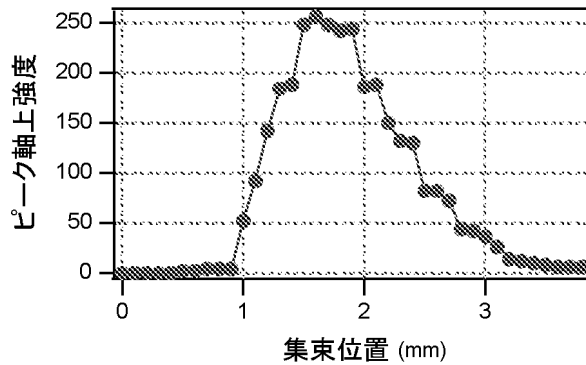
30



40

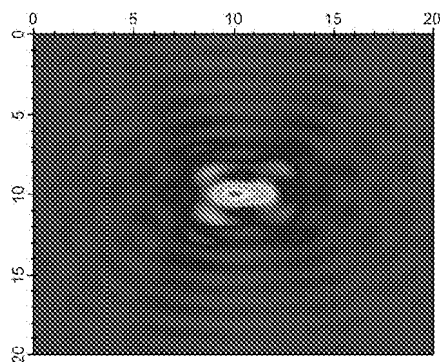
【0219】

右側の2つのプロットが何であるのかについての詳細な説明に関しては、以下の議論を参照されたい。



10

【 0 2 2 0 】



20

【 0 2 2 1 】

右側のプロットは、CCDカメラを用いて得られた、1つの所与の z 位置（光軸に沿った位置）に関するビーム断面の画像である。

【 0 2 2 2 】

色は光の強度を示しており、赤色が最も高い強度であり、紫色が最も低い強度である。 x/y のスケールの単位はマイクロメートルである。これは、スポットが水平（ x ）方向に沿って伸長した非対称ビームを示す。

30

【 0 2 2 3 】

左側の画像は、一連の z 位置（光軸に沿った位置）に関する、各断面画像におけるピーク強度のプロットである。強度の単位は、カメラの各ピクセルで測定したアナログ デジタルコンバータのビット数であり、これらの画像は8ビットCCDカメラで取得されているため、最大ピクセル強度は255である。

【 0 2 2 4 】

以下の2つの例では、上述の光学系を用いて非対称QND Bを生成し、また上述のCCDカメラシステムを用いて、得られた光ビームを特性決定した。

【 0 2 2 5 】

いずれの場合においても、SQWPの配向をこれら2つの場合の間で45°だけ回転させたことを除いて、光学系は同一である。

40

【 0 2 2 6 】

以下に F_D を決定するための手順を概説する：

1) ビーム強度 $I(x, y)$ プロファイルを、光軸に沿った一連の複数の位置に関して測定する。

【 0 2 2 7 】

a. これは、この測定が、ビーム強度が z の関数として最大に到達して、この z 位置の両側において上記最大レベルの1/2未満まで下降する範囲を包含するように、好適な z 位置の範囲にわたって実施された。

【 0 2 2 8 】

50

2) ビームのレイリー範囲を測定する。

【0229】

a. 上記画像から、上記ビームが最大強度からピーク強度の1/2まで下降するのにかかるz距離を測定する。

【0230】

3) ビームの $W_{o, eff}$ を計算する。

【0231】

a. これを、ビームのウエストのz位置(z軸上の最大強度位置)において測定されたビームプロファイル(画像)を用いて評価した。

【0232】

b. ビームプロファイルの長軸及び短軸の両方に関して、 W_o (ビーム強度がそのピークの $1/e^2$ まで下降するための径方向距離)を測定する。 $W_{o, eff}$ はこれらのうちの小さい方である。

【0233】

c. この測定の一部として、ビームがアスペクト比 $= W_{o, max} / W_{o, min} > 1.1$ を有するかどうかを実証することにより、ビームが非対称であることを確認することもできる。

【0234】

4) 測定したレイリー範囲を、 $W_{o, eff}$ のみから予測されたレイリー範囲と比較する。

【0235】

a. $F_D = Z_{Rx, min} / (W_{o, eff}^2)$ を評価する。

【0236】

b. これが > 10 である場合、QND Bが得られる。

【0237】

結果

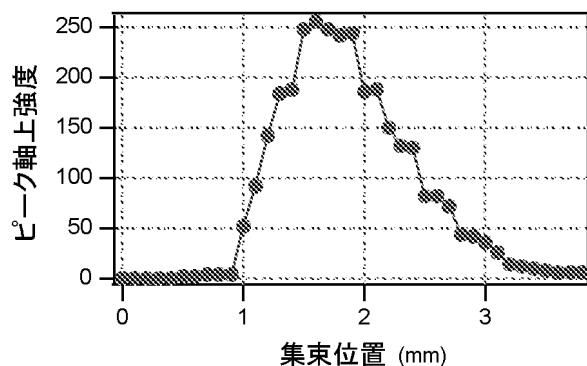
実験的に製造された非対称QND Bに対して作業を行った例

非対称性及び F_D の計算：

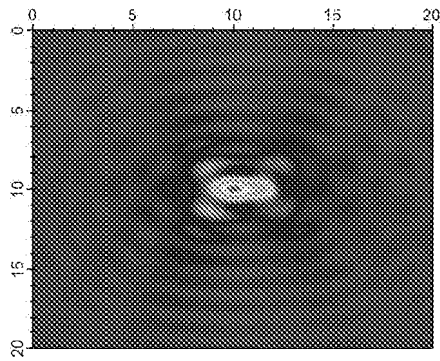
例1) 「-33」ファイル

= 1.064マイクロメートル

13-33 楕円の長軸がx軸上に整列されていることに留意する。



【0238】



10

【 0 2 3 9 】

焦線の F W H M = 1 . 2 3 m m (~ 2 × レイリー範囲) :

レイリー範囲の決定

レイリー範囲は、ビームがピーク値からそのピーク値の 1 / 2 まで減少する最短の距離である。

【 0 2 4 0 】

この場合、上記最短の距離は、 $z = 1 . 6 \text{ mm}$ におけるピークから、より負の方向の z へと移動しており、おおよそ $z = 1 . 1 7 \text{ mm}$ においてピーク強度の 1 / 2 に到達する。

20

【 0 2 4 1 】

これにより、1 / 2 強度点までの距離が 0 . 4 3 m m として与えられる。

【 0 2 4 2 】

正の z 方向に移動する 1 / 2 強度点を探索する場合、交点はおおよそ $z = 2 . 4 0 \text{ m}$ の位置である。

【 0 2 4 3 】

これにより、1 / 2 強度点までの距離が 0 . 8 0 m m として与えられる。

【 0 2 4 4 】

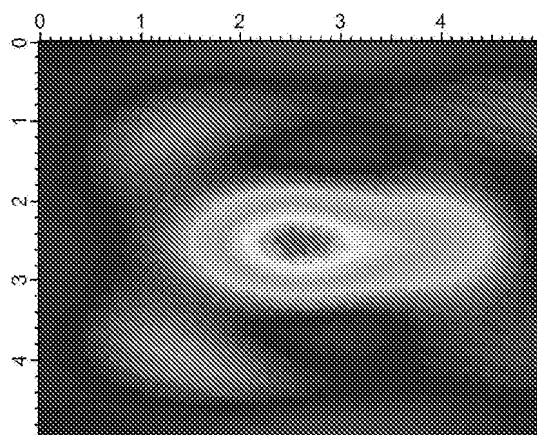
次に上述の 2 つの距離のうち最小のものを採用して、レイリー範囲を得る。

【 0 2 4 5 】

30

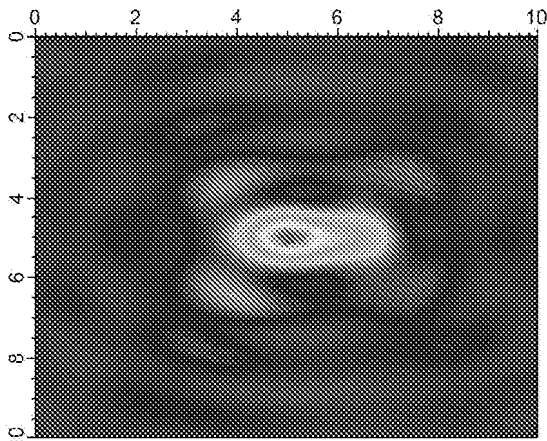
$$Z_{R x, \min} = 0 . 4 3 \text{ mm}$$

$$Z_{R y, \min} = 0 . 4 3 \text{ mm} \text{ (強度法を用いる場合、} x \text{ 及び } y \text{ は同一である)}$$

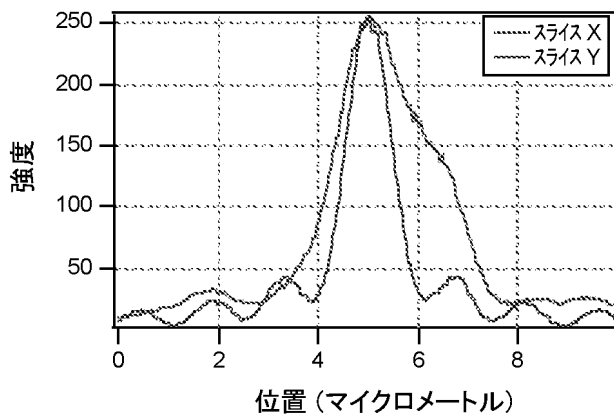


40

【 0 2 4 6 】



【 0 2 4 7 】



【 0 2 4 8 】

上記プロットの2つの（赤色、青色の）トレースは、1つ前の色付きプロットの1次元スライスである。

【 0 2 4 9 】

分析される断面プロットは、光軸に沿った強度がそのピークにあった、 $z = \sim 1.6$ mmにおけるものである。

【 0 2 5 0 】

赤色のトレース（スライス X）は、2 d 断面のピーク強度ピクセルを通して描画されたピクセル強度の水平断面である。

【 0 2 5 1 】

青色のトレース（スライス Y）は、2 d 断面のピーク強度ピクセルを通して描画されたピクセル強度の垂直断面である。

【 0 2 5 2 】

ここで x 及び y 方向のスポット半径を計算する：

X スライスを調べる：

$$W_{o, \min} = 4.995 - 4.06 = 0.94 \text{ マイクロメートル}$$

$$W_{o, \max} = 5.96 - 4.995 = 0.96 \text{ マイクロメートル}$$

$$\text{X 方向における直径} = 1.90 \text{ マイクロメートル} (1/e^2 \text{ 強度点})$$

$$W_{o, \min} = 0.94 \text{ マイクロメートル}$$

Y スライスを調べる：

$$W_{o, \min} = 4.995 - 3.33 = 1.66 \text{ マイクロメートル}$$

$$W_{o, \max} = 7.39 - 4.995 = 2.40 \text{ マイクロメートル}$$

$$\text{Y 方向における直径} = 4.06 \text{ マイクロメートル} (1/e^2 \text{ 強度点})$$

$$W_{o, \max} = 1.66 \text{ マイクロメートル}$$

ここで $W_{o, \text{eff}}$ を計算する：

10

20

30

40

50

$W_{o,eff}$ = 強度が最大値の $1/e^2$ まで下降する、いずれの方向 (x 又は y) における最短の距離

$$W_{o,eff} = 0.94 \text{ マイクロメートル}$$

次にアスペクト比を計算する：

$$\text{アスペクト比} = W_{o,max} / W_{o,min} = 1.66 / 0.94 = 1.76$$

ビームは非対称であり、アスペクト比は > 1.1 である。

【0253】

F_D の決定：

$$\text{測定された最小レイリー範囲} = 0.43 \text{ mm} = 430 \text{ マイクロメートル}$$

$$Z_{Rx,min} = 430 \text{ マイクロメートル}$$

$W_{o,eff} = 0.94 \text{ マイクロメートル}$ (強度が $1/e^2$ まで減少する最短の径方向距離を用いて)

$$W_{o,eff}^2 / 2 = 2.61 \text{ マイクロメートル}$$

$$F_D = Z_{Rx,min} / (W_{o,eff}^2 / 2) = 430 \text{ マイクロメートル} / 2.61 \text{ マイクロメートル} = 165$$

