

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7213852号
(P7213852)

(45)発行日 令和5年1月27日(2023.1.27)

(24)登録日 令和5年1月19日(2023.1.19)

(51)国際特許分類	F I	
C 0 3 B 33/09 (2006.01)	C 0 3 B 33/09	
C 0 3 C 23/00 (2006.01)	C 0 3 C 23/00	D
C 0 3 C 15/00 (2006.01)	C 0 3 C 15/00	Z
B 2 3 K 26/382 (2014.01)	B 2 3 K 26/382	
B 2 3 K 26/53 (2014.01)	B 2 3 K 26/53	

請求項の数 6 (全70頁)

(21)出願番号	特願2020-142869(P2020-142869)	(73)特許権者	397068274
(22)出願日	令和2年8月26日(2020.8.26)		コーニング インコーポレイテッド
(62)分割の表示	特願2016-539259(P2016-539259)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8
原出願日	平成26年12月16日(2014.12.16)		3 1 コーニング リヴァーフロント プ
(65)公開番号	特開2020-196665(P2020-196665)	(74)代理人	100073184
	A)		弁理士 柳田 征史
(43)公開日	令和2年12月10日(2020.12.10)	(74)代理人	100090468
審査請求日	令和2年9月24日(2020.9.24)		弁理士 佐久間 剛
(31)優先権主張番号	61/917,179	(72)発明者	サシャ マリヤノヴィッチ
(32)優先日	平成25年12月17日(2013.12.17)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		7 0 ペインテッド ポスト ノルブルック
(31)優先権主張番号	62/023,429	(72)発明者	ギャレット アンドリュウ ピエヒ
(32)優先日	平成26年7月11日(2014.7.11)		アメリカ合衆国 ニューヨーク州 1 4 8
	最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ガラスおよびガラス製品への高速レーザ穴あけ方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

成形品において、

基板であって、前記基板の第一の表面から前記基板の第二の表面へと連続的に延びる複数のエッチングされたビア貫通穴を有する基板を含み、

前記基板は390nm～700nmの範囲内の少なくとも1つの波長の少なくとも70%を透過させ、

前記複数のエッチングされたビア貫通穴の直径は20μm以下であり、

隣接するエッチングされたビア貫通穴間の間隔は10μm以上であり、

前記複数のエッチングされたビア貫通穴は、前記第一の表面の開口と、前記第二の表面の開口と、前記第一の表面の前記開口と前記第二の表面の前記開口との間にあるくびれ部と、を含み、

前記くびれ部の直径は前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも50%であり、

前記第一の表面の前記開口の直径と前記第二の表面の前記開口の直径との差は3μm以下である

ことを特徴とする成形品。

【請求項2】

前記複数のエッチングされたビア貫通穴の直径は5μm超であることを特徴とする、請求項1に記載の成形品。

【請求項 3】

前記くびれ部の直径は、前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも70%であることを特徴とする、請求項1または2に記載の成形品。

【請求項 4】

前記複数のエッチングされたビア貫通穴の密度は、5貫通穴/mm²～50貫通穴/mm²の範囲内であることを特徴とする、請求項1から3のいずれか1項に記載の成形品。

【請求項 5】

前記複数のエッチングされたビア貫通穴のアスペクト比は5:1～20:1の範囲内であることを特徴とする、請求項1から4のいずれか1項に記載の成形品。

【請求項 6】

前記複数のエッチングされたビア貫通穴は導電材料を含むことを特徴とする、請求項1から5のいずれか1項に記載の成形品。

10

【発明の詳細な説明】

【関連出願の相互参照】

【0001】

本願は、2014年7月11日に出願された米国仮特許出願第62/023429号明細書の利益を主張する、2014年10月31日に出願された米国仮特許出願第62/073191号明細書の利益を主張する、2014年11月7日に出願された米国特許出願第14/535800号明細書と、2013年12月17日に出願された米国仮特許出願第61/917179号明細書の、米国特許法第120条に基づく優先権の利益を主張するものである。上記出願の教示内容の全体を参照によって本願に援用する。

20

【技術分野】

【0002】

本発明は、ガラスおよびガラス製品への高速レーザ穴あけ方法に関する。

【背景技術】

【0003】

今日、電子機器応用のために精密に形成された穴を有する薄板ガラスに対して高い関心が寄せられている。穴には導電材料が充填され、1つの部品から他の部品へと電気信号を伝送するために使用され、中央処理ユニット、メモリチップ、グラフィカルプロセッシングユニット、またはその他の電子コンポーネントの精密接続が可能となる。このような用途の場合、その中に金属被覆された穴を有する基板は一般に、「インタポーザ」と呼ばれる。現在使用されているインタポーザ材料、例えば繊維強化ポリマやシリコンと比較して、ガラスは多くの有利な特性を有する。ガラスは、大型の薄い平滑な板として形成でき、研磨が不要であり、有機系の代替物より硬さと寸法安定性に優れ、シリコンより電気絶縁性が高らかに高く、有機系の選択肢より（熱と硬さの点での）寸法安定性が高く、集積回路内のスタックの反りを制御するために、膨張率の違いに合わせたカスタム化が可能である。

30

【0004】

ガラスへの穴の形成には様々な穴形成方法を使用でき、例えば、ホットプレス、感光被削性ガラスのリソグラフィ、放電穴あけ、パウダブラステイング、および各種のレーザ穴あけ方式がある。いずれの技術を使用しても、十分な速度（穴/秒）で十分な品質（低い耐亀裂性、適正な大きさまたは真円度）の穴を形成する上での課題が伴い、それが最終的にコストに影響する。例えば、ガラスのホットプレス加工では、十分に小さいサイズ（約100マイクロメートル以下）の穴の形成が困難であり、放電穴あけでは、短い穴ピッチ（すなわち、穴間の距離が約50マイクロメートル未満）でそうすることが困難でありえ、ビームトレパニングを用いたレーザ穴あけは低速でありえ（例えば、約1穴/秒）、エキシマレーザ加工および感光被削性ガラスは、高額な初期投資を要する可能性がある。

40

【0005】

UVナノ秒レーザを用いたレーザ穴あけ法は、特に高品質の穴を形成できることが実証されている。レーザは、穴1つにつき複数の（例えば何百かの）レーザパルスで直径約10マイクロメートルのパイロット孔をあけるために使用され、それから、その部品が酸工

50

ッチングされて、穴が拡張され、標的寸法とされる。穴はその後、金属化され、電気信号拡散のための再配線層が追加され、部品がより小型の個体にダイシングされ、機能的インタポーザができる。しかしながら、レーザ穴あけは時間のかかるプロセスである可能性があり、パーカッション穴あけ加工（すなわち、同じ場所でパルスが繰り返される）では、1個の穴を所望の深さまで開けるのに何百パルスも必要となりうる。精密レーザ穴あけプラットフォームの費用は高額に上る可能性があり（約100万ドル/台に迫る）、穴形成の速度がインタポーザの製造コスト全体の中の重要なパラメータとなる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

そこで、上述の問題を軽減または排除するようなガラス等の材料へのレーザ穴あけ方法が求められている。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本明細書で開示されている実施形態は、ダメージトラック（パイロット孔とも呼ばれる）を極めて高速で形成する方法に関する。特殊化した光供給システムとピコ秒パルスレーザを利用することにより、ダメージトラック/パイロット孔をガラスまたはその他の透明材料中に穴あけでき、各ダメージトラック/パイロット孔はわずか1レーザパルスで形成できる。この工程により、ダメージトラック/パイロット孔の穴あけ速度を上述のナノ秒レーザ穴あけプロセスで実現可能なものの優に100倍まで高速化できる。しかしながら、初期ダメージトラック/パイロット孔は一般に、小さすぎて導電材料を充填できず、連続していないことが多い。そのため、それだけで、このようなダメージトラック/パイロット孔はインタポーザまたは電気ビアに適していない。上記のプロセスをその後の酸エッチングステップと組み合わせることによって、ダメージトラックまたはパイロット孔をその後、高並行プロセスにより、インタポーザにとって現実的な穴径へと拡張できる。この複合的プロセスは、ガラス中にインタポーザに適した大きさ（20マイクロメートル未満から数10マイクロメートル程度まで）、形状、品質の穴を、他の方法よりかなり安価な1部品当たりのコストで生成する。

【0008】

1つの実施形態において、実質的に透明な材料に貫通穴をレーザ穴あけまたは形成する方法は、パルスレーザビームをビーム伝搬方向に沿って向けられ、材料中に方向付けられたレーザビーム焦線へと合焦させるステップであって、レーザビームの焦線は材料中に誘起吸収を発生させ、誘起吸収が材料中のレーザビーム焦線に沿ってダメージトラックを生成するようなステップと、材料とレーザビームを相互に関して並進させ、それによって複数のダメージトラックをレーザ形成するステップと、を含む。この方法は、材料を酸溶液中でエッチングして、材料中の欠陥線を拡張することにより、1マイクロメートルより大きい直径の穴を生成するステップをさらに含む。エッチング速度は、約10マイクロメートル/分未満、例えば約5マイクロメートル/分未満の速度、または約2マイクロメートル/分未満の速度とすることができる。エッチングプロセスのチーレ数は2以下とすることができる。

【0009】

いくつかの実施形態において、パルス幅は、約1ピコ秒超～約100ピコ秒未満、例えば約5ピコ秒超～約20ピコ秒未満の間の範囲内とすることができる、繰返し率は約1kHz～4MHzの間の範囲、例えば約10kHzから650kHzの間の範囲内とすることができる。上記の繰返し率の単パルスのほかに、パルスは、約1nsec～約50nsec、例えば10～30nsec、例えば約20nsecプラスマイナス2nsecの間の範囲の時間で分離される2パルスまたはそれ以上（例えば、3パルス、4パルス、5パルス、またはそれ以上）のバーストを、1バーストあたり少なくとも40μJのエネルギーで生成でき、バースト繰返し周波数は約1kHz～約200kHzの間の範囲とすることができる。パルスレーザビームの波長は、材料が実質的にこの波長を透過させるように選

10

20

30

40

50

択できる。材料で測定された1バーストあたりの平均レーザーエネルギーは、材料の厚さ1mmあたり40マイクロジュールより大きく、例えば40マイクロジュール/mm~1000マイクロジュール/mmの間、または100マイクロジュール/mm~650マイクロジュール/mmの間の範囲とすることができる。パルスレーザービームのバーストエネルギー密度は、25マイクロジュール/線状焦点mm~125マイクロジュール/線状焦点mmの範囲とすることができる。パルスレーザービームは、少なくとも500ダメージトラック/秒、少なくとも1,000ダメージトラック/秒、または少なくとも5,000ダメージトラック/秒で生成できる。ダメージトラックは、非周期的パターンでも形成できる。

【0010】

レーザービーム焦線は、ベッセルビームまたはガウス-ベッセルビームを使って形成できる。焦線は、アキシコンを使って生成できる。レーザービーム焦線の長さは約0.1mm~約10mmの間の範囲、例えば約1mm、約2mm、約3mm、約4mm、約5mm、約6mm、約7mm、約8mm、または約9mmとすることができ、または長さは約0.1mm~約1mmの範囲、平均スポット径は約0.1マイクロメートル~約5マイクロメートルの間の範囲内とすることができる。各貫通穴の直径は、約5マイクロメートル~100マイクロメートルとすることができる。各ダメージトラックの直径は、約5マイクロメートル以下とすることができる。いくつかの実施形態において、材料は板ガラスのスタックとすることができる。穴間の間隔は50マイクロメートル~500マイクロメートルの間、または10マイクロメートル~50マイクロメートルの間とすることができる。材料とレーザービームを相互に関して並進させるステップは、ガラス板を一連のリニアステージで並進させるステップ、またはレーザービームを、リニアステージ、レゾナントスキャニングミラースキャナ、ガルバノメータ(ガルボ)ミラースキャナ、圧電調節可能ミラー、または音響光学偏向装置を使って並進させるステップを含むことができる。この方法は、貫通穴におけるガラス内面を導体で被覆することにより、貫通穴の上下間に導電性を生じさせるステップ、または貫通穴におけるガラス内面を被覆して、生体分子が付着しやすくするステップをさらに含むことができる。材料は、390nm~700nmの範囲の少なくとも1つの波長を透過させることができ、および/または390nm~700nmの範囲内の少なくとも1つの波長の少なくとも70%を透過させることができる。材料は、ガラス、溶融石英、またはガラス板のスタックとすることができる。

【0011】

いくつかの実施形態において、複数の貫通穴の直径は20μm以下、隣接する貫通案間の間隔は10μm以上であり、複数の貫通穴は、第一の表面の開口と、第二の表面の開口と、第一の表面の開口と第二の表面の開口との間にあるくびれ部と、を含み、くびれ部の直径は、第一の表面の開口または第二の表面の開口の直径の少なくとも50%であり、第一の表面の開口の直径と第二の表面の開口の直径との差は3μm以下である。他の実施形態は、上述の、および詳細な説明の中に記載の方法により作製されるガラス成形品を含む。

【0012】

他の実施形態において、ガラス成形品は複数のダメージトラックを有する基板を含み、ダメージトラックの直径は5マイクロメートル未満、隣接する穴間の間隔は少なくとも20マイクロメートル、アスペクト比は20:1以上である。ダメージトラックの直径は、1マイクロメートル未満とすることができる。

【0013】

また別の実施形態において、ガラス成形品はガラス基板のスタックを含み、前記スタックを通る複数の穴が形成され、穴はガラス基板の各々を貫通し、穴の直径は1マイクロメートル~100マイクロメートルの間であり、穴-穴間隔は約25~1000マイクロメートルである。ガラス成形品は、10マイクロメートルより大きいエアギャップにより分離された少なくとも2枚のガラス基板を含むことができる。

【0014】

また別の実施形態において、実質的に透明な成形品は、約200nm~約2000nm

10

20

30

40

50

の間の波長を実質的に透過させる材料の多層スタックを含み、多層スタックは、スタックの複数の層を通じて形成された複数の穴を有する。穴の直径は1マイクロメートル～1000マイクロメートルの間であり、穴-穴間隔は25～1000マイクロメートルである。多層スタックは、a) 複数のガラス層と、ガラス層間に挟まれた少なくとも1つのポリマ層、b) 異なる組成の少なくとも2つのガラス層、またはc) 少なくとも1つのガラス層と少なくとも1つの非ガラス無機層のうちのいずれか1つまたはそれ以上を含むことができる。

【0015】

さらにまた別の実施形態において、材料中に貫通穴を形成する方法は、パルスレーザをビーム伝搬方向に沿って向けられたレーザビーム焦点へと合焦させ、レーザビーム焦点を材料中に方向付けるステップによって材料中に直径5 μm 以下のダメージトラックを形成するステップと、材料を酸溶液中でエッチングして、複数の欠陥線を拡張させて、材料中に複数の貫通穴を生成するステップと、を含み、エッチングのチーレ数は2以下である。材料は、390nm～700nmの範囲内の少なくとも1つの波長を透過させることができ、および/または390nm～700nmの範囲内の少なくとも1つの波長の少なくとも70%を透過させることができる。この方法はまた、エッチング中に酸溶液を機械的に攪拌するステップも含むことができる。酸溶液は表面活性剤を含むことができる。複数の貫通穴の直径は20 μm 以下とすることができ、隣接する貫通穴間の間隔は少なくとも10 μm である。複数の貫通穴は、第一の表面の開口と、第二の表面の開口と、第一の表面の開口と第二の表面の開口との間にあるくびれ部と、を含み、くびれ部の直径は、第一の表面の開口または第二の表面の開口の直径の少なくとも50%であり、第一の表面の開口の直径と第二の表面の開口の直径との差は3 μm 以下である。

【0016】

別の実施形態において、成形品は、基板の第一の表面から基板の第二の表面へと連続的に伸びる複数の貫通穴を有する基板を含み、基板は390nm～700nmの範囲内の少なくとも1つの波長を透過させ、複数の貫通穴の直径は20 μm 以下であり、複数の貫通穴は、第一の表面の開口と、第二の表面の開口と、第一の表面の開口と第二の表面の開口との間にあるくびれ部と、を含み、くびれ部の直径は第一の表面の開口または第二の表面の開口の直径の少なくとも50%であり、第一の表面の開口の直径と第二の表面の開口の直径の差は3 μm 以下である。複数の開口は5 μm より大きい直径、15 μm 以下の直径、または10 μm 以下の直径を有し、くびれ部の直径は、第一の表面の開口または第二の表面の開口の直径の少なくとも70%、少なくとも75%、または少なくとも80%である。基板は、熔融石英、ガラス、または化学的に強化されたガラスとすることができ、基板は1mm以下の厚さ、または20 μm ～200 μm の範囲の厚さを有することができる。貫通穴の密度は、5貫通穴/ mm^2 ～50貫通穴/ mm^2 の範囲内とすることができる。貫通穴のアスペクト比は5:1～20:1の範囲内とすることができる。貫通穴は非周期的パターンを有することができる。貫通穴は、導電材料を含む。

【0017】

本明細書に記載されている実施形態は多くの利点を提供し、その中には、穴/ダメージトラックをわずか1レーザパルスまたは1パルスバーストで形成でき、従来のパーカッション穴あけレーザ法よりはるかに速い穴あけまたは穴/ダメージトラック形成速度を可能にすることが含まれる。本明細書に記載されている穴/ダメージトラック穴あけ速度はレーザの繰返し率と、レーザビームを次の穴あけ位置へと移動できる速度によってのみ限定される。1秒あたり数百穴という穴あけ速度が容易に達成され、使用されるステージと穴パターン密度に応じて、1秒あたり10,000穴超という穴あけ速度が可能となる。これに加えて、このプロセスは、同時に複数の部品(スタック)を穴あけでき、システムのスループットはさらに高まる。

【0018】

線状焦点光学装置により、レーザで穴あけ加工された穴/ダメージトラックは、直径が極めて小さく(例えば、約1マイクロメートル)、これはガウス光ビームで実現可能な研

削穴の寸法（一般的には約 10 マイクロメートル超）よりはるかに小さい。

【0019】

酸エッチングの使用によって、金属化またはその他の化学コーティングにとって現実的な寸法のピア貫通穴の形成が可能となる。すべてのパイロット孔/ダメージトラックが並行プロセスで標的の直径まで並行して拡張され、これは穴を大径まであけるのにさらにレーザー露光を行う、レーザー使用の場合よりはるかに速い。

【0020】

酸エッチングは、レーザーによって生じる微細亀裂または損傷のすべてを平滑化することにより、レーザーだけの使用より強力な部品を作る。

【0021】

以上の事柄は、添付の図面に示されている例示的な実施形態に関する以下のより詳しい説明から明らかになり、各種の図面を通じて、同様の参照文字は同じ部品を示す。図面は必ずしも正しい縮尺によるとは限らず、実施形態を説明することに重点が置かれている。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】レーザー穴あけ加工のための光学アセンブリの1つの実施形態の概略図である。

【図2A】レーザービーム焦線の位置決め、すなわち焦線に沿った誘起吸収による、レーザー波長を透過させる材料の加工を示す。

【図2B】レーザービーム焦線の位置決め、すなわち焦線に沿った誘起吸収による、レーザー波長を透過させる材料の加工を示す。

【図3A】1つの実施形態によるレーザー加工光学アセンブリの図である。

【図3B-1】レーザービームの焦線を基板に関してある位置に位置付けることによる、基板の加工方法を示す図である。

【図3B-2】レーザービームの焦線を基板に関して異なる位置に位置付けることによる、基板の加工方法を示す図である。

【図3B-3】レーザービームの焦線を基板に関して異なる位置に位置付けることによる、基板の加工方法を示す図である。

【図3B-4】レーザービームの焦線を基板に関して異なる位置に位置付けることによる、基板の加工方法を示す図である。

【図4】レーザー加工光学アセンブリの第二の実施形態の図である。

【図5A】レーザー加工光学アセンブリの第三の実施形態の図である。

【図5B】レーザー加工光学アセンブリの第三の実施形態の図である。

【図6】例示的なピコ秒レーザーの、時間に対するレーザー発光（強度）のグラフである。

【図7A】Eagle XG（登録商標）ガラスの小片に作られた、レーザー穴あけにより形成された特徴物の走査電子顕微鏡写真である。

【図7B】Eagle XG（登録商標）ガラスの小片に作られた、レーザー穴あけにより形成された特徴物の走査電子顕微鏡写真である。

【図8】エッチングが行われていない一般的なダメージトラック、穿孔または欠陥線（これら3つの用語は本明細書中、互換的に使用される）の側面の顕微鏡画像である。ガラス中に形成されたトラックは一般に、完全に開放しておらず、すなわち、材料の一部領域は除去されるが、必ずしも完全な貫通穴が形成されるとはかぎらない。

【図9】酸エッチングが行われていないダメージトラックまたは穿孔の、図8に示される顕微鏡写真より高倍率の側面顕微鏡画像である。

【図10】酸エッチングされていない一般的なダメージトラックまたは穴の上面顕微鏡写真である。

【図11】より短い焦線（約0.5mm）、したがって高エネルギー密度を欠陥線に付与する、より焦点距離の短い対物レンズ（ $f = 30\text{mm}$ ）を使用することによる、顕著な微細亀裂を生じさせる加工条件で形成された穴の走査電子顕微鏡写真である。

【図12】部品の厚さ全体を貫通しない止まり穴の形成に使用可能な穴の走査電子顕微鏡写真である。

10

20

30

40

50

【図 1 3 A】エッチング後の入口穴（レーザ入射側）の走査電子顕微鏡写真である。

【図 1 3 B】エッチング後の出口穴（レーザ射出側）の走査電子顕微鏡写真である。

【図 1 4】微細亀裂の影響のエッチング後画像である。微細亀裂は、酸エッチングによって長い特徴物になっている。

【図 1 5】酸エッチング後の穴の側面を示す写真である。断面を示すためにサンプルはダイシングされている。明るい領域がガラス、暗い領域が穴である。

【図 1 6】酸エッチング後の穴の側面を示すが、図 1 5 に示されている写真より高倍率での写真である。

【図 1 7 A】上部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の約 10,000 個の穴についてとった穴径の統計を示す。

10

【図 1 7 B】下部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の約 10,000 個の穴についてとった穴径の統計を示す。

【図 1 7 C】くびれ部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の約 10,000 個の穴についてとった穴径の統計を示す。

【図 1 8 A】上部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の真円度の統計を示す。真円度 = ある穴の最大径 - 最小径。データはすべての穴に顕著な亀裂 / 削り屑がないことを示し、これらは顕著な非円形にエッチングすることになる。

【図 1 8 B】下部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の真円度の統計を示す。真円度 = ある穴の最大径 - 最小径。データはすべての穴に顕著な亀裂 / 削り屑がないことを示し、これらは顕著な非円形にエッチングすることになる。

20

【図 1 8 C】くびれ部における直径別穴数のグラフであり、エッチング後の真円度の統計を示す。真円度 = ある穴の最大径 - 最小径。データはすべての穴に顕著な亀裂 / 削り屑がないことを示し、これらは顕著な非円形にエッチングすることになる。

