

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6678586号
(P6678586)

(45) 発行日 令和2年4月8日(2020.4.8)

(24) 登録日 令和2年3月19日(2020.3.19)

(51) Int. Cl.	F I
C O 3 B 33/09 (2006.01)	C O 3 B 33/09
C O 3 B 33/02 (2006.01)	C O 3 B 33/02
B 2 8 D 5/00 (2006.01)	B 2 8 D 5/00 Z
B 2 3 K 26/53 (2014.01)	B 2 3 K 26/53
B 2 3 K 26/06 (2014.01)	B 2 3 K 26/06

請求項の数 7 (全 40 頁)

(21) 出願番号	特願2016-541390 (P2016-541390)	(73) 特許権者	397068274
(86) (22) 出願日	平成26年12月15日(2014.12.15)		コーニング インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2017-507878 (P2017-507878A)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(43) 公表日	平成29年3月23日(2017.3.23)		31 コーニング リヴァーフロント プ
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/070234		ラザ 1
(87) 国際公開番号	W02015/094994	(74) 代理人	100073184
(87) 国際公開日	平成27年6月25日(2015.6.25)		弁理士 柳田 征史
審査請求日	平成29年12月14日(2017.12.14)	(72) 発明者	マリヤノヴィッチ, サシヤ
(31) 優先権主張番号	61/917, 127		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(32) 優先日	平成25年12月17日(2013.12.17)		70 ペインテッド ポスト ノルブルッ
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)	(72) 発明者	ニーバー, アルバート ロス
(31) 優先権主張番号	62/024, 581		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 148
(32) 優先日	平成26年7月15日(2014.7.15)		70 ペインテッド ポスト ラック レ
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		イン 4

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3D成形透明脆性基板の加工

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

平坦な非強化ガラス加工物をレーザ加工する方法であって、前記方法は：

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って前記加工物に向けられたレーザビーム焦線に、パルスレーザビームを集束させるステップであって、前記レーザビーム焦線は前記加工物内において誘起吸収を生成し、前記誘起吸収は、前記加工物内の前記レーザビーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

前記加工物及び前記レーザビームを前記輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、前記加工物内に前記輪郭に沿った複数の前記欠陥線をレーザ形成するステップであって、前記輪郭は、前記加工物から分離されることになるパーツを画定する、ステップ；並びに

前記画定されたパーツを含む前記加工物を、3D表面を含むように成形するステップを有してなる、方法。

【請求項2】

成形された非強化ガラス加工物をレーザ加工する方法であって、前記方法は：

前記成形されたガラス加工物を、真空平坦化処理するステップ；

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って真空平坦化処理された前記加工物に向けられたレーザビーム焦線に、パルスレーザビームを集束させるステップであって、前記レーザビーム焦線は前記加工物内において誘起吸収を生成し、前記誘起吸収は、前記加工物内の前記レーザビーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

前記真空平坦化処理された加工物及び前記レーザービームを前記輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、前記加工物内に前記輪郭に沿った複数の前記欠陥線をレーザー形成するステップであって、前記輪郭は、前記加工物から分離されることになる前記パーツを画定する、ステップ；並びに

前記画定されたパーツを含む前記真空平坦化処理された加工物に対する真空を解放するステップを有してなる、方法。

【請求項 3】

前記パーツを前記加工物から前記輪郭に沿って分離するステップを更に含む、請求項 1 または 2に記載の方法。

10

【請求項 4】

前記加工物は成形ガラスパネルである、請求項 1 ~ 3のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 5】

前記加工物はたわませたガラスパネルである、請求項 1 ~ 4のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

前記誘起吸収は、前記加工物内に、深さ約 75 マイクロメートル以下までの表面下損傷を生成する、請求項 1 ~ 5のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 7】

前記 1 つ又は複数のパスにおいて、前記加工物を前記レーザービームに対して回転させるステップを更に含む、請求項 1 ~ 6のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【発明の詳細な説明】

【関連出願】

【0001】

本出願は、2013年12月17日出願の米国仮特許出願第61/917127号、2014年7月15日出願の米国仮特許出願第62/024581号、及び2014年9月5日出願の米国仮特許出願第62/046360号の利益、並びに2014年10月31日出願の米国特許出願第14/530379号の利益を主張するものであり、これらの出願の開示全体は参照により本出願に援用される。

【技術分野】

30

【0002】

本開示は、3D成形透明脆性基板の加工に関する。

【背景技術】

【0003】

消費者向け電子製品の次世代の潮流は、ソフトウェア及びハードウェア面での革新だけでなく、設計及び機能面での魅力を有する変化をも取り入れたものである。何らかの形態の3次元(3D)ガラスパーツが組み込まれた新規の製品が定期的に発表及び発売されている。いくつかの例としては、可撓性であるか又は屈曲形状を有する湾曲LCD TVスクリーン、湾曲スマートフォン及びウェアラブルガジェット(腕時計型携帯電話、腕時計等)が挙げられる。これらのタイプのデバイスの設計の他の要素は、従来の平坦なガラスカバープレートから、異なるスタイルの3次元湾曲表面となった、裏蓋である。これらの革新により、常に搔き傷及び衝撃に対する耐性を有する必要がある、ガラス製のこれらの3Dパーツの製造プロセスに、新たな課題がもたらされる。

40

【0004】

殆どの製造ラインが平坦な2次元パーツの取り扱いのために設計されたものであるため、複数の異なる形状を形成することの難しさは大幅に増大している。一般にこれらの3Dパーツは熱間打ち抜き加工されて所望の形状に形成され、大きな困難の1つとしては、熱成形された大型のパーツから上記パーツを切り離して最終的な仕上げ済み製品とすることがある。既存の製造ラインにおいて利用される技術によっては、上記製造ラインを3D形状の加工に適合させるための第1のステップは、上記製造ラインに必要な性能を追加導入

50

することである。例えばCNC機械加工は、より複雑な形状の加工を可能とするために5軸の工具の運動を必要とし得る。同様に、レーザ、アプレシブウォータージェット、罫書き及び破断といった他の技術全てを、3次元の片の特徴部分のうちのいくつかに切断、フライス削り、穿孔及び仕上げを施すために適合させる必要がある。

【0005】

2Dから3D加工への移行の複雑さに追加される他の課題は、材料に関するものである。3Dのパーツでは、湾曲、屈曲及び折り返しが機械的応力の蓄積の源となり、これはパーツの熱形成後のパーツの加工に大きな影響を与え得る。例えばパーツを大型ガラスプレートから熱間打ち抜き加工する際、マトリクスからの切断及び切り離しが必要となり、パーツの形状によっては、湾曲したパーツ上に蓄積された残留応力が、工具との接触時にパーツの粉碎を容易に誘起し得る。

10

【0006】

ガラスを切断及び分離するためには、縁部形状と同じ数だけ異なる方法が存在する。ガラスは、機械的に(CNC機械加工、アプレシブウォータージェット、罫書き及び破断等)、電磁照射(レーザ、放電、ジャイロトロン等)及び多くの他の方法を用いて、切断できる。より慣用的かつ一般的な方法(罫書き及び破断、又はCNC機械加工)は、異なるタイプ及びサイズの欠陥を有する縁部を生成する。また、縁部が表面に対して完璧に垂直ではないことが見受けられることも一般的である。欠陥を排除し、強度が改善されたより平らな表面を縁部に与えるために、縁部を摩砕することが多い。摩砕プロセスは、縁部材料の摩擦による除去を伴い、これは縁部に所望の仕上げを与えることができ、また縁部の形状を成形することもできる(ブルノーズ形状、面取り、鉛筆状等)。摩砕及び研磨ステップを可能とするために、パーツを最終的な所望の寸法より大きく切断する必要がある。

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

材料のレーザ加工の分野は、切断、穿孔、フライス削り、溶接、溶融等を伴う広範な用途、及び複数の異なるタイプの材料を包含する。これらの用途のうち特に関心が高いのは、異なる複数のタイプの基板の切断又は分離である。しかしながら、既存のレーザ技術及び工具の全てが、精密な切断及び仕上げに適しているわけではない。融除プロセス等、多くは研削が過剰となり、多くの欠陥及び微小割れを残す。上述のように、欠陥及び微小割れは、比較的弱い縁部及びパーツをもたらし、パーツが所望の寸法に仕上がるまでの摩砕及び研磨ステップを可能とするために、大型の基板を必要とする。その結果、現在市場で実施されている方法に比べてより迅速かつ清浄かつ安価で、反復可能性及び信頼性がより高い、3Dガラス形状切断及び抜き出し方法に対して多大な関心がある。

30

【課題を解決するための手段】

【0008】

本出願は、強化ガラス又は非強化ガラスにおいて、特に関心が持たれている成形された3Dの薄型透明脆性基板の任意の形状を切断及び分離するためのプロセスを記載する。本方法により、後加工仕上げステップを必要とすることなく、3Dパーツをその最終形態に切断して抜き出すことができる。本方法は、(例えば化学的にイオン交換された若しくは熱強化された)強化型又は非強化型(原料ガラス)の3Dのパーツに適用できる。

40

【0009】

本プロセスは、破片が無視できる程度しかなく、欠陥が最小であり、また縁部への表面下損傷が少ない状態で、制御可能な様式でパーツを分離し、これによりパーツの強度が保持される。本レーザ法は、選択されたレーザ波長に対して透過性の材料に好適である厚さ0.55mmのガラスのシート、例えば成形されたCorning Gorilla(登録商標)ガラス、例えばガラスコード2319を用いて、本方法を実証した。

【0010】

本プロセスにおいて、基板材料に垂直な欠陥線を生成するために、超短パルスレーザを使用する。一連の欠陥線は、形状の所望の輪郭を描く断層線を生成し、割れ伝播のための

50

、耐性が最低となった経路を確立し、上記経路に沿って、その基板マトリクスからの上記形状の分離及び取り外しが発生する。このレーザ分離法は、元の基板からの3D形状の手動分離、部分的分離又は完全な分離を可能とするよう調整及び構成できる。

【0011】

第1のステップでは、加工対象の物体(基板)に超短パルスレーザビームを照射し、上記超短パルスレーザビームは、高密度の高いアスペクト比の線状焦点に集束し、上記線状焦点は基板の厚さを通して貫通する。この高エネルギー密度の容積内において、材料は非線形効果によって改質される。非線形効果は、レーザビームから基板へとエネルギーを伝達して欠陥線の形成を可能とする機序をもたらす。この高光密度を用いなければ、非線形吸収はトリガされないことに留意しておくことは重要である。非線形効果の強度閾値未満では、材料はレーザ照射に対して透過性であり、その元の状態のままとなる。レーザで所望の線又は経路全体を走査することにより、幅が狭い断層線(数マイクロメートル幅の複数の垂直な欠陥線)は、基板から分離されることになるパーツの周縁又は形状を画定する。

10

【0012】

いくつかの実施形態では、パルス持続時間は、約1ピコ秒超かつ約100ピコ秒未満、例えば約5ピコ秒超かつ約20ピコ秒未満とすることができ、繰り返し数は約1kHz~4MHz、例えば約10kHz~650kHzとすることができる。上述の繰り返し数の単一のパルスに加えて、約1nsec~約50nsec、例えば10nsec~30nsec、例えば約20nsecの持続時間によって隔てられた2つ以上のパルス(例えば3パルス、4パルス、5パルス、10パルス、15パルス、20パルス又はそれ以上)のバースト中でパルスを生成でき、バースト繰り返し周波数は約1kHz~約200kHzとすることができる。パルスレーザビームは、材料が略透過性となるように選択された波長を有することができる。材料において測定される平均レーザ出力は、材料の厚さ1mmあたり40マイクロジュール超、例えば40マイクロジュール/材料の厚さ1mm~1000マイクロジュール/材料の厚さ1mm、又は100~650マイクロジュール/材料の厚さ1mmとすることができる。

20

【0013】

レーザビーム焦点は、約0.1mm~約10mm、例えば約1mm、約2mm、約3mm、約4mm、約5mm、約6mm、約7mm、約8mm、若しくは約9mm、又は約0.1mm~約1mmの長さを有することができ、また約0.1マイクロメートル~約5マイクロメートルの平均スポット直径を有することができる。孔又は欠陥線はそれぞれ、0.1マイクロメートル~100マイクロメートル、例えば0.25~5マイクロメートルの直径を有することができる。

30

【0014】

複数の垂直な欠陥線を有する断層線が生成されると：1)手動で、又は断層線若しくは断層線周辺に対する機械的応力；応力又は圧力は、断層線の両側を離れるように牽引して、依然として一体として結合している領域を破断する、張力を生成しなければならない；2)熱源を用いて、断層線の周辺に応力領域を生成し、上記垂直な欠陥線に張力を印加し、部分的又は全体的な自己分離を誘起することによって、分離を発生させることができる。これら両方の場合において、分離は、レーザ走査速度、レーザ出力、レンズのパラメータ、パルス幅、繰り返し数等といったプロセスパラメータに左右される。

40

【0015】

本開示は：

3D表面を有するガラス加工物をレーザ加工する方法にまで及び、本方法は：

ビーム伝播方向に沿って配向され、上記加工物から分離されることになるパーツを画定する輪郭に向けられたレーザビーム焦点に、パルスレーザビームを集束させるステップ；

1つ又は複数のパスにおいて：

加工物及びレーザビームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させるステップであって、レーザビーム焦点は加工物内において、レーザビーム焦点が加工物内へと延在する輪郭に沿った位置に誘起吸収を生成し、誘起吸収は、各位置において、加工物内のレーザビー

50

ム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；並びに

加工物及びレーザービームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させるステップを有してなり、

上記1つ又は複数のパスは、加工物中の部品の輪郭に沿って生成された欠陥線が、加工物からのパーツの分離を促進するために十分な数及び深さのものとなるように選択される。

【0016】

本開示は：

平坦な非強化ガラス加工物をレーザー加工する方法にまで及び、本方法は：

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って加工物に向けられたレーザービーム焦線に、パルスレーザービームを集束させるステップであって、レーザービーム焦線は加工物内において誘起吸収を生成し、この誘起吸収は、加工物内のレーザービーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

加工物及びレーザービームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、加工物内に輪郭に沿った複数の欠陥線をレーザー形成するステップであって、上記輪郭は、加工物から分離されることになるパーツを画定する、ステップ；並びに

上記画定されたパーツを含む加工物を、3D表面を含むように成形するステップを有してなる。

【0017】

本開示は：

成形された非強化ガラス加工物をレーザー加工する方法にまで及び、本方法は：

上記成形されたガラス加工物を、真空平坦化処理するステップ；

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って真空平坦化処理された加工物に向けられたレーザービーム焦線に、パルスレーザービームを集束させるステップであって、レーザービーム焦線は加工物内において誘起吸収を生成し、この誘起吸収は、加工物内のレーザービーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

真空平坦化処理された加工物及びレーザービームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、加工物内に輪郭に沿った複数の欠陥線をレーザー形成するステップであって、上記輪郭は、加工物から分離されることになるパーツを画定する、ステップ；並びに

上記画定されたパーツを含む真空平坦化処理された加工物に対する真空を解放するステップを有してなる。

【0018】

本開示は：

3D表面を有するガラス物品であって、上記ガラス物品は、少なくとも250マイクロメートル延在する複数の欠陥線を有する少なくとも1つの縁部を備え、各欠陥線の直径は、約5マイクロメートル以下である、ガラス物品に及ぶ。

【0019】

以上は、同様の参照符号は異なる複数の図を通して同一のパーツを示す添付の図面において図示されている例示的实施形態に関する、以下のより詳細な説明から、明らかになるであろう。これらの図は必ずしも正確な縮尺ではなく、図示されている実施形態には強調が施されている。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1A】改質したガラスの、等間隔の複数の欠陥線を有する断層線の図。図1Aは、試料を通る断層線の、レーザーによる生成を示す。

【図1B】改質したガラスの、等間隔の複数の欠陥線を有する断層線の図。図1Bは、分離後の、欠陥線を有する縁部を示す。

【図1C】改質したガラスの、等間隔の複数の欠陥線を有する断層線の図。図1Cは、分

10

20

30

40

50

離された縁部の写真である。

【図 2 A】レーザビーム焦点の位置決め、即ち焦点に沿って誘起吸収によりレーザ波長に対して透過性の材料の加工の図

【図 2 B】レーザビーム焦点の位置決め、即ち焦点に沿って誘起吸収によりレーザ波長に対して透過性の材料の加工の図

【図 3 A】一実施形態によるレーザ加工のための光学組立体を示す図

【図 3 B - 1】基板に対してレーザビーム焦点を様々に位置決めすることによって基板を加工するある選択肢を示す図

【図 3 B - 2】基板に対してレーザビーム焦点を様々に位置決めすることによって基板を加工する別の選択肢を示す図

【図 3 B - 3】基板に対してレーザビーム焦点を様々に位置決めすることによって基板を加工するさらに別の選択肢を示す図

【図 3 B - 4】基板に対してレーザビーム焦点を様々に位置決めすることによって基板を加工するさらなる選択肢を示す図

【図 4】レーザ加工のための光学組立体の第 2 の実施形態を示す図

【図 5 A】レーザ加工のための光学組立体の第 3 の実施形態を示す図

【図 5 B】レーザ加工のための光学組立体の第 3 の実施形態を示す図

【図 6】レーザ加工のための光学組立体の第 4 の実施形態を示す図

【図 7】材料のレーザ加工のためのレーザ強度に関する異なる複数の方式を示す図。図 7 A は集束されていないレーザビームを示し、図 7 B は球面レンズを用いて集光されたレーザビームを示し、図 7 C はアキシコン又は回折フレネルレンズを用いて集光されたレーザビームを示す。