$F_D > 10$ であるため、これは準非回折ビームである。

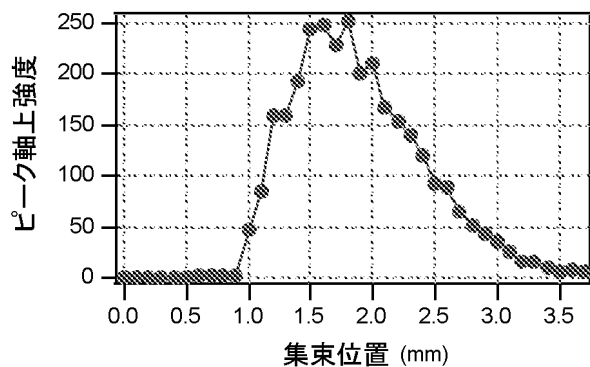
【0254】

及び、

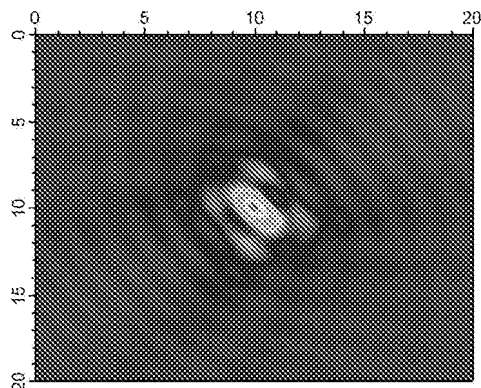
例 1) 「-39」ファイル

$$= 1.064 \text{ マイクロメートル}$$

13 - 39 楕円の長軸が x 軸に対して 45° で整列されていることに留意する。



【0255】



【0256】

焦線の FWHM = 1.21 mm ($\sim 2 \times$ レイリー範囲)

レイリー範囲の決定

レイリー範囲は、ビームがピーク値からそのピーク値の $1/2$ まで減少する最短の距離である。

【0257】

この場合、上記最短の距離は、 $z = 1.8 \text{ mm}$ におけるピークから、より負の方向の

10

20

30

40

50

z へと移動しており、おおよそ $z = 1.16 \text{ mm}$ においてピーク強度の $1/2$ に到達する。

【0258】

これにより、 $1/2$ 強度点までの距離が 0.64 mm として与えられる。

【0259】

正の z 方向に移動する $1/2$ 強度点を探索する場合、交点はおおよそ $z = 2.37 \text{ m}$ の位置である。

【0260】

これにより、 $1/2$ 強度点までの距離が 0.57 mm として与えられる。

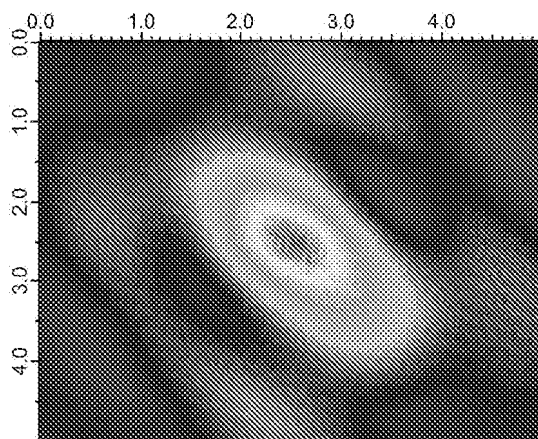
【0261】

上述の2つの距離のうち最小のものを採用して、 x 次元のレイリー範囲を得る。

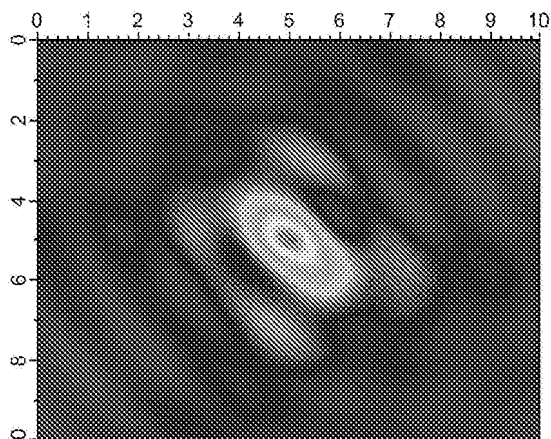
【0262】

$$Z_{R x, \min} = 0.57 \text{ mm}$$

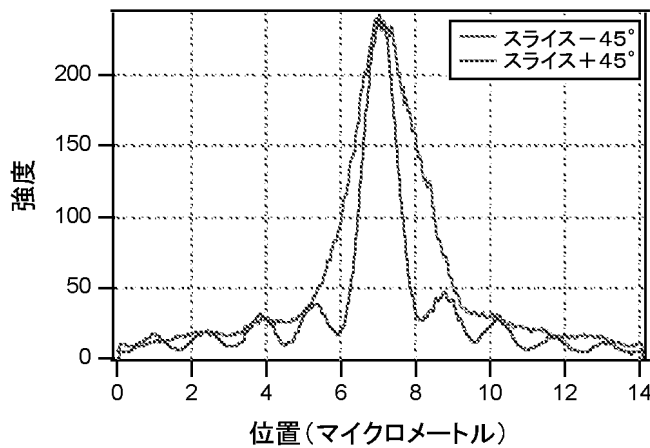
$$Z_{R y, \min} = 0.57 \text{ mm} \text{ (強度法を用いる場合、} x \text{ 及び } y \text{ は同一である)}$$



【0263】



【0264】



10

【 0 2 6 5 】

上記プロットの2つの(赤色、青色の)トレースは、1つ前の色付きプロットの1次元スライスである。

【 0 2 6 6 】

分析される断面プロットは、光軸に沿った強度がそのピークにあった、 $z \sim 1.8$ mmにおけるものである。赤色のトレース(スライス - 45°)は、2d断面のピーク強度ピクセルを通して描画されたピクセル強度の - 45°断面(2Dプロットの左下から右

20

【 0 2 6 7 】

青色のトレース(スライス + 45°)は、2d断面のピーク強度ピクセルを通して描画されたピクセル強度の + 45°断面(2Dプロットの左上から右下への横断)である。

【 0 2 6 8 】

ここで - 45° 及び + 45° 方向のスポット半径を計算する：

- 45° スライスを調べる：

$$W_{o, \min} = 7.07 - 4.96 = 2.11 \text{ マイクロメートル}$$

$$W_{o, \max} = 9.40 - 7.07 = 2.33 \text{ マイクロメートル}$$

$$\text{- 45° 方向における直径} = 4.44 \text{ マイクロメートル} (1/e^2 \text{ 強度点})$$

30

$$W_{o, \min} = 2.11 \text{ マイクロメートル}$$

+ 45° スライスを調べる：

$$W_{o, \min} = 7.05 - 6.12 = 0.93 \text{ マイクロメートル}$$

$$W_{o, \max} = 7.96 - 7.05 = 0.91 \text{ マイクロメートル}$$

$$\text{+ 45° 方向における直径} = 1.84 \text{ マイクロメートル} (1/e^2 \text{ 強度点})$$

$$W_{o, \max} = 0.91 \text{ マイクロメートル}$$

ここで $W_{o, \text{eff}}$ を計算する：

$W_{o, \text{eff}}$ = 強度が最大値の $1/e^2$ まで下降する、いずれの方向(x又はy)における最短の距離

40

$$W_{o, \text{eff}} = 0.91 \text{ マイクロメートル}$$

次にアスペクト比を計算できる：

$$\text{アスペクト比} = W_{o, \max} / W_{o, \min} = 2.11 / 0.91 = 2.32$$

F_D の決定：

$$\text{測定された最小レイリー範囲} = 0.43 \text{ mm} = 430 \text{ マイクロメートル}$$

$$Z_{R x, \min} = 570 \text{ マイクロメートル}$$

$W_{o, \text{eff}} = 0.91 \text{ マイクロメートル}$ (強度が $1/e^2$ まで減少する最短の径方向距離を用いて)

$$W_{o, \text{eff}}^2 / \text{アスペクト比} = 2.44 \text{ マイクロメートル (元の値から補正)}$$

$$F_D = Z_{R x, \min} / (W_{o, \text{eff}}^2 / \text{アスペクト比}) = 570 \text{ マイクロメートル} / 2$$

50

・ 4 4 マイクロメートル = 2 3 4

$F_D > 10$ であるため、これは準非回折ビームである。

【 0 2 6 9 】

モデル化された結果

最後に、以下のスライドは、光分散 ($\sigma_x^2(z)$ 又は $\sigma_y^2(z)$) を異なる z 位置において一連のビームプロファイルに対して直接計算することにより、どのようにして Q N D B のレイリー範囲 $Z_{R x, min}$ を計算できるかを示す。

【 0 2 7 0 】

これは、等式 (3 1) で使用するためのレイリー範囲を確立するための代替的な方法であり、上述の例において実験的に実施したような、光軸上のどこでビーム強度がその最大値の $1/2$ まで下降するかを測定とは反対のものである。

10

【 0 2 7 1 】

第 1 のスライドは、軸対称 Q N D B プロファイル (左上のプロット)、 z の関数として光軸上で得られる強度 (右上のプロット)、及び z の関数としての、計算されたビーム散乱 (の平方根) (右下のプロット) を示す。 x 方向の分散及び y 方向の分散は、ビームが回転対称性であるため、等しい。 x 又は y レイリー範囲は、 $\sigma_x^2(z)$ 又は $\sigma_y^2(z)$ がその最小値の 2 倍だけ増大する、 z 軸に沿った距離によって決定される。これは、 $\sigma_x^2(z)$ 又は $\sigma_y^2(z)$ が 2 だけ増大するときを測定することに等しい。

【 0 2 7 2 】

第 2 のスライドは、非対称 Q N D B に関する上述のものと同一の情報のセットを示す。ここでは、上の例のうちの 1 つで実験的に生成したものと同一のビーム形状である。ビームは非対称であるため、 x 方向及び y 方向のビーム分散はもはや同一ではない。 x 方向の分散は y 方向の分散よりも z に関してはるかに迅速であるが、これはビームが x 軸においてより狭く、従って x 軸においてより迅速に回折するためである。ここで留意すべきことは、 $\sigma_x^2(z)$ が 1.4 (即ち 2) の値まで上昇する正確な同一の z 位置が、光強度 $I(z)$ がそのピークの $1/2$ に下降する点であるかどうかである。これは、ビーム分散の測定、又はピーク強度の下降の測定のいずれを用いて、レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ を測定できる方法を示している。