【図 1 9 A】エッチング前の半径方向の亀裂の写真である。

【図 1 9 B】より高倍率での入口穴配列の写真である。

【図 1 9 C】より高倍率での入口穴配列の写真である。

【図 2 0 A】エッチング前の穴の写真であり、上面を示す。

【図 2 0 B】エッチング前の穴の写真であり、底面を示す。

【図 2 0 C】エッチング前の穴の写真であり、側面を示す。

【図 2 1 A】レーザ出力 55% での、酸エッチング後の穴の上面の写真である。

30

【図 2 1 B】レーザ出力 65% での、酸エッチング後の穴の上面の写真である。

【図 2 1 C】レーザ出力 75% での、酸エッチング後の穴の上面の写真である。

【図 2 1 D】レーザ出力 85% での、酸エッチング後の穴の上面の写真である。

【図 2 1 E】レーザ出力 100% での、酸エッチング後の穴の上面の写真である。

【図 2 2 A】レーザ出力 55% での、酸エッチング後の穴の底面の写真である。

【図 2 2 B】レーザ出力 65% での、酸エッチング後の穴の底面の写真である。

【図 2 2 C】レーザ出力 75% での、酸エッチング後の穴の底面の写真である。

【図 2 2 D】レーザ出力 85% での、酸エッチング後の穴の底面の写真である。

【図 2 2 E】レーザ出力 100% での、酸エッチング後の穴の底面の写真である。

【図 2 3 A】酸エッチング後の穴の上面の写真であり、穴径 100 マイクロメートル、ピッチ 200 マイクロメートル、配列 150 × 150 である。

40

【図 2 3 B】酸エッチング後の穴の上面の写真であり、穴径 50 マイクロメートル、ピッチ 100 マイクロメートル、配列 300 × 300 である。

【図 2 3 C】酸エッチング後の穴の上面の写真であり穴径 50 マイクロメートル、ピッチ 100 マイクロメートル、配列 300 × 300 であり、亀裂と削り屑のあるいくつかの穴を示す。

【図 2 4 A】配列 100 × 100 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、サンプルの上部の結果を示す。

【図 2 4 B】配列 100 × 100 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、サンプルの下部の結果を示す。

50

【図 2 4 C】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、サンプルのくびれ部の結果を示す。

【図 2 5 A】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、サンプルの上部の結果を示す。

【図 2 5 B】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、サンプルの下部の結果を示す。

【図 2 5 C】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、サンプルのくびれ部の結果を示す。

【図 2 6 A】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、第二のサンプルの上部の結果を示す。

10

【図 2 6 B】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、第二のサンプルの下部の結果を示す。

【図 2 6 C】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、直径別穴数のグラフであり、第二のサンプルのくびれ部の結果を示す。

【図 2 7 A】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、第二のサンプルの上部の結果を示す。

【図 2 7 B】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、第二のサンプルの下部の結果を示す。

【図 2 7 C】配列 1 0 0 × 1 0 0 の穴を有するサンプルの、真円度別穴数のグラフであり、第二のサンプルのくびれ部の結果を示す。

20

【図 2 8 A】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 2 8 B】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 2 8 C】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 2 9 A】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、5 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 2 9 B】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、5 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

30

【図 2 9 C】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、5 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 0 A】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、7 5 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 0 B】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、7 5 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 0 C】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、7 5 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 1 A】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、1 0 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

40

【図 3 1 B】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、1 0 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 1 C】1 0 0 % のレーザ出力を用いた、1 0 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 2 A】8 5 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 2 B】8 5 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 2 C】8 5 % のレーザ出力を用いた、3 0 マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

50

【図 3 3 A】85%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 3 B】85%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 3 C】85%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 4 A】85%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 4 B】85%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 4 C】85%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 5 A】85%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 5 B】85%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 5 C】85%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 6 A】75%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 6 B】75%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 6 C】75%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 7 A】75%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 7 B】75%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 7 C】75%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 8 A】75%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 8 B】75%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 8 C】75%のレーザ出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 3 9 A】75%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 3 9 B】75%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 3 9 C】75%のレーザ出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 0 A】65%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 0 B】65%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 0 C】65%のレーザ出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 1 A】65%のレーザ出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

10

20

30

40

50

【図 4 1 B】65%のレーザー出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 1 C】65%のレーザー出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 2 A】65%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 2 B】65%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 2 C】65%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

10

【図 4 3 A】65%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 3 B】65%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 3 C】65%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 4 A】55%のレーザー出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 4 B】55%のレーザー出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

20

【図 4 4 C】55%のレーザー出力を用いた、30マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 5 A】55%のレーザー出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 5 B】55%のレーザー出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 5 C】55%のレーザー出力を用いた、50マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 6 A】55%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

30

【図 4 6 B】55%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 6 C】55%のレーザー出力を用いた、75マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

【図 4 7 A】55%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、上部の図を示す。

【図 4 7 B】55%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、下部の図を示す。

【図 4 7 C】55%のレーザー出力を用いた、100マイクロメートルの穴の酸エッチング後の写真であり、くびれ部の図を示す。

40

【図 4 8】積み重ねられた3枚の150マイクロメートルのEagle XG（登録商標）ガラス板を通して延びる焦線を示す。

【図 4 9】ダメージトラックで穴あけされた、厚さ300マイクロメートルのEXGガラス2枚のスタックの側面を示す酸エッチング前の写真である。

【図 5 0】図 4 9と同じスタックの、酸エッチング後の側面を示す酸エッチング後の写真である。

【図 5 1】図 4 9と同じスタックの、酸エッチング後の上面を示す酸エッチング後の写真である。

【図 5 2 A】レーザー穴あけ後の基板1000を示す。

【図 5 2 B】酸エッチング後の基板1000を示す。

50

【図53】エッチングシステムのチーレ数と上側および下側開口の直径に関するくびれ部の直径の予想パーセンテージとの関係を示す。

【図54】ダメージトラックの半径に対するエッチングシステムのチーレ数のグラフである。

【図55】ガラス基板の厚さの半分に対するエッチングシステムのチーレ数のグラフである。

【図56】有効拡散率 (D_{eff}) に対するエッチングシステムのチーレ数のグラフである。

【図57】体積%での酸濃度に対するエッチングシステムのチーレ数と、有効拡散率と酸濃度を変化されることによるチーレ数への複合的な影響のグラフである。

【図58】ガラス部品の側面の酸エッチング後の写真である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下は例示的な実施形態の説明である。

【0024】

以下の実施形態では、線状焦点システムを生成する光学システムによる短（例えば、 $10^{-10} \sim 10^{-15}$ 秒）パルスレーザーを利用して、レーザーの波長を実質的に透過させる材料、例えばガラス、熔融石英、合成水晶、ガラスセラミック、セラミック、サファイヤ等の結晶材料、またはかかる材料の積層体（例えば、被覆ガラス）の小片に欠陥線、ダメージトラック、または穴を形成する。線状焦点の生成は、ガウス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実行されてもよく、この場合、ガウス-ベッセルビームと呼ばれ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、ガウスビームよりはるかに低速で回折する（例えば、1マイクロメートルのスポットサイズを、数10マイクロメートル以下ではなく、数百マイクロメートルまたはミリメートルの範囲にわたって保持しうる）。したがって、焦点深度または材料と強力に相互作用する距離は、ガウスビームだけを使用した場合よりはるかに大きい場合がある。ゆっくりと回折する、または回折しないビームの他の形態、例えばエアリビームもまた使用してよい。材料または成形品はレーザーの波長を、吸収率がこの波長において材料の深さ1mmにつき約10%未満、好ましくは約1%未満であるとき、実質的に透過させる。いくつかの実施形態において、材料はまた、約390nm~約700nmの範囲内の少なくとも1つの波長を透過させることができる。高強度レーザーと線状焦点の使用によって、各レーザーパルスが同時にガラス中に長い（例えば、100~1000マイクロメートル）トラックを損傷、アブレーション、またはその他の変化により生成できる。このトラックは、ガラス部品の厚さ全体を容易に貫通しうる。それゆえ、1パルスまたは1バーストパルスであっても、完全な「パイロット孔」または明確なダメージトラックを作ることができ、パーカッション穴あけが不要である。

【0025】

パイロット孔/ダメージトラックは、断面寸法が非常に小さい（数マイクロメートル以下）が比較的長く、すなわちアスペクト比が高い。部品はその後、酸エッチングによって最終的な穴径、例えば、所期の用途の要求に応じて、直径約30マイクロメートル以下、約25マイクロメートル以下、約20マイクロメートル以下、約15マイクロメートル以下、約10マイクロメートル以下、約5~約10マイクロメートル、約5~約15マイクロメートル、約5~約20マイクロメートル、約5~約25マイクロメートル、約5~約30マイクロメートルの範囲、または数10マイクロメートルまでとされる。いくつかの実施形態において、エッチングは、エッチングプロセスのチーレ数が約3以下、約2.5以下、約2以下、約1.5以下、約1以下、または約0.5以下となるように実行できる。エッチングの後、ガラス表面には、エッチングプロセスの均一性が不完全であることによってわずかな凹凸ができる場合があり、すなわち、エッチングされた穴の内部にも、幾分平滑ではあるものの、顕微鏡または走査電子顕微鏡では観察可能な程度の微細な粒質がありうる。いくつかの実施形態において、基板は、基板の第一の表面から基板の第二の表面へと連続的に延びる複数の貫通穴を有することができ、基板は390nm~700

10

20

30

40

50

nmの範囲内の少なくとも1つの波長を透過させ、複数の貫通穴の直径は20 μm以下であり、複数の貫通穴は第一の表面の開口と、第二の表面の開口と、第一の表面の開口と第二の表面の開口との間にあるくびれ部と、を含み、くびれ部の直径は第一の表面の開口または第二の表面の開口の直径の少なくとも50%であり、第一の表面の開口の直径と第二の表面の開口の直径との間の差は3 μm以下である。

【0026】

次に、穴への導電材料の被覆および/または充填が、例えば金属化を通じて行われ、透明材料からなるインタポーザ部品が作製される。金属または導電材料は、例えば、銅、アルミニウム、金、銀、鉛、スズ、インジウムスズ酸化物、またはそれらの組合せもしくは合金とすることができる。穴の内部を金属化するために使用されるプロセスは、例えば、電気メッキ、無電解めっき、物理蒸着、またはその他の蒸気コーティング法とすることができる。穴はまた、触媒材料、例えばプラチナ、パラジウム、二酸化チタン、または、穴内の化学反応を促進するその他の材料で被覆してもよい。あるいは、穴は、他の化学的機能付与剤で被覆し、表面濡れ性を変化させ、または生体分子の付着を可能にし、生化学的分析に使用されてもよい。このような化学的機能付与は、穴のガラス表面のシラン処理、および/または、所望の用途に合わせた生体分子の付着を促進するように設計された、特定のたんぱく質、抗体、またはその他の生物学的に特異的な分子の追加付着とすることができる。

【0027】

1つの実施形態において、材料のレーザ穴あけ方法は、パルスレーザビームをビーム伝搬方向に沿って向けられ、材料内部へと方向付けられるレーザビーム焦線へと合焦させるステップを含み、レーザビームの、材料において測定された平均レーザバーストエネルギーは、被加工材料の厚さ1 mmにつき約50マイクロジュール超であり、そのバーストエネルギー密度は約25 μJ/mm線状焦点~約125 μJ/mm線状焦点の範囲内であり、そのパルス幅は約100ピコ秒未満、繰返し率は約1 kHz~約4 MHzの範囲内である。線状焦点長さは、光軸上の、強度が最大強度の半分である2点間の距離によって決まる。レーザビームの焦線は、材料中に誘起吸収を発生させ、この誘起吸収が材料中のレーザビーム焦線に沿って穴を形成する。この方法はまた、材料とレーザビームを相互に関し、並進させるステップも含み、それによって材料中に複数の穴(またはダメージトラック)を、穴/ダメージトラックの所望のパターンに応じて、約50穴/秒超、約100穴/秒超、約500穴/秒超、約1,000穴/秒超、約2,000穴/秒超、約3,000穴/秒超、約4,000穴/秒超、約5,000穴/秒超、約6,000穴/秒超、約7,000穴/秒超、約8,000穴/秒超、約9,000穴/秒超、約10,000穴/秒超、約25,000穴/秒超、約50,000穴/秒超、約75,000穴/秒超、約100,000穴/秒超の速度でレーザ穴あけする。この方法は、材料を酸溶液中で、約5マイクロメートル/分未満の速度、例えば約2マイクロメートル/分の速度でエッチングし、それによって材料中の穴を拡張するステップをさらに含む。

【0028】

いくつかの実施形態において、パルス幅は、5ピコ秒超~約100ピコ秒未満の範囲内とすることができ、繰返し率は約1 kHz~4 MHzの間の範囲とすることができる。パルスは、約1 nsec~約50 nsecの間の範囲、例えば10~30 nsec、例えば約20 nsec プラスマイナス2 nsecの時間で分離される少なくとも2パルスのバーストで生成でき、バースト繰返し周期は約1 kHz~約4 MHzの間の範囲内とすることができる。パルスレーザビームの波長は、材料がこの波長を実質的に透過させるように選択できる。この波長は、例えば1064、532、355または266ナノメートルであってもよい。いくつかの実施形態において、バースト繰返し周波数は、約1 kHz~約4 MHzの間の範囲内、約10 kHz~約650 kHzの間の範囲内、約10 kHz以上、約100 kHz以上とすることができる。

【0029】

レーザビーム焦線の長さは、約0.1 mm~約10 mmの間の範囲内、または約0.1

10

20

30

40

50

mm ~ 約 1 mm の間の範囲内、平均スポット径は約 0 . 1 マイクロメートル ~ 約 5 マイクロメートルの間の範囲内とすることができる。ベッセルビームのスポット径 D は、 $D = (2 . 4048 \lambda) / (2 \theta)$ で表すことができ、 λ はレーザービームの波長、 θ はビームの関数コーン角である。

【 0 0 3 0 】

レーザーおよび光学システム

透明基板、特にガラスを切削するために、1064 nm ピコ秒レーザーを線状焦点ビーム形成光学装置と組み合わせて使用し、基板中に損傷の線またはダメージトラックを作る方法が開発された。これは、以下に、および 2014 年 1 月 14 日に出願された米国特許出願第 14 / 154 , 525 号明細書 (米国特許出願公開第 2014 / 0199519 号明細書として公開) によりその利益が主張されている 2013 年 1 月 15 日に提出された米国特許出願第 61 / 752 , 489 号明細書に、詳細に記載されており、各出願の内容全体を、本明細書に全文が記されているかのように、参照によって援用する。レーザーにより作られるダメージトラックは、本明細書においては、穴、パイロット孔、欠陥線、または穿孔と互換的に呼ばれる。この透明基板切削方法はまた、後述のように、後にエッチングプロセスによって拡張されるダメージトラックの形成にも当てはめることができる。

【 0 0 3 1 】

図 1 は、その概念 1 つの形態の概略図を示しており、この場合、アキシコン光学要素 10 とその他のレンズ 11 および 12 を使って、レーザー 3 (図示せず) からの光線をシステムの光軸に平行な直線形状となるパターン 2 b に合焦させる。基板 1 は、それが線状焦点内にあるように位置付けられる。線状焦点の範囲が約 1 mm、ピコ秒レーザーが生成する出力が約 20 W 以上、繰返し率が 100 kHz (材料において測定したときに約 200 マイクロジュール / パースト) であるとき、線領域 2 b 内の光強度は容易に、材料中に非線形吸収を生成するのに十分に高くなりうる。パルスレーザービームの、材料において測定した場合の平均レーザーパーストエネルギーは、材料厚さ 1 mm あたり 40 マイクロジュールより大きくすることができる。使用される平均レーザーパーストエネルギーは、材料厚さ 1 mm あたり 2500 μ J の高さとすることができ、例えば 100 ~ 2000 μ J / mm、200 ~ 1750 μ J / mm が好ましく、500 ~ 1500 μ J / mm がより好ましい。この「平均レーザーエネルギー」はまた、1 パースト当たりの平均線形エネルギー密度、またはレーザーパーストあたり、材料 1 mm あたり平均エネルギーと呼ぶこともできる。いくつかの実施形態において、パーストエネルギー密度は、約 25 μ J / mm 線状焦点 ~ 約 125 μ J / mm 線状焦点、または約 75 μ J / mm 線状焦点 ~ 約 125 μ J / mm 線状焦点の範囲内とすることができる。損傷、アブレーション、蒸発、またはその他の方法で変化させられた材料の領域は、高強度の線形領域に略追従して形成される。

【 0 0 3 2 】

図 2 A および 2 B を参照すると、材料のレーザー加工方法は、パルスレーザービーム 2 を、ビーム伝搬方向に沿って向けられたレーザービーム焦線 2 b に合焦させるステップを含む。図 3 A に示されるように、レーザー 3 (図示せず) はレーザービーム 2 を放出し、その 1 部分 2 a が光学アセンブリ 6 内に入射する。光学アセンブリ 6 は、入射レーザービームを、射出側において、ビーム方向に沿った所定の拡張範囲にわたり、延長レーザービーム焦線 2 b へと変換する (焦線の長さ L)。平坦基板 1 は、ビーム経路内に位置付けられて、レーザービーム 2 のレーザービーム焦線 2 b と少なくとも部分的に重複する。レーザービーム焦線はそれゆえ、基板中へと方向付けられる。参照番号 1 a は、平坦基板の、それぞれ光学レーザーアセンブリ 6 またはレーザーに面する表面を示し、参照番号 1 b は、基板 1 の反対表面を示している。基板または材料の厚さ (この実施形態では、平面 1 a および 1 b、すなわち基板平面に垂直に測定される) を d で示す。基板または材料は、例えば、レーザービーム 2 の波長を実質的に透過させるガラス成形品とすることができる。

【 0 0 3 3 】

図 2 A が示すように、基板 1 (または材料もしくはガラス成形品) は、長手方向のビーム軸に垂直に、それゆえ、光学アセンブリ 6 により生成される同じ焦線 2 b の後方に配置

10

20

30

40

50

される（基板は図面の平面に対して垂直）。焦線はビーム方向に沿って向けられ、配列されているため、基板は焦線 2 b に関して、焦線 2 b が基板の表面 1 a より前から始まり、基板の表面 1 b の前で止まり、すなわち、静止した焦線 2 b は基板内で終了し、表面 1 b を超えないように位置付けられる。レーザビームの焦線 2 b と基板とが重複する領域において、すなわち焦線 2 b によりカバーされる基板材料において、延長レーザビーム焦線 2 b が（レーザビーム焦線 2 b に沿ったレーザビームの強度が適当であり、この強度は長さ 1 の部分にレーザビーム 2 を合焦させることによって確保され、すなわち長さ 1 の線状焦点であると仮定される）、延長区間 2 c（長手方向のビーム方向に沿って配列される）を生成し、それに沿って基板材料中に誘起吸収が生じる。誘起吸収は、基板材料中に区間 2 c に沿った欠陥線を形成する。この欠陥線は、1 つの高エネルギーバーストパルスを使用することによって実質的に透明な材料、基板、または加工物内に生成された、顕微鏡レベルの（例えば、 $> 100 \text{ nm}$ および直径 $< 0.5 \text{ マイクロメートル}$ ）の長い「穴」（また、穿孔、ダメージトラック、または欠陥線とも呼ばれる）である。個々の穿孔は、例えば、数百キロヘルツ（1 秒間に数十万個の穿孔）の速度で作成できる。光源と材料との間の相対移動により、これらの穿孔は、相互に隣接させて設置できる（空間分離は希望に応じて 1 マイクロメートル 未満から何マイクロメートルまでの範囲にわたる）。この空間分離（ピッチ）は、材料または加工物を分離しやすくするように選択できる。いくつかの実施形態において、欠陥線 / ダメージトラックは「貫通穴」であり、これは、実質的に透明な材料の上から下まで延びる穴または開放通路である。他の実施形態において、ダメージトラックは真の意味の「貫通穴」でなく、それは、ダメージトラックの経路をふさぐ材料の粒子があるからである。それゆえ、ダメージトラックは、材料の上面から下面まで延ばすことができるものの、それはいくつかの実施形態において、材料の粒子が経路をふさいでいるため、連続する穴または通路でない。欠陥線 / ダメージトラックの形成は、局所的だけでなく、誘起吸収の延長区間 2 c の全長にわたっていてもよい。区間 2 c の長さ（これは、レーザビームの焦線 2 b と基板 1 との重複長さに対応する）は、参照文字 L で示されている。誘起吸収の区間 2 c（すなわち、基板 1 の材料の、欠陥が形成される区間）の平均径または範囲は参照文字 D で示されている。この平均範囲 D は基本的に、レーザビーム焦線 2 b の平均径、すなわち約 0.1 マイクロメートル ~ 約 5 マイクロメートル の間の範囲内の平均スポット径に対応する。

【0034】

それゆえ、単独の高エネルギーバーストパルスを使って、透明基板中に顕微鏡レベルの（すなわち、直径 $< 2 \text{ マイクロメートル}$ 、かつ $> 100 \text{ nm}$ で、いくつかの実施形態では $< 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、かつ $> 100 \text{ nm}$ ）の長い「穴」（前述のように、穿孔、ダメージトラック、または欠陥線とも呼ばれる）を作ることができる。これらの個々の穿孔は、数百キロヘルツ（例えば、1 秒間に数十万個の穿孔）の速度で作ることができる。それゆえ、光源と材料との間の相対移動により、これらの穿孔は、加工物の中のあらゆる所望の位置に配置できる。いくつかの実施形態において、欠陥線 / ダメージトラックは「貫通穴」であり、これは透明基板の上面から底面まで延びる穴または開放通路である。いくつかの実施形態において、欠陥線 / ダメージトラックは連続する通路でなくてもよく、中実物質（例えばガラス）の一部または小片によりふさがれ、または部分的にふさがれている場合がある。本明細書で定義するように、欠陥線 / ダメージトラックの内径は、開放通路または空気穴の内径である。例えば、本明細書に記載されている実施形態において、欠陥線 / ダメージトラックの内径は、 $< 500 \text{ nm}$ 、例えば 400 nm 、または 300 nm である。本明細書において開示されている実施形態における穴の周囲の材料の中断または変更領域（例えば、圧縮、溶融、またはその他の方法で変化させられる）は、好ましくは、直径が $< 50 \text{ マイクロメートル}$ （例えば、 $< 10 \text{ マイクロメートル}$ ）である。

【0035】

図 2 A が示すように、基板材料（これは、レーザビームの波長を透過させる）は、焦線 2 b 内のレーザビームの高い強度に伴う非線形効果から生じる、焦線 2 b に沿った誘起吸収により加熱される。図 2 B は、加熱された基板材料が事実上、膨張し、それによって

10

20

30

40

50

対応する誘起張力が微細亀裂の原因になることを示しており、張力は表面 1 a において最も高い。

【 0 0 3 6 】

レーザー源の選択は、透明材料中に、多重光子吸収 (MPA) を発生させる能力に応じて決定される。MPA は、同じまたは異なる周波数の 2 つまたはそれ以上の光子を同時に吸収して、分子を 1 つの状態 (通常は、基底状態) からより高エネルギーの電子状態 (おそらくはイオン化を招く) へと励起させる。これに係る分子の高低状態間のエネルギーの差は、その 2 つまたはそれ以上の光子のエネルギーの総和と等しい可能性がある。MPA は、誘起吸収とも呼ばれ、例えば 2 次、3 次、またはそれより高次のプロセスとすることができ、すなわち線形吸収より数倍弱い。MPA は、誘起吸収の強度が、例えば光の強度そのものに比例するのではなく、光の強度の 2 乗、3 乗、またはそれより高い累乗とすることができる。それゆえ、MPA は非線形の光学プロセスである。

10

【 0 0 3 7 】

焦線 2 b の生成に応用可能な代表的な光学アセンブリ 6 のほか、これらの光学アセンブリを利用できる代表的な光学装置について以下に説明する。すべてのアセンブリまたは装置は上述の説明に基づいているため、同じ構成部品もしくは特徴物またはその機能において等しいものには、同じ参照番号を使用する。したがって、以下では相違点だけを説明する。