【図 8 A】ピコ秒レーザに関するレーザ放出を時間の関数として示す図。各放出は、1 つ又は複数のサブパルスを含み得るパルス「バースト」を特徴とする。パルス持続時間、パルス間の間隔、及びバースト間の間隔に対応する時間が図示されている。

【図 8 B】ピコ秒レーザに関するレーザ放出を時間の関数として示す図。各放出は、1 つ又は複数のサブパルスを含み得るパルス「バースト」を特徴とする。パルス持続時間、パルス間の間隔、及びバースト間の間隔に対応する時間が図示されている。

【図 8 C】ある実施形態による方法による、平坦なガラスパネルを 3 D 成形されたパーツに加工するステップ

【図 9】ある実施形態による方法による、たわんだ非強化「G o r i l l a」2 3 1 9 から作製された仕上げ済みパーツ

【図 1 0 A】トレースされた経路に従った欠陥線を生成するためのプロセス。3 D ガラス表面と線状焦点との間の各相対位置において、コーナが丸くなった長方形の全周がトレースされる。次に上記相対位置を 2 0 0 マイクロメートルだけ段階的に下げ、同一の形状を再びトレースする。湾曲したガラスパネル中に欠陥線が完全に画定されるまで、このプロセスを繰り返す。

【図 1 0 B】ガラスの厚さが線状焦点の範囲内となっている領域にのみ欠陥線を生成する方法を誇張して示す図。この場合、線状焦点の範囲（又は長さ）は約 1 m m であり、ステップは約 1 0 0 マイクロメートルであった。隣接するステップの長方形の走査の間には重複が存在する。

【図 1 1】大型のガラスパーツから形成されて抜き出された個々のパーツ（上の行）と、同一のレーザ法を用いてこのプロセスの規模を拡大するための方法（下の行）

【図 1 2】本開示の方法を用いた複数のパーツの抜き出し

【図 1 3】熱によってたわんだガラスパネルから 3 D パーツを形成して抜き出すための代替的プロセス

【図 1 4】熱によってたわんだガラスパネルから 3 D パーツを形成し、強化して抜き出すための、別の代替的プロセス

【図 1 5 A】曲率半径が小さいガラスパーツの成形を促進するために。実施形態による方法によってレーザ穿通された、予備形成シート

10

20

30

40

50

【図15B】図15Aに示すシートから分離された、1つの個片化された予備形成物

【図16A】レーザ穿通孔（欠陥線）によって可能となった半径を有する3D表面の形成前の、図15Bの個片化された予備形成物の側面断面図

【図16B】レーザ穿通孔（欠陥線）によって可能となった半径を有する3D表面の形成後の、図15Bの個片化された予備形成物の側面断面図

【図16C】複数のレーザ穿通孔（欠陥線）によって可能となった小さなコーナ半径を有する表面の形成前の、図15Bの個片化された予備形成物のコーナの断面図

【図16D】複数のレーザ穿通孔（欠陥線）によって可能となった小さなコーナ半径を有する表面の形成後の、図15Bの個片化された予備形成物のコーナの断面図

【発明を実施するための形態】

10

【0021】

これより、例示的实施形態について説明する。

【0022】

本出願は、強化ガラス又は非強化ガラスにおいて特に関心の的となっている、任意の形状の成形された3D薄型透明脆性基板の正確な切断及び分離のためのプロセスを提供する。一実施形態では、上記ガラスはGorilla（登録商標）ガラス（全コード、Corning, Inc. から入手可能）である。実施形態による方法は、後加工仕上げステップを必要とすることなく、1つ又は複数の3Dパーツ、即ち3D表面を有するパーツをその最終的なサイズに切断して抜き出すことができる。本方法は、強化された（例えば化学的にイオン交換された）又は強化されていない（原料ガラス）3Dパーツに適用できる。

20

【0023】

本開示による、レーザを用いた透明材料の切断は、本明細書では穿孔又はレーザ穿孔又はレーザ加工と呼ぶ場合もある。

【0024】

本プロセスにより、破片が無視できる程度しかなく、欠陥が最小であり、また縁部への表面下損傷が少ない状態で、制御可能な様式でパーツを分離できるようになり、これによりパーツ又は加工物の強度が保持される。加工物は、本明細書で開示されるレーザ法に供される材料又は物体であり、本明細書では材料、基板又は基板材料とも呼ばれる。1つ又は複数のパーツ又は物品を加工物から分離できる。パーツ又は物品としては例えば、湾曲表面を有する携帯電話用のガラスカバー、又は自動車用ガラスが挙げられる。

30

【0025】

本レーザ法は、線形強度方式において選択されたレーザ波長に対して透過性又は略透過性の材料に好適である。本開示の文脈において、材料又は物品は、レーザ波長における材料の吸収率が、材料の深さ1mmあたり約10%未満、又は材料の深さ1mmあたり約5%未満、又は材料の深さ1mmあたり約2%未満、又は材料の深さ1mmあたり約1%未満である場合に、当該レーザ波長に対して略透過性である。本レーザ法は、レーザ波長に対する基板材料の透過性を、出力の線形方式（低いレーザ強度（エネルギー密度））において利用できる。線形強度方式における透過性により、集束したレーザビームによって画定される高強度領域から、基板の表面に対する損傷及び表面下損傷が削減又は防止される。

【0026】

40

本明細書において使用される場合、表面下損傷は、本開示によるレーザ加工を受けた基板又は材料から分離されたパーツの周縁表面における構造的不完全部分の最大サイズ（例えば長さ、幅、直径）を表す。構造的不完全部分は上記周縁表面から延在するため、表面下損傷は、本開示によるレーザ加工による損傷が発生する周縁表面からの最大深さとも考えられる。本明細書において、分離されたパーツの周縁表面は、分離されたパーツの縁部又は縁部表面を表し得る。構造的不完全部分は割れ又は空所であってよく、基板又は材料から分離されたパーツの破碎又は破損を促進する機械的弱点を表す。表面下損傷のサイズを最小化することにより、本発明は、分離されたパーツの構造的完全性及び機械的強度を改善する。

【0027】

50

以下に記載の複数の方法によると、レーザを使用して、極めて僅かな ($< 75 \mu\text{m}$ 、場合によっては $< 50 \mu\text{m}$ の) 表面下損傷及び破片生成しか伴わずに、高度に制御された、材料を通した完全な又は部分的な穿通孔を、シングルパスで生成できる。表面下損傷は、深さ $100 \mu\text{m}$ 以下又は深さ $75 \mu\text{m}$ 以下又は深さ $60 \mu\text{m}$ 以下又は深さ $50 \mu\text{m}$ 以下に制限でき、切断は僅かな破片しか生成しないものとする事ができる。これは、ガラスの厚さを完全に穿通するために複数回のパスが必要となる場合が多く、融除プロセスから多量の破片が形成され、より広範囲の表面下損傷 ($> 100 \mu\text{m}$) 及び縁部欠けが発生する、典型的なスポット集束レーザの使用による材料の融除とは対照的である。

【0028】

従って、本方法を用いて、1つ若しくは複数の高エネルギーパルス又は1つ若しくは複数の高エネルギーパルスのバーストを用いて、透明材料に、微小な (即ち直径 $< 2 \mu\text{m}$ 及び $> 100 \text{nm}$ 、並びにいくつかの実施形態では直径 $< 0.5 \mu\text{m}$ 及び $> 100 \text{nm}$ の) 細長い欠陥線 (本明細書では穿通孔、孔又は損傷トラックとも呼ばれる) を生成できる。穿通孔は、レーザによって改質された基板材料の領域を表す。レーザが誘起する改質は、基板材料の構造を崩壊させ、機械的に弱い部位を構成する。構造的崩壊は、圧縮、溶融、材料の脱落、再構成及び結合切断を含む。穿通孔は基板材料内へと延在し、レーザの断面形状 (通常は円形) と一致する断面形状を有する。穿通孔の平均直径は、 $0.1 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 、又は $1 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 、又は $2 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 、又は $0.1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ であってよい。いくつかの実施形態では、穿通孔は「貫通孔」であり、これは基板材料の上部から底部まで延在する孔又は開放チャネルである。いくつかの実施形態では、穿通孔は連続した開放チャネルでなくてよく、レーザによって材料から脱落した固体材料のセクションを含んでよい。脱落した材料は、穿通孔が画定する空間を塞ぐか、又は部分的に塞ぐ。脱落した材料のセクション間に、1つ又は複数の開放チャネル (非閉塞領域) が散乱してよい。開放チャネルの直径は $< 1000 \text{nm}$ 、又は $< 500 \text{nm}$ 、又は $< 400 \text{nm}$ 、又は $< 400 \text{nm}$ 、又は $10 \text{nm} \sim 750 \text{nm}$ 、又は $100 \text{nm} \sim 500 \text{nm}$ であってよい。上記孔を取り囲む、材料の崩壊した又は改質された (例えば圧縮された、溶融された又はその他の方法で変化した) 領域は、好ましくは $< 50 \mu\text{m}$ (例えば $< 10 \mu\text{m}$) の直径を有する。

【0029】

個々の穿通孔は、数百キロヘルツ (例えば1秒あたり数十万個の穿通孔) の速さで生成できる。従って、レーザ源と材料との間の相対運動により、これらの穿通孔を互いに隣接して配置でき、所望に応じて空間的間隔を1マイクロメートル未満から数マイクロメートル、又は数十マイクロメートルにまで変更できる。断層線の方向に沿った隣接する欠陥線の間隔は、例えば $0.25 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 、又は $0.50 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m}$ 、又は $0.50 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$ 、又は $0.50 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 、又は $0.50 \mu\text{m} \sim 3.0 \mu\text{m}$ 、又は $3.0 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ とすることができる。上記空間的間隔は、切断を促進できるように選択される。

【0030】

線形強度方式における基板材料の透過性に加えて、レーザ源の選択は更に、透明材料における多光子吸収 (MPA) を誘起できる能力に基づく。MPAは、材料を比較的低いエネルギー状態 (通常グラウンド状態) からより高いエネルギー状態 (励起状態) へと励起するための、同一の又は異なる周波数の多数の光子の同時吸収である。励起状態は、励起された電子的状態又はイオン化状態であってよい。材料の高エネルギー状態と低エネルギー状態との間のエネルギー差は、上記2つ以上の光子のエネルギーの合計に等しい。MPAは、一般には線形吸収よりも数段階弱い大きさの非線形プロセスである。これは、MPAの強度が光の強度の二乗以上の力に依存し、これによってMPAが非線形光学プロセスとなる点で、線形吸収とは異なる。通常の光強度では、MPAは無視できる。レーザ源 (特にパルスレーザ源) の集束領域等における光強度 (エネルギー密度) が極めて高い場合、MPAは目に見えるものとなり、光源のエネルギー密度が十分に高い領域内の材料において測定可能な効果をもたらす。集束領域内においても、エネルギー密度は、イオン化が得られる程度に十分に高

10

20

30

40

50

いものとなり得る。

【0031】

原子レベルにおいて、個々の原子のイオン化は、別個のエネルギー要件を有する。ガラス中に一般に使用される複数の元素（例えば Si、Na、K）は、イオン化エネルギーが比較的低い（ $\sim 5\text{ eV}$ ）。MPAという現象を用いない場合、 $\sim 5\text{ eV}$ における線形イオン化を生成するには約 248 nm の波長が必要となる。MPAを用いる場合、エネルギーに関して $\sim 5\text{ eV}$ だけ分離した状態間のイオン化又は励起は、 248 nm より長い波長を用いて達成できる。例えば、波長 532 nm の光子は $\sim 2.33\text{ eV}$ のエネルギーを有するため、波長 532 nm の2つの光子は、例えば2光子吸収（TPA）において、エネルギーに関して $\sim 4.66\text{ eV}$ だけ分離した状態間の遷移を誘起できる。従って、レーザービームのエネルギー密度が、必要な励起エネルギーの半分のエネルギーを有するレーザー波長の非線形 TPA を誘起することができる程度に十分に高い、材料の領域において、原子及び結合を選択的に励起又はイオン化できる。

10

【0032】

MPAにより、励起された原子又は結合の、隣接する原子又は結合からの局所的再構成及び分離をもたらすことができる。結合又は構成において得られるこのような改質により、MPAが起こる材料の領域からの、物質の非熱的融除及び除去をもたらすことができる。この物質の除去は構造的欠陥（以上では欠陥線、損傷線又は「穿通孔」と呼ばれている）を生成し、これは材料を機械的に弱化し、機械的又は熱的応力の印加時に割れ又は破砕を発生し易くする。穿通孔の配置を制御することによって、割れが発生する輪郭又は経路を正確に画定でき、材料の正確な微小機械加工を達成できる。一連の穿通孔によって画定された輪郭は、断層線と考えることができ、これは材料中の構造的に弱い領域に対応する。断層線は、材料からのパーツの分離のための好ましい輪郭を画定し、分離されたパーツの形状を制御する。一実施形態では、微小機械加工は、レーザーで加工された材料からのパーツの分離を含み、ここで上記パーツは、レーザーが誘起したMPA効果によって形成された複数の穿通孔の閉じた輪郭を画定する断層線によって決定された、正確に画定された形状又は周縁を有する。本明細書において使用される場合、用語「閉じた輪郭（closed contour）」は、レーザーの線で形成された穿通孔経路を指し、ここでこの経路はいくつかの場所でそれ自体と交差する。内部輪郭は、得られる形状が材料の外側部分によって完全に取り囲まれている場所に形成される経路である。

20

30

【0033】

好ましいレーザーは、超短パルスレーザー（パルス持続時間が 100 ピコ秒以下のレベル）であり、パルスモード又はバーストモードで動作できる。パルスモードでは、公称では同一の一連の複数の単一パルスがレーザーから放出されて加工物に向けられる。パルスモードでは、レーザーの繰り返し数は、パルス間の時間的間隔によって決定される。バーストモードでは、パルスのバーストがレーザーから放出され、ここで各バーストは（同一の又は異なる振幅の）2つ以上のパルスを含む。バーストモードでは、1つのバースト内のパルスは（バーストに関するパルス繰り返し数を画定する）第1の時間間隔によって分離され、バーストは（バースト繰り返し数を画定する）第2の時間間隔によって分離され、第2の時間間隔は典型的には第1の時間間隔よりも遥かに長い。（パルスモードの文脈であるかバーストモードの文脈であるかにかかわらず）本明細書において使用される場合、時間間隔は、パルス又はバーストの対応する部分間（例えば前縁部 前縁部間、ピーク ピーク間、又は後縁部 後縁部間）の時間差を指す。パルス及びバースト繰り返し数はレーザーの設計によって制御され、典型的には、例えばレーザーの動作条件を調整することにより、限度内で調整できる。典型的なパルス及びバースト繰り返し数は、 $\text{kHz} \sim \text{MHz}$ 範囲内である。

40

【0034】

（パルスモードにおける、又はバーストモードのバースト内のパルスに関する）レーザーパルス持続時間は、 10^{-10} 秒以下、又は 10^{-11} 秒以下、又は 10^{-12} 秒以下、又は 10^{-13} 秒以下であってよい。本明細書に記載の例示的实施形態では、レーザーパル

50

ス持続時間は10¹⁵秒超である。

【0035】

実施形態のプロセスの1つの特徴は、超短パルスレーザーによって生成された欠陥線の高いアスペクト比である。この高いアスペクト比により、基板材料の上面から底面へと延在する欠陥線を生成できる。本方法はまた、基板材料内の制御された深さまで延在する欠陥線を形成できる。欠陥線は単一のパルス、又は複数のパルスの単一のバーストによって生成でき、必要に応じて、影響を受ける領域の範囲（例えば深さ及び幅）を増大させるために、追加のパルス又はバーストを使用できる。

【0036】

ガウシアンレーザービームをアキシコンレンズに送ることによって、線状焦点の生成を実施でき、この場合、ガウスベッセルビームとして知られているビームプロファイルが生成される。このようなビームは、ガウシアンビームよりも遥かにゆっくりと回折する（例えば数十マイクロメートル以下ではなく、数百マイクロメートル又はミリメートルの範囲の単一マイクロメートル（single micron）スポットサイズを維持できる）。従って、焦点の深さ又は材料との強い相互作用の長さは、ガウシアンビームのみを使用した場合より遥かに大きくなり得る。エアリービーム等、他の形態又はゆっくりと回折する若しくは回折しないビームも使用してよい。

【0037】

図1A~1Cに示すように、薄型ガラスプレート110を切断するための方法は、超短パルスレーザービーム140を用いて、基板材料130内に、複数の垂直な欠陥線120で形成された断層線又は輪郭110を生成することに基づくものである。材料の特性（吸収率、熱膨張率（CTE）、応力、組成等）及び材料130の加工のために選択されるレーザーパラメータに応じて、自己分離を誘起するために断層線110の生成だけで十分とすることができる。この場合、張力/屈曲力、加熱又はCO₂レーザーといった副次的な分離プロセスは不要となる。

【0038】

図1Bは、複数の垂直な欠陥線120によって画定される輪郭又は断層線110に沿って加工物を分離した後の、加工物の縁部を示す。欠陥線を生成する誘起吸収は、分離された縁部又は表面上に、平均直径が3マイクロメートル未満の粒子を生成でき、これにより極めて清浄な切断プロセスが得られる。図1Cは、図1Aに図示された、これ以降で更に説明されるレーザープロセスを用いて分離されたパーツの縁部を示す写真である。