20

【 0 2 7 3 】

これら 2 つの方法の唯一の違いは、強度法を使用する場合には、 x 又は y 方向プロファイルに関するレイリー範囲測定の間に区別が全くなることである。

30

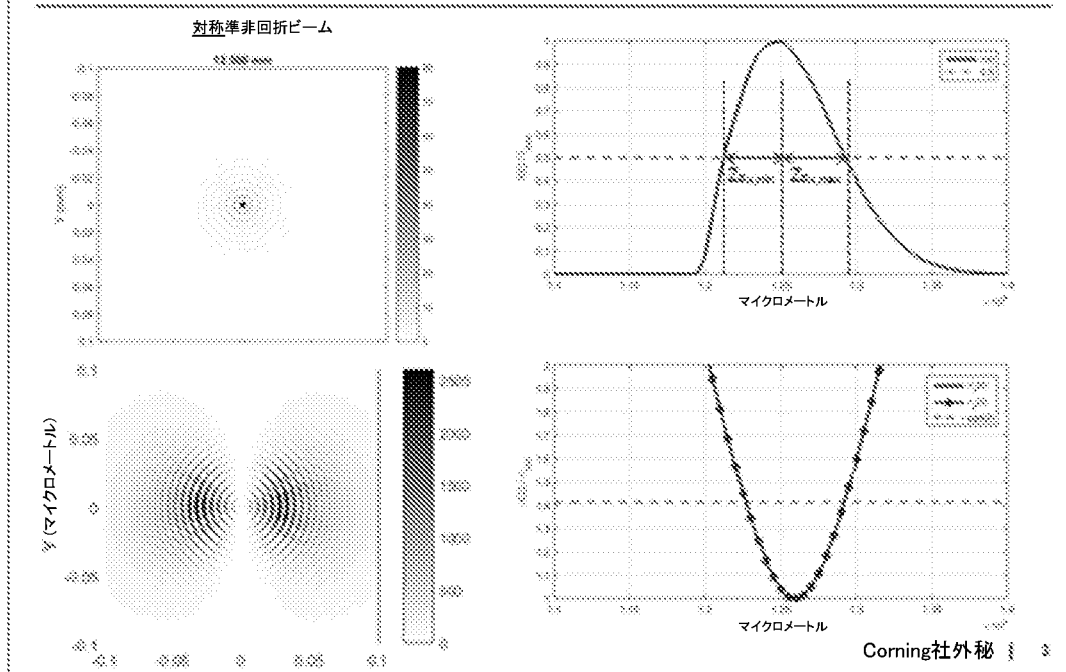
【 0 2 7 4 】

即ち強度法を用いる場合：

$$Z_{R x, min} = Z_{R y, min} \text{ 及び } Z_{R x, max} = Z_{R y, max}$$

となる。これは、各ビーム強度プロファイル $I(x, y)$ に関して、最大強度位置 (x, y) が 1 つしかないためである。

対称準非回折ビーム

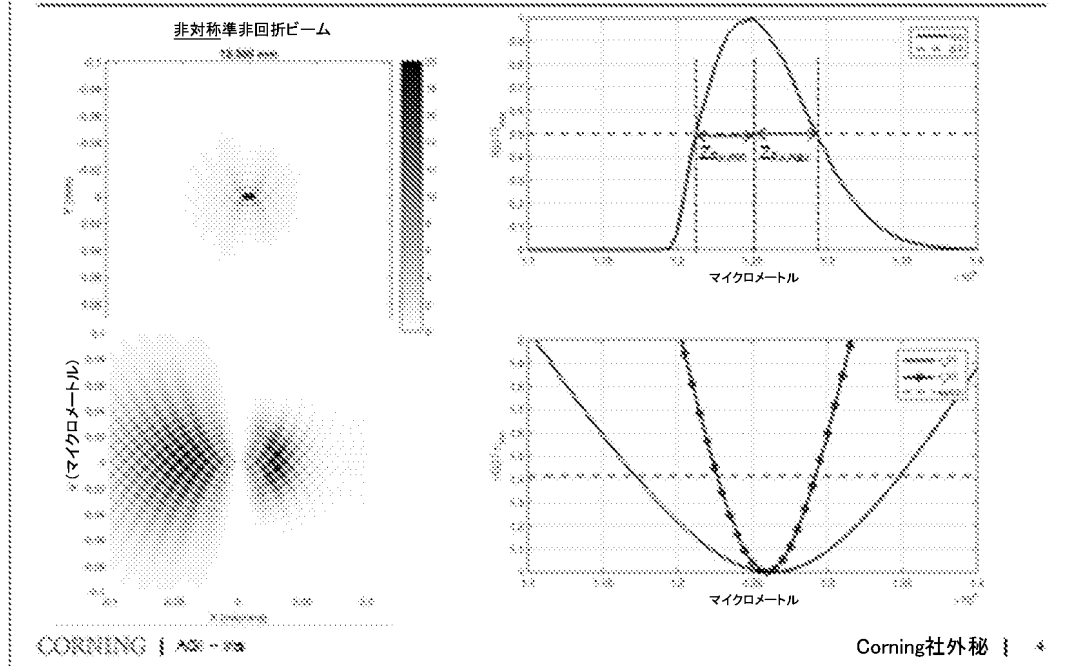


10

20

【 0 2 7 5 】

非対称準非回折ビーム



30

40

【 0 2 7 6 】

本明細書において、範囲は、「約 (a b o u t) 」ある特定の値から、及び / 又は「約」別の特定の値までとして表現され得る。このような範囲が表現されている場合、別の実施形態は、上記ある特定の値から、及び / 又は上記別の特定の値までを含む。同様に、先行詞「約」を用いることにより、値が概数として表現されている場合、上記特定の値は別

50

の実施形態を形成することが理解されるだろう。更に、各範囲の端点は、他方の端点との関連でも、他方の端点とは独立しても、重要であることが理解されるだろう。

【0277】

本明細書中で使用される方向に関する用語、例えば上方 (up)、下方 (down)、右 (right)、左 (left)、前方 (front)、後方 (back)、頂部 (top)、底部 (bottom) は、ここで図示されている状態の図面に関してのみ使用され、絶対的な配向を暗示することを意図したものではない。

【0278】

特段の記載がない限り、本明細書に記載のいずれの方法が、そのステップを特定の順序で実施すること、又はいずれの装置の特定の配向を必要とするものとして解釈されることは、全く意図されていない。従って、ある方法クレームが、そのステップが従うべき順序を実際に列挙していない場合、又はいずれの装置クレームが、個々の構成部品に関する順序若しくは配向を実際に列挙していない場合、又はステップをある特定の順序に限定すべきであることが、特許請求の範囲若しくは説明中で具体的に言明されていない場合、又は装置の構成部品に関する特定の順序又は配向が列挙されていない場合、いかなる点においても、順序又は配向が推定されることは全く意図されていない。これは：ステップの構成、動作フロー、構成部品の順序、又は構成部品の配向に関する論理の問題；文法的な編成又は句読点に由来する単純な意味；及び本明細書に記載の実施形態の数又はタイプを含む、解釈のためのいずれの可能な非明示的根拠にも当てはまる。

【0279】

本明細書中で使用される場合、単数形「ある (a, an)」及び「上記 (the)」は、文脈がそうでないことを明らかに指示していない限り、複数の指示対象を含む。従って例えば、「ある」構成部品に関する言及は、文脈がそうでないことを明らかに指示していない限り、2つ以上の上記構成部品を有する態様を含む。

【0280】

請求対象の主題の精神及び範囲から逸脱することなく、本明細書に記載の実施形態に対して様々な修正及び変形を実施できることは、当業者には理解されるだろう。よって本明細書は、本明細書に記載の様々な実施形態に対する上記修正及び変形が、添付の請求項及びその均等物の範囲内である限りにおいて、上記修正及び変形を包含することを意図している。

【0281】

以下、本発明の好ましい実施形態を項分け記載する。

【0282】

実施形態 1

透明被加工物をレーザ加工するための方法であって、上記方法は：

上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップ

を含み、上記輪郭線を形成する上記ステップは：

ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、上記ビーム経路から径方向にオフセットして位置決めされた非球面光学素子を通して上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記部分は：

波長；

有効スポットサイズ $W_{0, eff}$ ；並びに

断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含む、非軸対称ビーム断面

を含む、ステップ

を含み、

を含む、

10

20

30

40

50

$Z_{R x, \min}$ 及び $Z_{R y, \min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【0283】

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数である、方法。

【0284】

実施形態 2

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、実施形態 1 に記載の方法。

10

【0285】

実施形態 3

赤外線レーザビームを、上記輪郭線に沿って又は上記輪郭線の付近において、上記透明被加工物上へと向けることにより、上記透明被加工物を上記輪郭線に沿って分割するステップを更に含む、実施形態 2 に記載の方法

実施形態 4

隣接する上記欠陥の間の間隔は、約 1 マイクロメートル～約 30 マイクロメートルである、実施形態 2 に記載の方法。

【0286】

20

実施形態 5

上記非球面光学素子は、屈折アキシコン、反射アキシコン、ワキシコン、ネガティブアキシコン、空間光変調器、回折光学系、又は立方体状の光学素子を備える、実施形態 1～4 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0287】

実施形態 6

上記非球面光学素子は上記ビーム経路から、上記径方向においてあるオフセット距離だけオフセットされ；

上記オフセット距離は、上記パルスレーザビームと上記非球面光学素子との間の接触位置における上記パルスレーザビームの断面直径の約 10 %～約 75 % の距離である、実施形態 1～4 のいずれか 1 つに記載の方法。

30

【0288】

実施形態 7

上記無次元発散係数 F_D は、約 10～約 2000 の値を有する、実施形態 1～6 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0289】

実施形態 8

上記無次元発散係数 F_D は、約 50～約 1500 の値を有する、実施形態 1～6 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0290】

40

実施形態 9

上記無次元発散係数 F_D は、約 100～約 1000 の値を有する、実施形態 1～6 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0291】

実施形態 10

上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられる上記部分の上記非軸対称ビーム断面は、スポットサイズパラメータ $w_{0, \max}$ を有する長軸と、スポットサイズパラメータ $w_{0, \min}$ を有する短軸とを備え、

$w_{0, \max}$ は $w_{0, \min}$ より長く、 $w_{0, \min}$ に対する $w_{0, \max}$ のアスペクト比は 1.3 より大きい、実施形態 1～9 のいずれか 1 つに記載の方法。

50

【 0 2 9 2 】

実施形態 1 1

上記欠陥は、中央欠陥領域と、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられる上記部分の上記非軸対称ビーム断面の上記長軸に沿って、上記中央欠陥領域から外向きに延在する、少なくとも 1 つの径方向アームとを備える、実施形態 1 0 に記載の方法。

【 0 2 9 3 】

実施形態 1 2

上記方法は：

上記ビーム経路の周りでドーププリズムを回転させるステップであって、上記ドーププリズムは、上記パルスレーザビームが上記ドーププリズムを横断するように、上記ビーム経路に沿って上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間に位置決めされる、ステップ；並びに

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記輪郭線の一部分が上記透明被加工物の撮像表面に沿った曲率を備えるように、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップ

を更に備える、実施形態 1 ~ 1 0 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 2 9 4 】

実施形態 1 3

上記非球面光学素子を上記ビーム経路の周りで回転させるステップ；並びに

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記輪郭線の一部分が上記透明被加工物の上記撮像表面に沿った曲率を備えるように、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップ

を更に備える、実施形態 1 ~ 1 0 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 2 9 5 】

実施形態 1 4

上記透明被加工物は、ガラス、サファイア、溶融シリカ又はこれらの組み合わせを含む、実施形態 1 ~ 1 3 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 2 9 6 】

実施形態 1 5

上記ビーム源は、1 回のパルスバーストあたり約 1 パルス ~ 1 回のパルスバーストあたり約 3 0 パルスを含むパルスバーストを生成する、パルスビーム源を備え、

パルスバーストエネルギーは、1 回のパルスバーストあたり約 1 0 0 μ J ~ 約 6 0 0 μ J である、実施形態 1 ~ 1 4 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 2 9 7 】

実施形態 1 6

透明被加工物をレーザ加工するための方法であって、上記方法は：

上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップ

を含み、上記輪郭線を形成する上記ステップは：

ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通して、かつ光学遮断素子を越えて（ここで上記非球面光学素子及び上記光学遮断素子はそれぞれ、上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされる）、上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記部分は：

波長 ；

10

20

30

40

50

有効スポットサイズ $W_{o, eff}$; 並びに
 断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含む非軸対称断面
 を含む、ステップ
 を含む、

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0, eff}^2}{\lambda}$$

【 0 2 9 8 】

10

より大きく、ここで F_D は 10 以上の値を有する無次元発散係数である、方法。

【 0 2 9 9 】

実施形態 17

上記方法は、上記透明被加工物及び上記パルスレーザービームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザー形成するステップを更に含む、実施形態 16 に記載の方法。

【 0 3 0 0 】

実施形態 18

隣接する上記欠陥の間隔は、約 1 マイクロメートル ~ 約 30 マイクロメートルである、実施形態 17 に記載の方法。

20

【 0 3 0 1 】

実施形態 19

上記非球面光学素子は上記ビーム経路から、上記径方向にオフセットされて位置決めされる、実施形態 16 ~ 18 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 0 2 】

実施形態 20

上記光学遮断素子は、上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間に位置決めされる、実施形態 16 ~ 18 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 0 3 】