【 0 0 3 8 】

(高い破壊強度、幾何学的精度、エッチングのための強力な経路の生成、穴内部の形状、および微細亀裂の回避に関して) 高品質の穴あけを確実にできるように、基板表面上に位置付けられる個々の焦線は、後述の光学アセンブリ (以下、この光学アセンブリはその代わりにレーザー光学装置とも呼ばれる) を使って生成するべきである。レーザー 3 の波長の場合に (基板 1 の材料との相互作用)、例えば 0.5 マイクロメートル ~ 2 マイクロメートルの小さいスポットサイズを実現するために、通常、レーザー光学装置 6 の開口数に特定の要求事項を設けなければならない。

20

【 0 0 3 9 】

必要な開口数を得るために、光学装置は一方で、周知のアッペの公式 ($N.A. = n \sin(\theta)$ 、 n : 加工対象のガラスまたはその他の材料の屈折率、 θ : 開口角の半分、 $\theta = \arctan(D/2f)$ 、 D : 開口、 f : 焦点距離) に従って、ある焦点距離のための必要な開口を決定しなければならない。他方で、レーザービームは、光学装置を必要な開口まで照明しなければならず、これは通常、レーザーと合焦光学装置との間の拡張望遠鏡を使用したビーム拡張によって達成される。

30

【 0 0 4 0 】

スポットサイズは、焦線に沿った相互作用が均一になるようにするために、あまり大きく変化しすぎるべきではない。これを確実にするために、例えば、合焦光学装置の小さい円形領域だけを照明して、ビームの開口と、したがって、開口数のパーセンテージがわずかしき変化しないようにする (以下の実施形態参照)。

【 0 0 4 1 】

図 3 A (レーザー放射 2 のレーザービーム束の中の中央ビームの位置における基板平面に垂直の断面図であり、ここでも、レーザービーム 2 は基板平面に垂直に入射し、すなわち入射角は 0° であって、焦線 2 b または誘起吸収の延長区間 2 c は基板法線に平行である) によれば、レーザー 3 により発せられたレーザー放射 2 a は、まず、使用されるレーザー放射に対して完全に不透過の円形の絞り 8 へと方向付けられる。絞り 8 は、ビーム長軸に垂直に向けられ、図のビーム束 2 a の中央のビームに中心を置く。絞り 8 の直径は、ビーム束 2 a の中心付近のビーム束、すなわち中央ビーム (ここでは、2 a Z で示されている) が絞りに当たり、それによって完全に吸収されるように選択される。ビーム束 2 a の外周範囲内のビーム (周辺光線であり、2 a R で示される) は、絞りの大きさがビーム径と比較して小さいために吸収されず、側方で絞り 8 を通過して、光学アセンブリ 6 の、この実施形態においては球面カット両凸レンズ 7 として設計されている合焦光学要素の周辺領域に当た

40

50

る。

【 0 0 4 2 】

図 3 A に示されているように、レーザービーム焦線 2 b は、レーザービームにとっての単独の焦点だけでなく、レーザービーム中の異なる光線の一連の焦点である。一連の焦点は、図 3 A において、レーザービーム焦線 2 b の長さ l として示される所定の長さの長い焦線を形成する。レンズ 7 は、中央ビームに中心を置き、一般的な球面カットレンズ形態の無補正両凸合焦レンズとして設計されている。このようなレンズの球面収差は有利である場合がある。あるいは、理想的な焦点を形成せず、所定の長さの、異なる長い焦線を形成する、理想的に補正されたシステムとは異なる非球面またはマルチレンズシステムも使用できる（すなわち、単独の焦点を持たないレンズまたはシステム）。したがって、レンズの各領域は、レンズの中心からの距離に応じて、焦線 2 b に沿って合焦する。絞り 8 の、ビーム方向を横切る直径は、ビーム束の直径（ビームの強度がピーク強度の $1/e^2$ まで減るのに必要な距離によって定義される）の約 90% および、光学アセンブリ 6 のレンズの直径の約 75% である。それゆえ、ビーム束の中央をブロックすることによって生成された、収差無補正球面レンズ 7 の焦線 2 b が使用される。図 3 A は、中央ビームを通る 1 つの平面における断面を示しており、図のビームを焦線 2 b の周囲で回転されると、完全な 3 次元の束を見ることができる。

10

【 0 0 4 3 】

この種の焦線の 1 つの考えられる欠点は、条件（スポットサイズ、レーザー強度）が焦線に沿って（それゆえ、材料の所望の深度に沿って）変化する可能性があり、したがって、所望の種類 of 相互作用（溶融しない、誘起吸収、亀裂形成までの熱可塑性変形）が、焦線の選択された部分でしか発生しない可能性があることである。これは、今度は、入射レーザー光の一部しか、基板材料によって所望の方法で吸収されない可能性があることを意味する。このようにして、プロセスの効率（所望の分離速度のために必要な平均レーザー出力）が損なわれ、レーザー光はまた、望ましくない領域（基板または基板保持固定装置に付着した部分または層）に透過されて、その領域と望ましくない方法で相互作用（例えば、加熱、拡散、吸収、不要な変化）する場合がある。

20

【 0 0 4 4 】

図 3 B - 1 ~ 4 は（図 3 A における光学アセンブリだけでなく、基本的に他のすべての適用可能な光学アセンブリ 6 に関する）、光学アセンブリ 6 を基板 1 に関して適切に位置付け、および/または配列することによって、また光学アセンブリ 6 のパラメータを適切に選択することによって、レーザービームの焦線 2 b の位置を制御できることを示している。図 3 B - 1 が示すように、焦線 2 b の長さ l は、それが基板厚さ d を超える（ここでは 2 倍）ような方法で調節できる。基板 1 が（ビームの長手方向に見て）焦線 2 b の中央にある場合、誘起吸収の延長区間 2 c は、基板の厚さ全体にわたって生成される。レーザービームの焦線 2 b の長さ l は、例えば約 0.01 mm ~ 約 100 mm の間の範囲内、または約 0.1 mm ~ 約 10 mm の間の範囲内とすることができる。長さ l が例えば約 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.7 mm、1 mm、2 mm、3 mm、または 5 mm となるように各種の実施形態を構成できる。

30

【 0 0 4 5 】

図 3 B - 2 に示されているケースでは、基板の厚さ d に略対応する長さ l の焦点線 2 b が生成される。基板 1 は線 2 b に関して、線 2 b が基板の外部の点から開始するように位置付けられているため、誘起吸収の延長区間 2 c（これはここでは、基板表面から所定の基板深度まで延びるが、反対の表面 1 b までには延びていない）の長さ L は焦線 2 b の長さ l より短い。図 3 B - 3 は、基板 1 が（ビームの方向に垂直方向に沿って見たときに）焦線 2 b の開始点より上から始まり、図 3 B - 2 のように、線 2 b の長さ l が基板 1 内の誘起吸収 2 c のセクションの長さ L より大きいケースを示している。それゆえ、焦線は、基板内から始まり、反対の表面 1 b を超えて延びる。図 3 B - 4 は、焦線の長さ l が表面厚さ d より小さく、それによって、入射方向に見たときに基板が焦線に関して中央に位置付けられた場合、焦線が基板内の表面 1 a の付近から始まり、基板内の表面 1 b の付近で終

40

50

了する（例えば、 $l = 0.75 \cdot d$ ）ケースを示している。

【0046】

焦線 2 b を、表面 1 a、1 b の少なくとも一方が焦線によりカバーされるような方法で位置付けられ、誘起吸収区間 2 c が基板の少なくとも一方の表面で開始するようにすると特に有利である。このように、事実上、理想的なカットまたはダメージトラックの形成を実現しながら、表面上のアブレーション、フェザリング、粒状化を防止できる。

【0047】

図 4 は、他の適用可能な光学アセンブリ 6 を示している。基本的構成は図 3 A で説明したものと同様であるため、以下では相違点のみ説明する。図の光学アセンブリは、所定の長さ l の焦線が形成されるような形状の焦線 2 b を形成するために、非球面自由表面を有する光学系を使用することに基づく。この目的のためには、光学アセンブリ 6 の光学要素として非球面レンズを使用できる。図 4 において、例えば、いわゆる円錐プリズムが使用され、これはアキシコンと呼ばれることも多い。アキシコンは特殊な円錐カットレンズであり、これは光軸に沿った線上にスポット光源を形成する（または、レーザビームをリング状に変換する）。このようなアキシコンのレイアウトは、当業者にとって一般に知られており、この例の円錐角は 10° である。ここでは参照番号 9 で示されているアキシコンの頂点は、入射方向に向き付けられており、ビーム中央に中心を置く。アキシコン 9 により生成された焦線 2 b は、その内部から始まっているため、基板 1（ここでは、ビーム主軸に垂直に配列）は、ビーム経路の中でアキシコン 9 の直接背後に位置付けることができる。図 4 が示しているように、アキシコンの光学特性により、基板 1 をビームの方向に沿ってシフトさせ、それでも焦線 2 b の範囲内にとどまるようにすることが可能である。したがって、基板 1 の材料の中の誘起吸収区間 2 c は基板の深さ d 全体にわたって延びる。

【0048】

しかしながら、図のレイアウトは以下の制約を受ける：アキシコン 9 により形成される焦線 2 b の領域はアキシコン 9 の中で始まるため、アキシコン 9 と基板またはガラス複合材の加工物材料との間が分離されている状況で、レーザエネルギーの多くの部分が、材料内にある焦線 2 b の誘起吸収区間 2 c の中に収束しない。さらに、焦線 2 b の長さ l は、アキシコン 9 の屈折率と円錐角を通るビーム径に関する。そのため、材料が比較的うすい（数ミリメートル）場合、焦線全体は、基板またはガラス複合材の加工物の厚さよりはるかに長くなり、レーザエネルギーの多くが材料中に収束しないという効果を有する。

【0049】

これを理由として、アキシコンと合焦レンズの両方を含む光学アセンブリ 6 を使用することが望ましい場合がある。図 5 A は、このような光学アセンブリ 6 を示しており、その中で、延長レーザビーム焦線 2 b を形成するように設計された、非球面自由表面を有する第一の光学要素がレーザ 3 のビーム経路内に位置付けられる。図 5 A に示されるケースでは、この第一の光学要素は円錐角 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、レーザビーム 3 上に中心を置くように位置付けられる。アキシコンの頂点は、ビーム方向に向かって向き付けられる。第二の合焦光学要素は、ここでは平凸レンズ 11（その曲率はアキシコンに向かって）が、ビーム方向に、アキシコン 10 から距離 z_1 に位置付けられる。距離 z_1 はこの場合、約 300 mm であり、アキシコン 10 により形成されるレーザ放射がレンズ 11 の半径方向の外側部分に円形に入射する。レンズ 11 は円形放射を所定の長さ、この場合は 1.5 mm の焦線 2 b 上の、距離 z_2 、この場合は約 20 mm の外側で合焦させる。この実施形態において、レンズ 11 の有効焦点距離は 25 mm である。アキシコン 10 によるレーザビームの円形変形は、参照記号 SR で示されている。

【0050】

図 5 B は、図 5 A による基板 1 の材料中の焦線 2 b または誘起吸収 2 c の形成を詳しく示している。両方の要素 10、11 の光学特性とそれらの位置は、ビーム方向への焦線 2 b の長さ l が基板 1 の厚さ d と正確に一致するように選択される。その結果、焦線 2 b の位置を図 5 B に示されるように正確に基板 1 の 2 つの表面 1 a および 1 b 間に位置付ける

10

20

30

40

50

ためには、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。

【 0 0 5 1 】

したがって、焦線がレーザ光学装置から特定の距離に形成されれば、およびレーザ放射のより大きな部分が焦線の所望の終端まで合焦されれば有利である。前述のように、これは基本的に合焦する要素 1 1 (レンズ) を、特に半径方向の外側の領域で円形 (環状) にのみ照射することによって実現され、これは一方で、必要な開口数、およびしたがって必要なスポットサイズを実現する役割を果たすが、もう一方で、基本的に円形なスポットが形成されるため、拡散の円は、必要な焦線 2 b の後で、スポットの中央においてごく短い距離で強度が減弱する。このように、欠陥線 / ダメージトラックの形成は、必要な基板深さの中の短い距離内で止まる。アキシコン 1 0 と合焦レンズ 1 1 の組合せはこの要件を満たす。アキシコンは 2 種類の方法で機能する : アキシコン 1 0 により、通常丸いレーザスポットはリング形状で合焦レンズ 1 1 に送られ、アキシコン 1 0 の非球面性は、焦点面内の焦点の代わりに焦線がレンズの焦点面を超えて形成されるようにする効果を有する。焦線 2 b の長さ l は、アキシコン上のビーム径を通じて調節できる。その一方で、焦線に沿った開口数は、アキシコンレンズの距離 z_1 とアキシコンの円錐角を通じて調節できる。このように、レーザエネルギーの全体を焦線に集中させることができる。

10

【 0 0 5 2 】

欠陥線 / ダメージトラックを基板の裏面まで続くように形成しようとする場合も、円形 (環状) 照明は依然として、(1) レーザ出力が、レーザ光のほとんどが必要な長さの焦線に集中されたままであるという点で最適に使用され、および (2) 円形照明領域が、他の光学的機能によって設定される所望の収差と共に、焦線に沿ってスポットサイズを均一にし、およびそれゆえ、焦線に沿って基板から部品を均一分離させることができる、という利点を有する。

20

【 0 0 5 3 】

図 5 A に示される平凸レンズの代わりに、合焦メニスカスレンズまたはその他のより高度に補正された合焦レンズ (非球面、マルチレンズシステム) を使用することもできる。

【 0 0 5 4 】

図 5 A に示されるアキシコンとレンズ 1 1 の組合せだけを使って、非常に短い焦線 2 b を生成するためには、アキシコンに入射するレーザビームの非常に小さいビーム径を選択する必要がある。これには、アキシコンの頂点へのビームのセンタリングが非常に精密でなければならない点と、結果がレーザの方向変化に非常に影響を受けやすい点 (ビームドリフト安定性) という現実的な欠点がある。さらに、緊密にコリメートされたレーザビームは非常に発散的であり、すなわち、光偏向によってビーム束は短距離でばやける。どちらの影響も、光学アセンブリ 6 に別のレンズ、すなわちコリメートレンズ 1 2 を含めることによって回避できる。追加されたプラスのコリメートレンズ 1 2 は、合焦レンズ 1 1 の円形照明を極めて厳しく調節する役割を果たす。コリメートレンズ 1 2 の焦点距離 f' は、所望の円の直径 d_r が、 f' と等しいアキシコンからコリメートレンズ 1 2 までの距離 $z_1 a$ から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 $z_1 b$ (コリメートレンズ 1 2 から合焦レンズ 1 1 まで) を通じて調節できる。純粋な幾何学の問題として、円形の照明の幅が小さいと、焦線は短くなる。最小値は距離 f' で実現できる。

30

40

【 0 0 5 5 】

図 5 A に示される光学アセンブリ 6 はそれゆえ、図 1 に示されるものに基づいており、したがって、違いだけを以下に説明する。ここでも平凸レンズとして設計された (その曲率はビーム方向に向かう) コリメートレンズ 1 2 は、さらに、一方でアキシコン 1 0 (その頂点はビーム方向に向かう) と他方で平凸レンズ 1 1 との間のビーム経路の中央に位置付けられる。アキシコン 1 0 からコリメートレンズ 1 2 の距離は $z_1 a$ で示され、コリメートレンズ 1 2 から合焦レンズ 1 1 までの距離は $z_1 b$ で示され、合焦レンズ 1 1 から焦線 2 b までの距離は z_2 で示される (常に、ビーム方向に見る) 。

【 0 0 5 6 】

図 5 A に示されるように、アキシコン 1 0 により形成される円形放射 S R は、発散して

50

T_b は、0.25 マイクロ秒 (繰返し率 4 MHz) ~ 1000 マイクロ秒 (繰返し率 1 kHz)、例えば 0.5 マイクロ秒 (繰返し率 2 MHz) ~ 40 マイクロ秒 (繰返し率 25 kHz)、または 2 マイクロ秒 (繰返し率 500 kHz) ~ 20 マイクロ秒 (繰返し率 50 kHz) であってもよい。正確なタイミング、パルス幅、および繰返し率は、レーザの設計によって異なる可能性があるが、高強度の短パルス ($T_d < 20 \text{ psec}$ および好ましくは $T_d = 15 \text{ psec}$) が、特に好適であることがわかっている。実施形態のいくつかにおいて、 $5 \text{ psec} < T_d < 15 \text{ psec}$ である。

【0059】

材料を変化させるために必要なエネルギーは、バーストエネルギー、すなわちあるバースト (各バースト 610 は一連のパルス 620 を含む) 内に含まれるエネルギーとして、または単独のレーザパルス (その多くはバーストを含んでいてもよい) の中に含まれるエネルギーとして説明することができる。これらの用途の場合、1 バーストあたりのエネルギーは、 $25 \mu\text{J} \sim 750 \mu\text{J}$ 、より好ましくは $40 \mu\text{J} \sim 750 \mu\text{J}$ 、 $50 \mu\text{J} \sim 500 \mu\text{J}$ 、 $50 \sim 250 \mu\text{J}$ 、または $100 \sim 250 \mu\text{J}$ 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、それより小さくすることができ、個々のレーザパルスの正確なエネルギーは、図 6 に示されているように、バースト内のパルスの数と時間によるレーザパルスの減衰率 (例えば、指数関数的減衰率) によって異なる。例えば、エネルギー/バーストが一定であるとすると、バーストが 10 の個別のレーザパルスを含んでいれば、各個々のレーザパルスに含まれるエネルギーは、同じバーストが個別のレーザパルスを 2 つしか持たない場合より小さくなる。

【0060】

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、このような加工にとって有利である。レーザの繰返し率により時間的に分離された 1 つのパルスを使用する場合と異なり、レーザエネルギーをサブパルスの高速連続 (バーストを形成する) にわたって拡張するバーストシーケンスの使用により、単パルスレーザで可能になるものより、材料と協力的に相互作用する時間スケールをより大きくすることができる。単パルスは時間と共に拡張できるが、これを行うと、パルス内の強度を略パルス幅ごとに低下させなければならない。したがって、 10 psec パルスが 10 nsec パルスに拡張された場合、強度は略 3 桁小さくなる。このような減少により、光強度は、非線形吸収がもはや問題となくなるレベルまで減少し、光材料相互作用は材料を変化させることができるほど強くなる。これに対して、バーストパルスレーザでは、各サブパルス中の強度を極めて高いままとすることができる。例えば、時間的に約 10 nsec で分離された 3 つの 10 psec パルスは依然として、各パルス内の強度を 1 つの 10 psec パルスの 3 倍以内に保つことができ、レーザは 3 倍長い時間にわたって材料と相互作用できる。このようなバースト内の複数のパルスの調節により、したがって、レーザと材料との相互作用の時間の長さを、すでに存在しているプラズマブームとの光の相互作用をより大きく、またはより小さくし、最初の、または以前のレーザパルスにより以前に励起されていた原子と分子による光と材料の相互作用をより大きく、または少なくするように操作できる。

【0061】

ダメージトラックまたは穴は、単独のパルスバーストが実質的に材料上の同じ場所に当たると、材料中に形成される。すなわち、単独のバースト内の複数のレーザパルスは、材料中の 1 つの欠陥線または穴の位置に対応する。もちろん、材料は並進され (例えば、常に移動するステージによる) またはビームが材料に関して移動されるため、バースト内の個別のパルスは、材料の上で正確に同じ空間位置にあることはありえない。しかしながら、パルスは相互に 1 マイクロメートル以内にあるため、これらは材料の基本的に同じ場所に当たる。例えば、パルスは、相互の間隔 s_p で、すなわち $0 < s_p < 500 \text{ nm}$ で材料に当たることができる。例えば、材料上のある位置に 20 パルスのバーストが当たると、そのバースト内の個別のパルスは相互に 250 nm 以内でガラスに当たる場合がある。それゆえ、いくつかの実施形態において、間隔 s_p は約 $1 \text{ nm} \sim$ 約 250 nm 、または約 $1 \text{ nm} \sim$ 約 100 nm の範囲内である。

【 0 0 6 2 】

線状焦点を形成する光学的方法は、ドーナツ形のレーザビームと球面レンズ、アキシコンレンズ、回折要素、または上述のように高強度の線形領域を形成するその他の方法を使用した様々な形態をとることができる。レーザの種類（ピコ秒、フェムト秒、その他）および波長（IR、グリーン、UV、その他）も、十分な光強度が到達して基板材料に破壊部分を作ることができるかぎり、変更できる。

【 0 0 6 3 】

穴またはダメージトラックの形成

上述のレーザプロセスにより作られるダメージトラックは一般に、内径が約0.1マイクロメートル～2マイクロメートル、例えば0.1～1.5マイクロメートルの範囲内である穴の形態をとる。好ましくは、レーザにより形成される穴は非常に小さい（数マイクロメートル以下）の寸法であり、すなわち、これらは狭い。いくつかの実施形態において、これらの穴の直径は0.2～0.7マイクロメートルである。前述のように、いくつかの実施形態において、ダメージトラックは連続する穴または経路ではない。ダメージトラックの直径は、5マイクロメートル以下、4マイクロメートル以下、3マイクロメートル以下、2マイクロメートル以下、または1マイクロメートル以下とすることができる。いくつかの実施形態において、ダメージトラックの直径は、100nm超～2マイクロメートル未満、または100nm超～0.5マイクロメートル未満の範囲内とすることができる。このような特徴物の走査型電子顕微鏡の画像が図7Aおよび7Bに示されている。これらの穴は、エッチングされていない穴である（すなわち、これらはまだエッチングステップによって拡張されていない）。

【 0 0 6 4 】

穴または欠陥線/ダメージトラックは、材料の厚さ全体を穿孔でき、材料の深さ全体にわたり連続した開口を有していてもいなくてもよい。図8は、厚さ150マイクロメートルのEagle XG（登録商標）ガラス基板の加工物の厚さ全体を穿孔するようなトラックまたは欠陥線の例を示す。穿孔またはダメージトラックは、裂開端の側から観察される。材料を通るトラックは必ずしも貫通穴とはかぎらない。ガラスには、穴を閉塞させる領域があることが多いが、これらは一般に、例えばマイクロメートル程度と小さい。

【 0 0 6 5 】

図9は、同様の穴またはダメージトラックの、より倍率の高い画像を示しており、穴の直径と、また、穴が残りのガラスでふさがれている領域の存在も、よりはっきりと見える。ガラス内に形成されたトラックの直径は約1マイクロメートルである。これらは完全に開放しておらず、すなわち材料のある領域は除去されているが、必ずしも完全な貫通穴が形成されるとはかぎらない。

【 0 0 6 6 】

また、ガラス板のスタックまたは、他の実質的に透明な材料のスタックの中に穴/ダメージトラックを穿孔または形成することも可能である。このケースは、焦線の長さは、スタックの高さより長くする必要はある。例えば、150マイクロメートルのEagle XG（登録商標）のガラスを3枚積み重ねて試験を行い、一番上の板の上面から一番下の板の下面まで延びる、穿孔または欠陥線/ダメージトラック（内径約1マイクロメートル）で3枚すべてを通る貫通穿孔を形成した。単独の基板を通る貫通穿孔のために構成された焦線の例は図3B1-1に示されており、3枚の板のスタックを通じた貫通穿孔について、図48に関して以下に説明する。本明細書において定義されているように、欠陥線または穿孔の内径は開放経路または空気穴の内径である。穴を取り囲む材料の中断または変化された（例えば、圧縮、溶融、またはその他の方法で変化された）領域の直径は、開放経路または空気穴の内径より大きくすることができる。スタック内の穿孔を酸エッチングすることにより、スタックを構成するガラス板すべてを通して延びる複数の貫通穴を形成でき、あるいは、ガラス板を分離し、その後、各板を別々に酸エッチングすることもできる。例えば、このプロセスにより、ガラスに直径1～100マイクロメートル、例えば10～75マイクロメートル、10～50マイクロメートル、2～25マイクロメートル、