【0039】

場合によっては、生成された断層線は、基板材料からパーツを自発的に分離させるには不十分であり、副次的なステップが必要となる場合がある。例えば必要に応じて、第2のレーザーを用いて熱応力を生成し、ガラスパーツを互いから分離できる。厚さ0.55mmの「Gorilla」2319ガラスの場合、ガラスの分離は、例えば機械的力の印加によって、又は熱源（例えば赤外レーザー、例えばCO₂レーザー）を用いて熱応力を生成し、断層線に沿った基板材料からのパーツの分離を推し進めることによって、欠陥線を生成した後に達成できる。別の選択肢は、赤外レーザーを用いて分離を開始させ、分離を手動で完了することである。任意の赤外レーザーによる分離は、デューティサイクルを制御することによって出力が調整された、10.6マイクロメートルで放出を行う集束連続波（cw）レーザーを用いて達成できる。焦点変更（即ち集束スポットサイズまで、かつ集束スポットサイズを含む程度のデフォーカス）を用いて、スポットサイズを変更することによって、誘起される熱応力を変化させる。デフォーカスレーザービームは、レーザーの波長のサイズと同等の最小の回折限界スポットサイズよりも大きいスポットサイズを生成するレーザービームを含む。例えばCO₂レーザーに関して、2mm~20mm、又は2mm~12mm、又は約7mm、又は約2mm及び/又は約20mmのデフォーカススポットサイズ（1/e²直径）を使用でき、上記CO₂レーザーの回折限界スポットサイズは、放出波長が10.6マイクロメートルの場合、遥かに小さくなる。

【0040】

欠陥線を生成するための方法は複数存在する。焦線又は線状焦点を形成するための光学的方法はドーナツ状レーザービーム及び球面レンズ、アキシコンレンズ、回折素子を使用する複数の形態、又は高強度の線形領域を形成するための他の方法を取ることができる。基板又は加工物材料の集束領域における破壊を生成することにより、非線形光学的效果（例えば非線形吸収、多光子吸収）によって基板材料の破壊を生成するために十分な光学強度に到達しさえすれば、レーザーのタイプ（ピコ秒、フェムト秒等）及び波長のタイプ（IR、緑色、UV等）も変更できる。

【0041】

本出願では、高アスペクト比の垂直な欠陥線を、一貫した、制御可能かつ反復可能な方法で生成するために、超短パルスレーザーを使用する。この垂直な欠陥線の生成を可能とする光学的設定の詳細については以下に記載され、また2014年1月14日出願の米国特許出願第14/154525号明細書に記載されている。上記特許出願の内容全体は、それが出願において完全に記載されているかのように、参照により本出願に援用される。このコンセプトの本質は、超短（ピコ秒又はフェムト秒の持続時間の）ベッセルビームを使用して高アスペクト比かつ傾斜のない微小チャンネルを生成するために、光学レンズ組立体中にアキシコンレンズ素子を使用することである。換言すると、上記アキシコンは、レーザービームを、基板材料中の円筒形かつ高アスペクト比（長さが長く直径が小さい）の高強度領域に集光させる。集光されたレーザービームによって生成された高強度により、レーザー及び基板材料の電磁場の非線形相互作用が発生し、レーザーエネルギーが基板に伝達されて複数の欠陥の形成が発生し、これらが断層線の構成要素となる。しかしながら、レーザーエネルギー強度が高くない基板の領域（例えば基板表面、中央収束線を取り囲む基板のガラス容積）において、基板はレーザーに対して透過性であり、レーザーから基板へとエネルギーを伝達する機序が存在しないことを理解することが重要である。結果として、レーザー強度が非線形閾値未満であれば、基板には何も起こらない。

【0042】

図2A及び2Bに移ると、材料をレーザー加工する方法は、ビーム伝播方向に沿って見て、パルスレーザービーム2をレーザービーム焦線2bに集束させるステップを含む。レーザービーム焦線2bは、例えばベッセルビーム、エアリービーム、ウェーバービーム及びマチュービーム（即ち非回折ビーム）といった複数の方法で生成でき、これらのビームの場のプロファイルは典型的には、ガウス関数よりも横断方向（即ち伝播の方向）においてよりゆっくりと減衰する特別な関数によって与えられる。図3Aに示すように、レーザー3（図示せず）はレーザービーム2を放出し、このレーザービーム2は、光学組立体6に入射する部分2aを有する。光学組立体6は入射したレーザービームの方向を、ビーム方向（焦線の長さ1）に沿った所定の広がり範囲に亘って、出力側のレーザービーム焦線2bへと変化させる。平面状の基板1（加工されることになる材料）は、レーザービーム2のレーザービーム焦線2bと少なくとも部分的に重なるように、ビーム経路内に位置決めされる。参照符号1aは、平面状の基板の、光学組立体6又はレーザーそれぞれに対面する表面を指し、参照符号1bは、基板1の反対側の（遠方の）表面を指す。基板の厚さ（平面1a及び1bに対して、即ち基板平面に対して垂直に測定される）は、dで標識する。

【0043】

図2Aに示すように、基板1は、長手方向ビーム軸に対して略垂直に、及びこれに伴って、光学組立体6が生成した同一の焦線2bの後側に整列される（基板は図の平面に対して垂直である）。ビーム方向に沿って見ると、基板は焦線2bに対して、焦線2bが基板の表面1aの前で始まり、基板の表面1bの前で止まる、即ち焦線2bが基板内で終了し、表面1bを超えないように、位置決めされる。レーザービーム焦線2bと基板1の重複領域において、即ち焦線2bで被覆された基板材料において、レーザービーム焦線2bは、（レーザービーム焦線2bに沿った好適なレーザー強度（この強度は、長さ1のセクション（即ち長さ1の線状焦点）上にレーザービーム2が集束することを保証する）を想定した場合に）（長手方向のビーム方向に沿って整列された）セクション2cを画定し、上記セクション2cに沿って、非線形誘起吸収が基板材料中で生成される。誘起吸収は、セクション2

c に沿った基板材料中での欠陥線の形成を誘起する。欠陥線の形成は局所的なものだけではなく、誘起吸収のセクション 2 c の全長に亘って延在する。セクション 2 c の長さ（これはレーザビーム焦線 2 b と基板 1 との重複の長さに対応する）は、参照符号 L で標識される。誘起吸収セクション 2 c（又は欠陥線の形成が実行される基板 1 の材料のセクション）の平均直径又は平均直径（範囲（例えば長さ若しくは他の関連する直線寸法））は、参照符号 D で標識される。この平均距離 D は基本的には、レーザビーム焦線 2 b の平均直径、即ち約 0.1 マイクロメートル～約 5 マイクロメートルの平均スポット直径に対応する。

【 0 0 4 4 】

図 2 A に示すように、（レーザビーム 2 の波長 に対して透過性の）基板材料は、焦線 2 b に沿った誘起吸収により、局所的に加熱される。この波長は例えば 1064、532、355 又は 266 ナノメートルであってよい。誘起吸収は、焦線 2 b 内のレーザビームの高い強度に関連する非線形効果（例えば 2 光子吸収、多光子吸収）に起因する。図 2 B は、加熱された基板材料が最終的に膨張することにより、これに対応して誘起張力が微小割れ及び欠陥線の形成を引き起こし、上記張力は表面 1 a において最高となる。

10

【 0 0 4 5 】

焦線 2 b を生成するために適用できる代表的な光学組立体 6、及びこれらの光学組立体を適用できる代表的な光学的設定について、以下に記載する。全ての組立体又は設定はこれまでの記載に基づくものであり、従って、同一の構成部品若しくは特徴部分又は機能が同一の構成部品若しくは特徴部分に関しては同一の参照符号を用いる。従って差異のみを以下に記載する。

20

【 0 0 4 6 】

分離されたパーツ（分離はこれに沿って発生する）の表面の（破断強度、幾何学的精度、粗度及び再機械加工の必要の回避に関する）高い品質を保証するために、基板表面上に分離又は取り外しの線（断層線）に沿って位置決めされた個々の断層線を、以下に記載の光学組立体（以下、この光学組立体は代替的にレーザ光学部品とも呼ばれる）を用いて生成する必要がある。分離された表面（又は切断縁部）の粗度は主に、断層線のスポットサイズ又はスポット直径から決定される。表面の粗度は例えば、ASME B46.1 規格によって定義された Ra 表面粗度パラメータによって特徴決定できる。ASME B46.1 に記載されているように、Ra は、評価長さ内で記録された、中心線からの表面プロファイルの高さ偏差の絶対値の算術平均である。別の言い方をすると、Ra は、中心に対する表面の個々の特徴部分（山及び谷）の絶対高さ偏差の組の平均である。

30

【 0 0 4 7 】

例えば 0.5 マイクロメートル～2 マイクロメートルという小さいスポットサイズ、又は基板 1 の材料と相互作用するレーザ 3 の所定の波長 を達成するために、通常、レーザ光学部品 6 の開口数に対して特定の要件を課す必要がある。これらの要件は、以下に記載のレーザ光学部品 6 によって満たされる。必要な開口数を達成するために、上記光学部品は、公知のアッベの式（開口数 = $n \sin \theta$ 、 n : 加工される材料又は加工物の屈折率、 θ : 開口角度の 1/2 ; 及び $\theta = \arctan(D_L / 2f)$; D_L : 開口の直径、 f : 焦点距離）に従って、所定の焦点距離に関して必要な開口を配置しなければならない。その一方でレーザビームは上記光学部品を、上記必要な開口まで照明しなければならず、これは典型的には、レーザと集束用光学部品との間の拡大用望遠鏡を用いたビームの拡大によって達成される。

40

【 0 0 4 8 】

焦線に沿った均一な相互作用のために、スポットサイズは、あまり強く変化させ過ぎてはならない。これは例えば、ビーム開口、及びそれに伴って開口数のパーセンテージが僅かしか変化しないように、集束用光学部品を小さな円形領域においてのみ照明することによって保証できる。

【 0 0 4 9 】

図 3 A（レーザ照射 2 のレーザビーム束の中央のビームの高さの、基板平面に対して垂

50

直なセクション；ここではまた、レーザビーム 2 は（光学組立体 6 に入る前に）基板平面に垂直に入射し、即ち入射角は 0° であり、これにより焦線 2 b 又は誘起吸収のセクション 2 c が基板の法線に対して平行となる）によると、レーザ 3 によって放出されたレーザ照射 2 a はまず、使用されるレーザ放射に対して完全に不透過性の円形開口 8 に向けられる。開口 8 は長手方向ビーム軸に対して垂直に配向され、図示されているビーム束 2 a の中央ビームに対してセンタリングされる。開口 8 の直径は、ビーム束 2 a の中央付近のビーム束又は中央ビーム（ここでは 2 a Z で標識される）が開口に当たり、開口によって完全に吸収されるように選択される。開口サイズがビーム直径に比べて削減されているため、ビーム束 2 a の外側周縁範囲のビーム（辺縁光線、ここでは 2 a R で標識される）のみが吸収されず、開口 8 を横断方向に通過し、光学組立体 6 の集束用光学素子の辺縁領域に当たり、上記光学素子は、この実施形態では球面に切削された両凸面レンズ 7 として設計される。

10

【 0 0 5 0 】

図 3 A に示すように、レーザビーム焦線 2 b は、レーザビームのための単一の焦点であるだけでなく、レーザビーム中の異なる複数の光線のための一連の焦点である。上記一連の焦点は、レーザビーム焦線 2 b の長さ l として図 3 A に示す所定の長さの伸長した焦線を形成する。レンズ 7 は中央ビームに対してセンタリングされ、一般的な球面に切削されたレンズの形状の、非補正両凸面レンズとして設計される。このようなレンズの球面収差は有利となり得る。代替例として、理想的な焦点を形成しないものの、所定の長さの明確な伸長した焦線を形成する、理想的に補正された系から逸脱した非球面レンズ又は多レンズ系（即ち単一の焦点を有しないレンズ又は系）も使用できる。このように焦線 2 b に沿って集束するレンズの領域は、レンズの中央から離間している。ビーム方向に広がる開口 8 の直径は、（ビームの強度をピーク強度の $1/e^2$ に低減させるために必要な距離によって定義される）ビーム束の直径のおよそ 90% 及び光学組立体 6 のレンズ 7 の直径のおよそ 75% である。ビーム束を中央においてブロックする非収差補正球面レンズ 7 の焦線 2 b は、このように使用される。図 3 A は、中央ビームを通る 1 つの平面内のセクションを示し、図示されているビームが焦線 2 b の周りで回転する際、完全な 3 次元の束を確認できる。

20

【 0 0 5 1 】

レンズ 7 及び図 3 A に示す系によって形成されるタイプの焦線の、1 つの潜在的な欠点は、条件（スポットサイズ、レーザ強度）が焦線に沿って（及びこれに伴って材料の所望の深さに沿って）変化し得、従って所望のタイプの相互作用（非溶融、誘起吸収、割れ形成までの熱可塑性変形）が、焦線の選択された部分にしか発生できない場合がある点である。これは即ち、基板材料は入射レーザ光の一部しか所望の様式で吸収しない場合があることを意味する。このようにして、プロセスの効率（所望の分離速度に対して必要な平均レーザ出力）が損なわれる場合があり、レーザ光は望ましくない領域（例えば基板又は基板保持構造に付着したパーツ又は層）にも伝達され得、上記領域と望ましくない様式で相互作用し得る（例えば加熱、拡散、吸収、不必要な改質）。

30

【 0 0 5 2 】

図 3 B 1 ~ 4 は、（図 3 A の光学組立体に関してのみならず、他のいずれの応用可能な光学組立体 6 に関して）光学組立体 6 を基板 1 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って、並びに光学組立体 6 のパラメータを好適に選択することによって、レーザビーム焦線 2 b の位置を制御できることを示す。図 3 B 1 に示すように、焦線 2 b の長さ l は、これが基板厚さ d を超える（ここでは 2 倍となる）ように調整できる。（長手方向ビーム方向に見て）基板 1 が焦線 2 b に対して中央に配置されると、誘起吸収のセクション 2 c が基板の厚さ全体に亘って生成される。レーザビーム焦線 2 b は、例えば約 0.01 mm ~ 約 100 mm、約 0.1 mm ~ 約 10 mm、又は約 0.1 mm ~ 1 mm の長さ l を有することができる。様々な実施形態は、例えば約 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.7 mm、1 mm、2 mm、3 mm 又は 5 mm の長さ l を有するように構成できる。

40

50

【 0 0 5 3 】

図 3 B 2 に示されている場合においては、基板厚さ d にある程度対応する長さ l の焦線 2 b が生成される。基板 1 は線 2 b に対して、線 2 b が基板の外側の点において始まり、また誘起吸収の領域 2 c の（ここでは基板表面から所定の基板深さまで延在するもの、反対側の（遠方の）表面 1 b までは延在しない）長さ l が、焦線 2 b の長さ l より小さくなるように位置決めされる。図 3 B 3 は、（ビーム方向に対して垂直な方向に沿って見て）基板 1 が焦線 2 b の始点の上側に位置決めされ、これにより、線 2 b の長さ l が基板 1 の誘起吸収のセクション 2 c の長さ l より大きくなるような場合を示している。従って焦線は基板内で始まり、反対側の表面 1 b を超えて延在する。図 3 B 4 は、焦線の長さ l が基板厚さ d より小さくなり、これによって、入射方向に見て焦線に対して基板が中央に位置決めされている場合、焦線が基板内の表面 1 a の近傍で始まって基板内の表面 1 b の近傍で終わる（例えば $l = 0.75 \cdot d$ ）ような場合を示している。

10

【 0 0 5 4 】

表面 1 a、1 b のうちの少なくとも一方が焦線によって被覆され、誘起吸収のセクション 2 c が基板の少なくとも 1 つの表面上で始まるように、焦線 2 b を位置決めすると、特に有利である。このようにして、表面における融除、フェザリング及び微粒化を回避しながら殆ど理想的な切断を達成できる。

【 0 0 5 5 】

図 4 は、適用可能な別の光学組立体 6 を示す。基本的な構成は図 3 A において記載したものと同様であるため、差異のみを以下に記載する。図示されている光学組立体は、焦線 2 b を生成するための、所定の長さ l の焦線が形成されるように成形された非球面自由表面を有する光学部品の使用に基づくものである。この目的のために、光学組立体 6 の光学素子として非球面を使用できる。図 4 では、例えば、アキシコンと呼ばれることも多い、所謂円錐プリズムが使用される。アキシコンは、光軸に沿った線上にスポット源を形成する（又はレーザービームをリングに変形させる）、円錐形に切削された特別なレンズである。このようなアキシコンの設計は当業者には一般的に知られており、本例での円錐角は 10° である。ここでは参照符号 9 で標識されたアキシコンの頂点は、入射方向へと向けられており、ビームの中央に対してセンタリングされる。アキシコン 9 によって生成された焦線 2 b はアキシコン 9 の内部で始まるため、基板 1（ここではビーム主軸に対して垂直に整列されている）を、アキシコン 9 のすぐ後側のビーム経路内に位置決めできる。図 4 に示すように、アキシコンの光学特性によって、基板 1 を、焦線 2 b の範囲内にあるまま、ビーム方向に沿って変移させることもできる。従って、基板 1 の材料内の誘起吸収のセクション 2 c は、基板深さ d 全体に亘って延在する。