実施形態 21

上記光学遮断素子は、上記ビーム源と上記非球面光学素子との間に位置決めされる、実施形態 16 ~ 18 のいずれか 1 つに記載の方法。

30

【 0 3 0 4 】

実施形態 22

第 1 のレンズ及び第 2 のレンズはそれぞれ、上記ビーム経路内の上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされ、

上記光学遮断素子は、上記第 1 のレンズと上記第 2 のレンズとの間に位置決めされる、実施形態 16 ~ 18 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 0 5 】

実施形態 23

上記第 1 のレンズは第 1 の焦点距離を備え、上記第 2 のレンズは第 2 の焦点距離を備え、

40

上記第 1 のレンズ及び上記第 2 のレンズは、上記ビーム経路に沿って、上記第 1 の焦点距離及び上記第 2 の焦点距離の合計だけ離間している、実施形態 22 に記載の方法。

【 0 3 0 6 】

実施形態 24

上記光学遮断素子は、上記光学遮断素子が上記パルスレーザービームの強度の約 25% ~ 約 80% を遮断するように、上記ビーム経路内に位置決めされる、実施形態 16 ~ 18 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 0 7 】

50

実施形態 2 5

上記光学遮断素子は、上記光学遮断素子が上記パルスレーザビームの上記強度の約 5 0 % を遮断するように、上記ビーム経路内に位置決めされる、実施形態 2 4 に記載の方法。

【 0 3 0 8 】

実施形態 2 6

上記光学遮断素子は、上記光学遮断素子が上記パルスレーザビームの断面弦部分を遮断するように、上記ビーム経路内に位置決めされる、実施形態 1 6 ~ 1 8 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 0 9 】

実施形態 2 7

上記光学遮断素子は、上記光学遮断素子が上記パルスレーザビームの断面セクタを遮断するように、上記ビーム経路内に位置決めされる、実施形態 1 6 ~ 1 8 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 0 】

実施形態 2 8

上記方法は：

上記ビーム経路の周りでドーププリズムを回転させるステップであって、上記ドーププリズムは、上記パルスレーザビームが上記ドーププリズムを横断するように、上記ビーム経路に沿って上記光学遮断素子と上記透明被加工物との間に位置決めされる、ステップ；並びに

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記輪郭線の一部分が上記透明被加工物の上記撮像表面に沿った曲率を備えるように、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップ

を更に備える、実施形態 1 6 ~ 2 7 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 1 】

実施形態 2 9

上記光学遮断素子を上記ビーム経路の周りで回転させるステップ；並びに

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記輪郭線の一部分が上記透明被加工物の撮像表面に沿った曲率を備えるように、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップ

を更に備える、実施形態 1 6 ~ 2 7 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 2 】

実施形態 3 0

上記無次元発散係数 F_D は、約 1 0 ~ 約 2 0 0 0 の値を有する、実施形態 1 6 ~ 2 9 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 3 】

実施形態 3 1

上記無次元発散係数 F_D は、約 5 0 ~ 約 1 5 0 0 の値を有する、実施形態 1 6 ~ 2 9 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 4 】

実施形態 3 2

上記無次元発散係数 F_D は、約 1 0 0 ~ 約 1 0 0 0 の値を有する、実施形態 1 6 ~ 2 9 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 3 1 5 】

実施形態 3 3

透明被加工物をレーザ加工するための方法は、上記透明被加工物内に輪郭線を形成するステップであって、上記輪郭線は、上記透明被加工物内の欠陥を含む、ステップを含み、上記輪郭線を形成する上記ステップは：

10

20

30

40

50

ビーム経路に沿って配向され、ビーム源によって出力されたパルスレーザビームを、非球面光学素子を通して向けるステップ；

上記ビーム源と上記透明被加工物との間に位置決めされたデコヒーレント化用光学素子を用いて、上記パルスレーザビームの第1のビーム部分を上記パルスレーザビームの第2のビーム部分からデコヒーレント化させるステップ；並びに

上記パルスレーザビームの上記第1のビーム部分及び上記第2のビーム部分を上記透明被加工物内へと向けることにより、上記パルスレーザビームの、上記透明被加工物内へと向けられた上記第1のビーム部分及び上記第2のビーム部分が、上記透明被加工物内で誘起吸収を生成するステップであって、上記誘起吸収は、上記透明被加工物内に欠陥を生成し、また上記透明被加工物内へと向けられた上記第1のビーム部分及び上記第2のビーム部分の組み合わせは：

波長；

有効スポットサイズ $W_{0,eff}$ ；並びに

断面 x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び断面 y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を含む非軸対称断面

を含み、ここで $Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$$

【0316】

より大きく、ここで F_D は10以上の値を有する無次元発散係数である、ステップを含む、方法。

【0317】

実施形態34

上記透明被加工物及び上記パルスレーザビームを、上記輪郭線に沿って互いに対して並進移動させることにより、上記透明被加工物内に上記輪郭線に沿った複数の上記欠陥をレーザ形成するステップを更に含む、実施形態33に記載の方法。

【0318】

実施形態35

隣接する上記欠陥の間隔は、約1マイクロメートル～約30マイクロメートルである、実施形態34に記載の方法。

【0319】

実施形態36

上記無次元発散係数 F_D は、約10～約2000の値を有する、実施形態33～35のいずれか1つに記載の方法。

【0320】

実施形態37

上記無次元発散係数 F_D は、約50～約1500の値を有する、実施形態33～35のいずれか1つに記載の方法。

【0321】

実施形態38

上記無次元発散係数 F_D は、約100～約1000の値を有する、実施形態33～35のいずれか1つに記載の方法。

【0322】

実施形態39

上記デコヒーレント化用光学素子は、上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間に位置決めされる、実施形態33～38のいずれか1つに記載の方法。

【0323】

実施形態40

上記デコヒーレント化用光学素子は、上記ビーム源と上記非球面光学素子との間に位置

10

20

30

40

50

決められる、実施形態 33 ~ 38 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0324】

実施形態 41

上記デコヒーレント化用光学素子は光遅延プレートを備え、

上記第 1 のビーム部分を上記第 2 のビーム部分からデコヒーレント化する上記ステップは、上記パルスレーザビームの上記第 1 のビーム部分を、上記光遅延プレートを通るように向けることにより、上記第 2 のビーム部分に対する上記第 1 のビーム部分の光位相差を誘発するステップを含む、実施形態 33 ~ 40 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0325】

実施形態 42

上記光遅延プレートは、上記ビーム源と上記非球面光学素子との間に位置決めされる、実施形態 41 に記載の方法。

【0326】

実施形態 43

上記第 1 のビーム部分を上記第 2 のビーム部分からデコヒーレント化する上記ステップは：

上記パルスレーザビームの上記第 1 のビーム部分が上記透明被加工物において第 1 の偏光を備えるように、上記パルスレーザビームの上記第 1 のビーム部分を偏光させるステップ；及び

上記パルスレーザビームの上記第 2 のビーム部分が上記透明被加工物において第 2 の偏光を備えるように、上記パルスレーザビームの上記第 2 のビーム部分を偏光させるステップであって、上記第 1 の偏光は上記第 2 の偏光に対して垂直である、ステップを含む、実施形態 33 ~ 40 のいずれか 1 つに記載の方法。

【0327】

実施形態 44

上記デコヒーレント化用光学素子は分割 1 / 4 波長板を備える、実施形態 43 に記載の方法。

【0328】

実施形態 45

上記分割 1 / 4 波長板は、上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間に位置決めされ；

上記分割 1 / 4 波長板は、第 1 のプレート部分及び第 2 のプレート部分を備え；

上記第 1 のプレート部分は第 1 の速軸及び第 1 の遅軸を備え、上記第 2 のプレート部分は第 2 の速軸及び第 2 の遅軸を備え；

上記第 1 の速軸は上記第 2 の速軸に対して垂直であり、上記第 2 の速軸は上記第 2 の遅軸に対して垂直であり；

上記パルスレーザビームの上記第 1 のビーム部分は、上記第 1 のプレート部分を横断することによって、上記第 1 の偏光へと偏光され、上記パルスレーザビームの上記第 2 のビーム部分は、上記第 2 のプレート部分を横断することによって、上記第 2 の偏光へと偏光される、実施形態 44 に記載の方法。

【0329】

実施形態 46

偏光子及び 1 / 4 波長板はそれぞれ、上記ビーム経路内において、上記ビーム源と上記デコヒーレント化用光学素子との間に位置決めされる、実施形態 43 に記載の方法。

【0330】

実施形態 47

第 1 のレンズ及び第 2 のレンズはそれぞれ、上記ビーム経路内において、上記非球面光学素子と上記透明被加工物との間に位置決めされ；

上記デコヒーレント化用光学素子は、上記第 1 のレンズと上記第 2 のレンズとの間に位置決めされる、実施形態 43 に記載の方法。

【 0 3 3 1 】

実施形態 4 8

上記第 1 のレンズは第 1 の焦点距離を備え、上記第 2 のレンズは第 2 の焦点距離を備え；

上記第 1 のレンズ及び上記第 2 のレンズは、上記ビーム経路に沿って、上記第 1 の焦点距離及び上記第 2 の焦点距離の合計だけ離間し；

上記デコヒーレント化用光学素子は、上記分割 1 / 4 波長板が、上記第 1 のレンズから上記第 1 の焦点距離だけ離間し、かつ上記第 2 のレンズから上記第 2 の焦点距離だけ離間するように、上記第 1 のレンズと上記第 2 のレンズとの間に位置決めされる、実施形態 4 7 に記載の方法。

10

【 0 3 3 2 】

実施形態 4 9

加工方法であって、上記加工方法は：

パルスレーザビームを透明被加工物内に局在化させるステップであって、上記パルスレーザビームは光経路に沿って z 方向に伝播し、また：(i) 波長；(i i) 有効スポットサイズ $W_{0, eff}$ ；(i i i) 上記透明被加工物の損傷閾値を超えるために十分なパルスエネルギー及びパルス持続時間；(i v) 第 1 の部分及び第 2 の部分（上記第 1 の部分は上記第 2 の部分に対して非コヒーレント状態である）；並びに(v) x 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R x, min}$ 及び y 方向の最小レイリー範囲 $Z_{R y, min}$ を有する非軸対称ビーム断面を含む、ステップ

20

を含み、
 $Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの小さい方は、

$$F_D \frac{\pi w_{0, eff}^2}{\lambda}$$

【 0 3 3 3 】

より大きく、ここで F_D は 1 0 以上の値を有する無次元発散係数である、加工方法。

【 0 3 3 4 】

実施形態 5 0

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は 2 0 0 μm 以上である、実施形態 4 9 に記載の加工方法。

30

【 0 3 3 5 】

実施形態 5 1

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は 1 mm 以上である、実施形態 4 9 に記載の加工方法。

【 0 3 3 6 】

実施形態 5 2

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は 5 0 μm ~ 1 0 mm である、実施形態 4 9 に記載の加工方法。

【 0 3 3 7 】

実施形態 5 3

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は 3 0 0 μm ~ 2 mm である、実施形態 4 9 に記載の加工方法。