10

20

30

40

50

2 ~ 20 マイクロメートル、2 ~ 15 マイクロメートル、2 ~ 10 マイクロメートルの穴がエッチングにより形成され、穴の間隔は例えば、25 ~ 1000 マイクロメートルであってもよい。

【0067】

このプロセスはまた、ガラス以外の透明材料の板の中に穴を形成するためにも利用されてよい。光学システムは線状焦点を使用しているため、大きい (> 1 マイクロメートル、最大 4 mm、例えば 10 ~ 500 マイクロメートルの) エアギャップまたはその他のフィルター材料 (例えば、水、透明ポリマ、インジウムスズ酸化物などの透明電極) を基板間に有する透明材料に穴をあけることができる。複数のガラス板に、たとえこれらが肉眼で見えるもの (数マイクロメートル、数十マイクロメートル、または数百マイクロメートル) により分離されていたとしても、穴あけを継続できることは、この線状焦点の穴あけ方式の大きな利点として注目すべきである。これに対して、例えばカー効果に基づくセルフフォーカスを利用して高アスペクト比の経路を形成するものや、ガラスの穴自体の形成を用いて導波路を形成するもの等、その他のレーザ方式を使用した場合、2枚の板間にエアギャップ等のギャップが存在すると、プロセスが完全に中断され、下の板への高品質の穴あけが困難となるか、完全にできなくなる可能性がある。それは、このような非線状焦点 (例えば、ガウス - ベッセル以外) のビームは、空気中に入ると回折して、素早く拡散するからである。それを制限しなおすような既存の経路がない場合、または、それを合焦しなおすような実質的なカー効果がない場合、ビームは大きな直径へと広がりすぎ、その下の材料を変化させることができない。カー効果に基づくセルフフォーカスの場合、空気中のセルフフォーカスに対する限界出力は、ガラスに必要な限界出力の約 20 倍と高く、このようなエアギャップが大きな問題となる。しかしながら、線状焦点システムの場合、ビームはガラス材料、またはポリマ、またはエアギャップがそこにあるか否かを問わず、あるいは真空が存在していたとしても、高強度のコアを引き続き形成することができる。したがって、線状焦点ビームの場合、材料内にそれとその上のガラス板との間にギャップがあっても、その他のガラス層への穴あけを継続する上で問題とならない。

【0068】

同様に、基板のスタックには、スタック全体を通じてガラス組成の異なる基板が含まれる場合がある。例えば、1つのスタックは、Eagle XG ガラスの基板と Corning ガラスコード 2320 の基板の両方を含んでいる場合がある。あるいは、透明基板のスタックは、サファイヤ等、ガラス以外の透明無機材料を含んでいる場合がある。基板は、線状焦点を形成するために使用されるレーザの波長を実質的に透過させなければならず、例えば、レーザ波長は 200 nm ~ 2000 nm にあり、例えば 1064 nm、532 nm、355 nm、または 266 nm である。いくつかの実施形態において、基板はまた、約 390 nm ~ 約 700 nm の範囲内の少なくとも 1つの波長を透過させることができる。いくつかの実施形態において、基板は、約 390 nm ~ 約 700 nm の範囲内の少なくとも 1つの波長の少なくとも 70%、少なくとも 75%、少なくとも 80%、少なくとも 85%、または少なくとも 90% を透過させることができる。ガラスまたはその他の透明材料に穴 / ダメージトラックを穴あけすることは、前記スタックに形成された複数の穴を有する基板のスタックを含む (相互に離間されているか、直接接触している) 成形品を作るために使用でき、これらの穴は基板の各々の中に延び、穴径は例えば 1 ~ 100 マイクロメートルであり、例えば間隔は 25 ~ 1000 マイクロメートルである。したがって、このプロセスは、多層スタックを含む実質的に透明な成形品を作製するためにも使用でき、多層スタックは複数のガラス層を含み、ガラス層間に少なくとも 1つのポリマ層があるか、組成の異なる少なくとも 2つのガラス層、または少なくとも 1つのガラス層と、少なくとも 1つの非ガラス無機層を含む。

【0069】

穴または欠陥線 / ダメージトラック間の横方向の空間 (ピッチ) は、合焦されたレーザビームの下で基板が並進される間のレーザのパスまたはバースト速度によって決まる。穴全体を形成するためには通常、1つのピコ秒レーザパルスバーストだけでよいが、希望に

10

20

30

40

50

応じて複数のバーストを使用してもよい。異なるピッチの穴を形成するには、より長い、またはより短い間隔でレーザーの発射をトリガすることができる。いくつかの実施形態において、レーザートリガは一般に、ビームの下で加工物をステージ駆動により移動させることによって同期させることができるため、レーザーバーストは一定の間隔、例えば1マイクロメートルごと、5マイクロメートルごと、10マイクロメートルごと、20マイクロメートルごと、またはそれ以上でトリガされる。インタポーザとして使用するための基板内にダメージトラックを形成する場合、隣接するダメージトラック間の距離、すなわち周期性は、貫通穴（すなわち、エッチングプロセスの後に形成される穴）の所望のパターンに依存させることができる。例えば、いくつかの実施形態において、ダメージトラックの所望のパターン（および、その結果として得られる、エッチングの後にそこから形成される貫通穴）は、不規則な間隔の非周期的パターンである。これらは、トレースがインタポーザの上に設置されることになる、またはインタポーザ上のチップへの特定の電氣的接続が設置されるべき場所にある必要がある。したがって、インタポーザのための切削とダメージトラックの穴あけの違いは、インタポーザの他の貫通穴が非周期的パターンで配置されることである。パターンを切削する場合、ダメージトラックは特定の周期的ピッチで作られ、ピッチは切削対象材料の組成によって異なる。本明細書に記載されている方法において、穴または欠陥線（またはダメージトラックまたは穿孔）は、隣接する穴/欠陥線/ダメージトラック間の間隔を約10 μm 以上、約20 μm 以上、約30 μm 以上、約40 μm 以上、約50 μm 以上とすることができる。いくつかの実施形態において、間隔は約20mmまでとすることができる。いくつかの実施形態において、間隔は、50マイクロメートル~500マイクロメートル、または10マイクロメートル~50マイクロメートルとすることができる。

10

20

【0070】

図10は同様のサンプル、このケースでは、周期的な配列の穴を有する厚さ300マイクロメートルのCorning Eagle XG（登録商標）ガラスを上面から見たものを示している。レーザービームの入射点がはっきりとわかる。隣接穴のピッチ、すなわち間隔は300マイクロメートルであり、穴径は約2マイクロメートルであり、各穴の周囲の縁、すなわち変化させられ、または上昇された材料は直径が約4マイクロメートルである。各種のレーザープロセスパラメータを探索して、材料を完全に貫通する穴を生成し、ガラスの微細亀裂が最も少なかった条件を見出した。

30

【0071】

レーザー出力とレンズ焦点距離（これが、焦線の長さ、したがって出力密度を決定する）は、ガラスの完全貫通と微細亀裂を少なくするうえで最も重要なパラメータである。例えば、図11は、ガラスに顕著な微細亀裂が発生した結果を示している。

【0072】

また、材料中の途中までしか延びない穿孔またはダメージトラックを意図的に作ることも可能である。この場合、このようなトラックは、止まり穴またはビアを作るために有益である。レーザーにより形成される止まり穴の一例が図12に示されている。ここで、ダメージトラックはガラスの中に約75%まで延びる。これを実現するために、光学装置のフォーカスは、線状焦点がガラスの上部だけにダメージを与えるまで上げられる。その他の止まり穴深度も実現可能であり、例えば、ガラス中に10%のみ、約25%のみ、約50%のみ、またはガラスの厚さより小さい何れの数値であってもよい。

40

【0073】

厚さ300マイクロメートルのCorning Eagle XG（登録商標）ガラスに、第一の表面から第二表面へと延びる連続または不連続の貫通穴または経路であるダメージトラックを作るには、以下の条件が適当であることがわかった：

アキシコンレンズへの入射ビームの直径：約 $3\text{mm}1/e^2$

アキシコン角度 = 10度

初期のコリメートレンズの焦点距離 = 125mm

最終的な対物レンズの焦点距離 = 50mm

50

入射ビーム収束角（ベータ）= 12.75度
 フォーカス設定 $z = 0.25$ mm（部品上面から約50マイクロメートル下）
 レーザパルスエネルギー約180マイクロジュール
 レーザのパルス繰返し率 = 200 kHz
 3パルス/バースト
 これらの条件の結果が図10に示されている。

【0074】

切削動作に関して、レーザのトリガは一般に、ビームの下の部品のステージ駆動移動と同期され、レーザパルスは一定の間隔、例えば1マイクロメートルごと、または5マイクロメートルごとにトリガされることが最も多い。正確な間隔は、基板内の応力レベルを同じ場合に、穿孔された穴から穿孔された穴までの亀裂の伝搬を容易にする材料特性によって決まる。しかしながら、基板の切削と異なり、同じ方法を、穴またはダメージトラック間の間隔をより大きくして、材料を穿孔するためだけに使用することも可能である。インタポーザの場合、穴は一般に、切削に必要な距離よりはるかに長い距離だけ離間され、約10マイクロメートル以下のピッチの代わりに、穴間の間隔は数百マイクロメートルとすることができる。上述のように、穴の正確な位置は、規則的な間隔である必要はなく（すなわち、これらは非周期的であり）、位置は単純に、レーザの発射がいつトリガされるかによって決まり、部品内のどの位置にあってもよい。図9において作られた穴は、インタポーザ用のある程度代表的である間隔とパターンの一例である。

【0075】

一般に、上述のプロセスにより、利用可能なレーザ出力が大きいほど、高速で材料を穿孔でき、および/または高速で材料中にダメージトラックを形成できる。インタポーザ用の、または同様の用途のためにガラスの穴あけを行う場合、加工速度は一般に、直接レーザ出力によってだけでなく、すでに冗長なレーザパルスまたはバーストを、穴が必要な特定の場所に方向付ける能力によっても限定される。上述のように、いくつかの実施形態において、ダメージトラック（および、結果として得られる、エッチング後にそこから形成される貫通穴）の所望のパターンは、不規則な間隔の被周期的パターンである。これらは、トレースがインタポーザ上に設置される場所、またはインタポーザ上の、チップへの特定の電気接続が設置される場所にある必要がある。したがって、インタポーザのための切削およびダメージトラックの穴あけの違いは、インタポーザ用の貫通穴が非周期的に設置されることである。例えば、市販されているバーストモード *p s e c* のレーザは、約200マイクロジュール/バーストのレーザバーストを繰返し率約100~200kHzで容易に生成できる。これは、約20~40ワットの時間平均レーザ出力に対応する。しかしながら、インタポーザに穴あけするには、これらのバーストのほとんどが使用されないことが最も多く、これは、非常に高速なビーム偏向方法であっても、ビームは、kHzまたはおそらく数十kHzの速度でなければ、所望の穴位置に位置付けられないからである。これは、上述の線状焦点と *p s e c* パルスレーザプロセスによる効率的な穴あけの主な問題が、ビームを基板表面上でどのように移動させ、方向付けるかであることを意味する。使用可能な1つの方法は、パターン全体を一連の1次元の線に分割する方法であり、各線が、例えば共通のy軸位置を共有する穴の全部を含む。その後、ガラスまたはビームを、レーザビームがx方向に移動する「ラストスキャン」モードでスキャンすることができ、共通のy軸の数値を共有する所望の穴の位置のすべてをスキャンする。ビームがスキャンされるため、そのレーザは、所望の穴の位置でのみバーストを発射するようにトリガされる。あるy線がスキャンされた後、基板またはレーザビームが新しいy位置へと移動され、この新しいy線上の新規の所望の穴位置群についてプロセスが繰り返される。その後、このプロセスは、基板上の所望の穴の全部が作られるまで続けられる。

【0076】

上述のプロセスは容易であるが、必ずしも効率的であるとは限らず、それは、ステージの速度と所望の穴の間隔によって、レーザパルス/バーストのうちどれだけを使用できるかが決まるからである。例えば、レーザは200,000バースト/ビームでパルスま

10

20

30

40

50

たはバーストを生成できるが、ステージの平均速度が0.5 m/秒であり、穴の間隔が平均100マイクロメートルである場合、約5,000バースト/秒しか使用できず、これはすなわち、利用可能なレーザバーストの約2.5%である。それにより5,000穴(またはダメージトラック)/秒で穴あけできることは確かであるが、これはレーザ能力のわずかな部分にすぎない。

【0077】

レーザビームを方向付けるために、より効率的な方法を使用できる。ガラスまたはビーム供給光学装置のスキヤニングは、ガルバノミラー(ガルバノ)およびfシタレンズから得られる高速ビーム偏向、または光学系もしくはガラスもしくは小範囲のピエゾ作動、または電磁ビーム偏向(EOD)または音響光学ビーム偏向器(AOD)と組み合わせて、ビームを上述の線形「ラスタ」スキヤン方向と直交する方向に高速で調節できるようにすることができる。その場合、y軸に沿ってビームがスキヤンされると、パルスのある時間で線形ステージ(x,y)座標の特定の範囲内のいずれかの穴に向けることのできる高速ビーム偏向器により、小幅で迅速な調節を行ってもよい。そのため、レーザビームの穴を直線に沿ったある位置にのみ方向付けることができる代わりに、システムは今度は、レーザビームをラスタスキヤンラインの幅dyの領域内のどの穴にも向けることができる。これによって、ラスタビームが単位時間あたりにアクセス可能な穴の数が格段に増え、それゆえ、開けることのできる1秒あたりの穴数を大幅に増やすことができる。これに加えて、高速ビーム偏向器は、ラスタスキヤン軸に垂直な方向だけでなく、スキヤン軸に平行にも使用できる。ビームをスキヤン軸に平行に変更させることによって、高速ビーム偏向部品(例えば、ガルバノ、AOD、EOD、ピエゾ)を、dy領域の中に、同じ操作軸位置(例えば、上記の例ではx軸)を有するが、異なるy軸位置に穴をあけることができ、それは、ビームをステージスキヤンに関して後方に「移動させ」、ステージの直線運動を停止することなく、あるx位置に第二の穴をあけることができるからである。これに加えて、操作軸に沿った高速偏向により、穴の位置決めをより正確に行うことができ、それは、パルスレーザがバースト発射のために利用できるときにわずかな遅延時間があっても、所望のx軸位置にビームを向け、また、ステージの直線移動中の速度および加速度アーチファクトを補償するためにも使用できるからである。

【0078】

あるいは、1方向に連続的にスキヤンし、そのスキヤンと共にビームの高速移動を行う代わりに、より従来の「ステップアンドリピート」方式を使用することも可能であり、この場合、リニアステージは特定の(x,y)位置へと移動され、高速ビーム偏向器(例えば、ガルバノ)の特定の視野内にすべての穴があけられ、線形ステージが新しい(x,y)位置に進められ、プロセスが繰り返される。しかしながら、全体としての穴あけ速度については、その代わりに上述の調整されたリニアステージと、リニアステージがほとんど常に移動し続ける高速偏向器方式を使用することが有利である場合がある。

【0079】

さらに高いシステムスループット(穴/sec/システム)を実現するために、上述のビームスキヤニング方式はまた、ビーム分割法と組み合わせてもよく、その場合、共通のレーザ源は、1つの基板または一連の基板の上方の複数のビーム供給ヘッドの間でそのバーストを分配する。例えば、音響光学または電気光学要素を使って、N個おきにパルスのある光路へと偏向してもよく、N個のヘッドが使用されてもよい。これは、このようなビームステアリング要素の角度偏向特性を利用することによって、またはこのような要素の偏光角偏向特性を利用することによって、偏光依存ビームスプリッタを通じてビームを方向付けることによって実現されてもよい。

【0080】

ダメージトラック(およびエッチングプロセスによってそこから作られる貫通穴)の所望のパターンに応じて、ダメージトラックは、約50ダメージトラック/秒超、約100ダメージトラック/秒超、約500ダメージトラック/秒超、約1,000ダメージトラック/秒超、約2,000ダメージトラック/秒超、約3,000ダメージトラ

10

20

30

40

50

ック/秒超、約4,000ダメージトラック/秒超、約5,000ダメージトラック/秒超、約6,000ダメージトラック/秒超、約7,000ダメージトラック/秒超、約8,000ダメージトラック/秒超、約9,000ダメージトラック/秒超、約10,000ダメージトラック/秒超、約25,000ダメージトラック/秒超、約50,000ダメージトラック/秒超、約75,000ダメージトラック/秒超、または約100,000ダメージトラック/秒超の速度で作ることができる。

【0081】

エッチング

穴を金属/導電材料コーティング/充填および電気接続に有益な大きさに拡張するために、部品を酸エッチングした。酸化エッチングを使って穴を最終的な直径まで拡張することには数多くの利点があり、すなわち1)酸エッチングは穴を、特に金属化し、インタポータに使用するには小さすぎるサイズ(例えば、約1マイクロメートル)からより好都合な大きさ(例えば、5マイクロメートル以上)に変化させること、2)エッチングは、不連続穴として、または単にガラス内へのダメージトラックとして始められるものから、エッチングによって連続貫通穴ビアにできること、3)エッチングは並行性の高いプロセスであり、部品内の穴/ダメージトラックのすべてを同時に拡張でき、これはレーザを穴に再び移動させて、それを広げるためにさらに材料を取り除かなければならない場合よりはるかに高速であること、および4)エッチングは部品内のエッジや小さい裂け目を平滑にするのを助け、材料の全体的な強度と信頼性を高めること、である。

【0082】

図52Aおよび52Bは、それぞれレーザ穴あけ後と酸エッチング後の基板1000を示す。図52Aに示されるように、基板1000には、前述のレーザ穴あけプロセスのいずれかを使って、第一の、すなわち上面1004から第二の、すなわち下面1006まで延びる1つまたは複数のダメージトラックまたはパイロット孔1002を形成できる。ダメージトラック1002は、例示のためにのみ、連続穴として描かれている。前述のように、いくつかの実施形態において、ダメージトラック1002は、非連続穴であり、基板の粒子がダメージトラックの中に存在している。図52Bに示されるように、基板1000に後述のようないずれかのエッチングプロセスを施した後、ダメージトラックが拡張されて貫通穴ビア1008が作られ、これは上面1004の上側開口における上部直径Dt、下面1006の下側開口における底部直径Db、およびくびれ部の直径Dwを有する。本明細書中で使用されるかぎり、くびれ部とは、穴の、上側開口と下側開口との間にある最も狭い部分を指す。貫通穴ビア1008の形状は、くびれ部によって砂時計の形で示されているが、これは例にすぎない。いくつかの実施形態において、貫通穴ビアは実質的に円筒形である。いくつかの実施形態において、エッチングプロセスにより、直径1マイクロメートル超~約2マイクロメートル超、約3マイクロメートル超、約4マイクロメートル超、約5マイクロメートル超、約10マイクロメートル超、約15マイクロメートル超、または約20マイクロメートル超を有する。

【0083】

1つの例において、使用される酸は体積で10% HF/15% HNO₃であった。部品は温度24~25で53分間エッチングし、約100マイクロメートルの材料が取り除かれた。部品をこの酸浴槽中に浸漬させ、40kHzと80kHzの周波数の組合せによる超音波攪拌を使って、穴/ダメージトラック内の流体浸透と流体交換を促進した。これに加えて、超音波音場内での部品の手動攪拌(例えば、機械的攪拌)を行って、超音波音場からの定常波パターンが部品上に「ホットスポット」またはキャビテーションに関連する損傷を生じさせるのを防止し、また、部品中の肉眼で見える流体の流れを起こした。酸の組成とエッチング速度は、わずか1.9マイクロメートル/分という部品-材料除去速度でゆっくりとエッチングするように意図的に設計した。例えば、約2マイクロメートル/分未満のエッチング速度で、酸が狭い穴/ダメージトラックに十分に振動し、攪拌によって、新鮮な流体を交換し、溶解した材料を当初の非常に狭い穴/ダメージトラックから除去することができる。それにより、エッチング中、基板の厚さ全体にわたり(すなわ

ち、穴またはダメージトラックの穴の長さ全体にわたり)、ほとんど同じ速度で穴を拡張できる。いくつかの実施形態において、エッチング速度は、10マイクロメートル/分未満の速度、例えば約5マイクロメートル/分未満、または約2マイクロメートル/分未満とすることができる。

【0084】

図13Aおよび13Bは、結果として得られた部品の上面と下面を示している。穴は直径約95マイクロメートルであり、真円度が高く、材料に微細亀裂がほとんどなかったことを示している。穴のピッチは300マイクロメートルであり、各穴の直径は約90~95マイクロメートルである。図13Aおよび13Bの画像は、バックライトで撮影され、各穴の中の明るい領域はまた、穴が酸エッチングによって完全に開放されたことも示している。同じサンプルをその後、穴の内部形状をよりよく見るためにダイシングした。図15および16は、その結果を示している。穴は「砂時計」の形状であり、すなわち、これらは穴の中央に向かってテーパが付いている。一般に、この形状は、パイロット孔形成プロセスではなく、エッチング環境によって決定される。明るい領域ガラスであり、暗い領域は穴である。穴の上部(レーザー入射側)の直径は約89マイクロメートルであり、くびれ部の直径は約71マイクロメートルであり、下部(レーザー射出側)の直径は約85マイクロメートルである。

10

【0085】

これに対して図14は、レーザープロセスによる顕著な微細亀裂を有するサンプルのエッチング結果を示しており、エッチングされた穴は円形の特徴物ではなく、長い形状である。微細亀裂は、レーザーバーストエネルギーを小さくすること、バースト当たりのパルス数を増やすこと、または、例えばより焦点距離の長い対物レンズを使用して、線状焦点の長さを延ばすことによって、減らすことができる。これらの変更は、基板内に含まれるエネルギー密度を縮小できる。これに加えて、光学システムを、収差が線状焦点内に導入されず、線状焦点内に方位非対称性が生じないように、確実に最適に配置するための注意を払わなければならない。このような非対称性は、基板内に高いエネルギー密度の箇所を発生させることがあり、これが微細亀裂につながる可能性がある。

20

【0086】

このレーザーとエッチングプロセスが一貫した結果をもたらすことを確認するために、300マイクロメートルのピッチの100x100の配列(全体で穴が10,000個)の穴パターンを作り、その後、エッチングしたサンプルを、マシンビジョンシステムにより測定し、各穴の上部および下部直径とくびれ部の直径を得た。その結果が図17A~17Cにヒストグラムとして示されている。上部および下部直径はどちらも約95マイクロメートルであり、大きさが非常に近く、標準偏差は約2.5マイクロメートルである。上部および下部直径とは異なり、くびれ部は約70マイクロメートルで、標準偏差は約3マイクロメートルである。それゆえ、くびれ部は、上部および下部直径より約30%狭い。図18A~18Cは、同じ穴について、上部、下部およびくびれ部の真円度測定値のヒストグラムを示す。真円度は、穴の最大直径から同じ穴の最小直径を差し引いたものとして定義され、単位はマイクロメートルである。分布は、穴が約5マイクロメートル未満までほぼ円形であることを示している。分布には、顕著な裾がなく、これは、微細亀裂または削り屑がエッチングにより除去され、丸くない形状とされていることを示す。