20

30

【 0 0 5 6 】

しかしながら、図示した設計は以下の制約を受ける：アキシコン 9 が形成する焦線 2 b の領域はアキシコン 9 内で始まるため、アキシコン 9 と基板材料又は加工物との間が離間している状況では、レーザーエネルギーのかなりの部分が、材料内に位置する焦線 2 b の誘起吸収のセクション 2 c へと集束しない。更に、焦線 2 b の長さ l は、アキシコン 9 の屈折率及び円錐角により、ビーム直径に関連する。これが、比較的薄い材料（数ミリメートル）の場合に焦線全体が基板の厚さより遥かに長くなる原因であり、これによりレーザーエネルギーの大半が材料に集束しない。

40

【 0 0 5 7 】

このため、アキシコン及び集束用レンズの両方を含む光学組立体 6 を用いることが望ましい場合がある。図 5 A はこのような光学組立体 6 を示し、これは、レーザービーム焦線 2 b を形成するよう設計された非球面自由表面を有する第 1 の光学素子がレーザー 3 のビーム経路内に位置決めされる。図 5 A に示されている場合では、この第 1 の素子は、円錐角 5° のアキシコン 10 であり、これはビーム方向に対して垂直に位置決めされ、レーザービーム 3 に対してセンタリングされる。アキシコンの頂点はビーム方向に向かって配向される。ここでは平凸レンズ 11（その湾曲面はアキシコンに向かって配向される）である第 2 の集束用光学素子は、ビーム方向においてアキシコン 10 から距離 Z_1 に位置決めされる

50

。距離 Z_1 はこの場合はおよそ 300 mm であり、これは、アキシコン 10 が形成するレーザー照射がレンズ 11 の外径部分に円形に入射するように選択される。レーザーは出力側に、この場合は 1.5 mm の所定の長さの焦線 2b 上において、この場合はレンズ 11 からおよそ 20 mm である距離 Z_2 に円形照射を集束させる。レンズ 11 の有効焦点距離は、この実施形態では 25 mm である。アキシコン 10 によるレーザービームの円形変形は、参照符号 SR で標識される。

【0058】

図 5 B は、図 5 A による基板 1 の材料中の焦線 2b 又は誘起吸収のセクション 2c の形成を詳細に示す。両素子 10、11 の光学特性及びこれらの位置決めは、ビーム方向の焦線 2b の長さ l が基板 1 の厚さ d と完全に一致するように選択される。その結果、図 5 B に示すように、焦線 2b が基板 1 の 2 つの表面 1a と 1b との間に正確に位置決めされるような、ビーム方向に沿った基板 1 の正確な位置決めが必要となる。

10

【0059】

従って、焦線がレーザー光学部品からある一定の距離に形成され、またレーザー照射の大半が焦線の所望の端部に集束すれば有利である。上述のように、これは、一次集束用素子 11 (レンズ) を、特定の外径領域全体に亘って円形 (環状) にのみ照明することによって達成でき、これは必要な開口数、及びこれに伴って必要なスポットサイズを実現する役割を果たすが、その一方で、スポットの中央の極めて短い距離に亘る必要な焦線 2b が、基本的に円形のスポットとして形成された後で、拡散の円の強度が減少する。このようにして、欠陥線の形成は、必要な基板深さの短い距離内で停止される。アキシコン 10 と集束用レンズ 11 との組合せがこの要件を満たす。アキシコンは 2 つの異なる様式で作用する。即ちアキシコン 10 により、通常は丸みを帯びたレーザースポットがリングの形状で集束用レンズ 11 に送られ、またアキシコン 10 の非球面性は、焦面内の焦点の代わりにレンズの焦面を超えて焦線を形成する効果を有する。焦線 2b の長さ l は、アキシコン上のビーム直径によって調整できる。一方、焦線に沿った開口数は、距離 Z_1 (アキシコン レンズ間の分離) によって、及びアキシコンの円錐角によって調整できる。このようにして、レーザーエネルギー全体を焦線に集中させることができる。

20

【0060】

欠陥線の形成が基板の裏側まで続くよう構成する場合、円形 (環状) 照明は、(1) レーザ光の大半が焦線の必要な長さに集中したままとなるという意味でレーザー出力が最適に使用されるという点、並びに (2) 円形に照明された領域と、他の光学機能を用いた所望の収差設定とを併せることで、焦線に沿った均一なスポットサイズ、及びこれに伴って焦線に沿った基板からのパーツの均一な分離を達成できるという点で、依然として有利である。

30

【0061】

図 5 A に示す平凸レンズの代わりに、集束用メニスカスレンズ又は別のより高度に補正された集束用レンズ (非球面、多レンズ系) も使用できる。

【0062】

図 5 A に示すアキシコン及びレンズの組合せを用いて、極めて短い焦線 2b を生成するために、アキシコンに入射するレーザービームの極めて小さいビーム直径を選択する必要がある。これは、アキシコンの頂点に対するビームのセンタリングを極めて正確なものとする必要がある点、及び結果がレーザーの方向の変動に対して極めて敏感である点 (ビームドリフト安定性) という、実用上の欠点を有する。更に精密にコリメートされたレーザービームは発散性が高く、即ち光の偏向によってビーム束が短い距離に亘ってぼやけてしまう。

40

【0063】

図 6 に示すように、これら両方の効果は、光学組立体 6 に別のレンズ、即ちコリメートレンズ 12 を含むことによって回避できる。追加の正レンズ 12 は、集束用レンズ 11 の円形照明を極めて精密に調整する役割を果たす。コリメートレンズ 12 の焦点距離 f' は、アキシコンからコリメートレンズ 12 までの距離 $Z_1 a$ (これは f' に等しい) から所望の円の直径 d_r が得られるように選択される。リングの所望の幅 b_r は、距離 $Z_1 b$

50

(コリメートレンズ 1 2 から集束用レンズ 1 1 まで) によって調整できる。完全に幾何学的な問題として、円形照明の幅が小さいと、焦線が短くなる。距離 f' において最小値を達成できる。

【 0 0 6 4 】

従って図 6 に示す光学組立体 6 は、図 5 A に示す光学組立体 6 に基づき、従って差異についてのみ以下に記載する。ここでも (湾曲面がビーム方向に向けられた) 平凸レンズとして設計されたコリメートレンズ 1 2 は更に、 (頂点がビーム方向に向けられた) アキシコン 1 0 と平凸レンズ 1 1 との間のビーム経路内の中央に配置される。アキシコン 1 0 からのコリメートレンズ 1 2 の距離は $Z 1 a$ で表され、 (常にビーム方向に見た) コリメートレンズ 1 2 からの集束用レンズ 1 1 の距離は $Z 2$ で表される。図 6 に示すように、アキシコン 1 0 で形成される円形照射 $S R$ は、コリメートレンズ 1 2 に円の直径 $d r$ に発散して入射し、これは、集束用レンズ 1 1 において少なくともおよそ一定の円の直径 $d r$ のために、距離 $Z 1 b$ に沿った必要な円の幅 $b r$ に調整される。図示されている場合は、レンズ 1 2 におけるおよそ 4 mm の円の幅 $b r$ が、レンズ 1 2 の集束特性によって、レンズ 1 1 においておよそ 0 . 5 mm へと削減されるように、極めて短い焦線 $2 b$ を生成することが意図されている (この例では円の直径 $d r$ が 2 2 mm である) 。

【 0 0 6 5 】

図示されている例では、典型的なレーザービーム直径 2 mm、焦点距離 $f = 2 5$ mm を有する集束用レンズ 1 1、焦点距離 $f' = 1 5 0$ mm を有するコリメートレンズを用い、距離 $Z 1 a = Z 1 b = 1 4 0$ mm 及び $Z 2 = 1 5$ mm を選択して、0 . 5 mm 未満の焦線の長さ l を達成できる。

【 0 0 6 6 】

図 7 A ~ 7 C は、異なる複数のレーザー強度方式におけるレーザー物質間の相互作用を示す。図 7 A に示す第 1 の場合では、集束していないレーザービーム 7 1 0 は、透明基板 7 2 0 にいずれの改質も導入することなく、透明基板 7 2 0 を通過する。この特定の場合では、レーザーエネルギー密度 (又はビームが照明する単位面積あたりのレーザーエネルギー) が非線形効果を誘起するために必要な閾値未満であるため、非線形効果が存在しない。エネルギー密度が高くなるほど、電磁場の強度が高くなる。従って図 7 B に示すように、レーザービームが球面レンズ 7 3 0 によってより小さなスポットサイズに集束されるとき、照明されている面積が削減され、エネルギー密度が上昇して、このような条件を満たす容積内においてのみ焦線の形成を可能とするように材料を改質する非線形効果がトリガされる。このようにして、集束したレーザーのビームウエストが基板の表面に位置決めされた場合に、表面の改質が発生することになる。対照的に、集束したレーザーのビームウエストが基板の表面の下側に位置決めされた場合には、エネルギー密度が非線形光学効果の閾値未満であれば表面には何も起こらない。しかしながら、基板 7 2 0 の体積内に位置決めされた焦点 7 4 0 において、レーザー強度は、多光子非線形効果をトリガすることによって材料に損傷を誘起できる程度に十分に高い。

【 0 0 6 7 】

最終的には、図 7 C に示すように、アキシコンの場合、アキシコンレンズ 7 5 0 あるいはフレネルアキシコンの回折パターンは、ベッセル型強度分布 (高強度の円筒 7 6 0) を生成する干渉を生成し、また非線形吸収及び材料への改質を生成するために十分に高い強度が、上記容積内にのみ存在する。ベッセル型強度分布が、非線形吸収及び材料への改質を生成するために十分に高くなっている、円筒 7 6 0 の直径は、本明細書において記載されているように、レーザービーム焦線のスポット直径でもある。ベッセルビームのスポット直径 D は、 $D = (2 . 4 0 4 8) / (2 B)$ として表すことができ、ここではレーザービームの波長であり、 B はアキシコン角度の関数である。

【 0 0 6 8 】

レーザー及び光学系

ある代表的な実例において、3 D 成形された「G o r i l l a」ガラスパーツ又は他の 3 D 加工物からパーツを切断して抜き出すために、1 0 6 4 nm ピコ秒パルスレーザーを、

10

20

30

40

50

線状焦点ビーム形成光学部品と併用して、「Gorilla」ガラス基板に損傷の線（本明細書では欠陥線、損傷トラック又は断層線とも呼ばれる）を生成するプロセスが開発された。

【0069】

図8A及び図8Bに示すように、本明細書に記載されている選択された実施形態によると、ピコ秒レーザはパルス500Aの「バースト」500を生成し、これは場合によっては「バーストパルス」とも呼ばれる。バースト生成は、パルスの生成が均一で安定したストリームでなく、パルスの密集であるような、レーザ動作のタイプである。各「バースト」500は、最高100psec（例えば0.1psec、5psec、10psec、15psec、18psec、20psec、22psec、25psec、30psec、50psec、75psec又はこれらの数値の間）という極めて短い持続時間 T_d の複数のパルス500A（例えば2パルス、3パルス、4パルス、5パルス、10、15、20又はそれ以上）を含有してよい。パルス持続時間は一般に、約1psec～約1000psec、又は約1psec～約100psec、又は約2psec～約50psec、又は約5psec～約20psecである。単一のバースト500内のこれら個々のパルス500Aは、「サブパルス」とも呼ぶことができ、これは単に、これらがパルスの単一のバースト内で発生するという事実を示す。上記バースト内の各レーザパルス500Aのエネルギー又は強度は、バースト内の他のパルスのエネルギー又は強度と等しくなくてよく、バースト500内の複数のパルスの強度分布は、レーザの設計によって支配されている、時間による急激な減衰に追従できる。好ましくは、本明細書に記載の例示的实施形態のバースト500内の各パルス500Aは、バースト内の後続のパルスから、1nsec～50nsec（例えば10～50nsec、又は10～40nsec、又は10～30nsec）の期間 T_p だけ時間的に離れており、上記時間はレーザキャビティの設計によって支配されることが多い。ある所定のレーザに関して、バースト500内の各パルス間の時間間隔 T_p （パルス間間隔） T_p は比較的均一である（ $\pm 10\%$ ）。例えばいくつかの実施形態では、各パルスは後続のパルスから、およそ20nsec（50MHzパルス繰り返し周波数）だけ時間的に離れている。例えば、約20nsecのパルス間間隔 T_p を生成するレーザに関して、あるバースト内のパルス間間隔 T_p は約 $\pm 10\%$ 内に維持され、又は約 ± 2 nsecである。各「バースト」間の時間（即ちバースト間の時間間隔 T_b ）は遥かに長くなる（例えば0.25 T_b ～1000マイクロ秒、例えば1～10マイクロ秒又は3～8マイクロ秒）。例えば、本明細書に記載のレーザの例示的实施形態のうちいくつかでは、これは約200kHzのレーザ繰り返し数又は周波数に関して約5マイクロ秒となる。レーザ繰り返し数はまた、本明細書ではバースト繰り返し周波数又はバースト繰り返し数とも呼ばれ、これはあるバーストの第1のパルスと、後続のバーストの第1のパルスとの間の時間として定義される。他の実施形態では、バースト繰り返し周波数は、約1kHz～約4MHz、又は約1kHz～約2MHz、又は約1kHz～約650kHz、又は約10kHz～約650kHzである。各バーストの第1のパルスと後続のバーストの第1のパルスとの間の時間 T_b は、0.25マイクロ秒（4MHzのバースト繰り返し数）～1000マイクロ秒（1kHzのバースト繰り返し数）、例えば0.5マイクロ秒（2MHzのバースト繰り返し数）～40マイクロ秒（25kHzのバースト繰り返し数）、又は2マイクロ秒（500kHzのバースト繰り返し数）～20マイクロ秒（50kHzバーストの繰り返し数）であってよい。正確なタイミング、パルス持続時間及び繰り返し数は、レーザの設計及びユーザが制御可能な動作パラメータに応じて変化できる。高強度の短いパルス（ $T_d < 20$ psec及び好ましくは $T_d = 15$ psec）は、動作が良好であることが示されている。

【0070】

材料を改質するために必要なエネルギーについて、バーストエネルギー、即ちあるバースト内に含まれるエネルギー（各バースト500は一連の複数のパルス500Aを含む）に関して、又は単一のレーザパルス内に含まれるエネルギー（その多くはあるバーストを構成する）に関して説明できる。これらの応用に関して、（切断される材料1ミリメートルあたり

10

20

30

40

50

の)バーストあたりのエネルギーは、 $10 \sim 2500 \mu\text{J}$ 、又は $20 \sim 1500 \mu\text{J}$ 、又は $25 \sim 750 \mu\text{J}$ 、又は $40 \sim 2500 \mu\text{J}$ 、又は $100 \sim 1500 \mu\text{J}$ 、又は $200 \sim 1250 \mu\text{J}$ 、又は $250 \sim 1500 \mu\text{J}$ 、又は $250 \sim 750 \mu\text{J}$ とすることができる。バースト内の個々のパルスのエネルギーはより小さくなり、正確な個々のレーザパルスエネルギーは、バースト500内のパルス500Aの数、並びに図8A及び図8Bに示すような時間によるレーザパルスの減衰率(例えば急激な減衰率)に左右されることになる。例えば一定のエネルギー/バーストのために、あるパルスバーストが10個の個々のレーザパルス500Aを含む場合、個々のレーザパルス500Aはそれぞれ、同一のバーストパルス500が2つの個々のレーザパルスしか有しない場合よりも小さいエネルギーを含むことになる。

10

【0071】

このようなパルスバーストを生成できるレーザの使用は、透明材料、例えばガラスを切断又は改質するために有利である。単一パルスレーザの繰り返し数によって時間的に離れている複数の単一パルスの使用とは対照的に、レーザエネルギーをバースト500内のパルスの迅速なシーケンス全体に亘って広げるバーストパルスシーケンスの使用により、単一パルスレーザを用いて可能な材料との高強度相互作用のタイムスケールを長くすることができる。単一パルスを時間的に拡大できる一方で、これが実施されると、エネルギーの保存のために、パルス内強度をパルス幅に亘っておおよそ1だけ落とすことが要求される。従って、 10 psec の単一パルスが 10 nsec パルスに拡大される場合、強度はおおよそ3桁下がる。このような低減により、非線形吸収がもはや重要でなくなり、かつ光材料間相互作用が切断を可能とすることができるほどには強くなくなる点まで、光の強度を低下させることができる。対照的に、バーストパルスレーザを用いると、バースト500内の各パルス又はサブパルス500A中の強度は極めて高いままとすることができ、例えば、おおよそ 10 nsec の間隔 T_p だけ時間的に離れている、パルス持続時間 T_d が 10 psec の3つのパルス500Aは、各パルス内の強度を依然として単一の 10 psec パルスの強度のおおよそ3倍とすることができ、その一方でレーザを、3桁大きいタイムスケールに亘って材料と相互作用させることができる。従って、あるバースト内の複数のパルス500Aをこのように調整することにより、既存のプラズマブルームとの光のより強い又は弱い相互作用、初期又は過去のレーザパルスによって事前に励起された原子及び分子とのより強い又は弱い光材料間相互作用、及び欠陥線(穿通孔)の制御された成長を促進できる材料内のより強い又は弱い加熱効果を促進できるような方法で、レーザ材料間相互作用のタイムスケールを操作できる。材料を改質するために必要なバーストエネルギーの量は、基板材料の組成、及び基板との相互作用に使用される線状焦点に左右されることになる。相互作用範囲が長いほど、エネルギーはより広がり、また必要となるバーストエネルギーが高くなる。