40

【 0 3 3 8 】

実施形態 5 4

上記非軸対称ビーム断面は、最大スポットサイズパラメータ $W_{0, max}$ 、最小スポットサイズパラメータ $W_{0, min}$ 、及びアスペクト比

$$\frac{w_{0,max}}{w_{0,min}}$$

【 0 3 3 9 】

を有し、

上記アスペクト比は 1 . 1 より大きい、実施形態 4 9 ~ 5 3 のいずれか 1 つに記載の加工方法。

【 0 3 4 0 】

実施形態 5 5

10

上記アスペクト比は 2 . 0 より大きい、実施形態 5 4 に記載の加工方法。

【 0 3 4 1 】

実施形態 5 6

上記アスペクト比は 1 . 2 ~ 1 5 . 0 である、実施形態 5 4 に記載の加工方法。

【 0 3 4 2 】

実施形態 5 7

上記アスペクト比は 1 . 5 ~ 3 . 0 である、実施形態 5 4 に記載の加工方法。

【 0 3 4 3 】

実施形態 5 8

$w_{0,min}$ は 0 . 2 5 μm 以上である、実施形態 5 4 ~ 5 7 に記載の加工方法。

20

【 0 3 4 4 】

実施形態 5 9

$w_{0,min}$ は 1 . 0 μm 以上である、実施形態 5 4 ~ 5 7 に記載の加工方法。

【 0 3 4 5 】

実施形態 6 0

$w_{0,min}$ は 0 . 2 5 μm ~ 1 0 μm である、実施形態 5 4 ~ 5 7 に記載の加工方法。

【 0 3 4 6 】

実施形態 6 1

$w_{0,min}$ は 0 . 5 μm ~ 2 . 5 μm である、実施形態 5 4 ~ 5 7 に記載の加工方法

30

【 0 3 4 7 】

実施形態 6 2

上記非軸対称ビーム断面は非楕円形状を有する、実施形態 4 9 ~ 6 1 のいずれか 1 つに記載の加工方法。

【 0 3 4 8 】

実施形態 6 3

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は

$$100 \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

40

【 0 3 4 9 】

より大きい、実施形態 4 9 ~ 6 2 のいずれか 1 つに記載の加工方法。

【 0 3 5 0 】

実施形態 6 4

$Z_{R x, min}$ 及び $Z_{R y, min}$ のうちの上記小さい方は

$$250 \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$$

50

【 0 3 5 1 】

より大きい、実施形態 6 3 に記載の加工方法。

【 0 3 5 2 】

実施形態 6 5

上記パルスレーザビームは波長 を有し、

上記透明被加工物は、上記 z 方向において 2 0 % / mm 未満の、吸収及び散乱によるものを合わせた損失を有する、実施形態 4 9 ~ 6 4 のいずれか 1 つに記載の加工方法。

【 0 3 5 3 】

実施形態 6 6

ガウスレーザビームから、上記非軸対称ビーム断面を有するパルスレーザビームを形成 10
するステップを更に含み、

上記ガウスレーザビームは、レイリー範囲 Z_R を有する、実施形態 4 9 ~ 6 5 のいずれか 1 つに記載の加工方法。

【 0 3 5 4 】

実施形態 6 7

Z_R に対する $Z_{R x, \min}$ 及び $Z_{R y, \min}$ のうちの上記小さい方の比は、5 以上である、実施形態 6 6 に記載の加工方法。

【 0 3 5 5 】

実施形態 6 8

Z_R に対する $Z_{R x, \min}$ 及び $Z_{R y, \min}$ のうちの上記小さい方の上記比は、5 20
0 以上である、実施形態 6 6 に記載の加工方法。

【 符号の説明 】

【 0 3 5 6 】

- 1 0 0 光学アセンブリ
- 1 0 1 並進移動方向
- 1 0 2 光軸
- 1 0 4 撮像平面
- 1 0 5 共通の焦点面
- 1 1 0 ビーム源
- 1 1 1 ビーム経路 30
- 1 1 2 パルスレーザビーム
- 1 1 3 パルスレーザビーム焦線
- 1 1 4 非軸対称ビームスポット
- 1 1 5 短軸
- 1 1 6 長軸
- 1 1 8 軸交点
- 1 1 9 ビームスポット外周
- 1 2 0 非球面光学素子
- 1 2 2 中心線軸
- 1 2 4 レーザ入力表面 40
- 1 2 6 レーザ出力表面
- 1 3 0 第 1 のレンズ
- 1 3 2 第 2 のレンズ
- 1 3 4 コリメート空間
- 1 4 0 光学遮断素子
- 1 4 0 a 第 1 の光学遮断素子
- 1 4 0 b 第 2 の光学遮断素子
- 1 4 1 遮断位置
- 1 4 1 a 第 1 の遮断位置
- 1 4 1 b 第 2 の遮断位置 50

1 4 2	光遅延プレート
1 4 4	偏光子
1 4 6	1 / 4 波長板
1 5 0	分割 1 / 4 波長板
1 5 2	第 1 のプレート部分
1 5 4	第 2 のプレート部分
1 5 6 a	第 1 の速軸
1 5 6 b	第 2 の速軸
1 5 8 a	第 1 の遅軸
1 5 8 b	第 2 の遅軸
1 6 0	透明被加工物
1 6 2	撮像表面
1 6 5	所望の分割線
1 7 0	輪郭線
1 7 2	欠陥
1 7 4	中央欠陥領域
1 7 6	径方向アーム
1 8 0	ドーププリズム
1 9 0	並進移動ステージ
5 0 0	パルスバースト
5 0 0 A	パルス

10

20

【図 1 A】

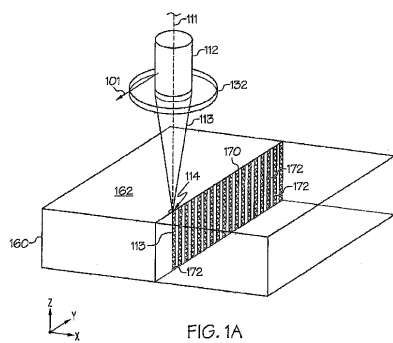


FIG. 1A

【図 1 B】

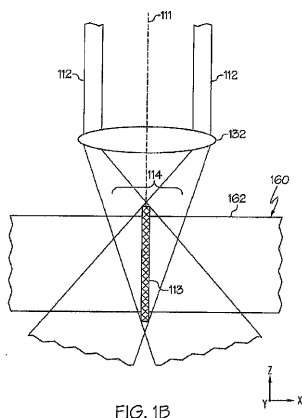


FIG. 1B

【図 2】

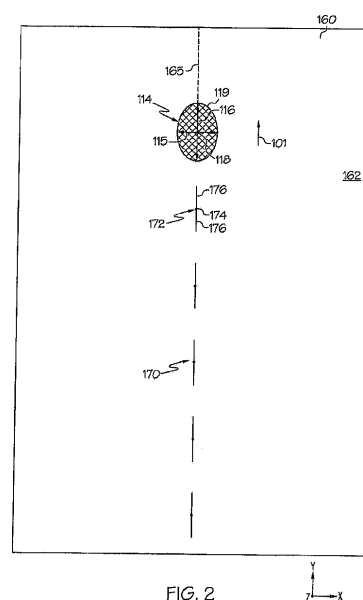
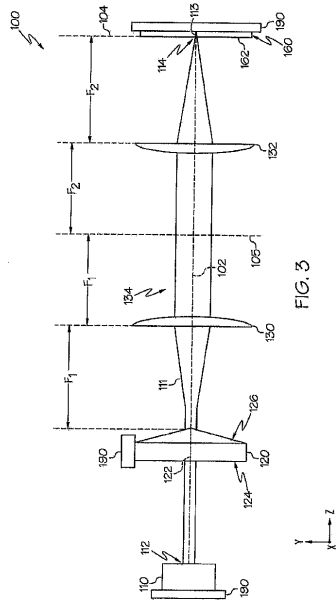
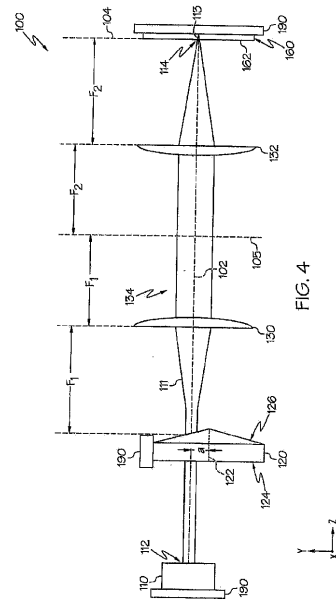