30

40

【0087】

図13A~16に示されている酸エッチングされた基板を形成し、図17A~18Cに示される特性を付与した後に酸エッチング条件を変更して、貫通穴の各種の特性を調整することによって、これをインダーザ用のピア貫通穴として有益なものにできることがわかった。例えば、いくつかの実施形態において、貫通穴は上側開口と、下側開口と、くびれ部と、を有することができ、上側および下側開口の直径に対するくびれ部の直径の比を制御できる。本明細書中で使用されるかぎり、くびれ部とは、上側および下側開口間にある穴の最も狭い部分を指す。くびれ部、上側開口、および下側開口の直径を制御する2つの要素はエッチング反応速度と拡散速度である。基板の厚さの全体にわたって材料をエッチ

50

ングし、ダメージトラックをピア貫通穴へと拡張するために、酸がダメージトラックの全長にわたって移動する必要がある。エッチング速度が速すぎ、酸が十分に拡散してダメージトラックのすべての部分に行き渡る時間がないと、酸は材料の表面で、材料の中央部分より多くの材料を不均等にエッチングする。Thiele, E. W. Relation between catalytic activity and size of particle, Industrial and Engineering Chemistry, 31 (1939), pp. 916 - 920に記載されているように、エッチングプロセスのチーレ数()を操作することを利用して、上側および下側開口の直径に対するくびれ部の直径の比を制御できる。チーレ数は、エッチング反応時間に対する拡散時間の比であり、下式で表すことができる。

【0088】

【数1】

$$\varphi = \sqrt{\frac{2k_r C^{\gamma}}{rD_{eff}}} * L$$

【0089】

式中、

k_r はエッチングの反応速度定数、

C は塊状酸濃度、

γ は慣性反応次数に基づく係数、

r は反応中の穴の半径、

D_{eff} は、水中でダメージトラックまたは穴への酸の有効拡散率であり、これは攪拌と超音波処理によって自然拡散率 D を強調したもの、

L は材料の厚さの $1/2$

である。

【0090】

上式によれば、エッチング反応時間が拡散時間より長い場合、チーレ数は1より大きい。これは、酸がダメージトラックまたは穴の長さ全体にわたり移動する前になくなり、ダメージトラックまたは穴の中央で拡散によって補充できることを意味する。その結果、エッチングはトラックまたは穴の上部および下部において、 k_r によって決定される速度でより速く進み、中央部のエッチングは、拡散により決定される速度でよりゆっくりと起こり、ピアホールは砂時計の形状となる。しかしながら、拡散時間がエッチング反応時間と等しいか、それより速い場合、チーレ数は1以下となる。このような条件下では、酸濃度が、ダメージトラックまたは穴の全体に沿って均一となり、ダメージトラックまたは穴が均一にエッチングされ、実質的に円筒形のピアホールが得られる。

【0091】

いくつかの実施形態において、拡散時間とエッチング反応時間を制御して、エッチングシステムのチーレ数、ひいては、上側および下側開口の直径に対するくびれ部の直径の比を制御できる。図53は、エッチングシステムのチーレ数と、上側および下側開口の直径に関するくびれ部の直径の予想パーセンテージとの間の関係を示す。いくつかの実施形態において、エッチングプロセスのチーレ数は、約5以下、約4.5以下、約4以下、約3.5以下、約3以下、約2.5以下、約2以下、約1.5以下、または約1以下とすることができる。いくつかの実施形態において、ピアホールのくびれ部の直径は、ピアホールの上側および/または下側開口の直径の50%~100%、50%~95%、50%~90%、50%~85%、50%~80%、50%~75%、50%~70%、55%~100%、55%~95%、55%~90%、55%~85%、55%~80%、55%~75%、55%~70%、60%~100%、60%~95%、60%~90%、60%~85%、60%~80%、60%~75%、60%~70%、65%~100%、65

10

20

30

40

50

% ~ 95%、65% ~ 90%、65% ~ 85%、65% ~ 80%、65% ~ 75%、65% ~ 70%、70% ~ 100%、70% ~ 95%、70% ~ 90%、70% ~ 85%、70% ~ 80%、70% ~ 75%、75% ~ 100%、75% ~ 95%、75% ~ 90%、75% ~ 85%、75% ~ 80%、80% ~ 100%、80% ~ 95%、80% ~ 90%、80% ~ 85%、85% ~ 100%、85% ~ 95%、85% ~ 90%、90% ~ 100%、90% ~ 95%、または95% ~ 100である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径はビアホールの上側および下側開口の直径の約50%以上、約55%以上、約60%以上、約65%以上、約70%以上、約75%以上、約80%以上、約85%以上、約90%以上、約95%以上、または約100%である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径は、ビアホールの上側および/または下側開口の平均直径の50% ~ 100%、50% ~ 95%、50% ~ 90%、50% ~ 85%、50% ~ 80%、50% ~ 75%、50% ~ 70%、55% ~ 100%、55% ~ 95%、55% ~ 90%、55% ~ 85%、55% ~ 80%、55% ~ 75%、55% ~ 70%、60% ~ 100%、60% ~ 95%、60% ~ 90%、60% ~ 85%、60% ~ 80%、60% ~ 75%、60% ~ 70%、65% ~ 100%、65% ~ 95%、65% ~ 90%、65% ~ 85%、65% ~ 80%、65% ~ 75%、65% ~ 70%、70% ~ 100%、70% ~ 95%、70% ~ 90%、70% ~ 85%、70% ~ 80%、70% ~ 75%、75% ~ 100%、75% ~ 95%、75% ~ 90%、75% ~ 85%、75% ~ 80%、80% ~ 100%、80% ~ 95%、80% ~ 90%、80% ~ 85%、85% ~ 100%、85% ~ 95%、85% ~ 90%、90% ~ 100%、90% ~ 95%、または95% ~ 100である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径はビアホールの上側および下側開口の平均直径の約50%以上、約55%以上、約60%以上、約65%以上、約70%以上、約75%以上、約80%以上、約85%以上、約90%以上、約95%以上、または約100%である。

10

20

【0092】

上述のチーレ数の式から判断できるように、ダメージトラックの初期半径とガラスの厚さはチーレ数に寄与する。図54は、ダメージトラックの初期半径と共にチーレ数が減少する様子を示している。図55は、基板の厚さの半分の値と共にチーレ数が減少する様子を示している。基板の厚さとダメージトラックの半径は、場合によっては、特定の厚さまたはダメージトラックの半径が必要な時、変更できない要素である。それより、この場合にはチーレ数に影響を与える他の要素を調節できる。例えば、図56は、有効拡散率(Def)が増加するとチーレ数が減少する様子を示している。いくつかの実施形態において、有効拡散率は、エッチング条件に攪拌および/または超音波処理を追加することによって増大でき、これについては以下により詳しく説明する。図57は、酸濃度、この場合はHF濃度の減少と共にチーレ数が減少する様子を示している。図57はまた、有効拡散率の増大および酸濃度の減少の組合せによりチーレ数が減少する様子も示している。

30

【0093】

いくつかの実施形態において、エッチング反応時間は、エッチング溶液の酸濃度を調節することによって制御できる。いくつかの実施形態において、エッチング溶液は、脱イオン化水、第一の酸、および第二の酸を含む水溶液とすることができる。第一の酸はフッ化水素酸とすることができ、第二の酸は硝酸、塩酸、または硫酸とすることができる。いくつかの実施形態において、エッチング溶液は、第一の酸しか含まなくてもよい。いくつかの実施形態において、エッチング溶液は、フッ化水素酸以外の第一の酸および/または硝酸、塩酸または硫酸以外の第二の酸を含むことができる。例示的なエッチング溶液は、フッ化水素酸10体積%/硝酸15体積%、またはフッ化水素酸5体積%/硝酸7.5体積%、またはフッ化水素酸2.5体積%/硝酸3.75体積%を含むことができる。

40

【0094】

いくつかの実施形態において、エッチングタンク内の基板の無機、機械的攪拌、および/またはエッチング溶液への表面活性剤の添加は、ビアホールの属性を調整するために変更可能な、その他のエッチング条件である。いくつかの実施形態において、エッチング溶

50

液が超音波攪拌され、基板はエッチング溶液を保持するエッチングタンクの中に、ダメージトラックの上側および下側開口が超音波に実質的に均一に暴露され、ダメージトラックが均一にエッチングされるような向きとされる。例えば、超音波トランスデューサがエッチングタンクの底部に配置されている場合、基板は、このエッチングタンクの中に、基板のダメージトラックを有する面がエッチングタンクの底部に対して平行ではなく、エッチングタンクの底部に対して垂直になるように配置される。

【0095】

いくつかの実施形態において、エッチングタンクは、x、y、およびz方向に機械的に攪拌して、ダメージトラックの均一なエッチングを改善することができる。いくつかの実施形態において、x、y、およびz方向への機械的攪拌は連続的に行うことができる。

10

【0096】

いくつかの実施形態において、表面活性剤をエッチング溶液に添加して、ダメージトラックの濡れ性を増大させることができる。濡れ性を高めることによって、拡散時間が短縮し、ピアホールの上側および下側開口の直径に対するピアホールのくびれ部の直径の比を大きくすることができる。いくつかの実施形態において、表面活性剤は、エッチング溶液の中に溶解し、エッチング容器中の酸と反応しない、いずれの適当な表面活性剤とすることもできる。いくつかの実施形態において、表面活性剤は、Capstone（登録商標）FS-50またはCapstone（登録商標）FS-54等のフッ素系表面活性剤とすることができる。いくつかの実施形態において、表面活性剤の、エッチング溶液1L当たりの表面活性剤mlとした濃度は、約1、約1.1、約1.2、約1.3、約1.4、約1.5、約1.6、約1.7、約1.8、約1.9、約2.0またはそれ以上とすることができる。

20

【0097】

速度

上述の方法を使ってレーザーで穿孔または「パイロット孔」または「ダメージトラック」を形成する主な利点は、加工時間が極めて高速であることである。図8に示されるダメージトラックの各々は、ピコ秒レーザーパルスの単独バーストで形成される。これは、材料の層を徐々に除去するために多くのレーザーパルスが必要とするパーカッション式穴あけと基本的に異なる。

【0098】

本明細書で示すサンプルに関して、ステージ速度は12m/分=200mm/秒であった。300マイクロメートルの間隔の場合、これは、レーザーバーストが1.5msごとに発射されて、1つの穴を形成することを意味し、これは667穴/秒の形成速度である。この約30mm×30mmの穴パターンの各列を作るためのステージの加速および減速を考えると、穴形成速度は300穴/秒を優に上回る。パターンを物理的範囲においてより大きくすると、ステージの加速の必要回数が減り、平均穴形成速度はさらに速くなるであろう。

30

【0099】

ここで使用されるレーザーは、全パルスエネルギーで100,000パルス/秒を容易に提供できるため、この速度で穴を形成することが可能である。一般に、穴形成速度の限界は、レーザービームを基板に関してどれだけ速く移動できるか、である。穴の間隔が10マイクロメートルであり、ステージ速度が1m/秒である場合、100,000穴/秒で形成される。実際、基板の切削はしばしばこのように行われる。しかしながら、実際のインタポーザの場合、穴はしばしば、数百マイクロメートル間隔であり、よりランダムな間隔である（すなわち、非周期的パターンがある）。したがって、図のパターンに関して上述した数は、わずか約300穴/秒である。より高い速度を達成するには、ステージ速度を、例えば200mm/秒から1m/秒へと上げて、速度をさらに5倍増大させることができる。同様に、平均穴ピッチが300マイクロメートル未満であれば、穴形成速度は相応に増大するであろう。

40

【0100】

50

レーザービームの下で基板を並進させることに加え、レーザーを穴から穴へと高速で移動させるためのその他の方法を使用することが可能であり、例えば、ガルバノメータと f - シータレンズ、音響光学偏向器、空間光変調器、その他を使用して、光学ヘッドそのものを移動させる。

【0101】

上述のように、ダメージトラック（よびエッチングプロセスによってそこから作られる貫通穴）の所望のパターンにより、ダメージトラックは、約50ダメージトラック/秒超、約100ダメージトラック/秒超、約500ダメージトラック/秒超、約1,000ダメージトラック/秒超、約2,000ダメージトラック/秒超、約3,000ダメージトラック/秒超過、約4,000ダメージトラック/秒超、約5,000ダメージトラック/秒超、約6,000ダメージトラック/秒超過、約7,000ダメージトラック/秒超、約8,000ダメージトラック/秒超、約9,000ダメージトラック/秒超過、約10,000ダメージトラック/秒超、約25,000ダメージトラック/秒超、約50,000ダメージトラック/秒超過、約75,000ダメージトラック/秒超、約100,000ダメージトラック/秒超過の速度で作ることができる。

10

【0102】

最終部品

いくつかの実施形態において、基板に対して上述のダメージトラック形成および酸エッチングプロセスを実行することにより、複数の貫通穴ビアを有する基板を得ることができる。いくつかの実施形態において、ビアの直径は、所期の用途にとっての要求に応じて、約30マイクロメートル以下、約25マイクロメートル以下、約20マイクロメートル以下、約15マイクロメートル以下、約10マイクロメートル以下、約5マイクロメートル～約10マイクロメートル、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20マイクロメートル、約5マイクロメートル～約25マイクロメートル、約5マイクロメートル～約30マイクロメートルの範囲内、最大数十マイクロメートルとすることができる。他の実施形態において、ビアの直径は、約20 μm 超とすることができる。いくつかの実施形態において、基板は、直径が異なるビアを有することができ、例えば、ビアの直径は少なくとも5 μm の差があってもよい。いくつかの実施形態において、ビアの上側開口と下側開口の直径の差は、3 μm 以下、2.5 μm 以下、2 μm 以下、1.5 μm 以下、または1 μm 以下とすることができ、これは、線状焦点ビームを使って材料中にダメージトラックを作ることによって可能となる。これらのダメージトラックは、基板の深さ全体にわたり非常に小さい直径を保持し、最終的にエッチング後に上側および下側直径が均一にされる。いくつかの実施形態において、隣接するビア間の間隔（中心間距離）は約10 μm 以上、約20 μm 以上、約30 μm 以上、約40 μm 以上、約50 μm 以上とすることができる。いくつかの実施形態において、隣接ビアの間隔は、最大20mmとすることができる。いくつかの実施形態において、ビアの密度は約0.01ビア/ mm^2 以上、約0.1ビア/ mm^2 以上、約1ビア/ mm^2 以上、約5ビア/ mm^2 以上、約10ビア/ mm^2 以上、約20ビア/ mm^2 以上、約30ビア/ mm^2 以上、約40ビア/ mm^2 以上、約50ビア/ mm^2 以上、約75ビア/ mm^2 以上、約100ビア/ mm^2 以上、約150ビア/ mm^2 以上、約200ビア/ mm^2 以上、約250ビア/ mm^2 以上、約300ビア/ mm^2 以上、約350ビア/ mm^2 以上、約400ビア/ mm^2 以上、約450ビア/ mm^2 以上、約500ビア/ mm^2 以上、約550ビア/ mm^2 以上、約600ビア/ mm^2 以上、約650ビア/ mm^2 以上とすることができる。いくつかの実施形態において、ビア密度は約0.01ビア/ mm^2 ～約650ビア/ mm^2 または約5ビア/ mm^2 ～約50ビア/ mm^2 の範囲とすることができる。

20

30

40

【0103】

上述のように、いくつかの実施形態において、ビアホールのくびれ部の直径は、ビア穴の上側および/または下側開口の直径の50%～100%、50%～95%、50%～90%、50%～85%、50%～80%、50%～75%、50%～70%、55%～100%、55%～95%、55%～90%、55%～85%、55%～80%、55%～

50

75%、55%~70%、60%~100%、60%~95%、60%~60%、60%~85%、60%~80%、60%~75%、60%~70%、65%~100%、65%~95%、65%~90%、65%~85%、65%~80%、65%~75%、65%~70%、70%~100%、70%~95%、70%~90%、70%~85%、70%~80%、70%~75%、75%~100%、75%~95%、75%~90%、75%~85%、75%~80%、80%~100%、80%~95%、80%~90%、80%~85%、85%~100%、85%~95%、85%~90%、90%~100%、90%~95%、または95%~100である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径はビアホールの上側および下側開口の直径の約50%以上、約55%以上、約60%以上、約65%以上、約70%以上、約75%以上、約80%以上、約85%以上、約90%以上、約95%以上、または約100%である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径は、ビアホールの上側および/または下側開口の平均直径の50%~100%、50%~95%、50%~90%、50%~85%、50%~80%、50%~75%、50%~70%、55%~100%、55%~95%、55%~90%、55%~85%、55%~80%、55%~75%、55%~70%、60%~100%、60%~95%、60%~60%、60%~85%、60%~80%、60%~75%、60%~70%、65%~100%、65%~95%、65%~90%、65%~85%、65%~80%、65%~75%、65%~70%、70%~100%、70%~95%、70%~90%、70%~85%、70%~80%、70%~75%、75%~100%、75%~95%、75%~90%、75%~85%、75%~80%、80%~100%、80%~95%、80%~90%、80%~85%、85%~100%、85%~95%、85%~90%、90%~100%、90%~95%、または95%~100である。いくつかの実施形態において、ビアホールのかぶれ部の直径はビアホールの上側および下側開口の平均直径の約50%以上、約55%以上、約60%以上、約65%以上、約70%以上、約75%以上、約80%以上、約85%以上、約90%以上、約95%以上、または約100%である。

10

20

【0104】

いくつかの実施形態において、ビアホールのアスペクト比（基板厚さ：ビア直径）は、約1：1以上、約2：1以上、約3：1以上、約4：1以上、約5：1以上、約6：1以上、約7：1以上、約8：1以上、約9：1以上、約10：1以上、約11：1以上、約12：1以上、約13：1以上、約14：1以上、約15：1以上、約16：1以上、約17：1以上、約18：1以上、約19：1以上、約20：1以上、約25：1以上、約30：1以上、約35：1以上とすることができる。いくつかの実施形態において、ビアホールのアスペクト比は、約5：1~約10：1、約5：1~20：1、約5：1~30：1、約10：1~20：1、約10：1~30：1の範囲とすることができる。

30

【0105】

いくつかの実施形態において、基板の厚さは約20 μ m~約3mm、約20 μ m~約1mm、または約50 μ m~300 μ m、または100 μ m~750 μ m、または約1mm~約3mmの範囲内である。いくつかの実施形態において、基板は、透明材利用、例えば、ただしこれらに限定されないが、ガラス、熔融石英、合成水晶、ガラスセラミック、セラミック、およびサファイヤ等の結晶材料で作製できる。いくつかの実施形態において、基板はガラスとすることができ、ガラスは、アルカリを含むガラス、アルカリを含まないガラス（例えば、無アルカリアルミノボロシリケートガラス）または、異なるガラス組成を含む層の積層ガラス片とすることができる。いくつかの実施形態において、ガラスは、化学的に強化された（例えば、イオン交換した）ガラスとすることができる。いくつかの実施形態において、基板は、約390nm~約700nmの範囲内の少なくとも一つの波長を透過させることができる。いくつかの実施形態において、基板は約390nm~約700nmの範囲内の少なくとも一つの波長の少なくとも70%、少なくとも75%、少なくとも80%、少なくとも85%、または少なくとも90%を透過させることができる。

40

【0106】

50

その後、貫通穴ビアには導電材料を被覆および/または充填して電氣的インタポーザの用途に使用できる。いくつかの実施形態において、被覆および/または充填は、金属化によって行うことができる。金属化は、例えば、真空蒸着、電解メッキ、導電ペーストの充填、またはその他の様々な方法で行うことができる。その後、電氣的トレースを部品表面上にパターンニングしてもよく、その穴からの電氣信号をマイクロチップまたはその他の電氣回路に送信できるようにするための一連の再配線層とコンタクトパットを構築してもよい。

【0107】

デジタルポリマラーゼ連鎖反応(dPCR)試験などの生化学用途について、この部品はまた、表面の親水性または疎水性を制御するコーティングで機能付与することもできる。抗体、たんぱく質、またはその他の生体分子を付着できる他のコーティングもまた塗布できる。dPCRマイクロアレイの場合、非常に密度が高く、規則的な配列の穴を有する基板が特に有益であり、例えば、ピッチが約100マイクロメートル未満の、六角形の緊密パック穴パターンである。このようなパターンの場合、上述のレーザプロセスで可能な速度は特に高く、これは、レーザを極めて高い頻度で発射でき、レーザの繰返し率全体を有効に使用できるからである。それゆえ、10,000穴/秒を超える穴形成速度を実現できる(穴間隔100マイクロメートルで、ステージ速度1m/秒)。留意すべき点として、穴形成はレーザパルスのわずかな部分しか使用していない場合がある。レーザペーストの繰返し速度は容易に数百kHzとすることができ、その一方で、これらのペーストの全部を使用するのに十分な速度でビームを新しい穴の位置へと向けることは困難でありうる。例えば、実際の穴形成速度は、100穴/秒、500穴/秒、999穴/秒、3,000穴/秒、5,000穴/秒、10,000穴/秒であってもよく、その一方でレーザの繰返し率も同時に100,000バースト/秒、200,000バースト/秒であってもよい。これらの場合、バーストパルスのほとんどは、レーザから外の基板に向けられるのではなく、電氣光学変調器等の装置を使って方向転換されてビームダンプの中に入る。それゆえ、穴あけに必要な1秒あたりのバースト数が、レーザの繰返し率全体から実際に得られるものより少なくてよい。多くの短パルスレーザは電氣光学または音響光学変調器をその出力に有しているため、このような方法でそれらを動作させることができる。

【実施例】

【0108】

実施例1

図19Bおよび19Cに示されるように、Corning Eagle XG(登録商標)ガラス(厚さ300マイクロメートル)の試験サンプルを作製し、サンプル中に貫通穴を形成した。ピコ秒レーザのバーストエネルギーとバーストあたりのパルス数を変化させ、ピッチを50マイクロメートルから300マイクロメートルに変化させたにも関わらず、すべてのサンプルにおいて、図19Aに示されるように、ガラス内部に約10マイクロメートルの範囲の小さい半径方向の亀裂が観察された。

【0109】

別のサンプルとしてCorning Eagle XG(登録商標)ガラス(厚さ150マイクロメートル)を作製し、貫通穴を形成した後、エッチングによって穴の直径を拡張した。部品:穴配列100×100、ピッチ300マイクロメートル、レーザ出力またはバーストエネルギーを変化(サンプル5個)、穴配列150×150、ピッチ200マイクロメートルのサンプル1個、穴配列300×300、ピッチ100マイクロメートルのサンプル1個。上面(図20A)、下面(図20B)および側面(図20C)の図20A~20Cのエッチング前の写真に示されているように、ガラス表面に実質的なチップまたは亀裂を生じずに貫通穴が形成されたが、内部の半径方向の亀裂と表面下の損傷(図示せず)がある程度あった。図21A~21Eに示されているように、穴配列100×100、ピッチ300マイクロメートルについて、レーザ出力を上げた場合(レーザ出力は、図21A=55%、図21B=65%、図21C=75%、図21D=85%、図21E=100%)のエッチング後(直径約100マイクロメートルを除去)の上面図は、最良の