20

30

【0072】

複数のパルスの単一のバーストがガラス上の略同一の位置に当たる場合、欠陥線又は孔が材料内に形成される。即ち単一のバースト内の複数のレーザパルスは、ガラス内に、単一の欠陥線又は孔位置を生成できる。当然のことながら、ガラスが(例えば連続移動ステージによって)並進移動するか、又はビームがガラスに対して移動する場合、バースト内の個々のパルスは、ガラス上の正確に同一の空間的位置にあることはできない。しかしながら、これらは互いに $1 \mu\text{m}$ の範囲内にあり、即ちこれらは基本的に同一の位置でガラスに当たる。例えばこれらは、互いから間隔 s_p (ここで $0 < s_p < 500 \text{ nm}$)でガラスに当たることができる。例えば20個のパルスのバーストがあるガラス位置に当たる場合、このバースト内の個々のパルスは、互いに 250 nm の範囲内でガラスに当たる。従っていくつかの実施形態では、 $1 \text{ nm} < s_p < 250 \text{ nm}$ である。いくつかの実施形態では、 $1 \text{ nm} < s_p < 100 \text{ nm}$ である。

40

【0073】

一実施形態では、厚さ 0.55 mm の、Corningガラスコード2319の「Gorilla」ガラス基板を、光学系が生成する焦線の領域内となるように位置決めした。

50

長さ約1mmの焦線、及びバースト繰り返し数又は周波数200kHz（材料において測定した場合に約200マイクロジュール/バースト）において約40W以上の出力を生成するピコ秒レーザを用いると、焦線領域における光強度（エネルギー密度）を、基板材料において非線形吸収を生成できる程度に高くすることは容易である。基板内の損傷、融除、気化又はその他の改質を受けた材料の領域は、高強度の線形領域に概ね続いて生成された。

【0074】

孔又は損傷トラックの形成：

（例えばイオン交換ガラスを用いて）基板が十分な応力を有する場合、パーツは、レーザプロセスによってトレースされた穿通損傷の経路（断層線又は輪郭）に沿って自発的に基板から分離することになる。しかしながら、基板に固有の応力が高くない場合、ピコ秒レーザは単に、基板中に損傷トラック（欠陥線）を形成するだけである。これらの損傷トラックは概ね、約0.2マイクロメートル～約2マイクロメートル、例えば0.5～1.5マイクロメートルの内側寸法（例えば直径）を有する孔の形態を取る。好ましくは、この孔の寸法は極めて小さい（数マイクロメートル以下）。

10

【0075】

欠陥線は、材料の厚さ全体を穿通してもしなくてもよく、また材料の深さ全体に亘る連続した開口部であってもなくてもよい。図1Cは、700マイクロメートル厚の「Gorilla」ガラス基板の加工物の厚さ全体を穿通する、このようなトラック又は欠陥線の例を示す。穿通孔又は損傷トラックは、へき開縁部の側部を通して観察される。材料を通るトラックは、貫通孔である必要はない。孔を塞ぐガラスの領域が存在してよいが、上記領域は一般にサイズが小さく、例えば数マイクロメートルである。

20

【0076】

パーツの分離時、欠陥線に沿って破砕が発生し、欠陥線に由来する特徴部分を有する周縁表面（縁部）を有するパーツが提供されることに留意されたい。分離前、欠陥線は一般に円筒形である。パーツを分離すると、欠陥線は破砕され、欠陥線の残りが、分離されたパーツの周縁表面の輪郭に残る。理想的なモデルでは、欠陥線は分離時に半分だけへき開し、これによって、分離されたパーツの周縁表面が、円筒の半分に相当するセレーションを含む。実際には、分離は理想的なモデルから外れる場合もあり、周縁表面のセレーションは、元の欠陥線の形状の任意の画分となり得る。特定の形状とは無関係に、周縁表面の特徴部分を欠陥線と呼ぶものとし、これは欠陥線の起源を示す。

30

【0077】

ガラス又は他の材料の積層されたシートを穿通することもできる。この場合、焦線の長さは、積層体の高さよりも長い必要がある。

【0078】

集束したレーザビームの下で基板が並進移動するため、欠陥線の間隔の横断方向間隔（ピッチ）は、レーザのパルス数によって決定される。完全な孔を形成するためには通常、単一のピコ秒レーザパルス又はバーストしか必要でないが、必要に応じて複数のパルス又はバーストを使用してよい。異なるピッチ又は欠陥線間隔の複数の孔を形成するために、レーザを、より長い又は短い間隔で点灯するようにトリガできる。切断動作に関して、レーザのトリガは一般に、ビームの下での、ステージによって駆動される基板の運動と同期されるため、レーザパルスは1マイクロメートル毎又は5マイクロメートル毎といった固定間隔でトリガされる。隣接する欠陥線の間隔の正確な間隔は、基板内の応力レベルを考慮して、穿通孔から穿通孔への割れの伝播を促進する、材料の特性によって決定される。しかしながら、基板の切断とは対照的に、材料を穿通するためだけに同一の方法を用いることもできる。この場合、孔（又は損傷トラック若しくは穿通孔）を、より大きな間隔（例えば7マイクロメートル以上のピッチ）で離すことができる。

40

【0079】

レーザ出力及びレンズ焦点距離（これは焦線の長さ、及びこれに伴って出力密度を決定する）は、ガラスを完全に貫通することと、表面及び表面下損傷が小さいこととを保証す

50

るために、特に重要なパラメータである。

【0080】

一般に、利用可能なレーザー出力が高いほど、上述のプロセスを用いて材料をより迅速に切断できる。本明細書で開示される1つ又は複数のプロセスは、切断速度 0.25 m/sec 以上でガラスを切断する。切断速度は、複数の欠陥線の孔を生成しながら基板材料(例えばガラス)の表面に対してレーザービームが移動する速さである。製造のための資本投資を最小化するため、及び設備利用率を最適化するために、例えば 400 mm/sec 、 500 mm/sec 、 750 mm/sec 、 1 m/sec 、 1.2 m/sec 、 1.5 m/sec 若しくは 2 m/sec 、又は更に $3.4\text{ m/sec} \sim 4\text{ m/sec}$ といった高い切断速度が望ましいことが多い。レーザー出力は、レーザーのバーストエネルギーとバースト繰り返し周波数(数)との積に等しい。一般に、高い切断速度でガラス材料を切断するために、欠陥線は典型的には $1 \sim 25\text{ }\mu\text{m}$ だけ離間し、いくつかの実施形態ではこの間隔は好ましくは $3\text{ }\mu\text{m}$ 以上、例えば $3 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 、又は例えば $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$ である。

10

【0081】

例えば、 300 mm/sec の直線切断速度を達成するために、 $3\text{ }\mu\text{m}$ の孔ピッチは、少なくとも 100 kHz のバースト繰り返し数を有するパルスバーストレーザに対応する。 600 mm/sec の切断速度に関して、 $3\text{ }\mu\text{m}$ のピッチは、少なくとも 200 kHz のバースト繰り返し数を有するパルスバーストレーザに対応する。 200 kHz において少なくとも $40\text{ }\mu\text{J}$ /バーストを生成し、切断速度 600 mm/s で切断を行うパルスバーストレーザは、少なくとも 8 W のレーザー出力を有する必要がある。切断速度が高くなると、これに伴って高いレーザー出力が必要となる。

20

【0082】

例えば $3\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ及び $40\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 0.4 m/sec の切断速度には、少なくとも 5 W のレーザーが必要となり、 $3\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ及び $40\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 0.5 m/sec の切断速度には、少なくとも 6 W のレーザーが必要となる。従って好ましくは、パルスバーストピコ秒レーザーのレーザー出力は 6 W 以上、より好ましくは少なくとも 8 W 以上、及び更に好ましくは少なくとも 10 W 以上である。例えば、 $4\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ(欠陥線の間隔、又は損傷トラックの間隔)及び $100\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 0.4 m/sec の切断速度を達成するためには、少なくとも 10 W のレーザーが必要であり、 $4\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ及び $100\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 0.5 m/sec の切断速度を達成するためには、少なくとも 12 W のレーザーが必要である。例えば、 $3\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ及び $40\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 1 m/sec の切断速度を達成するためには、少なくとも 13 W のレーザーが必要である。また例えば、 $4\text{ }\mu\text{m}$ ピッチ及び $400\text{ }\mu\text{J}$ /バーストにおいて 1 m/sec の切断速度は、少なくとも 100 W のレーザーが必要となる。

30

【0083】

欠陥線(損傷トラック)間の最適なピッチ及び正確なバーストエネルギーは材料に左右され、経験的に決定できる。しかしながら、レーザーパルスエネルギーが上昇する、又は損傷トラックをより小さいピッチで作製するのは、常に基板材料の分離をより良好なものとする、又は縁部品質を改善する条件ではないことに留意されたい。欠陥線(損傷トラック)間の小さ過ぎる(例えば $< 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、又はいくつかの例示的实施形態では $< 1\text{ }\mu\text{m}$ 、又は他の実施形態では $< 2\text{ }\mu\text{m}$)ピッチは、場合により、近隣の後続の欠陥線(損傷トラック)の形成を阻害し得、また穿通された輪郭を巡る材料の分離を阻害し得る。ピッチが小さ過ぎる場合、ガラス内の望ましくない微小割れの増大も引き起こされ得る。長過ぎる(例えば $> 50\text{ }\mu\text{m}$ 、及びいくつかのガラスでは $> 25\text{ }\mu\text{m}$ 又は $> 20\text{ }\mu\text{m}$ でさえある)ピッチは、「非制御下の微小割れ」を引き起こし得る。即ちこの場合、意図した輪郭に沿った欠陥線から欠陥線への伝播の代わりに、微小割れが異なる経路に沿って伝播し、意図した輪郭とは離れた異なる(望ましくない)方向のガラスの割れを引き起こす。これは最終的には、分離されたパーツの強度を低下させ得る。というのは残留する微小割れは、ガラスを弱化させるきずを構成するためである。欠陥線を形成するための高過ぎる(例えば $> 2500\text{ }\mu\text{J}$ /バースト、及びいくつかの実施形態では $> 500\text{ }\mu\text{J}$ /バースト)

40

50

ストの)バーストエネルギーは、既に形成された欠陥線の「治癒 (healing)」又は再溶解を引き起こし得、これはガラスの分離を阻害し得る。従って、バーストエネルギーが $< 2500 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 、例えば $500 \mu\text{J}/\text{バースト}$ であることが好ましい。また、高過ぎるバーストエネルギーの使用は微小割れの形成を引き起こし得、これは極めて大きく、分離後のパーツの縁部強度を低減し得る構造的不完全性を生成する。低過ぎる (例えば $< 40 \mu\text{J}/\text{バースト}$ の)バーストエネルギーは、ガラス内に目に見える欠陥線を形成できず、従って特に高い分離力が必要となり得、又は穿通された輪郭に沿った分離を完全に不可能としてしまい得る。

【0084】

このプロセスが可能な典型的な切断速度の例は、例えば 0.25 m/sec 以上である。いくつかの実施形態では、切断速度は少なくとも 300 mm/sec である。いくつかの実施形態では、切断速度は少なくとも 400 mm/sec 、例えば $500 \text{ mm/sec} \sim 2000 \text{ mm/sec}$ 以上である。いくつかの実施形態では、ピコ秒 (ps) レーザはパルスバーストを利用して、 $0.5 \mu\text{m} \sim 13 \mu\text{m}$ 、例えば $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$ の周期で欠陥線を生成する。いくつかの実施形態では、パルスレーザは $10 \text{ W} \sim 100 \text{ W}$ のレーザ出力を有し、材料及び/又はレーザビームは互いに対して、少なくとも 0.25 m/sec ; 例えば $0.25 \text{ m/sec} \sim 0.35 \text{ m/sec}$ 、又は $0.4 \text{ m/sec} \sim 5 \text{ m/sec}$ の速度で並進移動する。好ましくは、パルスレーザビームの各パルスバーストは、加工物において測定した場合に、加工物の厚さ 1 mm あたり $40 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 超の平均レーザエネルギーを有する。好ましくは、パルスレーザビームの各パルスバーストは、加工物において測定した場合に、加工物の厚さ 1 mm あたり $2500 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 未満、及び好ましくは加工物の厚さ 1 mm あたり約 $2000 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 未満、及びいくつかの実施形態では加工物の厚さ 1 mm あたり $1500 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 未満、例えば加工物の厚さ 1 mm あたり $500 \mu\text{J}/\text{バースト}$ 以下の平均レーザエネルギーを有する。

【0085】

本発明者らは、アルカリ含有量が低いか又はゼロのアルカリ土類ボロアルミノシリケートガラスを穿通するためには、遥かに高い ($5 \sim 10$ 倍高い) 容積パルスエネルギー密度 ($\mu\text{J}/\mu\text{m}^3$) が必要となることを発見した。これは例えば、好ましくは少なくとも1バーストあたり2パルスを有するパルスバーストレーザを利用して、約 $0.05 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$ 以上、例えば少なくとも $0.1 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$ 、例えば $0.1 \sim 0.5 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$ の、上記アルカリ土類ボロアルミノシリケートガラス中の容積エネルギー密度を提供することによって、達成できる。

【0086】

従って、レーザが、1バーストあたり少なくとも2パルスを有するパルスバーストを生成することが好ましい。例えばいくつかの実施形態では、パルスレーザは $10 \text{ W} \sim 150 \text{ W}$ (例えば $10 \text{ W} \sim 100 \text{ W}$) の出力を有し、1バーストあたり少なくとも2パルス (例えば1バーストあたり $2 \sim 25$ パルス) を有するパルスバーストを生成する。いくつかの実施形態では、パルスレーザは $25 \text{ W} \sim 60 \text{ W}$ の出力を有し、1バーストあたり少なくとも $2 \sim 25$ パルスを有するパルスバーストを生成し、このレーザバーストが生成する隣接する欠陥線間の周期又は距離は $2 \sim 10 \mu\text{m}$ である。いくつかの実施形態では、パルスレーザは $10 \text{ W} \sim 100 \text{ W}$ の出力を有し、1バーストあたり少なくとも2パルスを有するパルスバーストを生成し、加工物及びレーザビームは互いに対して、少なくとも 0.25 m/sec の速度で並進移動する。いくつかの実施形態では、加工物及び/又はレーザビームは互いに対して、少なくとも 0.4 m/sec の速度で並進移動する。

【0087】

例えば、厚さ 0.7 mm の非イオン交換 Corning コード 2319 又はコード 2320 Gorilla (登録商標) ガラスを切断するために、約 $150 \sim 250 \mu\text{J}/\text{バースト}$ のパルスバーストエネルギー及び $2 \sim 15$ のバーストパルス数を伴う $3 \sim 7 \mu\text{m}$ のピッチ、また好ましくは $3 \sim 5 \mu\text{m}$ のピッチ及び $2 \sim 5$ のバーストパルス数 (1バーストあたりのパルスの数) が、良好に作用できることが観察されている。

【 0 0 8 8 】

1 m / s e c の切断速度において、E a g l e X G (登録商標) ガラス又は 2 3 2 0 「G o r i l l a」ガラスの切断は典型的には、1 5 ~ 8 4 W のレーザ出力の利用が必要となり、3 0 ~ 4 5 W で十分である場合が多い。一般に、広範なガラス及び他の透明材料に亘って、出願人は、0 . 2 ~ 1 m / s e c の切断速度を達成するために 1 0 W ~ 1 0 0 W のレーザ出力が好ましく、多くのガラスに関しては 2 5 ~ 6 0 W のレーザ出力で十分である(又はこれが最適である)ことを発見した。0 . 4 m / s e c ~ 5 m / s e c の切断速度に関して、レーザ出力は好ましくは、4 0 ~ 7 5 0 μ J / パーストのパーストエネルギー、(切断される材料に応じて) 1 パーストあたり 2 ~ 2 5 パルス、及び 3 ~ 1 5 μ m 又は 3 ~ 1 0 μ m の欠陥線間隔(ピッチ)を伴う 1 0 W ~ 1 5 0 W とするべきである。これらの切断速度のためには、ピコ秒パルスパーストレーザの使用が好ましい。というのは、上記ピコ秒パルスパーストレーザは高い出力と、必要な 1 パーストあたりのパルス数とを生成するためである。従っていくつかの例示の実施形態によると、パルスレーザは 1 0 W ~ 1 0 0 W、例えば 2 5 W ~ 6 0 W の出力を生成し、また 1 パーストあたり少なくとも 2 ~ 2 5 パルスのパルスパーストを生成し、欠陥線間の間隔は 2 ~ 1 5 μ m となる。そしてレーザビーム及び/又は加工物は互いに対して、少なくとも 0 . 2 5 m / s e c、いくつかの実施形態では少なくとも 0 . 4 m / s e c、例えば 0 . 5 m / s e c ~ 5 m / s e c 以上の速度で並進移動する。

10

【 0 0 8 9 】

3 D 成形形状の切断及び抜き出し

20

図 8 C は、厚さ 0 . 5 5 m m の C o r n i n g コード 2 3 1 9 「G o r i l l a」ガラスの、大型予備形成パネル加工物から、3 D 形状を切断して抜き出すためのプロセスを示す。大型予備形成切断ガラスシートを、テンプレートを用いてたわませることによって、3 D 形状の、大きな半径で湾曲したパネルへと形成する。この 3 D 形状をレーザビームの下に配置し、ガラス形状の表面と線状焦点(焦線)との間の相対距離を段階的に下げながら、図 9 と併せて後に記載する同一の形状を漸進的にトレースすることによって、本明細書に記載の欠陥線を上記湾曲ガラス上に生成した。表面と焦線との間の相対距離を段階的に下げるステップについては、図 1 0 A 及び 1 0 B と併せて後に更に説明する。各パスにおいて、ガラスの僅かな部分のみがレーザの線状焦点と重複することにより、欠陥線が生成された。コーナが丸くなった(丸みの半径 $R 2 = 1 2$ m m) 長方形のトレースが完了する毎に、距離を 2 0 0 マイクロメートルだけ変化させた、又は段階的に変化させた。湾曲ガラス形状上の欠陥線によって上記形状全体が刻印されると、切り離し線(図示せず)を用いてパーツを手動で破断して外すことにより、最終的なパーツの抜き出しが達成された。このパーツは、長さ L 、幅 W 及び厚さ又は高さ h を有する。値 $R 1$ は、形成されたパーツに関する曲率半径であり、これは長さ L と併せて厚さ h を決定する。