FIG. 2

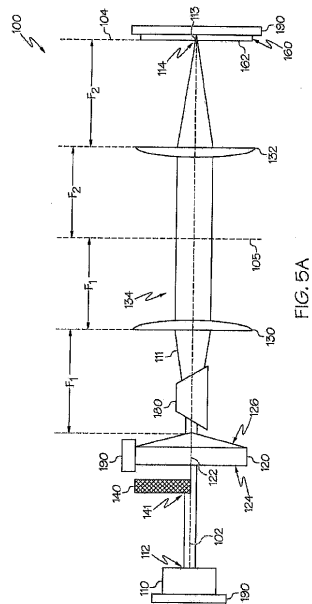
【図 3】



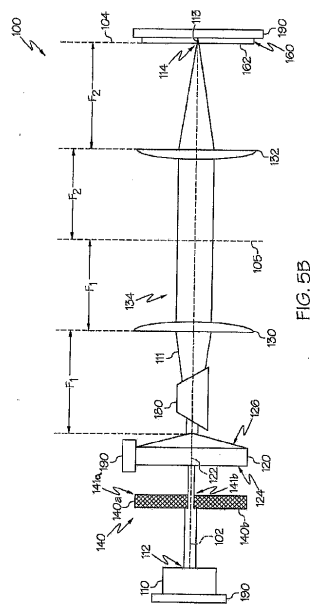
【図 4】



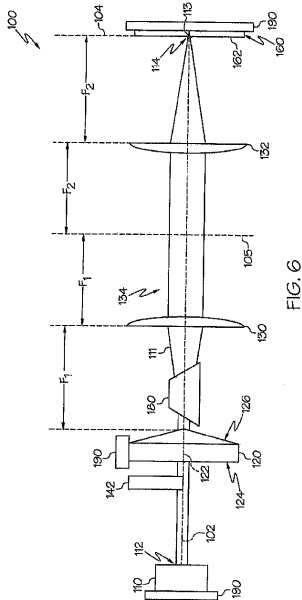
【図 5 A】



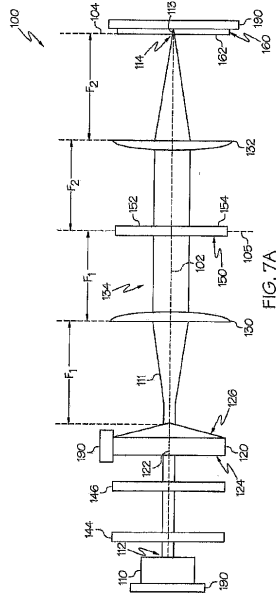
【図 5 B】



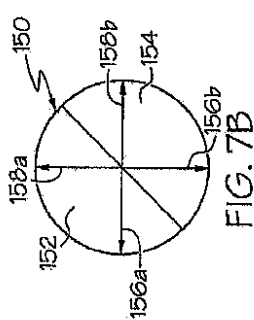
【図 6】



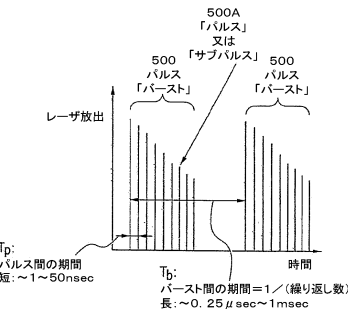
【図 7 A】



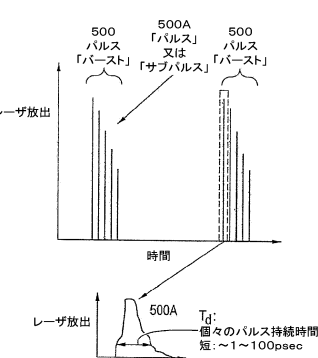
【図 7 B】



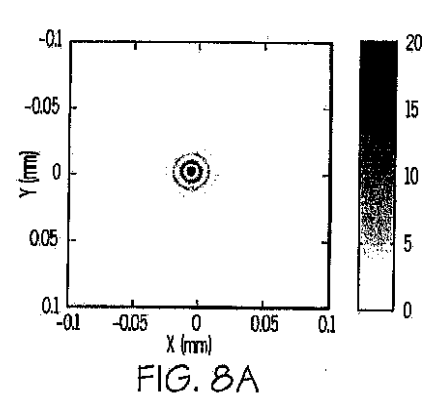
【図 7 D】



【図 7 C】



【図 8 A】



【図 8 B】

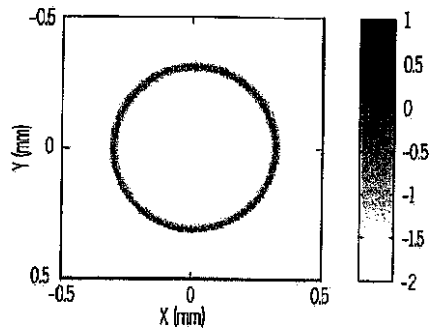


FIG. 8B

【図 9】

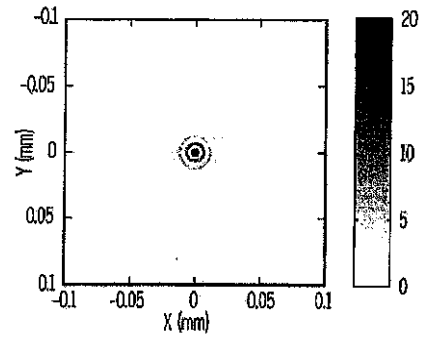


FIG. 9

【図 8 C】

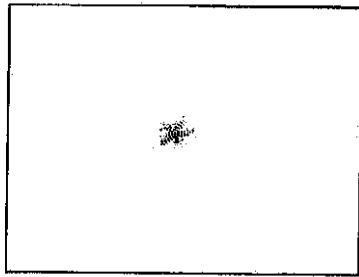


FIG. 8C

【図 10】

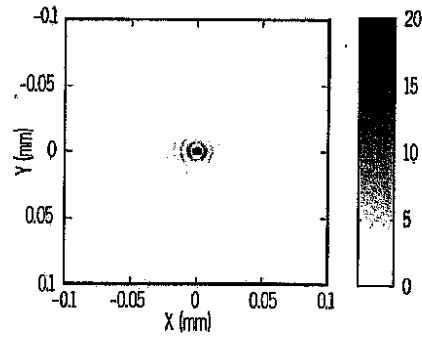


FIG. 10

【図 11 A】

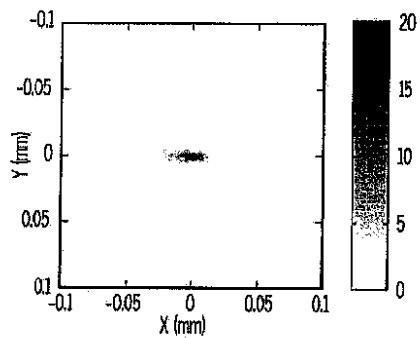
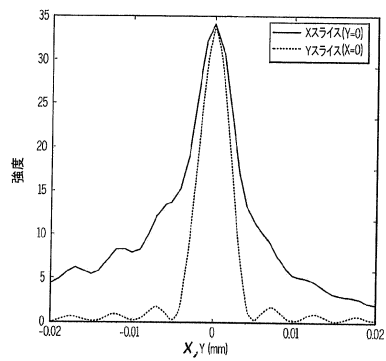


FIG. 11A

【図 11 C】



【図 11 D】

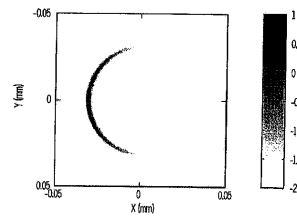
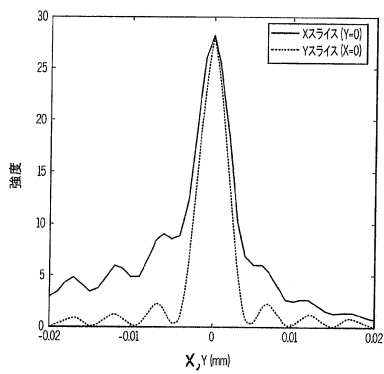


FIG. 11D

【図 11 B】



【図 1 1 E】

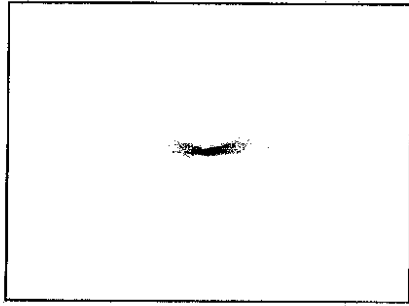
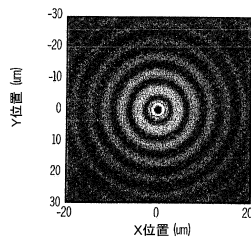
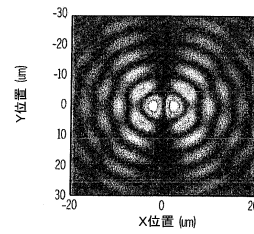


FIG. 11E

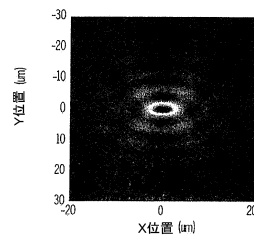
【図 1 2 A】



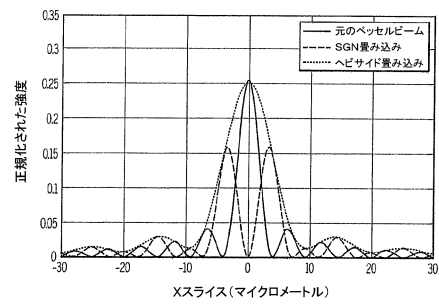
【図 1 2 B】



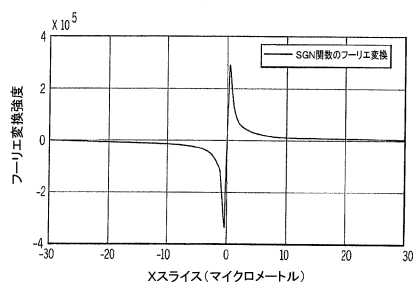
【図 1 2 C】



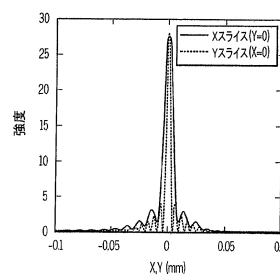
【図 1 2 D】



【図 1 2 E】



【図 1 2 G】



【図 1 2 F】

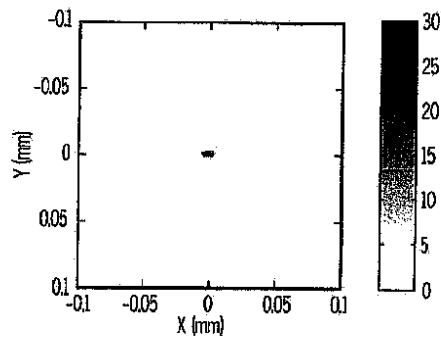


FIG. 12F

【図 1 2 H】

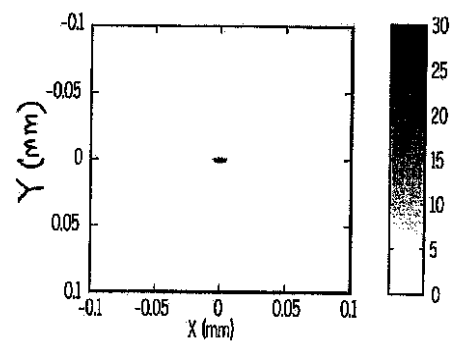
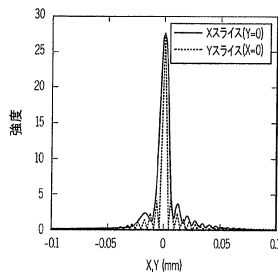