結果（最も丸い穴で閉塞がない（中央が暗いものは閉塞した穴を示す））が得られることを示しており、約 75 ~ 85 % の出力で最適となり、図 2 2 A ~ 2 2 E に示される同じサンプルの底面図においても同じ結果が見られた（レーザ出力は、図 2 2 A = 55 %、図 2 2 B = 65 %、図 2 2 C = 75 %、図 2 2 D = 85 %、図 2 2 E = 100 %）。

【0110】

図 2 3 A ~ 2 3 C に示されるように、より大型の配置の試験（図 2 3 A = 配列 150 × 150、ピッチ 200 マイクロメートル、穴 100 マイクロメートル）（図 2 3 B ~ 2 3 C = 配列 300 × 300、ピッチ 100 マイクロメートル、穴 50 マイクロメートル）では、100 マイクロメートルと 50 マイクロメートルの穴の両方について、65 % のレーザ出力で丸い穴が得られたが、ある程度の閉塞もあり、閉塞には一定の周期性があり（おそらく、超音波定常波がエッチング中により高混合状態および低混合状態の小領域を作ることによる）、また、図 2 3 C に示されているように、いくつか領域には亀裂またはチップの入った穴が含まれている。

10

【0111】

配列 100 × 100 の 2 つのサンプルに関する寸法解析により、第一のサンプルについては図 2 5 A から 2 5 C（図 2 5 A = 上側、図 2 5 B = 下側、図 2 5 C = くびれ部）および第二のサンプルについては図 2 7 A ~ 2 7 C（図 2 7 A = 上側、図 2 7 B = 下側、図 2 7 C = くびれ部）に示されているように、真円度（真円度 = 最大の内接直径 - 最小の内接直径）が良好（すなわち、約 5 マイクロメートル未満）であることが示され、上側（第一のサンプルは図 2 4 A、第二のサンプルは図 2 6 A に示される）および下側（第一のサンプルは図 2 4 B、第二のサンプルは図 2 6 B に示される）直径はほぼ等しく、くびれ部（第一のサンプルは図 2 4 C、第二のサンプルは図 2 6 C に示される）は開いている。

20

【0112】

実施例 2

別のサンプルとして、Corning Eagle XG（登録商標）ガラス（厚さ 300 マイクロメートル）の試験を行い、最終寸法（エッチング後）により穴の品質がどのように変化するかを調べた。穴は配列 150 × 150 の配列（各サンプルにつき 22, 500 穴）、ピッチ 300 マイクロメートルで形成し、エッチングによる除去で 4 つの穴径を得た（直径 30、50、75、および 100 マイクロメートル）。貫通穴形成プロセスのレーザ条件は、レンズ 50 mm、ステージ速度 12 m / 分（200 mm / 秒）、繰返し率 200 kHz、1 パースあたり 3 パルス、とした。貫通穴を約 187 穴 / 秒で形成した。30 マイクロメートルの穴についての図 2 8 A ~ 2 8 C と 50 マイクロメートルの穴についての図 2 9 A ~ 2 9 C に示されているように、100 % のレーザ出力で、30 マイクロメートルの穴のくびれ部は狭く見え（図 2 8 B）、50 マイクロメートルの穴（図 2 9 B）のくびれ部は広く開いている。75 マイクロメートルの穴についての図 3 0 A ~ 3 0 C と 100 マイクロメートルの穴についての図 3 1 A ~ 3 1 C に示されるように、100 % のレーザ出力で、両方の大きさのくびれ部（図 3 0 B および 3 1 B）は広く開いている。30 マイクロメートルの穴についての図 3 2 A ~ 3 2 C と 50 マイクロメートルの穴についての図 3 3 A ~ 3 3 C に示されているように、85 % のレーザ出力で、30 マイクロメートルの穴のくびれ部は狭く見え（図 3 2 B）、50 マイクロメートルの穴のくびれ部（図 3 3 B）は非常に広い。75 マイクロメートルの穴についての図 3 4 A ~ 3 4 C と 100 マイクロメートルの穴についての図 3 5 A ~ 3 5 C に示されるように、85 % のレーザ出力で、両方の大きさのくびれ部（図 3 4 B および 3 5 B）は広く開いている。30 マイクロメートルの穴についての図 3 6 A ~ 3 6 C と 50 マイクロメートルの穴についての図 3 7 A ~ 3 7 C に示されているように、75 % のレーザ出力で、30 マイクロメートルの穴のくびれ部は狭く見え（図 3 6 B）、50 マイクロメートルの穴のくびれ部（図 3 7 B）は広く開いている。75 マイクロメートルの穴についての図 3 8 A ~ 3 8 C と 100 マイクロメートルの穴についての図 3 9 A ~ 3 9 C に示されるように、75 % のレーザ出力で、両方の大きさのくびれ部（図 3 8 B および 3 9 B）は開いているが、全体的な穴の直径においてはある程度のばらつきがある場合がある。30 マイクロメートルの穴につい

30

40

50

での図40A～40Cと50マイクロメートルの穴についての図41A～41Cに示されているように、65%のレーザ出力で、エッチング後に穴はガラス内に完全に形成されず、30マイクロメートルの穴(図41B)の結果が最悪であったが、50マイクロメートルの穴(図41A)であっても、ある程度の開放性の欠如または閉塞が見られる。75マイクロメートルの穴についての図42A～42Cと100マイクロメートルの穴についての図43A～43Cに示されるように、65%のレーザ出力で、上面図(図42Aおよび43A)と底面図(図42Cおよび43C)から開放性の不良と閉塞の証拠が得られる。30マイクロメートルの穴についての図44A～44Cと50マイクロメートルの穴についての図45A～45Cに示されているように、55%のレーザ出力で、穴は完全に形成されず、酸エッチングでこれらを開放できなかった。75マイクロメートルの穴についての図46A～46Cと100マイクロメートルの穴についての図47A～47Cに示されるように、55%のレーザ出力で、穴は完全に形成されず、酸エッチングでこれらを開放できなかった。図47Aおよび47Cに示されているように、100マイクロメートルの穴であっても、くびれ部の開放性の欠如またはそれぞれ上面図と底面図における閉塞の証拠が見られた。

10

【0113】

実施例3

本明細書で開示されている方法はまた、複数の層を同時に穴あけできるようにすることにより、さらに速い加工速度を実現する。図48は、3枚の、積み重ねられた、150マイクロメートルのEagle XG(登録商標)ガラス板430を通して延びる焦線432を示している。焦線432が3つの積み重ねられた板すべてにわたって延びているため、3つの層全体を通じて完全な欠陥線を同時に形成できる。スタックを貫通する完全な穿孔を作るには、焦線の長さをスタックの高さより長くする必要がある。部品の穴あけを行ったところで、これらを分離してからエッチングすることができ、それによって各板の穴の中に助剤を容易に到達させることができる。

20

【0114】

穴あけのためのこの線状焦点法の大きな利点は、プロセスが、レーザビームのセルフフォーカスに依存するプロセスと異なり、部品間のエアギャップに影響を受けないことである。例えば、合焦されたガウスビームは、第一のガラス層に入ると発散し、あまり深くまで穴あけしないか、穴の側面に沿った反射またはガラスの穴あけ中の導波路効果によってセルフフォーカシングが行われた場合、ビームは第一のガラス層から出て回折し、第二ガラス層まで穴あけしない。カー効果に基づくセルフフォーカシング(「フィラメンテーション」とも呼ばれる)を利用して材料内部のより長い相互作用長さを実現するレーザプロセスの場合であっても、レーザビームが上のガラス片から出て空気に入ることは問題であり、それは、空気には、空中でカー効果に基づくセルフフォーカシングを誘発するために、ガラス内でカー効果のセルフフォーカシングを保持するために必要なパワーの～20倍ものパワーを必要とするからである。これに対して、ベッセルビームは、エアギャップの大きさの変化(最大数百分の1マイクロメートル、さらには1mm)に関係なく、線状焦点の範囲全体にわたって両方のガラス層に穴あけすることができる。

30

【0115】

実施例4

このような穴あけプロセス中に、ガラス片の上、下、および間に保護層またはコーティングを挿入することも可能である。材料がレーザ放射を透過させるかぎり、ビームは依然として、保護コーティングを通じて合焦され、ガラス片に穴あけする。このことは、部品をクリーンなままに保ち、穴あけプロセス中に擦り傷やその他の取り扱いによる損傷を防止しようとする場合に特に有利となりうる。部品の穴あけ後、コーティングを除去できる。同様に、このような層、例えば透明ポリマの薄層(Donguan Yunyang Industrial Co., Ltd.のYY-100ポリエチレン接着フィルム)を、スタック穴あけプロセス中に板間に使用し、積み重ねられた板の表面擦り傷を防止することができ、これは部品の強度を保ち、審美的またはその他の欠陥を防止するのに役立つ。

40

50

【 0 1 1 6 】

図 4 9 は、厚さ 3 0 0 マイクロメートルの E X G ガラス板 2 枚の、このような方法で穴明けした後の画像を示す。図 5 0 は、酸エッチング後の同じ部品を示す。この場合、穴は側面形状から直径が 1 5 0 マイクロメートルであるように見えるが、実際には直径約 7 0 マイクロメートルであり、側面からは、カメラの焦点から延びる複数の列の穴があり、各列が若干横方向にずれているため、実際より大きな開放穴のような錯覚が起こるため、大きく見えるにすぎない。穴の上面図（図 5 1）は、穴の直径が実際には約 7 0 マイクロメートルであることを示しており、各穴の中心を通る光は、これらが開放している貫通穴であることを示している。

【 0 1 1 7 】

実施例 5

ダメージトラックを有する厚さ 1 5 0 μm の Corning Eagle XG（登録商標）ガラス部品を、体積で 5 % HF / 7 . 5 % HNO₃ を有する酸エッチング浴槽の中に縦に設置した。部品を温度 2 6 の温度で 8 1 0 秒間エッチングし、約 1 3 マイクロメートルの材料を約 1 マイクロメートル / 分の速度で除去した。4 0 k H z と 8 0 k H z の周波数組合せの超音波攪拌を用いて、穴への流体の浸透と流体交換を促進した。これに加えて、超音波音場内で部品を x、y、および z 方向に連続的に移動させ、超音波音場からの定常波パターンが部品中に「ホットスポット」またはキャビテーションに関連する損傷が発生しないようにし、また、部品全体にわたり、肉眼で見える流体の流れを起こした。エッチング中、ダメージトラックが拡張されて、直径 1 3 μm 、アスペクト比 1 1 : 1、くびれ部の直径がガラス部品の上面および底面におけるピア開口のち直径の平均の 7 3 % であるピアホールが形成された。図 5 8 は、酸エッチング後のガラス部品の側面の写真である。

【 0 1 1 8 】

本明細書中で引用されたすべての特許公開出願、および参考文献の中の関連する教示は、参照によってその全体を援用する。

【 0 1 1 9 】

本明細書では例示的な実施形態が示されているが、当業者にとっては、付属の特許請求の範囲により包含され範囲から逸脱することなく、そこに形態や詳細な各種の変更を加えてもよいことがわかるであろう。

【 0 1 2 0 】

以下、本発明の好ましい実施形態を項分け記載する。

【 0 1 2 1 】

実施形態 1

実質的に透明な材料に穴を形成する方法において、

パルスレーザービームを、ビーム伝搬方向に沿って向けられ、前記材料中に方向付けられたレーザービーム焦線へと合焦させるステップであって、前記レーザービームの焦線は前記材料中に誘起吸収を発生させ、前記誘起吸収が前記材料中の前記レーザービーム焦線に沿ってダメージトラックを生成するステップと、

前記材料と前記レーザービームを相互に関して並進させ、それによって複数のダメージトラックを形成するステップと、

前記材料を酸溶液中でエッチングして、前記材料中の前記ダメージトラックを拡張することにより、1 マイクロメートルより大きい直径の貫通穴を生成するステップと、を含むことを特徴とする方法。

【 0 1 2 2 】

実施形態 2

前記エッチングのチーレ数が 2 以下であることを特徴とする、実施形態 1 に記載の方法。

【 0 1 2 3 】

実施形態 3

前記パルスレーザーは、バーストあたり少なくとも 2 パルスのバーストを生成し、バース

10

20

30

40

50

トあたり少なくとも $40 \mu\text{J}$ のエネルギーを生成することを特徴とする、実施形態 1 または 2 に記載の方法。

【0124】

実施形態 4

前記パルスレーザは少なくとも 500 ダメージトラック / 秒を生成することを特徴とする、実施形態 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0125】

実施形態 5

前記パルスレーザは少なくとも $1,000$ ダメージトラック / 秒を生成することを特徴とする、実施形態 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【0126】

実施形態 6

前記パルスレーザは少なくとも $5,000$ ダメージトラック / 秒を生成することを特徴とする、実施形態 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0127】

実施形態 7

前記焦線は、ベッセルビームまたはガウス - ベッセルビームを使って形成されることを特徴とする、実施形態 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0128】

実施形態 8

前記焦線は、アキシコンを使って生成されることを特徴とする、実施形態 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【0129】

実施形態 9

前記材料は、 $390 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の範囲内の少なくとも 1 つの周波数を透過させることを特徴とする、実施形態 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0130】

実施形態 10

前記材料は、 $390 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の範囲内の少なくとも 1 つの周波数の少なくとも 70% を透過させることができることを特徴とする、実施形態 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の方法。

30

【0131】

実施形態 11

前記材料はガラスであることを特徴とする、実施形態 1 ~ 10 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0132】

実施形態 12

前記材料は溶融石英であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0133】

実施形態 13

前記材料はガラス板のスタックであることを特徴とする、実施形態 1 ~ 12 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【0134】

実施形態 14

前記エッチングは約 10 マイクロメートル / 分未満の速度で行われることを特徴とする、実施形態 1 ~ 13 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0135】

実施形態 15

前記エッチングは約 5 マイクロメートル / 分未満の速度で行われることを特徴とする、

50

実施形態 1 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0136】

実施形態 16

前記エッチングは約 2 マイクロメートル / 分未満の速度で行われることを特徴とする、実施形態 1 ~ 15 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0137】

実施形態 17

前記パルスレーザービームのパルス幅は、約 1 ピコ秒超 ~ 約 100 ピコ秒未満の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 16 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0138】

実施形態 18

前記パルス幅は、約 5 ピコ秒超 ~ 約 20 ピコ秒未満の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 17 に記載の方法。

【0139】

実施形態 19

前記レーザービームの繰返し率は約 1 kHz ~ 4 MHz の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 18 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0140】

実施形態 20

前記繰返し率は約 10 kHz ~ 650 kHz の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 19 に記載の方法。

【0141】

実施形態 21

前記パルスレーザービームのバーストエネルギー密度は、25 マイクロジュール / mm 線状焦点 ~ 125 マイクロジュール / mm 線状焦点の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 20 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0142】

実施形態 22

前記パルスレーザービームのパルスは、約 1 nsec ~ 約 50 nsec の間の範囲の時間で分離される少なくとも 2 パルスのバーストで生成され、前記バーストのバースト繰返し率は約 1 kHz ~ 約 650 kHz の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 21 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0143】

実施形態 23

前記少なくとも 2 つのパルスは、20 nsec プラスマイナス 2 nsec の時間で分離されることを特徴とする、実施形態 22 に記載の方法。

【0144】

実施形態 24

前記パルスレーザービームの波長は、前記材料が前記波長を実質的に透過させるように選択されることを特徴とする、実施形態 1 ~ 23 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0145】

実施形態 25

前記レーザービームの焦線の長さは、約 0.1 mm ~ 約 10 mm の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1 ~ 24 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0146】

実施形態 26

前記レーザービームの焦線の長さは、約 0.1 mm ~ 約 1 mm の間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 25 に記載の方法。

【0147】

実施形態 27

10

20

30

40

50

前記レーザービームの焦線の平均スポット径は、約 0.1 マイクロメートル～約 5 マイクロメートルの間の範囲内であることを特徴とする、実施形態 1～26 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0148】

実施形態 28

前記ダメージトラックの各々の直径は約 5 マイクロメートル以下であることを特徴とする、実施形態 1～27 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0149】

実施形態 29

隣接するダメージトラック間の間隔は 50 マイクロメートル～500 マイクロメートルの間であることを特徴とする、実施形態 1～28 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【0150】

実施形態 30

隣接するダメージトラック間の前記間隔は 10 マイクロメートル～50 マイクロメートルの間であることを特徴とする、実施形態 29 に記載の方法。

【0151】

実施形態 31

前記材料と前記レーザービームを相互に関して並進させるステップは、レゾナントスキャニングミラースキャナを使って前記レーザービームを並進させるステップを含むことを特徴とする、実施形態 1～30 のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【0152】

実施形態 32

前記材料と前記レーザービームを相互に関して並進させるステップは、ガルバノメータミラースキャナを使って前記レーザービームを並進させるステップを含むことを特徴とする、実施形態 1～30 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0153】

実施形態 33

前記材料と前記レーザービームを相互に関して並進させるステップは、音響光学偏向器を使って前記レーザービームを並進させるステップを含むことを特徴とする、実施形態 1～30 のいずれか 1 項に記載の方法。

30

【0154】

実施形態 34

前記ダメージトラックは、非周期的パターンで形成されることを特徴とする、実施形態 1～33 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0155】

実施形態 35

前記貫通穴の内面を、導体で被覆して、前記貫通穴の上と下との間に電気的接続性を生成させるステップをさらに含むことを特徴とする、実施形態 1～34 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0156】

実施形態 36

前記貫通穴の内面を、生体分子を付着させやすくするために被覆するステップをさらに含むことを特徴とする、実施形態 1～35 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【0157】

実施形態 37

前記貫通穴の直径は 5 マイクロメートル～100 マイクロメートルの間であることを特徴とする、実施形態 1～36 のいずれか 1 項に記載の方法。

【0158】

実施形態 38

前記複数の貫通穴の直径は 20 μm 以下であり、

50

隣接する貫通穴間の間隔は10 μm以上であり、

前記複数の貫通穴は、前記第一の面の開口と、前記第二の面の開口と、前記第一の面の前記開口と前記第二の面の前記開口との間にあるくびれ部と、を含み、

前記くびれ部の直径は、前記第一の面の前記開口または前記第二の面の前記開口の直径の少なくとも50%であり、

前記第一の面の前記開口の直径と前記第二の面の前記開口の直径との差が3 μm以下である

ことを特徴とする、実施形態1～37のいずれか1項に記載の方法。

【0159】

実施形態39

実施形態1～38のいずれか1項に記載の方法により製造されることを特徴とする成形品。

【0160】

実施形態40

複数のダメージトラックを有する基板を含むガラス成形品において、

前記ダメージトラックは、直径が5マイクロメートル未満であり、隣接する穴間の間隔が少なくとも20マイクロメートルであり、アスペクト比が20：1以上であることを特徴とするガラス成形品。

【0161】

実施形態41

前記ダメージトラックの前記直径は1マイクロメートル未満であることを特徴とする、実施形態40に記載のガラス成形品。

【0162】

実施形態42

ガラス成形品において、

ガラス基板のスタックであって、前記スタックを通じて形成される複数の穴を有し、前記穴は前記ガラス基板の各々を通して延びるスタックを含み、

前記穴は、直径が約1マイクロメートル～約100マイクロメートルの間であり、隣接する穴間の間隔が25マイクロメートル～1,000マイクロメートルの間であることを特徴とするガラス成形品。

【0163】

実施形態43

前記ガラス基板のうちの少なくとも2枚は10マイクロメートルより大きいエアギャップにより分離されていることを特徴とする、実施形態42に記載のガラス成形品。

【0164】

実施形態44

実質的に透明な成形品において、

材料の多層スタックを含み、

前記材料は200nm～2000nmの間の波長を実質的に透過させ、

前記多層スタックは、前記スタックの前記多層を通じて形成された複数の穴を有し、

前記穴は、直径が1マイクロメートル～100マイクロメートルの間であり、穴間隔が25マイクロメートル～1000マイクロメートルである

ことを特徴とする実質的に透明な成形品。

【0165】

実施形態45

前記多層スタックは、

多層ガラス層および前記ガラス層間に挟まれた少なくとも1つのポリマ層または、

異なる組成の少なくとも2つのガラス層または、

少なくとも1つのガラス層および少なくとも1つの非ガラス無機層

からなることを特徴とする、実施形態44に記載の実質的に透明な成形品。

10

20

30

40

50

【 0 1 6 6 】

実施形態 4 6

材料中に貫通穴を形成する方法において、

パルスレーザビームをビーム伝搬方向に沿って向けられたレーザビーム焦線へと合焦させ、前記レーザビーム焦線を前記材料中に方向付けるステップによって前記材料中に複数のダメージトラックを形成するステップであって、前記ダメージトラックの直径が $5 \mu\text{m}$ 以下であるステップと、

前記材料を酸溶液中でエッチングして、複数の欠陥線を拡張させて、前記材料中に複数の貫通穴を生成するステップであって、前記エッチングのチーレ数が 2 以下であるステップと、

を含むことを特徴とする方法。

10

【 0 1 6 7 】

実施形態 4 7

前記材料は、 $390 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の範囲内の少なくとも 1 つの波長を透過させることを特徴とする、実施形態 4 6 に記載の方法。

【 0 1 6 8 】

実施形態 4 8

前記材料は、 $390 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の範囲内の少なくとも 1 つの波長の少なくとも 70 % を透過させることができることを特徴とする、実施形態 4 6 または 4 7 に記載の方法。

【 0 1 6 9 】

実施形態 4 9

エッチング中に前記酸溶液を機械的に攪拌するステップをさらに含むことを特徴とする、実施形態 4 6 ~ 4 8 のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【 0 1 7 0 】

実施形態 5 0

前記複数の貫通穴は、直径が $20 \mu\text{m}$ 以下であり、隣接する貫通穴間の間隔が少なくとも $10 \mu\text{m}$ であることを特徴とする、実施形態 4 6 ~ 4 9 のいずれか 1 項に記載の方法。

【 0 1 7 1 】

実施形態 5 1

前記複数の貫通穴は、第一の表面の開口と、第二の表面の開口と、前記第一の表面の前記開口と前記第二の表面の前記開口との間にあるくびれ部と、を含み、

前記くびれ部の直径は、前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも 50 % であり、

前記第一の表面の前記開口の直径と前記第二の表面の前記開口の直径との差は $3 \mu\text{m}$ 以下である

ことを特徴とする、実施形態 5 0 に記載の方法。

30

【 0 1 7 2 】

実施形態 5 2

前記酸溶液は表面活性剤を含むことを特徴とする、実施形態 4 6 ~ 5 1 のいずれか 1 項に記載の方法。

40

【 0 1 7 3 】

実施形態 5 3

成形品において、

基板であって、前記基板の第一の表面から前記基板の第二の表面へと連続的に延びる複数の貫通穴を有する基板を含み、

前記基板は $390 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ の範囲内の少なくとも 1 つの波長を透過させ、

前記複数の貫通穴の直径は $20 \mu\text{m}$ 以下であり、

隣接する貫通穴間の間隔は $10 \mu\text{m}$ 以上であり、

前記複数の貫通穴は、前記第一の表面の開口と、前記第二の表面の開口と、前記第一の

50

表面の前記開口と前記第二の表面の前記開口との間にあるくびれ部と、を含み、

前記くびれ部の直径は前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも50%であり、

前記第一の表面の前記開口の直径と前記第二の表面の前記開口の直径との差は3 μm 以下である

ことを特徴とする成形品。

【0174】

実施形態54

前記複数の貫通穴の直径は5 μm 超であることを特徴とする、実施形態53に記載の成形品。

10

【0175】

実施形態55

前記くびれ部の直径は、前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも70%であることを特徴とする、実施形態53または54に記載の成形品。