30

【 0 0 9 0 】

図 9 は、図 8 と併せて上述した加工ステージに従って、たわんだ非強化「G o r i l l a」2 3 1 9 から加工された、仕上げ済みパーツを示す。

【 0 0 9 1 】

図 1 0 A は、ガラスとレーザ焦線との間の複数の相対距離において、トレースされた経路に従った欠陥線を生成するためのプロセスを示す。3 D ガラス表面とレーザ焦線との間の各距離又は間隔において、コーナが丸くなった長方形の全周をトレースする。次に上記相対間隔を 2 0 0 マイクロメートルだけ段階的に下げ、同一の形状を再びトレースする。湾曲したガラスパネル中に欠陥線が完全に画定されるまで、このプロセスを繰り返す。このステップの走査は、パスと呼ぶ場合もある。従って 1 つ又は複数のパスにおいて、加工物とレーザビームとを互いに対して並進移動させることができ、レーザビーム焦線は、図 1 0 A の上側に 4 つの異なる平面内に図示された輪郭経路に沿って加工物と交差する。レーザビーム及び加工物が、例えば上記 4 つの平面のうちの 1 つに対して垂直な方向に段階的に移動するか、又は互いに対して並進移動すると、レーザビーム焦面は加工物中の上記平面のうちの別のものと、輪郭経路において交差する。1 つ又は複数のパスにおいて、各

40

50

平面において輪郭の周辺に十分な数の欠陥線を生成すると、輪郭によって画定されたパーツを加工物から分離できる。分離がレーザービーム焦点単独による分離であるか、又は分離が機械的な力、若しくは別個の赤外レーザービームの印加、若しくは他のステップを更に伴うかにかかわらず、欠陥線の数、分離が促進されれば十分である。

【 0 0 9 2 】

図 1 0 B は、ある所与の平面内での走査に関して、ガラスの厚さが線状焦点又は焦点線の範囲内となっている領域にのみ欠陥線を生成する方法の拡大図を示す。いくつかの場合、異なる複数の平面における走査間に重複が存在し得ることに留意されたい。例えばある例示的な場合において、線状焦点の範囲（又は焦点線の長さ）は約 1 mm であり、ステップは約 1 0 0 マイクロメートルであった。従って、後ろのステップの走査（又はパス）におけるレーザービーム焦点は、前のステップの走査（又はパス）において生成された欠陥線と重複した。

10

【 0 0 9 3 】

図 1 1 は、切断及び抜き出しプロセスの規模を拡大して、複数のパーツを生成できるようにする方法を示す。図 1 1 の上の行は、図 8 ~ 1 0 B と併せて上述したように大型のガラスパーツ又は加工物から個々のパーツを形成して抜き出すステージを示す。この上の行はまた、抜き出し後のガラスパーツ又は加工物の強化も示す。図 1 1 の下の行は、図 1 1 の上の行に示した方法と同様の方法を用いて複数のガラスパーツの形成、抜き出し及び強化を行うための対応するステージを、上の行と並べて示す。

【 0 0 9 4 】

20

図 1 2 は、2つの形成及び分離されたパーツ又は加工物を示し、これらは図 9 に図示したパーツと同様であるが、図 1 2 の例では、2つの長方形を同時にトレースした。図 1 2 のトレースされた長方形及び各切り離し線もまた、レーザーによる欠陥線によってトレースされ、かつ所望のコーナが丸くなった長方形を基板パネルから分離するために使用される。半径 5 0 0 mm の湾曲したガラスに成形された、たわんだ厚さ 0 . 5 5 mm の Corning コード 2 3 1 9 「Gorilla」ガラスを、図 1 2 に示す実証でも使用した。2つの長方形は、図 9 のパーツに関して使用したものと同一の 3 D 湾曲形状及び 1 2 mm のコーナ半径を有する。

【 0 0 9 5 】

上述の実証のために使用されたレーザー条件及び速度を、参考のために以下にまとめる。パーツをガラスマトリクスから分離するために、切り離し線に力を手動で印加した。この力は、穿通線（欠陥線）における破断と、断層線に沿った割れの伝播とを引き起こし、これにより最終的にガラスマトリクスから上記形状が分離された。

30

アキシコンレンズへの入力ビーム直径 ~ 2 mm

アキシコン角度 = 1 0 °

初期コリメートレンズ焦点距離 = 1 2 5 mm

最終対物レンズ焦点距離 = 4 0 mm

入射ビーム方位角 = 1 2 . 7 5 °

焦点は 0 ~ 1 0 mm に設定され、各トレースにおいて 2 0 0 マイクロメートル刻みで変化
レーザー出力は全出力の 7 5 % (~ 3 0 ワット)

40

レーザーのパルス繰り返し数 = 2 0 0 k H z

3 パルス / パースト

ピッチ = 6 マイクロメートル

図 9 に示す同一トレースの複数のパス

可動ステージ速度 = 1 2 m / m i n = 2 0 0 m m / s

【 0 0 9 6 】

上述のプロセスの代替例として、デフォーカス C O ₂ レーザを利用してパーツの切り離しを補助する別の実施形態が実証されている。デフォーカス C O ₂ レーザは、ピコ秒レーザーが所望の輪郭（断層線）をトレースして、周りを取り囲む基板マトリクスからのパーツの分離を実施するに従って、ピコ秒レーザーに追従する。デフォーカス C O ₂ レーザが誘起

50

した熱応力は、割れを開始及び伝播させるために十分であり、これは、断層線によって画定された上記所望の輪郭に沿ったパーツの分離を引き起こし、これによって基板パネルから成形されたパーツが切り離される。このために、以下の光学部品及びレーザーパラメータに関して最良の結果が見られた：

ピコ秒レーザー

アキシコンレンズへの入力ビーム直径 ~ 2 mm

アキシコン角度 = 10°

初期コリメートレンズ焦点距離 = 125 mm

最終対物レンズ焦点距離 = 40 mm

入射ビーム方位角 = 12.75°

焦点は0 ~ 10 mmに設定され、各トレースにおいて200マイクロメートル刻みで変化
レーザー出力は全出力の75% (~30ワット)

レーザーのパルス繰り返し数 = 200 kHz

3パルス/バースト

ピッチ = 6マイクロメートル

図9に示す同一トレースの複数のパス

可動ステージ速度 = 12 m/min = 200 mm/s

10

CO₂レーザー

レーザー並進移動速度 : 130 mm/s

レーザー出力 = 100%

パルス持続時間 13マイクロ秒 (95%デューティサイクル)

レーザー変調周波数 20 kHz

レーザービームのデフォーカスは21 mmである

シングルパス

【0097】

熱によってたわんだガラスパネルから3Dパーツを形成して抜き出すための、代替的なプロセス

図13は、3D形状を抜き出す代替的な方法の複数のステージを示す。平坦ガラス基板パネルをたわませて予備形成する前に、平坦ガラス基板パネル上に欠陥線を生成する(レーザーによってトレースする)。熱たわみプロセスの後、欠陥線周辺の残留応力は張力(引張力)を生成し、これは上記形状が切り離されるまで割れが伝播するのを支援する。

【0098】

図14は、熱によってたわんだガラスパネルからの3Dのパーツの形成、強化及び抜き出しのための、ある実施形態によるプロセスを示す。図14に示すように、上述のような方法は、異なるレベルのイオン交換及び圧縮応力を施された、様々な平坦な強化Corn ingコード2319「Gorilla」ガラスを分離するにあっても、極めて良好に作用する。3Dパーツは、既にイオン交換によって強化された大型基板又はパネル全体から、直接生成して抜き出すことができる。ガラスが事前に強化されているという事実により、CO₂レーザー等の赤外レーザーを用いる必要なく、基板からのパーツの切り離しを促進できる。

【0099】

例えば携帯電話等のハンドヘルド製品のために、3D表面を有するカバーガラスが開発されている。しかしながら、例えば薄型LCDガラスから3Dパーツを形成するのは、曲率半径が小さい場合ほど困難になる。例えば10mmの曲率半径は、薄型LCDガラスによって容易に達成される。しかしながら、例えば5mm又は2mmといった比較的小さい半径を有する3D皿状パーツは、既存の方法で製造するのがより困難である。というのは、既存の方法では、ガラスは典型的には高温となり、これにより、良好な2mmのコーナ半径を達成するためには表面欠陥が発生してしまうためである。更に、ガラスを型の厳密

20

30

40

50

な特徴部分に押し付けるために、真空及び圧力が必要となり得る。更に、製造サイズ及び容積をスケールアップするためには、典型的にはコスト効率のために大型に形成された薄型ガラスのシートが使用され、複数のパーツのレイ上に厳密なコーナ半径を生成するのは、更に困難になり得る。本明細書で開示される実施形態は、図1～4Bと併せて更に説明されるように、曲率半径が小さい3D表面を有するガラスパーツの製造を促進できる。

【0100】

図15Aは、複数のパーツ1551の予備形成シート1550の図である。シート1550を、実施形態による方法に従ってレーザー穿通する（欠陥線を生成する）ことにより、曲率半径が小さいガラス部品の成形が促進される。特に、これまでに開示した方法に従って切り離し線1554をレーザー穿通することにより、複数の個々のパーツを有する個々のパーツ予備形成物1551の個片化が促進される。パーツの外形1552もレーザー穿通することにより、3D湾曲表面を有するようにガラスパーツ1552を成形した後に続く、個片化した予備形成物からのパーツの取り外しが促進される。他の実施形態では、成形は予備形成シート1550全体をそのままに保った状態で実施されることに留意されたい。

10

【0101】

図15Bは、図15Aに示すシートから分離された、1つの個片化された予備形成物の図である。図15Bにはパーツのコーナ1556も図示されており、上記コーナ1556は複数回レーザー穿通され、これによって、図16C～Dのコーナ断面図に関連して更に後述されるように、湾曲半径が小さいコーナの成形が促進される。図16A～Bの側面断面図に関連して更に後述されるように、ガラスパーツ1552の表面上における更なる3D湾曲部の成形を促進する他のレーザー穿通孔は、図15Bには示されていない。

20

【0102】

図16A～Bは、レーザー穿通孔によって可能となった半径を有する3D表面の形成のそれぞれ前及び後における、図15Bの個片化された予備形成物の側面断面図である。図16Aは、個片化された予備形成物1551の一部の表面に適用されることになる3D湾曲部を画定する3D湾曲表面を有する型1558を示す。予備形成物1551は、表面欠陥を僅かしか又は全く誘起せずに予備形成物の屈曲を促進する、レーザー穿通孔1560を含む。図16Bは、成形後の同一の型1558及び予備形成物1551を示し、穿通孔1560がガラス中の屈曲応力を緩和することを確認できる。このようなレーザー穿通孔は、成形を完了するために予備形成物1551に対して真空又は圧力を印加する必要を削減又は排除できる。

30

【0103】

図16C～Dは、複数のレーザー穿通孔1560によって可能となった小さなコーナ半径を有する表面の形成のそれぞれ前及び後における、図15Bの個片化された予備形成物のコーナ断面図である。図16C～Dに示すように、複数の穿通孔によって、例えば5mm又は2mm以下といった特に小さい表面曲率半径を可能とすることができる。複数の又は高密度の穿通孔により、成形中の応力が緩和され、成形中に真空又は圧力を印加する必要が削減され、表面欠陥が減少する。

【0104】

上述の方法は、レーザー加工性能の向上及びコスト節約、並びにこれに伴って低コストの製造につながり得る、以下の便益を提供する。上述の実施形態は、以下を提供する：

40

最終的なサイズでの3D成形「Gorilla」ガラスパーツの完全な分離及び抜き出し方法は、フュージョンプロセスによって製造されたままの状態（非強化）、又は「Gorilla」ガラス基板に清浄な制御された様式で化学強化を施した後で、（個々の又は複数の）任意の形状の成形された3D「Gorilla」ガラスパーツの完全な切断及び抜き出しを可能とする。最終的なサイズへのパーツの完全な切断及び分離は、レーザー線状焦点（焦線）に対する基板の表面の相対位置を段階的に下げながらパーツの形状の輪郭をトレースすることによって、半径が大きい形状に予備成形された基板から達成された。

【0105】

50

表面下損傷の減少：レーザと材料との間の超短パルス相互作用により、熱的相互作用が殆ど存在しなくなり、従って、望ましくない応力並びに表面における及び表面下領域における微小割れにつながり得る、熱の影響を受ける領域が最小となる。更に例えば、レーザビームを3Dガラス形状へと集中させる光学部品は、基板の表面上に、典型的には直径2～5マイクロメートルの欠陥線を生成する。

【0106】

分離後、表面下損傷は、表面から深さ<75マイクロメートル、例えば深さ<50マイクロメートル又は更に深さ<30マイクロメートルといった距離にまで制限される。これは分離されたパーツの縁部強度に大きく影響する。というのは、強度は欠陥の数、並びにサイズ及び深さに関する欠陥の統計的分布に左右されるためである。これらの数が多いほど、パーツの縁部は弱くなり、分離されたパーツが破損しやすくなる。本明細書によって開示される実施形態によって可能となるプロセスは、深さ75マイクロメートル未満、例えば深さ50マイクロメートル未満、深さ30マイクロメートル未満又は更に深さ20マイクロメートル以下といった、切断されたままの状態の縁部の表面下損傷を提供できる。

【0107】

いずれの切断プロセスによって引き起こされる、切断表面に対して概ね垂直に配向された、表面下損傷、又は微小割れ及び材料の改質は、ガラス又は他の脆性材料の縁部強度に関する懸案事項である。表面反射は無視されるが、割れは材料内に向かって探索され、これらの割れは明るい線として現れる。次に、「スパーク」がなくなるまでこの顕微鏡の焦点を材料に合わせ、規則的な間隔で画像を収集する。そして割れを発見し、ガラスの深さを通してこれらを追跡し、表面下損傷の最大深さ（典型的にはマイクロメートルで測定される）を得ることによって、これらの画像を手動で処理する。典型的には数千もの微小割れが存在するため、典型的には最も大きい微小割れのみを測定する。このプロセスを、1つの切断縁部の約5箇所に対して繰り返す。微小割れは切断表面に対して概ね垂直であるが、切断表面に対して完全に垂直であるいずれの割れは、この方法では検出できない。

【0108】

プロセスの清浄性 上述の方法は、清浄な制御された様式で3Dガラス形状を分離/切断できる。従来の融除又は熱的レーザプロセスを用いるのは極めて困難である。というのは、上記プロセスは、ガラス又は他の基板の微小割れ又は複数のより小さい片への断片化を誘起する、熱の影響を受ける領域をトリガする傾向があるためである。本開示のレーザパルス、及び誘起される材料との相互作用の特徴により、これらの問題は全て回避できる。というのは、これらの問題は極めて短いタイムスケールで発生するため、及びレーザ照射に対する基板材料の透過性により、誘起される熱的效果が最小化されているためである。欠陥線は物体又は加工物内に生成されるため、切断ステップ中の破片及び粒子状物質の存在は実質的に排除される。生成される欠陥線に由来するいずれの粒子が存在する場合、これら粒子は、パーツが分離されるまで良好に内包される。本明細書に記載のレーザによる方法によって切断及び分離される表面上の粒子の平均直径は、例えば約3マイクロメートル未満とすることができる。

【0109】

異なる複数のサイズの複雑なプロファイル及び形状の切断

本レーザ加工方法により、ガラス及び他の基板又は加工物を、多数の形態及び形状に従って切断/分離できる。これは他の競合技術において制約となっている。本明細書に記載の方法を用いて、厳密な半径（例えば<2mm又は<5mm）を切断でき、これにより湾曲縁部が可能となる。また、欠陥線はいずれの割れの伝播位置を強力に制御するため、本方法は、切断の空間的位置に対する優れた制御をもたらし、僅か数百マイクロメートルの構造体及び特徴部分の切断及び分離を可能とする。

【0110】

プロセスステップの削除

パーツ（新規のガラスパネルからの、任意の成形された複数のガラスプレート）を最終的なサイズ及び形状に加工するためのプロセスは、パネルの切断、あるサイズへの切断、

10

20

30

40

50

仕上げ及び縁部成形、目標厚さへのパーツの薄化、研磨、並びに場合によっては化学強化さえも包含する、複数のステップを伴う。これらのステップのうちのいずれを削除することにより、プロセス時間及び投入資本の観点において製造コストが改善されることになる。本明細書において提示した方法は、例えば破片及び縁部欠陥の生成を低減すること、洗浄及び乾燥ステーションの必要を本質的に排除することにより、ステップの数を削減できる。更に、例えば試料をその最終的なサイズ、形状及び厚さに直接切断し、仕上げラインの必要を排除することにより、ステップの数を削減できる。

【0111】

積層体の切断

本プロセスは、積層されたガラスパネル内に垂直な欠陥線を生成することもできる。積層体の高さには制限があるものの、複数の積層されたプレートを同時に加工することにより、生産性を向上させることができる。材料をレーザ波長に対して略透過性とする必要があり、上記レーザ波長は、3Dガラス形状に関する場合には、本明細書において使用したレーザ波長(1064nm)である。