FIG. 12H

【図 12 I】



【図 13 A】

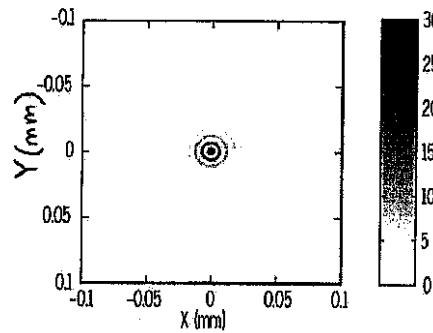


FIG. 13A

【図 13 B】

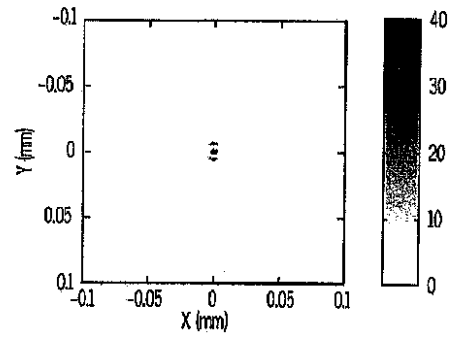


FIG. 13B

【図 13 C】

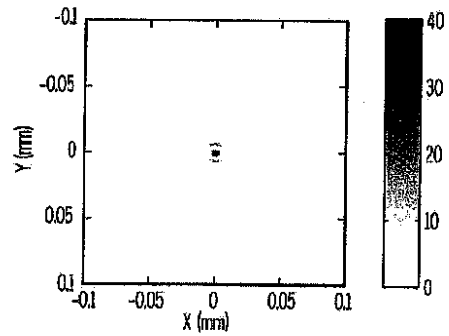


FIG. 13C

【図 13 D】

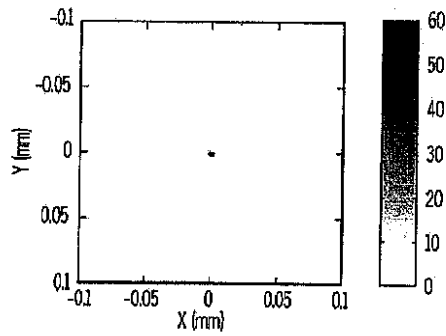


FIG. 13D

【図 13 F】

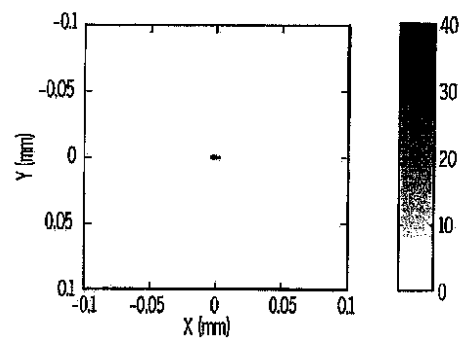


FIG. 13F

【図 13 E】

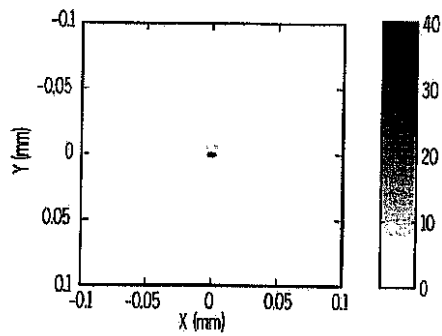


FIG. 13E

【図 13 G】

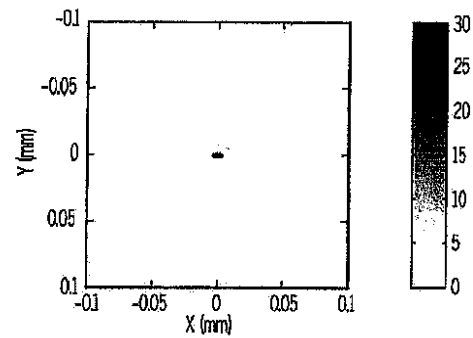


FIG. 13G

【図 13 H】

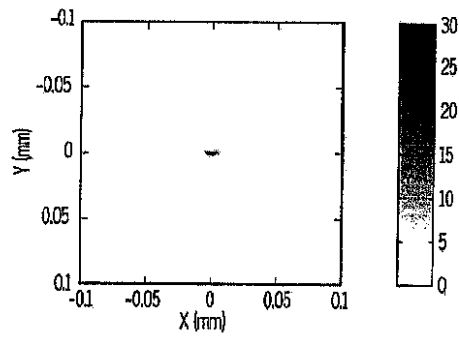


FIG. 13H

【図 13 J】

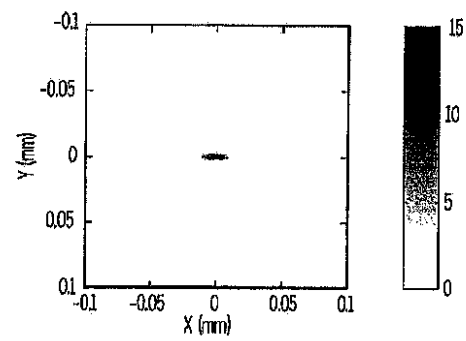


FIG. 13J

【図 13 I】

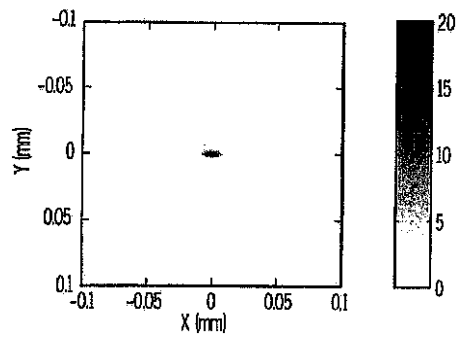


FIG. 13I

【図 13 K】

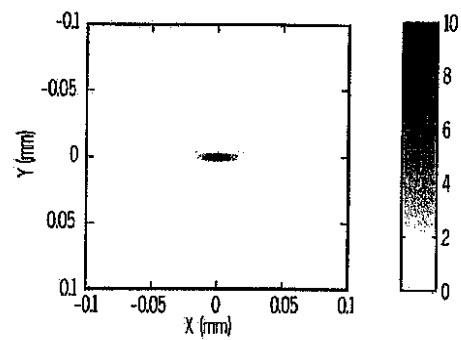


FIG. 13K

【図 14】

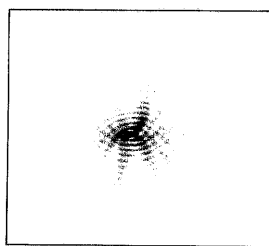


FIG. 14

【図 16】

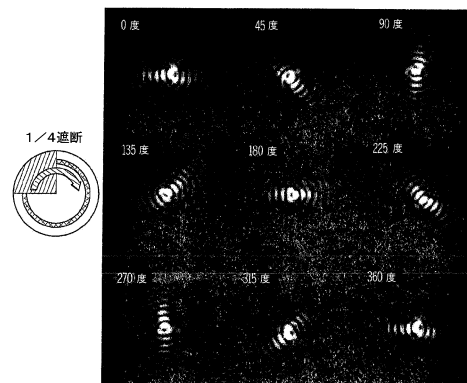


FIG. 17A

【図 15】

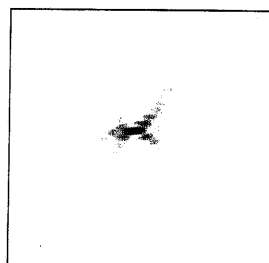
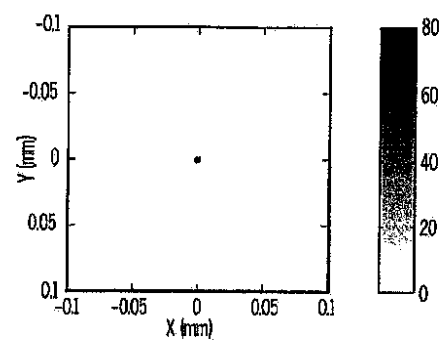


FIG. 15

【図 17 A】



【図 17 B】

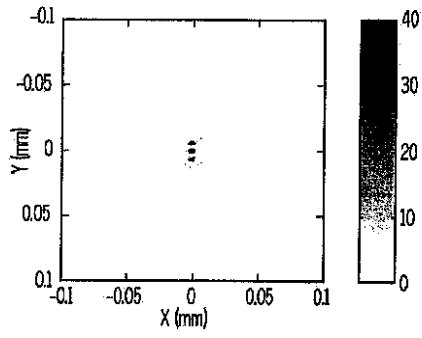


FIG. 17B

【図 17 C】

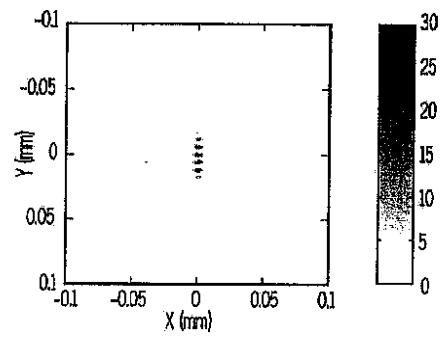


FIG. 17C

【図 17 D】

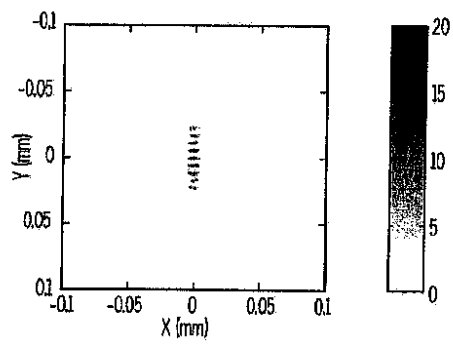


FIG. 17D

【図 17 E】

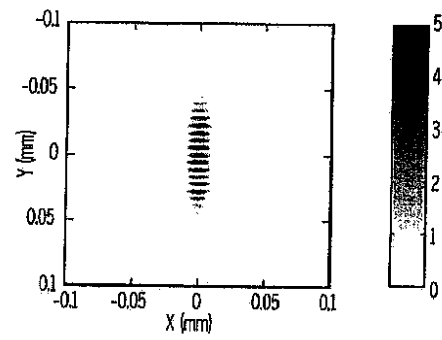


FIG. 17E

【図 17 F】

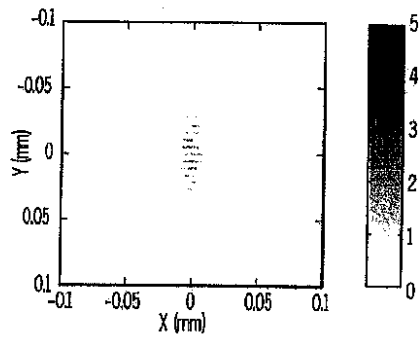
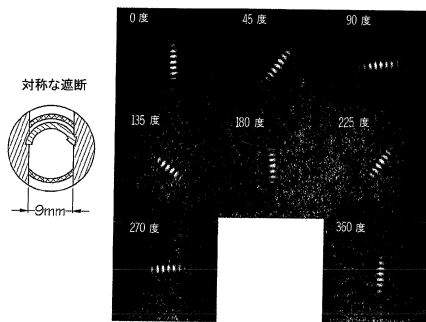


FIG. 17F

【図 18】



【図 19 A】

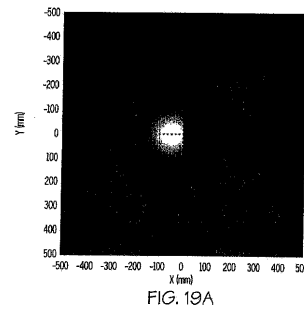


FIG. 19A

【図 19 B】

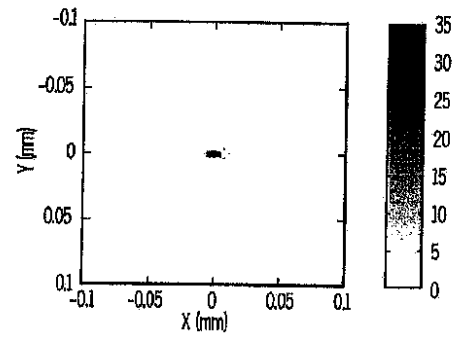


FIG. 19B

【図 20 A】

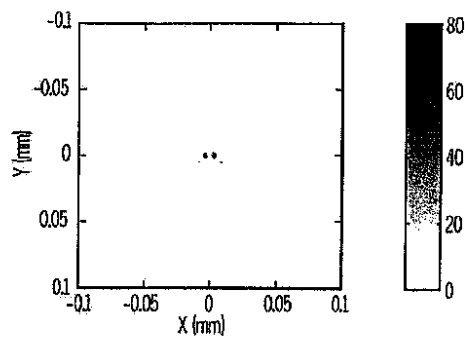


FIG. 20A

【図 21 A】

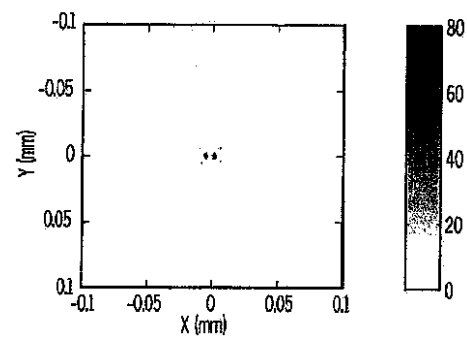
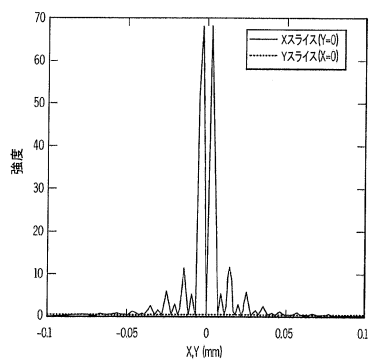
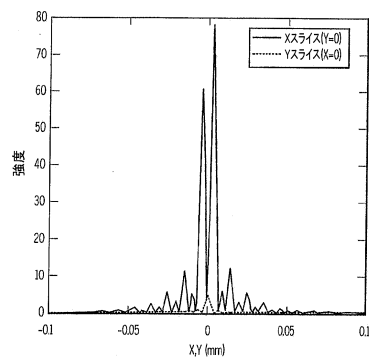


FIG. 21A

【図 20 B】



【図 21 B】



【図 22 A】

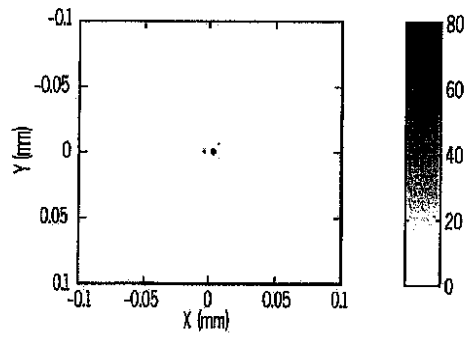
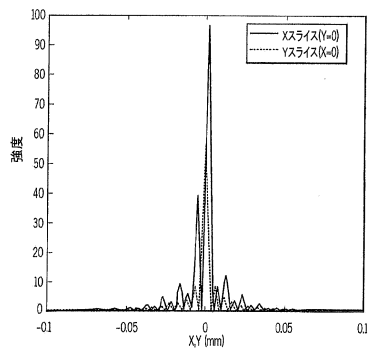
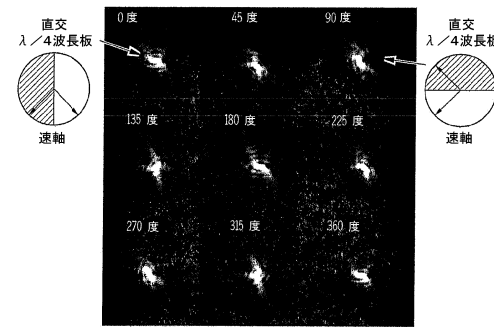


FIG. 22A

【図 22 B】



【図 23】



【図 24】

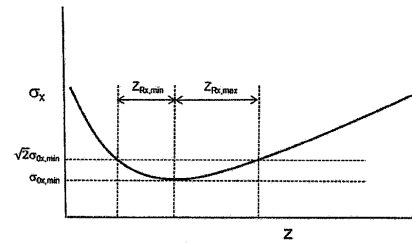
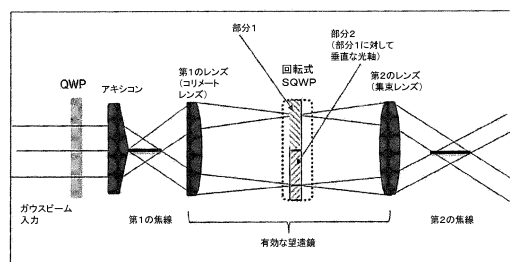
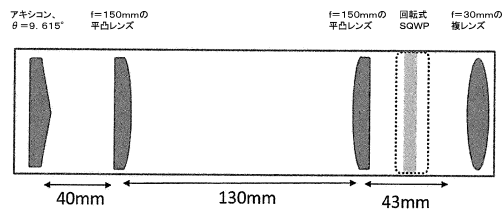