【0176】

実施形態56

前記くびれ部の直径は、前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも75%であることを特徴とする、実施形態53～55のいずれか1項に記載の成形品。

20

【0177】

実施形態57

前記くびれ部の直径は、前記第一の表面の前記開口または前記第二の表面の前記開口の直径の少なくとも80%であることを特徴とする、実施形態53～56のいずれか1項に記載の成形品。

【0178】

実施形態58

前記基板は溶融石英であることを特徴とする、実施形態53～57のいずれか1項に記載の成形品。

【0179】

実施形態59

前記基板はガラスであることを特徴とする、実施形態53～57のいずれか1項に記載の成形品。

30

【0180】

実施形態60

前記ガラスは化学的に強化されたガラスであることを特徴とする、実施形態59に記載の成形品。

【0181】

実施形態61

前記基板の厚さは1mm以下であることを特徴とする、実施形態53～60のいずれか1項に記載の成形品。

40

【0182】

実施形態62

前記基板の厚さは、20 μm ～200 μm の範囲内であることを特徴とする、実施形態53～61のいずれか1項に記載の成形品。

【0183】

実施形態63

前記複数の貫通穴の密度は、5貫通穴/ mm^2 ～50貫通穴/ mm^2 の範囲内であることを特徴とする、実施形態53～62のいずれか1項に記載の成形品。

【0184】

50

実施形態 6 4

前記複数の貫通穴の直径は $1.5 \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、実施形態 5 3 ~ 6 3 のいずれか 1 項に記載の成形品。

【 0 1 8 5 】

実施形態 6 5

前記複数の貫通穴の直径は $1.0 \mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、実施形態 5 3 ~ 6 4 のいずれか 1 項に記載の成形品。

【 0 1 8 6 】

実施形態 6 6

前記複数の貫通穴のアスペクト比は $5 : 1 \sim 20 : 1$ の範囲内であることを特徴とする、実施形態 5 3 ~ 6 5 のいずれか 1 項に記載の成形品。