10

【0112】

本明細書において挙げられている全ての特許、公開出願及び参考文献の関連する教示は、その全体が参照により本出願に援用される。

【0113】

本明細書では複数の例示的实施形態について開示したが、添付の請求項が包含する本発明の範囲から逸脱することなく、上記例示的实施形態において形態及び細部の様々な変更を実施してよいことは、当業者には理解されるだろう。

20

【0114】

以下、本発明の好ましい実施形態を項分け記載する。

【0115】

実施形態1

3D表面を有するガラス加工物をレーザ加工する方法であって、上記方法は：
 ビーム伝播方向に沿って配向され、上記加工物から分離されることになるパーツを画定する輪郭に向けられたレーザビーム焦線に、パルスレーザビームを集束させるステップ；
 1つ又は複数のパスにおいて：

加工物及びレーザビームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させるステップであって、レーザビーム焦線は加工物内において、レーザビーム焦線が加工物内へと延在する輪郭に沿った位置に誘起吸収を生成し、上記誘起吸収は、各位置において、加工物内のレーザビーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；並びに

30

加工物及びレーザビームを互いに対して並進移動させるステップを有してなり、

上記1つ又は複数のパスは、加工物中のパーツの輪郭に沿って生成された欠陥線が、加工物からのパーツの分離を促進するために十分な数及び深さのものとなるように選択される、方法。

【0116】

実施形態2

平坦な非強化ガラス加工物をレーザ加工する方法であって、上記方法は：

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って加工物に向けられたレーザビーム焦線に、パルスレーザビームを集束させるステップであって、上記レーザビーム焦線は加工物内において誘起吸収を生成し、この誘起吸収は、加工物内のレーザビーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

40

加工物及びレーザビームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、加工物内に輪郭に沿った複数の欠陥線をレーザ形成するステップであって、上記輪郭は、加工物から分離されることになるパーツを画定する、ステップ；並びに

上記画定されたパーツを含む加工物を、3D表面を含むように成形するステップを有してなる、方法。

50

【 0 1 1 7 】

実施形態 3

成形された非強化ガラス加工物をレーザ加工する方法であって、上記方法は：

上記成形されたガラス加工物を、真空平坦化処理するステップ；

ビーム伝播方向に沿って配向され、輪郭に沿って真空平坦化処理された加工物に向けられたレーザビーム焦線に、パルスレーザビームを集束させるステップであって、レーザビーム焦線は加工物内において誘起吸収を生成し、この誘起吸収は、加工物内のレーザビーム焦線に沿って欠陥線を生成する、ステップ；

真空平坦化処理された加工物及びレーザビームを輪郭に沿って互いに対して並進移動させることによって、加工物内に輪郭に沿った複数の欠陥線をレーザ形成するステップであって、上記輪郭は、加工物から分離されることになる部分を画定する、ステップ；並びに

上記画定された部分を含む真空平坦化処理された加工物に対する真空を解放するステップ

を有してなる、方法。

【 0 1 1 8 】

実施形態 4

部分を加工物から輪郭に沿って分離するステップを更に含む、実施形態 1 ~ 3 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 1 9 】

実施形態 5

上記部分を加工物から輪郭に沿って分離するステップは、上記部分に機械的力を印加することによって、輪郭に沿った分離を促進するステップを含む、実施形態 4 に記載の方法。

【 0 1 2 0 】

実施形態 6

上記部分を加工物から輪郭に沿って分離するステップは、輪郭に沿って又は輪郭付近において赤外レーザビームを上記加工物に向けることによって、上記分離を促進するステップを含む、実施形態 4 又は 5 に記載の方法。

【 0 1 2 1 】

実施形態 7

上記加工物は成形ガラスパネルである、実施形態 1 ~ 6 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 2 2 】

実施形態 8

上記加工物はたわませたガラスパネルである、実施形態 1 ~ 7 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 2 3 】

実施形態 9

レーザビーム焦線の長さは、上記加工物の厚さより大きい、実施形態 1 ~ 8 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 2 4 】

実施形態 1 0

上記輪郭は、上記加工物から分離されることになる 2 つ以上の部分を画定する、実施形態 1 ~ 9 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 2 5 】

実施形態 1 1

1 つ又は複数のパスにおいて、上記加工物を上記レーザビームに対して回転させるステップを更に含む、実施形態 1 ~ 1 0 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 2 6 】

実施形態 1 2

10

20

30

40

50

上記誘起吸収は、上記加工物内に、深さ約75マイクロメートル以下までの表面下損傷を生成する、実施形態1～11のいずれか1つに記載の方法。

【0127】

実施形態13

上記加工物の厚さは、約100マイクロメートル～約8mmである、実施形態1～12のいずれか1つに記載の方法。

【0128】

実施形態14

上記パルスレーザービームのパルス持続時間は、約1ピコ秒超かつ約100ピコ秒未満である、実施形態1～13のいずれか1つに記載の方法。

10

【0129】

実施形態15

上記パルスレーザービームは、上記加工物において測定した場合の平均レーザーバーストエネルギーが、上記加工物の厚さ1mmあたり40マイクロジュール超である、実施形態1～14のいずれか1つに記載の方法。

【0130】

実施形態16

上記パルスレーザービームはある波長を有し、上記加工物は上記波長に対して略透過性である、実施形態1～15のいずれか1つに記載の方法。

【0131】

実施形態17

上記加工物は化学強化ガラスを含む、実施形態1及び4～16のいずれか1つに記載の方法。

20

【0132】

実施形態18

上記加工物は非強化ガラスを含む、実施形態1及び4～16のいずれか1つに記載の方法。

【0133】

実施形態19

上記パルスレーザーは10W～100Wの出力を有し、1バーストあたり少なくとも2パルスを含む複数のパルスのバーストを生成する、実施形態1～18のいずれか1つに記載の方法。

30

【0134】

実施形態20

上記パルスレーザーは10W～100Wの出力を有し、1バーストあたり2～25パルスを含む複数のパルスのバーストを生成する、実施形態19に記載の方法。

【0135】

実施形態21

上記パルスレーザーは25W～60Wの出力を有し、1バーストあたり2～25パルスを含む複数のパルスのバーストを生成し、
欠陥線間の距離は2～10マイクロメートルである、実施形態19に記載の方法。

40

【0136】

実施形態22

上記パルスレーザーは10W～100Wの出力を有し、上記加工物及び上記レーザービームは互いに対して少なくとも0.4m/secの速さで並進移動する、実施形態19に記載の方法。

【0137】

実施形態23

上記誘起吸収は、約0.5マイクロメートル以下のRa表面粗度を生成する、実施形態1～22のいずれか1つに記載の方法。

50

【 0 1 3 8 】

実施形態 2 4

上記加工物の厚さは約 1 0 0 マイクロメートル～約 8 mm である、実施形態 1 ～ 2 3 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 3 9 】

実施形態 2 5

上記加工物及びパルスレーザービームは、約 1 mm / s e c ～約 3 4 0 0 mm / s e c の速さで、上記輪郭に沿って互いに対して並進移動する、実施形態 1 ～ 2 4 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 4 0 】

実施形態 2 6

上記パルスレーザービームのパルス持続時間は、約 1 ピコ秒超かつ約 1 0 0 ピコ秒未満である、実施形態 1 ～ 2 5 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 4 1 】

実施形態 2 7

上記パルス持続時間は、約 5 ピコ秒超かつ約 2 0 ピコ秒未満である、実施形態 2 6 に記載の方法。

【 0 1 4 2 】

実施形態 2 8

上記パルスレーザービームの繰り返し数は約 1 k H z ～ 2 M H z である、実施形態 1 ～ 2 7 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 4 3 】

実施形態 2 9

上記繰り返し数は約 1 0 k H z ～ 6 5 0 k H z である、実施形態 2 8 に記載方法。

【 0 1 4 4 】

実施形態 3 0

上記パルスは、約 1 n s e c ～約 5 0 n s e c の持続時間によって隔てられた少なくとも 2 つのパルスのバースト内で生成され、

上記バーストのバースト繰り返し周波数は、約 1 k H z ～約 6 5 0 k H z である、実施形態 1 ～ 2 9 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 4 5 】

実施形態 3 1

上記パルスは、約 1 0 ～ 5 0 n s e c の持続時間によって隔てられる、実施形態 3 0 に記載の方法。

【 0 1 4 6 】

実施形態 3 2

上記レーザービーム焦線の長さは約 0 . 0 1 mm ～約 1 0 0 mm である、実施形態 1 ～ 3 1 のいずれか 1 つに記載の方法。

【 0 1 4 7 】

実施形態 3 3

上記レーザービーム焦線の長さは約 0 . 1 mm ～約 1 0 mm である、実施形態 3 2 に記載の方法。

【 0 1 4 8 】

実施形態 3 4

上記レーザービーム焦線の長さは約 0 . 1 mm ～約 1 mm である、実施形態 3 2 に記載の方法。

【 0 1 4 9 】

実施形態 3 5

上記レーザービーム焦線の平均スポット直径は、約 0 . 1 マイクロメートル～約 5 マイクロメートルである、実施形態 1 ～ 3 4 のいずれか 1 つに記載の方法。

10

20

30

40

50

【 0 1 5 0 】

実施形態 3 6

上記加工物の成形前に、成形後にある表面湾曲部を有することが意図された上記加工物のあるセクションに、レーザービーム焦線を向けることによって、上記セクション内に1つ又は複数の欠陥線を生成して、上記加工物の成形を促進するステップを更に含む、実施形態 2 に記載の方法。

【 0 1 5 1 】

実施形態 3 7

成形後の表面曲率半径は約 5 mm 未満である、実施形態 3 6 に記載の方法。

【 0 1 5 2 】

実施形態 3 8

成形後の表面曲率半径は約 2 mm 未満である、実施形態 3 7 に記載の方法。

【 0 1 5 3 】

実施形態 3 9

実施形態 1 ~ 3 8 のいずれか 1 つに記載の方法によって調製された、ガラス物品。

【 0 1 5 4 】

実施形態 4 0

3 D 表面を有するガラス物品であって、
上記ガラス物品は、少なくとも 2 5 0 マイクロメートル延在する複数の欠陥線を有する
少なくとも 1 つの縁部を有し、

上記欠陥線はそれぞれ、約 5 マイクロメートル以下の直径を有する、ガラス物品。

【 0 1 5 5 】

実施形態 4 1

上記ガラス物品は強化ガラスを含む、実施形態 4 0 に記載のガラス物品。

【 0 1 5 6 】

実施形態 4 2

上記ガラス物品は非強化ガラスを含む、実施形態に記載 4 0 のガラス物品。

【 0 1 5 7 】

実施形態 4 3

上記縁部の R a 表面粗度は約 0 . 5 マイクロメートル未満である、実施形態 4 0 に記載
のガラス物品。

【 0 1 5 8 】

実施形態 4 4

上記縁部は深さ約 7 5 マイクロメートル以下までの表面下損傷を有する、実施形態 4 0
に記載のガラス物品。

【 0 1 5 9 】

実施形態 4 5

上記欠陥線間の距離は約 7 マイクロメートル以下である、実施形態 4 0 に記載のガラス
物品。

【 符号の説明 】

【 0 1 6 0 】

- 1 基板
- 1 a 基板の表面
- 1 b 基板の反対側の表面
- 2 レーザ照射
- 2 a レーザ照射、ビーム束
- 2 a R 辺縁光線
- 2 a Z 中央ビーム
- 2 b レーザビーム焦線
- 2 c 誘起吸収のセクション

10

20

30

40

50

3	レーザ	
6	光学組立体	
7	両凸面レンズ	
8	円形開口	
9	アキシコン	
1 0	アキシコン	
1 1	平凸レンズ	
1 2	コリメートレンズ	
1 1 0	薄型ガラスプレート、断層線、輪郭	
1 2 0	欠陥線、孔	10
1 3 0	基板材料	
1 4 0	超短パルスレーザビーム	
5 0 0	バースト	
5 0 0 A	パルス	
7 1 0	集束していないレーザビーム	
7 2 0	透明基板	
7 3 0	球面レンズ	
7 4 0	焦点	
7 5 0	アキシコンレンズ	
7 6 0	円筒	20
1 5 5 0	予備形成シート	
1 5 5 1	パーツ	
1 5 5 2	パーツの外形	
1 5 5 4	切り離し線	
1 5 5 6	パーツのコーナ	
1 5 5 8	型	
1 5 6 0	レーザ穿通孔	

【図1A】

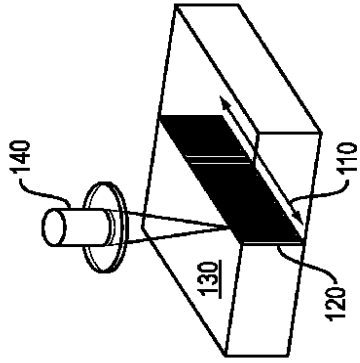


FIG. 1A

【図1B】

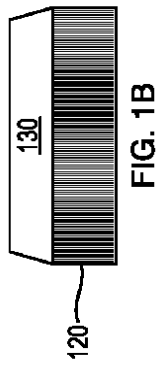


FIG. 1B

【図2B】

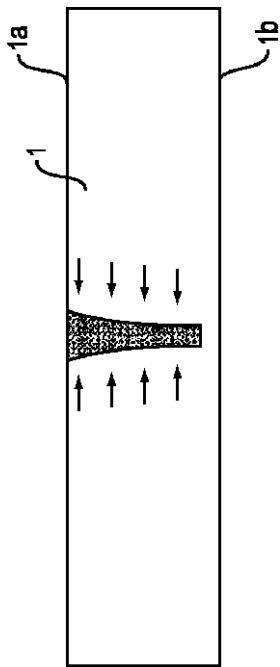


FIG. 2B

【図1C】

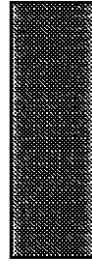
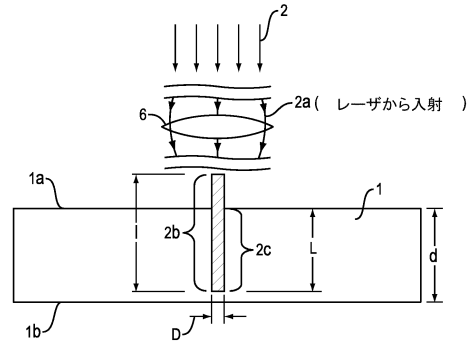
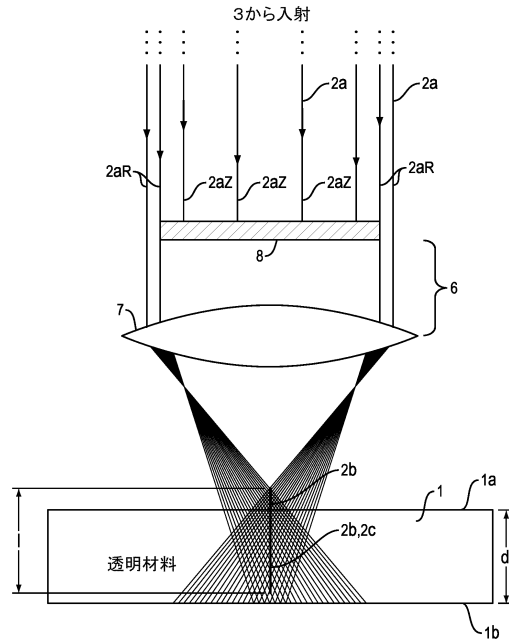