FIG. 24

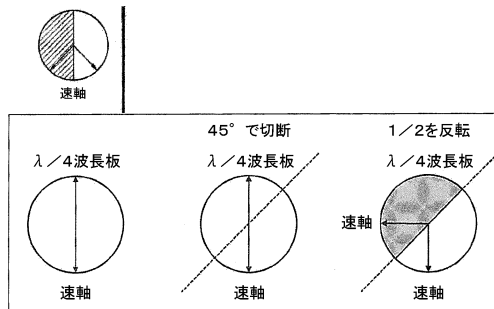
【図 25】



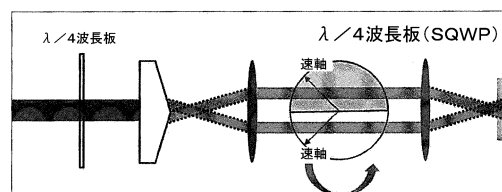
【図 26】



【図 27】



【図 28】



【 29 】

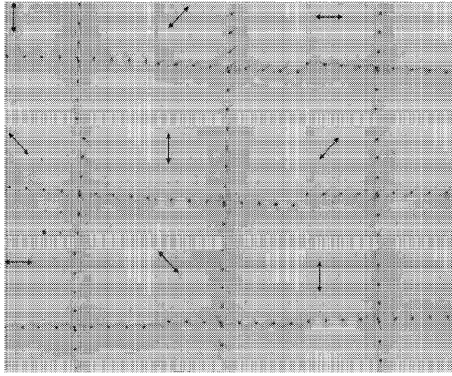


FIG. 29

【 30 】

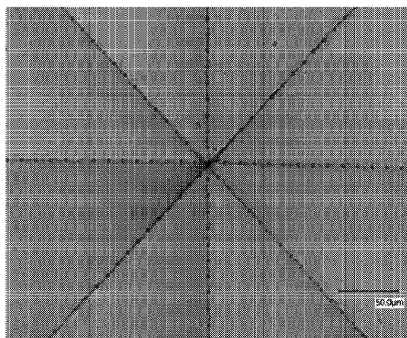


FIG. 30

【 33 】

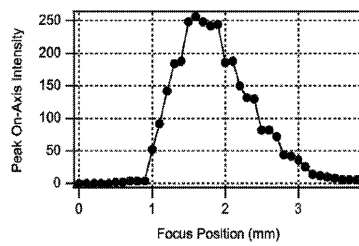


FIG. 33

【 34 】

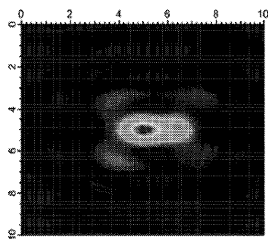


FIG. 34

【 31 】

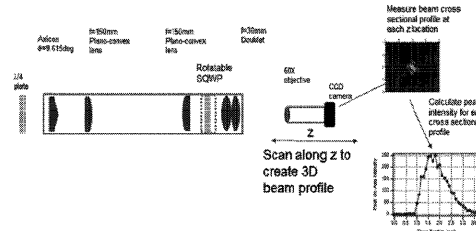


FIG. 31

【 32 】

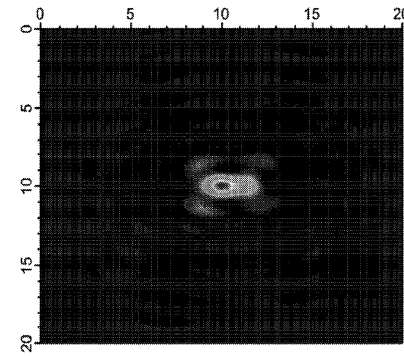


FIG. 32

【 35 】

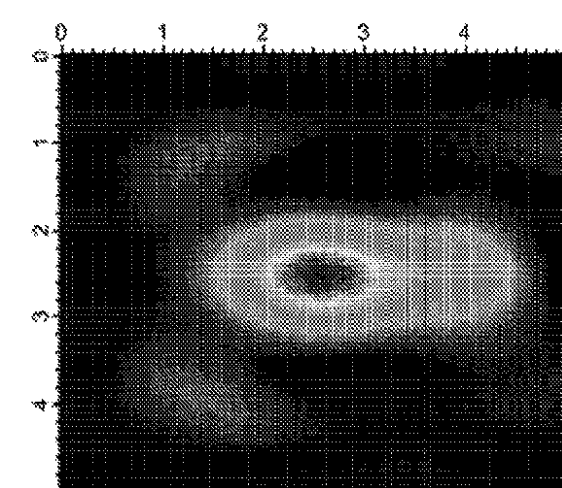


FIG. 35

【 3 6 】

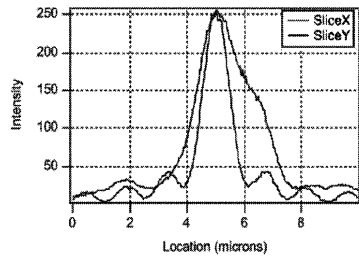


FIG. 36

【 3 8 】

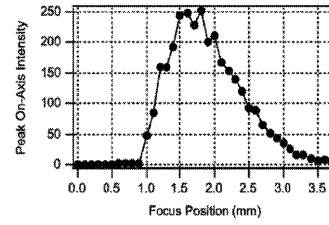


FIG. 38

【 3 7 】

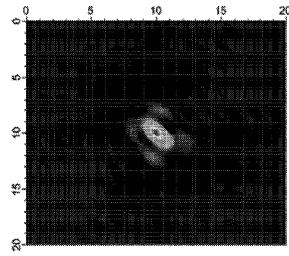


FIG. 37

【 3 9 】

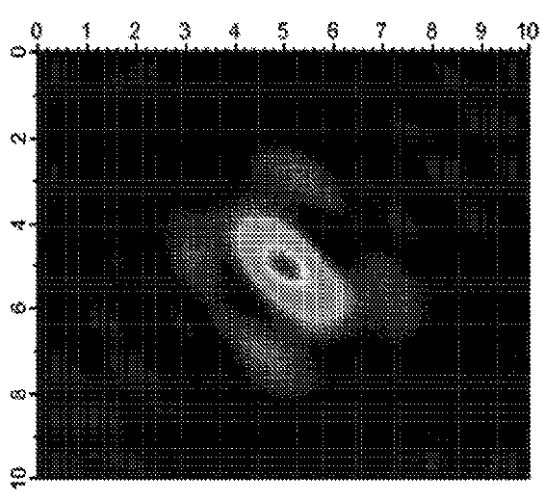


FIG. 39

【 4 0 】

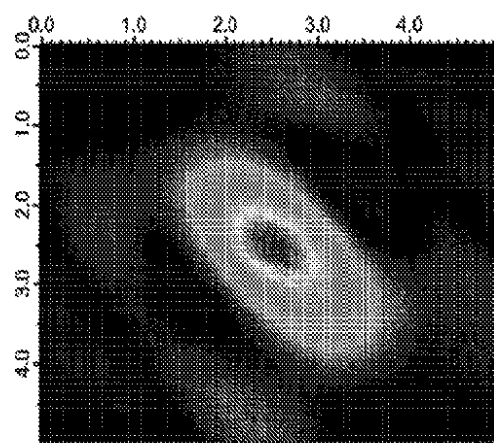


FIG. 40

【 4 1 】

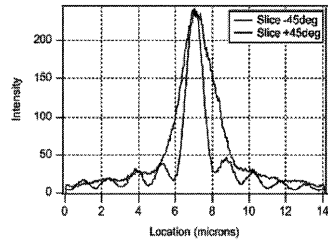


FIG. 41

【 4 2 】

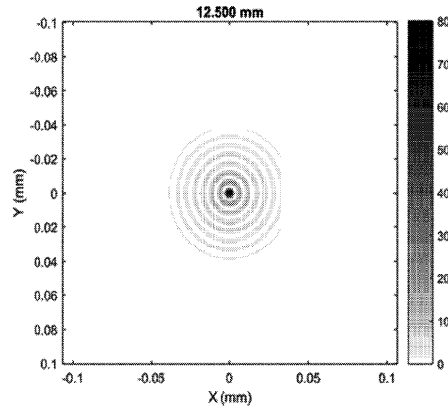


FIG. 42

【 4 4 】

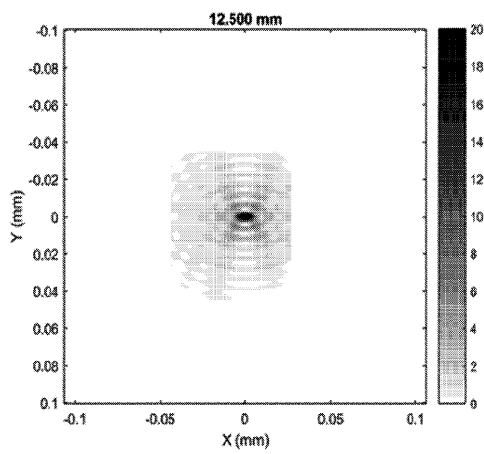


FIG. 44

【 4 3 】

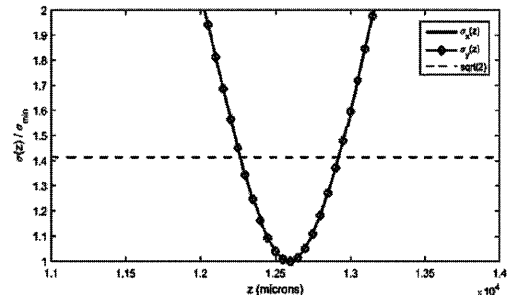
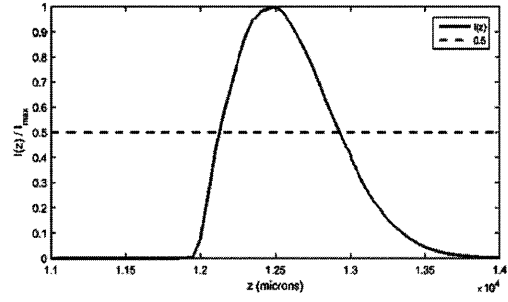


FIG. 43

【 4 5 】

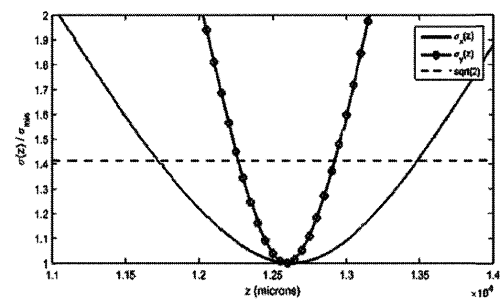
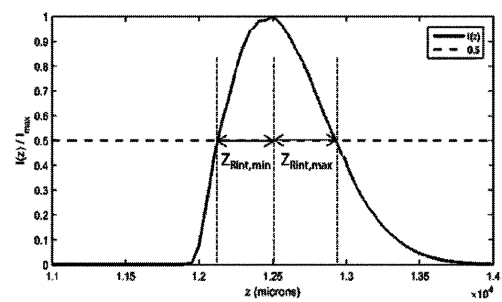


FIG. 45

フロントページの続き

- (72)発明者 ピエヒ, ギャレット アンドリュー
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 3 0 コーニング ホーンビー ロード 4 2 2 6
- (72)発明者 ツダ, セルジオ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 4 5 ホースヘッズ バーリントン ロード 1 0
- (72)発明者 ウエスト, ジェームズ アンドリュー
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8 7 0 ペインテッド ポスト チャットフィールド プ
レイス イースト 1

審査官 長谷川 真一

- (56)参考文献 特表2015-536896(JP, A)
特表2011-520748(JP, A)
米国特許出願公開第2016/0159679(US, A1)
特開平08-184581(JP, A)
特開2016-021077(JP, A)
特開2002-045985(JP, A)
米国特許出願公開第2012/0111310(US, A1)
特開2006-108478(JP, A)
特開2003-088985(JP, A)
特開2002-321081(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C 0 3 B 3 3 / 0 9
B 2 3 K 2 6 / 0 6 4
B 2 3 K 2 6 / 5 3