FIG. 1C

【図2A】



【図3A】



【 図 3 B - 1 】

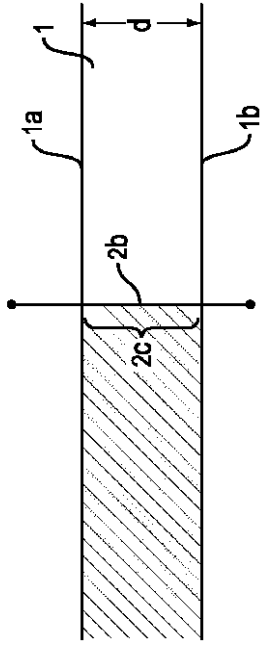


FIG. 3B-1

【 図 3 B - 2 】

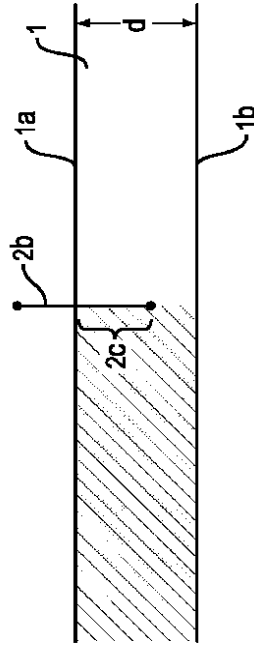


FIG. 3B-2

【 図 3 B - 3 】

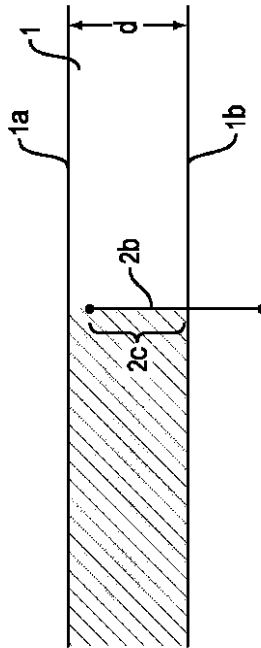


FIG. 3B-3

【 図 3 B - 4 】

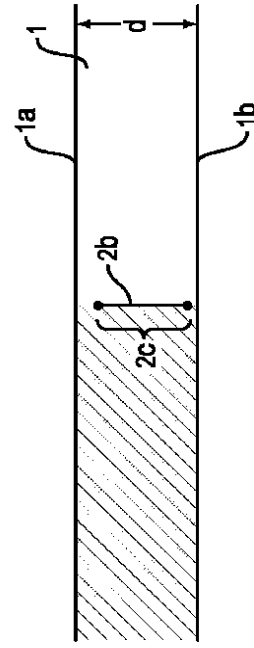
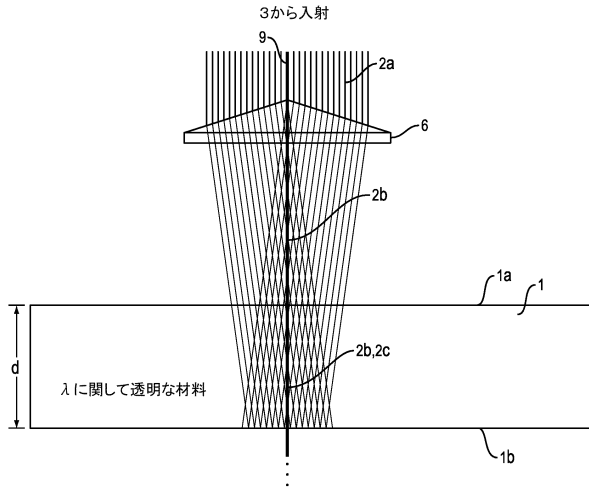
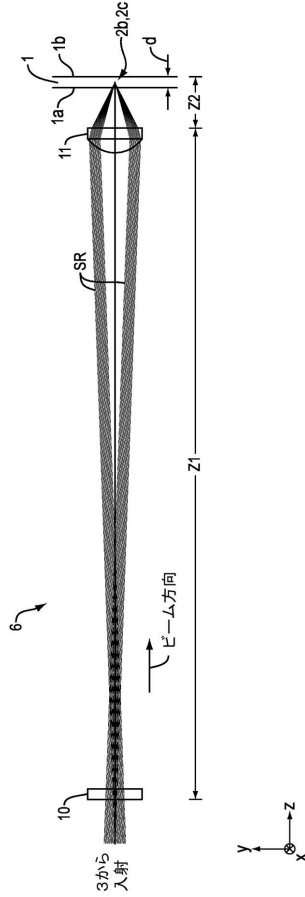


FIG. 3B-4

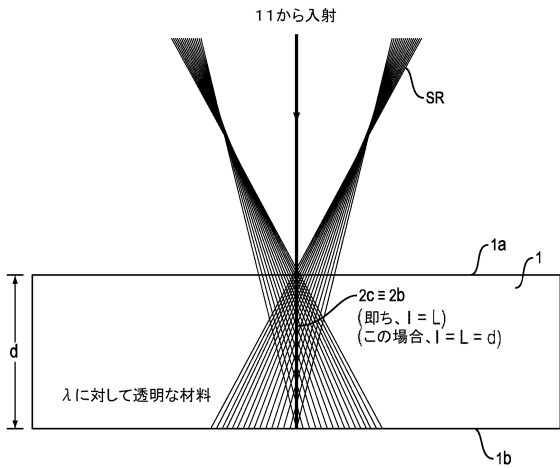
【図4】



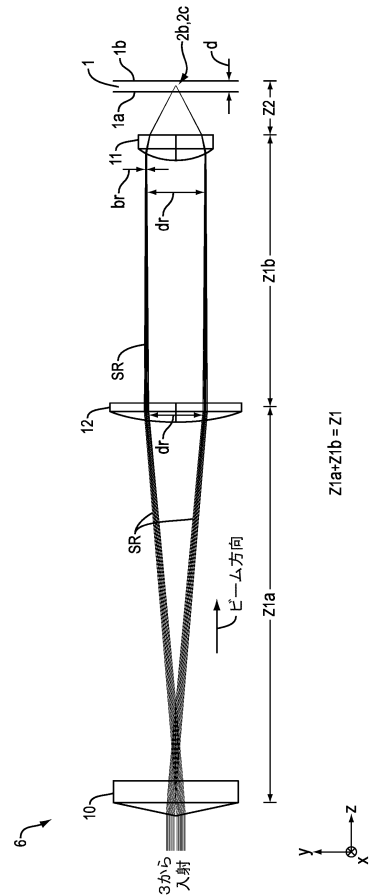
【図5A】



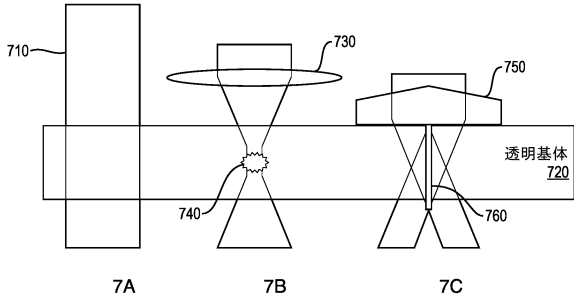
【図5B】



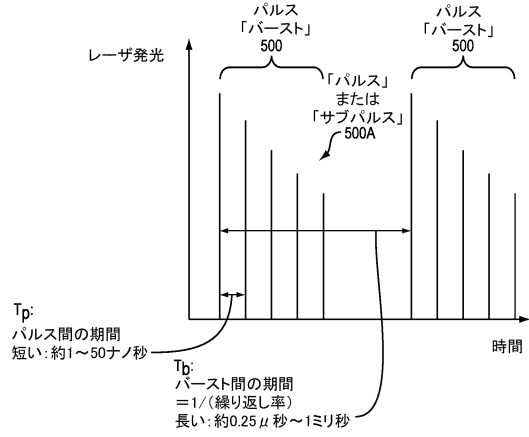
【図6】



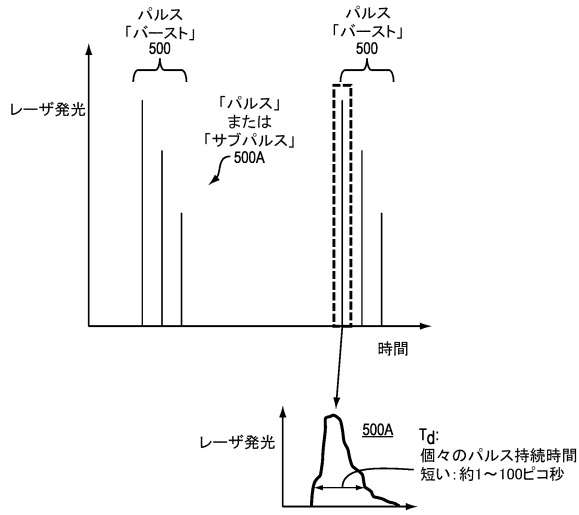
【図7】



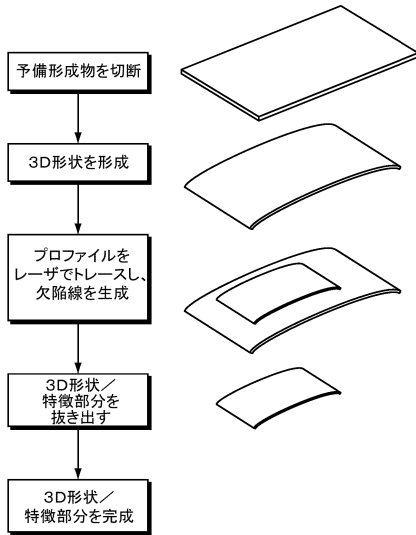
【図8B】



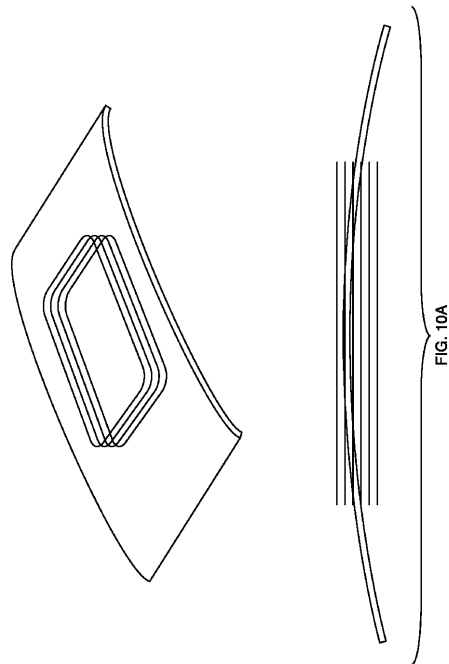
【図8A】



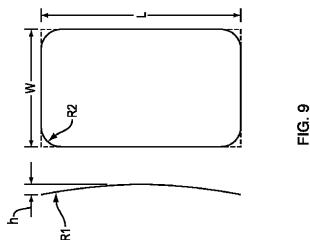
【図8C】



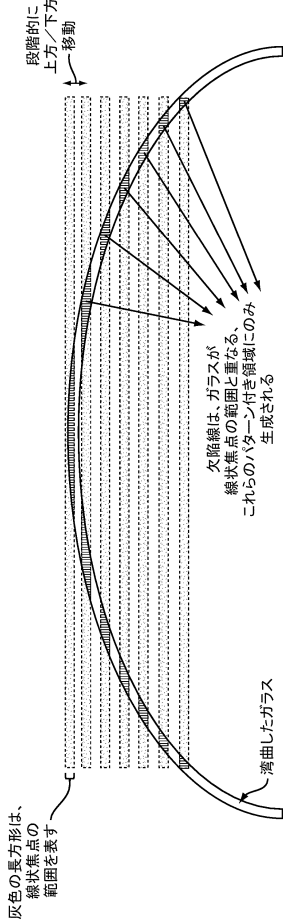
【図10A】



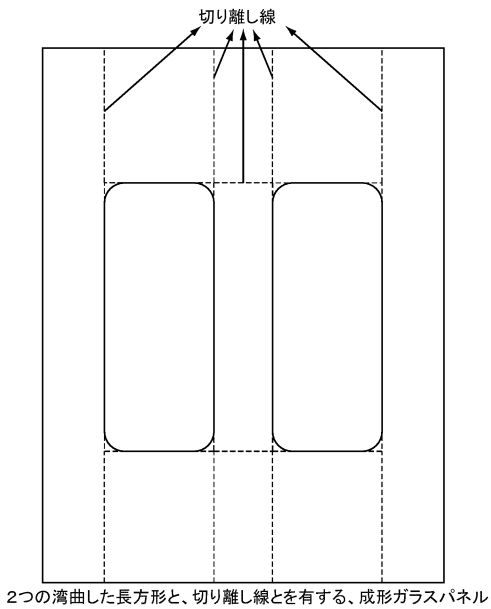
【図9】



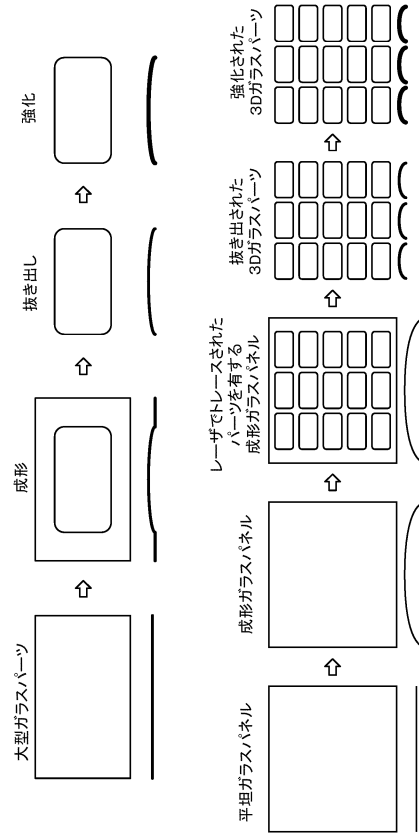
【図10B】



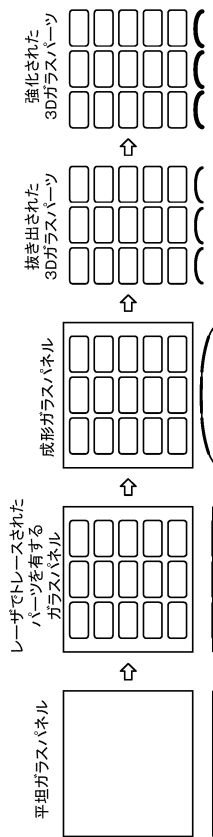
【図12】



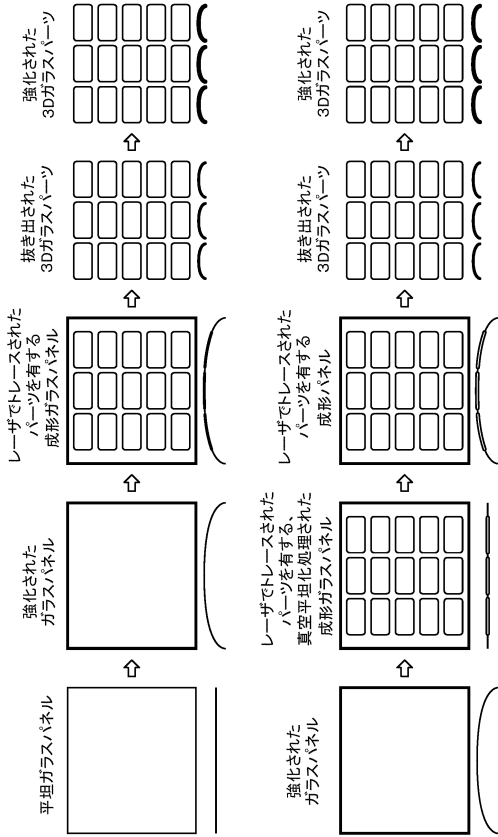
【図11】



【図13】



【図 14】



【図 16 B】

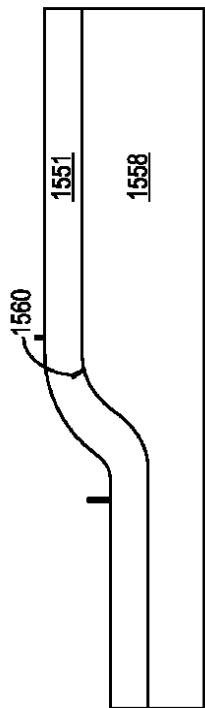
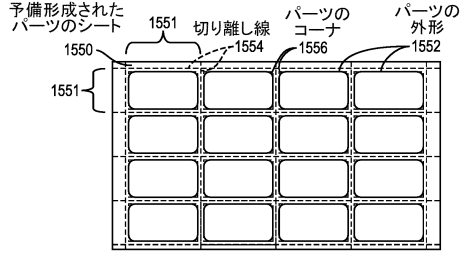
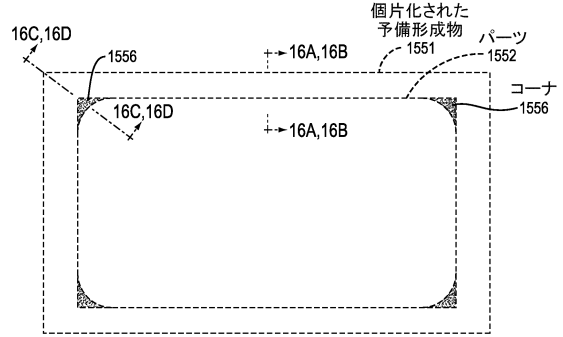


FIG. 16B

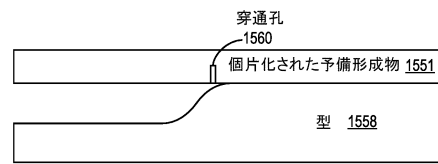
【図 15 A】



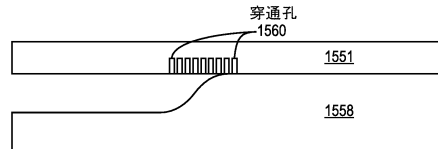
【図 15 B】



【図 16 A】



【図 16 C】



【 16 D 】

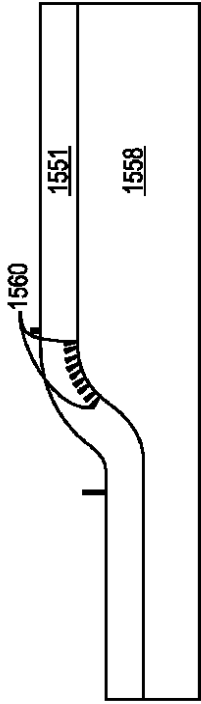


FIG. 16D

フロントページの続き

- (31)優先権主張番号 62/046,360
(32)優先日 平成26年9月5日(2014.9.5)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)
- (31)優先権主張番号 14/530,379
(32)優先日 平成26年10月31日(2014.10.31)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

前置審査

- (72)発明者 ピエヒ, ギャレット アンドリュウ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 14830 コーニング ホーンビー ロード 4226
- (72)発明者 ツダ, セルジオ
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 14845 ホースヘッズ バリントン ロード 10
- (72)発明者 ワグナー, ロバート スティーヴン
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 14830 コーニング ダイク ロード 4557

審査官 吉川 潤

- (56)参考文献 特表2013-536081(JP, A)
特開2005-288503(JP, A)
特開2006-130691(JP, A)
特開2008-062263(JP, A)
特表2011-517299(JP, A)
特開2013-245153(JP, A)
特開2006-150385(JP, A)
米国特許第06787732(US, B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C03B 33/00 - 33/14
B23K 26/00 - 26/70
B28D 1/00 - 7/04