10

【 0 1 8 7 】

実施形態 6 7

前記複数の貫通穴は導電材料を含むことを特徴とする、実施形態 5 3 ~ 6 6 のいずれか 1 項に記載の成形品。

20

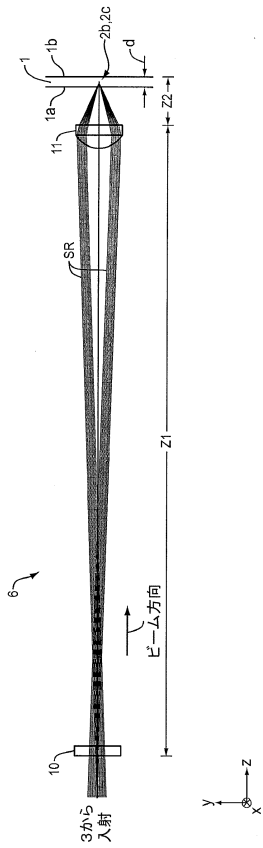
30

40

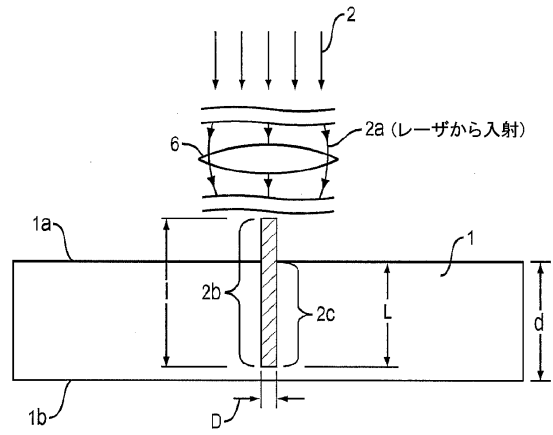
50

【図面】

【図 1】



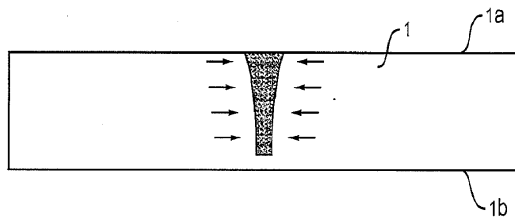
【図 2 A】



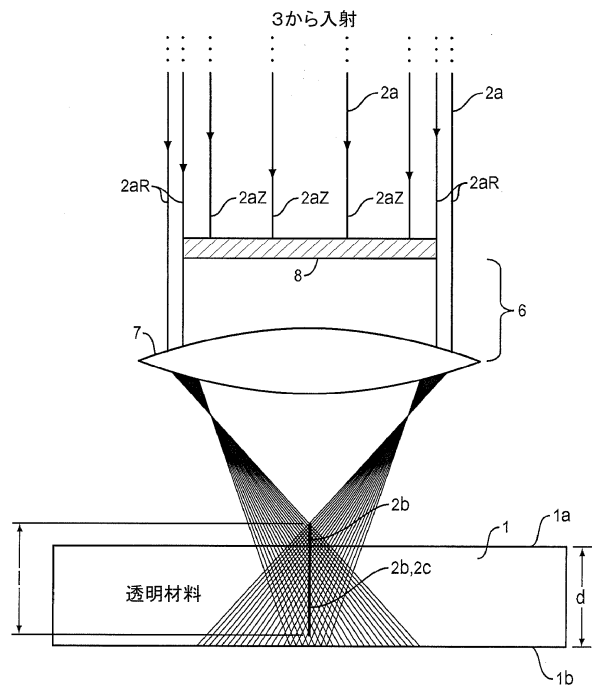
10

20

【図 2 B】



【図 3 A】

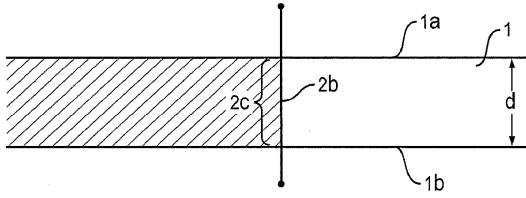


30

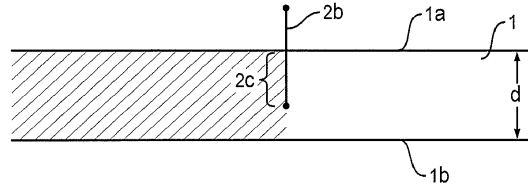
40

50

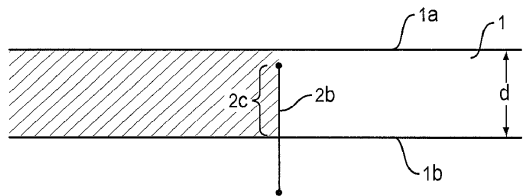
【図 3 B - 1】



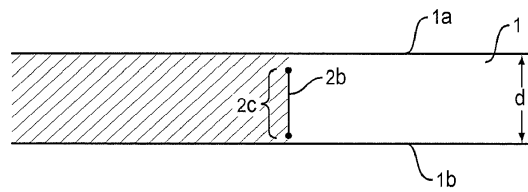
【図 3 B - 2】



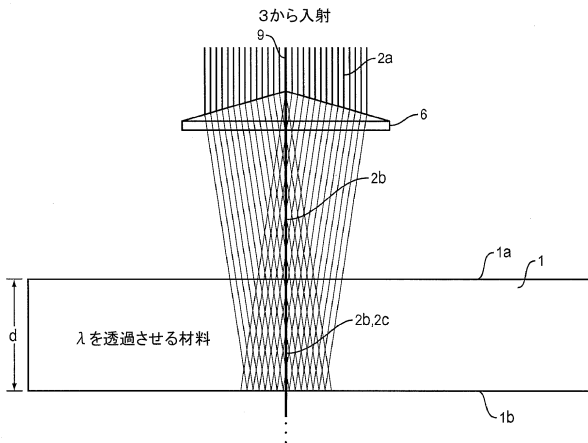
【図 3 B - 3】



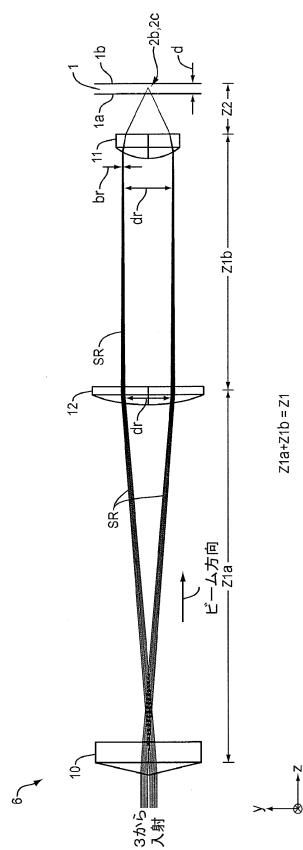
【図 3 B - 4】



【図 4】



【図 5 A】



10

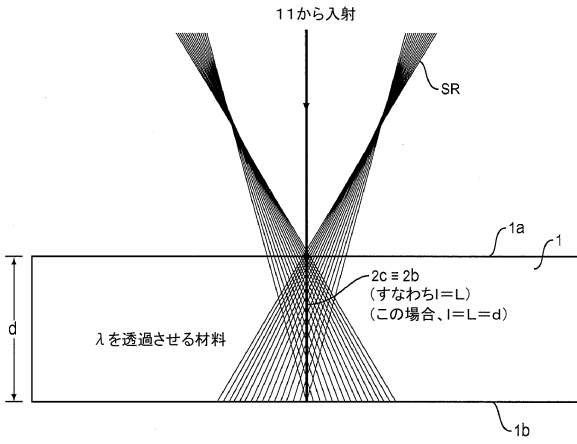
20

30

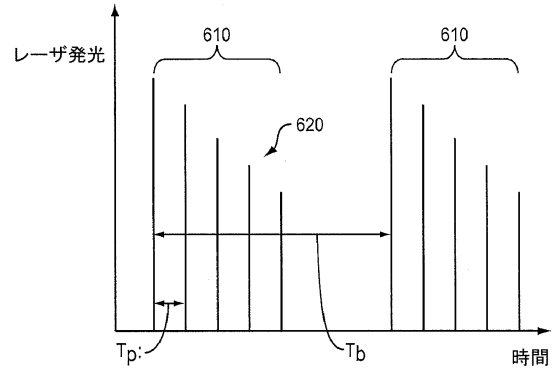
40

50

【図 5 B】

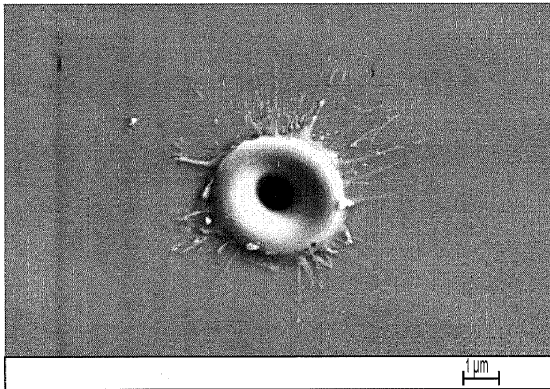


【図 6】

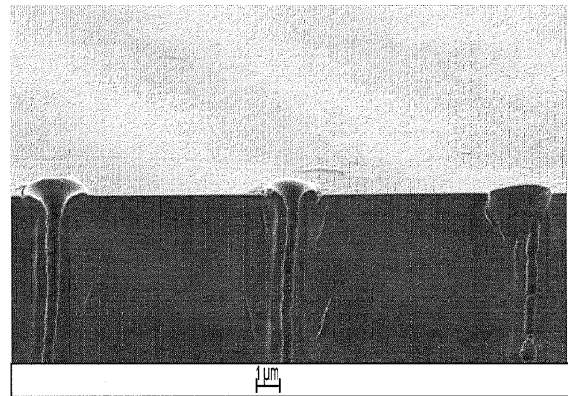


10

【図 7 A】



【図 7 B】



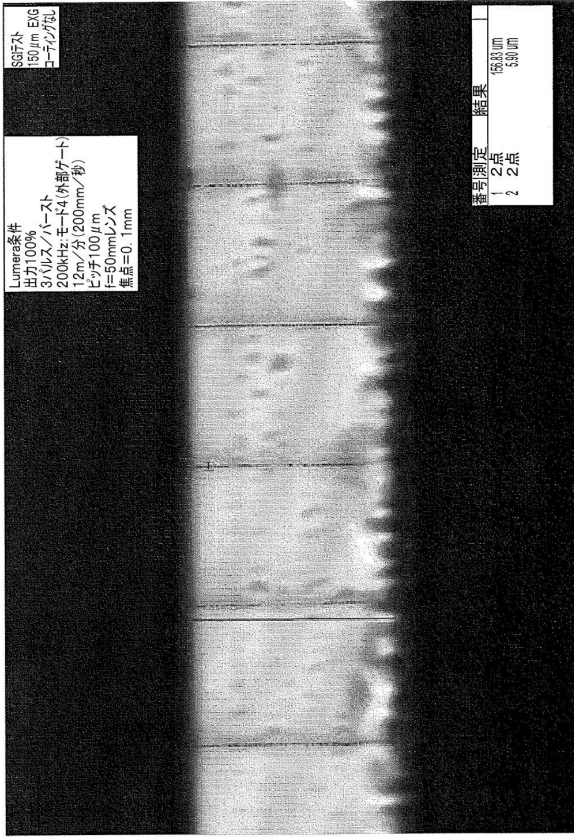
20

30

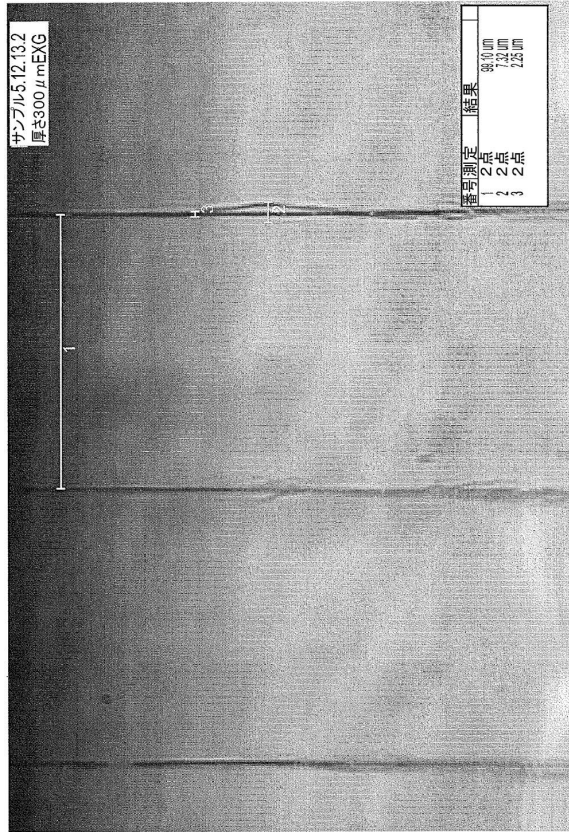
40

50

【 図 8 】



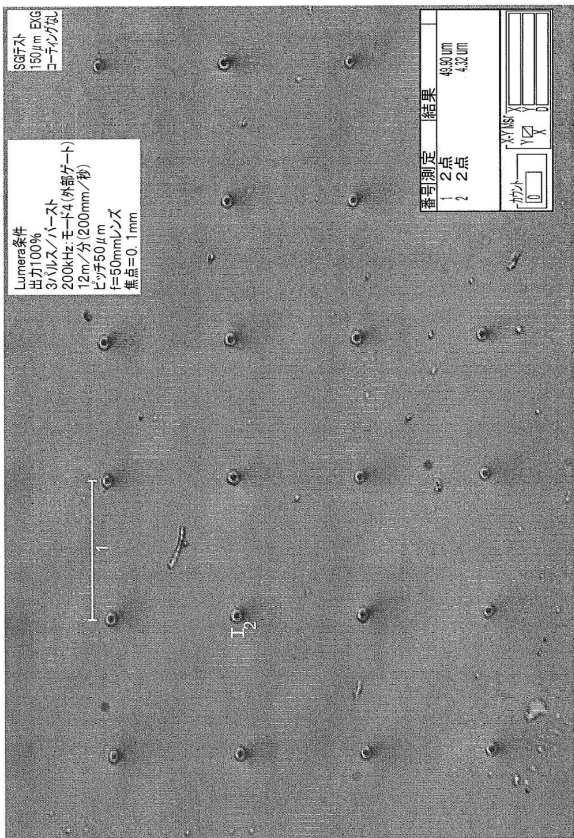
【 図 9 】



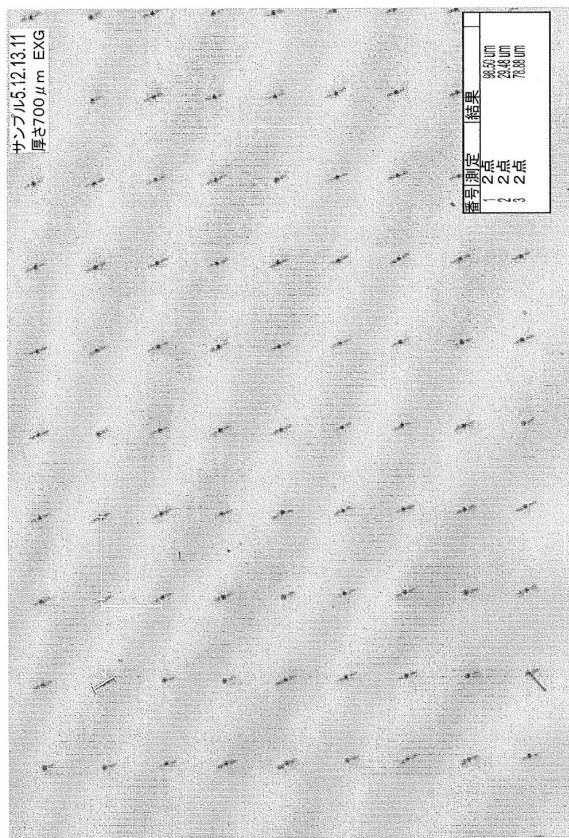
10

20

【 図 10 】



【 図 11 】

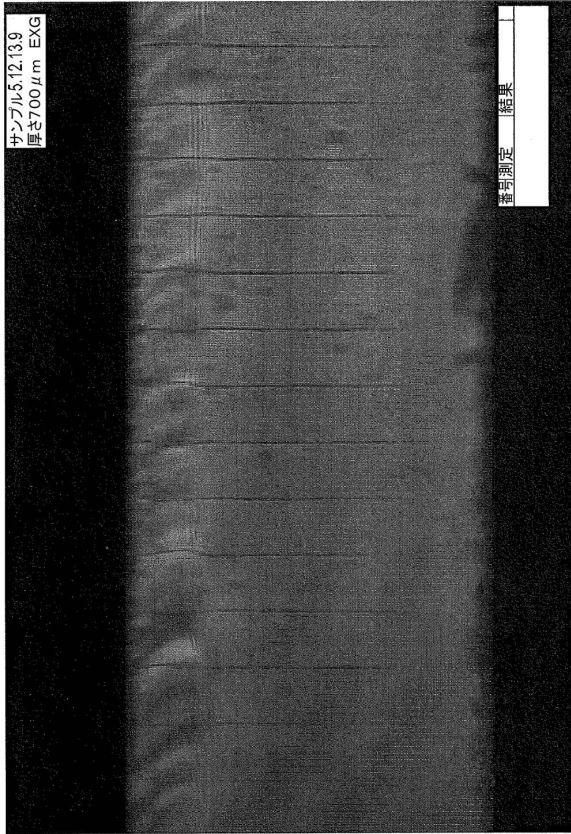


30

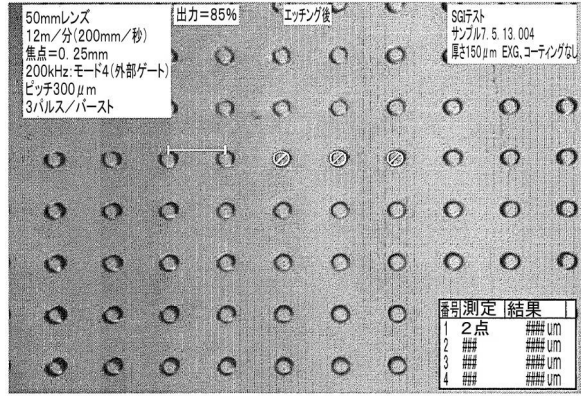
40

50

【 図 1 2 】



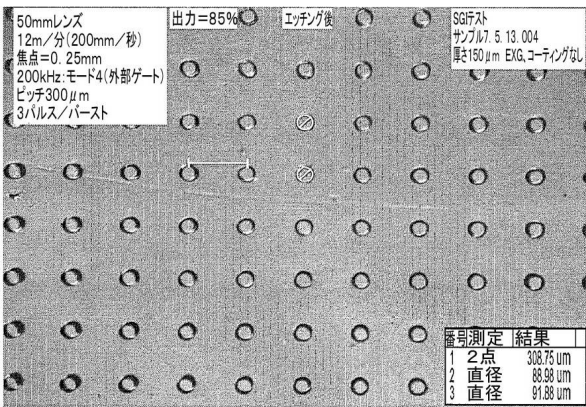
【 図 1 3 A 】



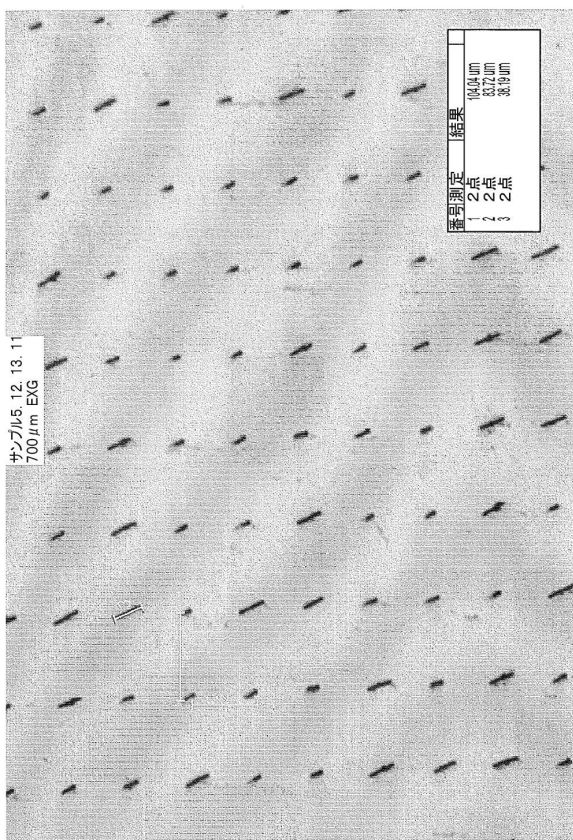
10

20

【 図 1 3 B 】



【 図 1 4 】

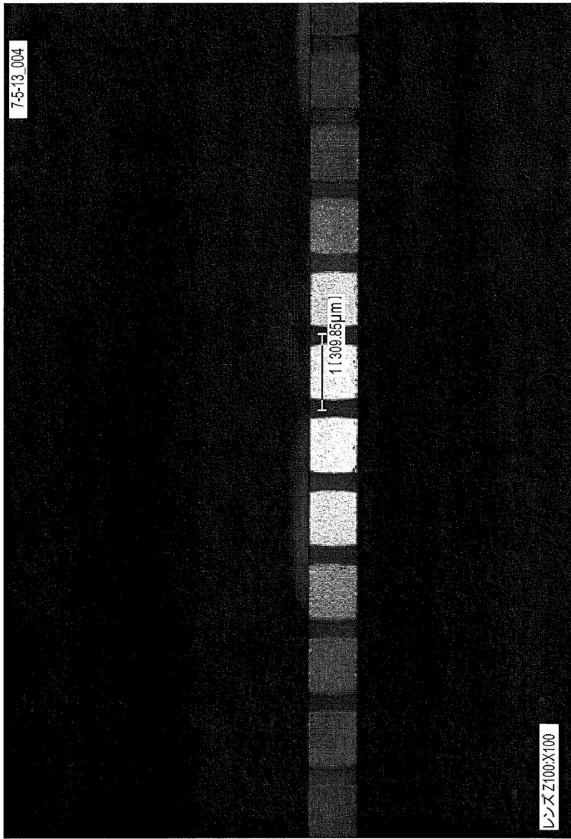


30

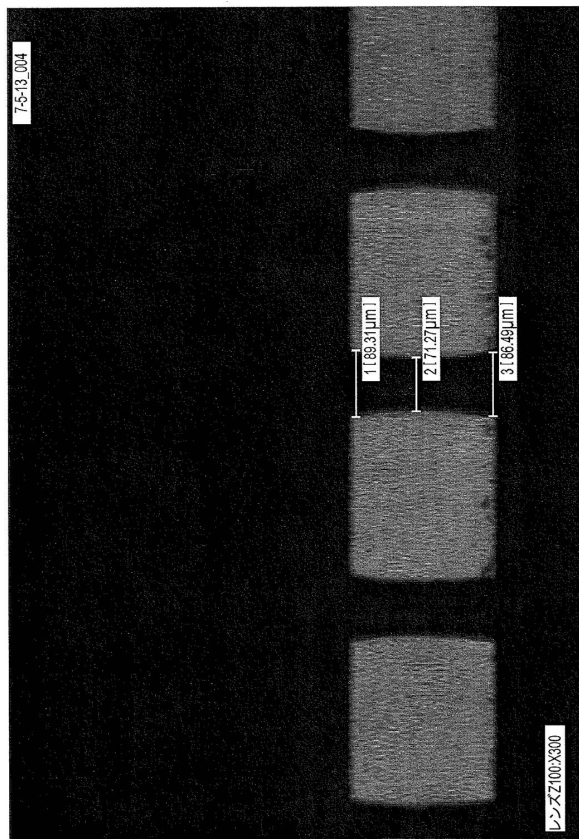
40

50

【 図 1 5 】



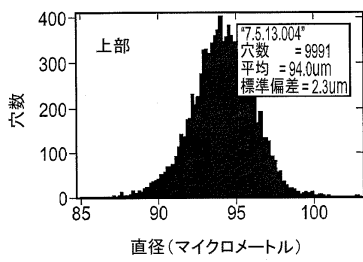
【 図 1 6 】



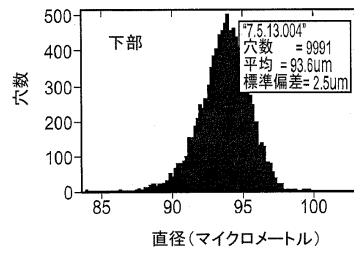
10

20

【 図 1 7 A 】



【 図 1 7 B 】

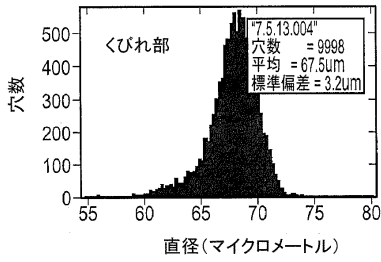


30

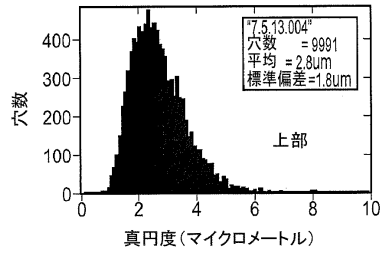
40

50

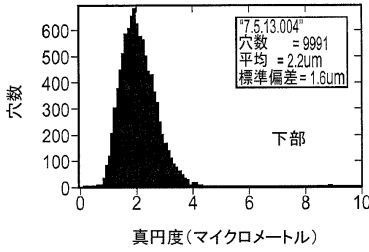
【図 17C】



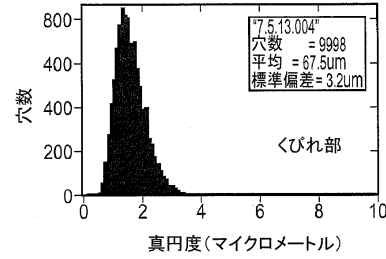
【図 18A】



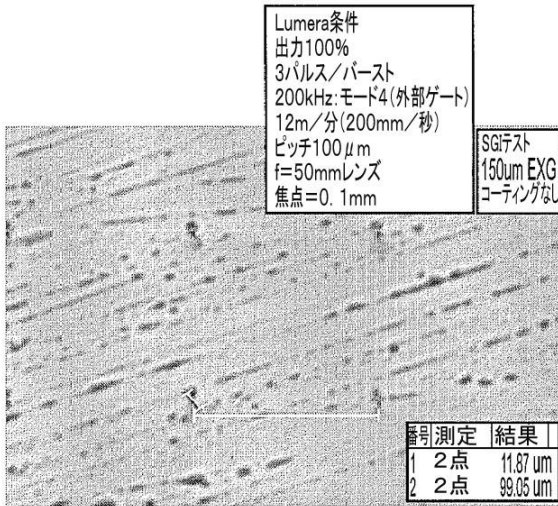
【図 18B】



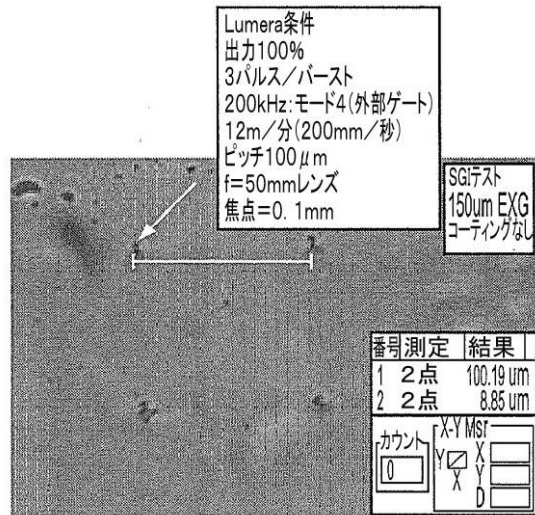
【図 18C】



【図 19A】



【図 19B】



10

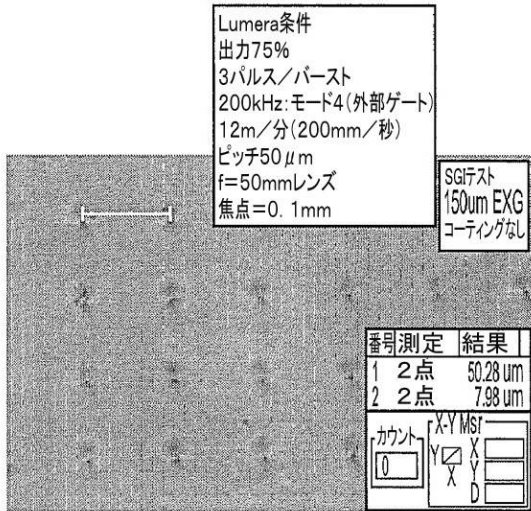
20

30

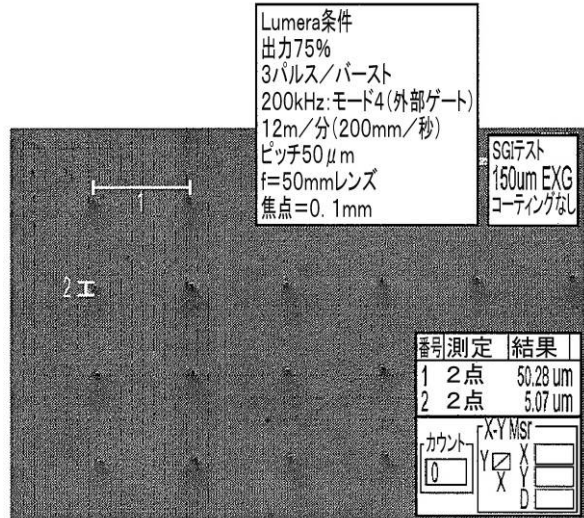
40

50

【図19C】

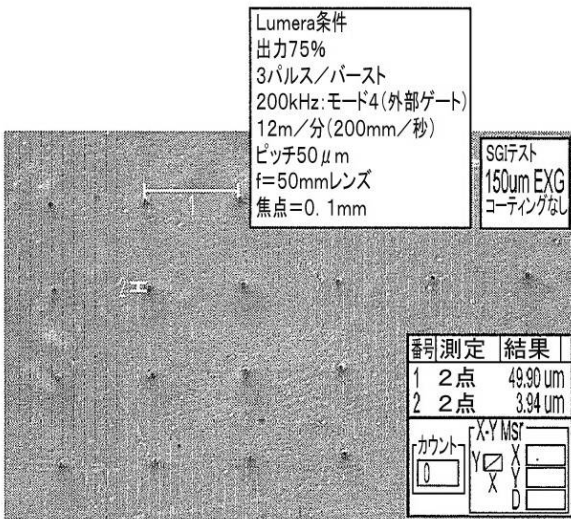


【図20A】

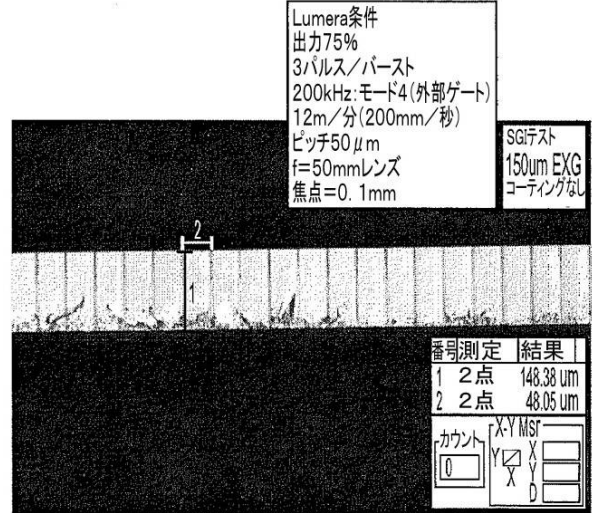


10

【図20B】



【図20C】



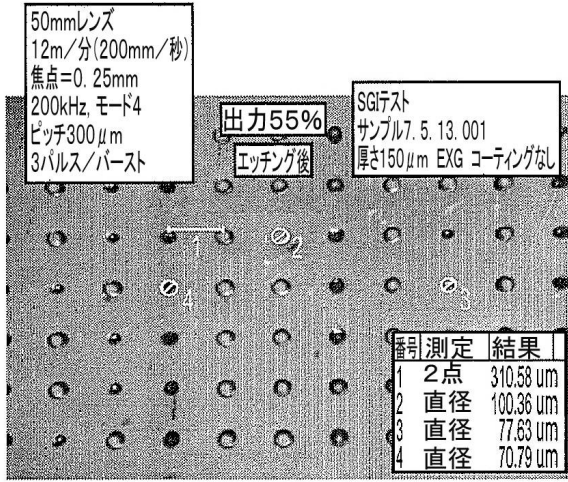
20

30

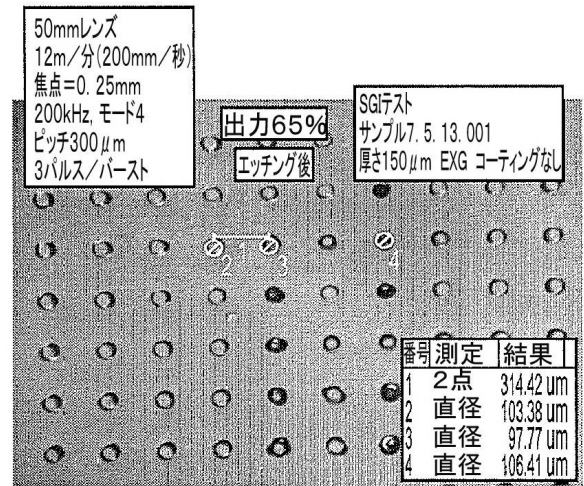
40

50

【図 2 1 A】

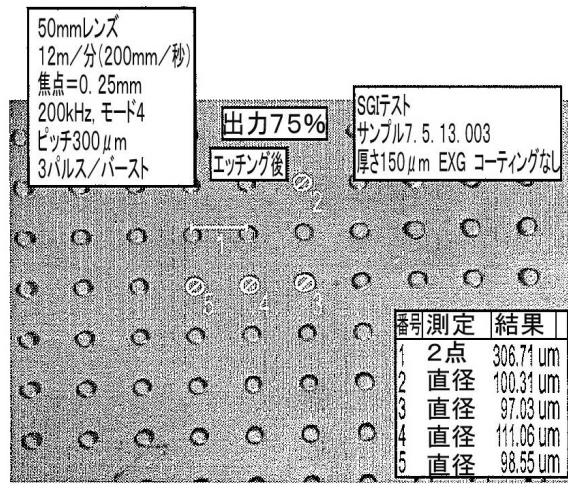


【図 2 1 B】

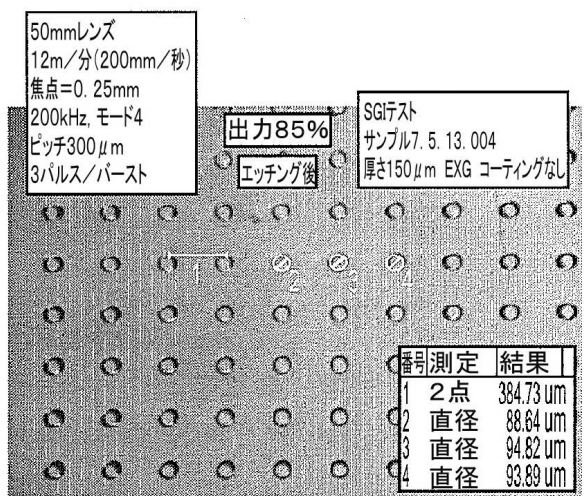


10

【図 2 1 C】



【図 2 1 D】



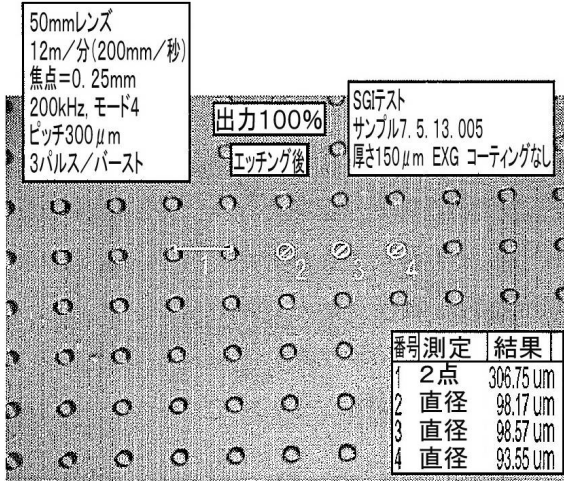
20

30

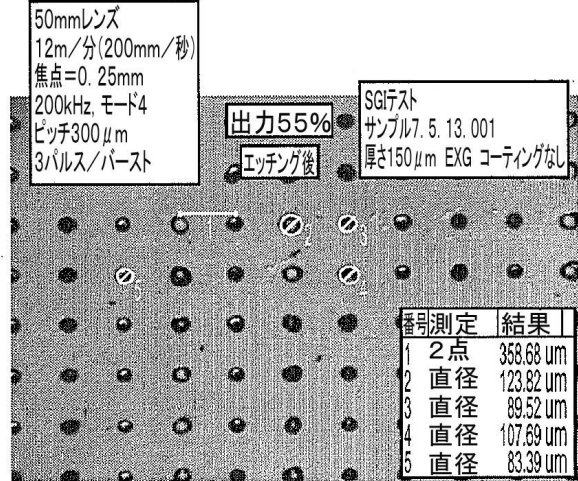
40

50

【 図 2 1 E 】

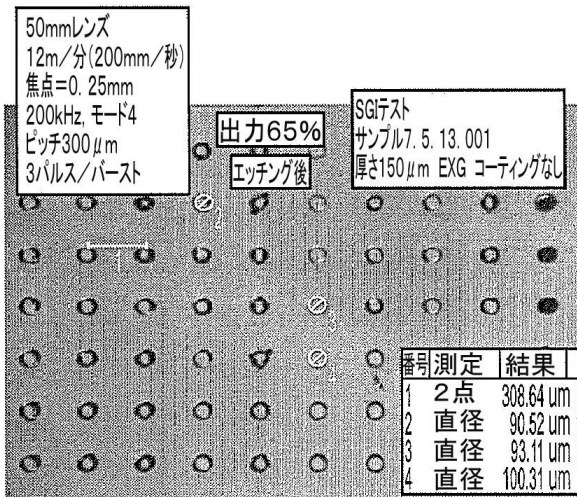


【 図 2 2 A 】

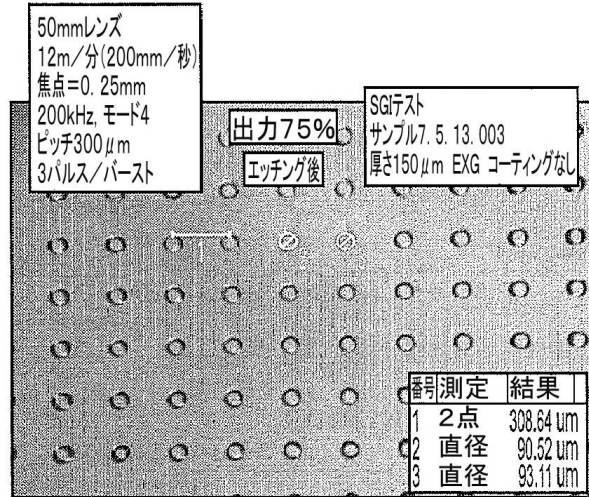


10

【 図 2 2 B 】



【 図 2 2 C 】



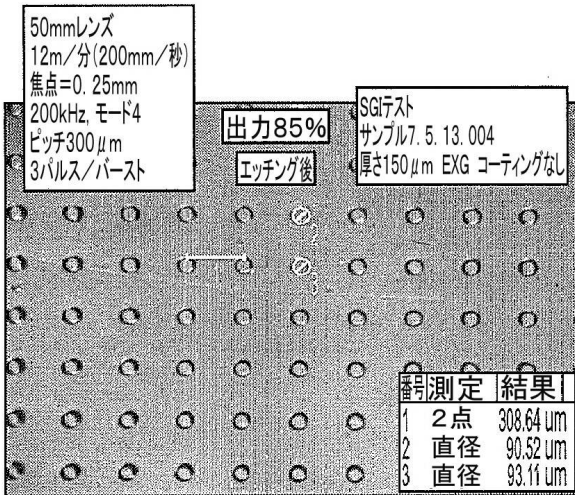
20

30

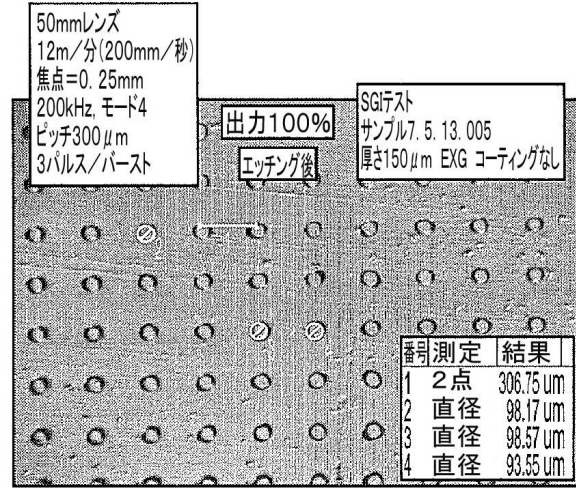
40

50

【 図 2 2 D 】

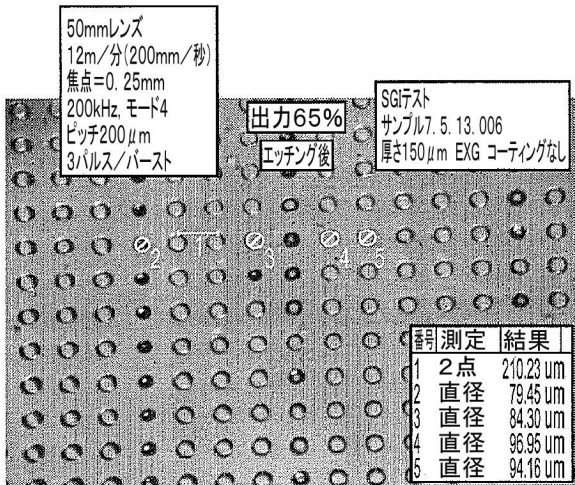


【 図 2 2 E 】

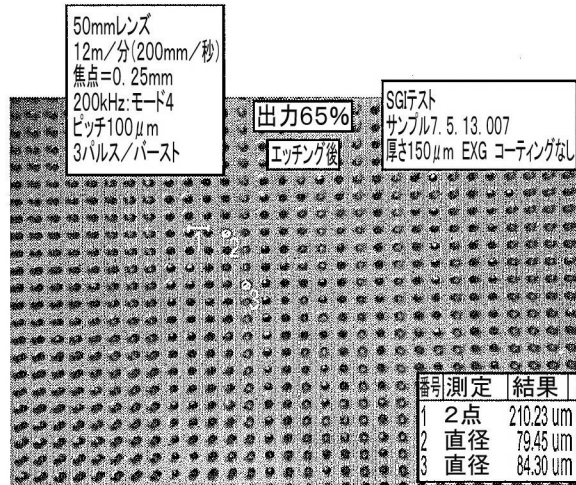


10

【 図 2 3 A 】



【 図 2 3 B 】



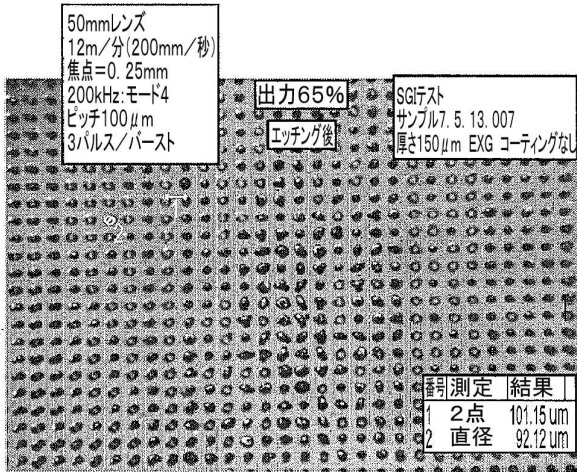
20

30

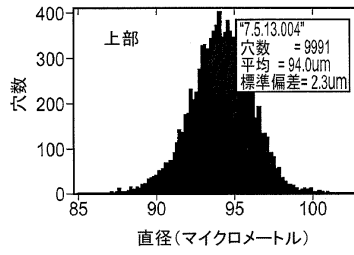
40

50

【 図 2 3 C 】

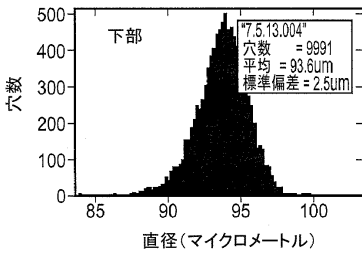


【 図 2 4 A 】

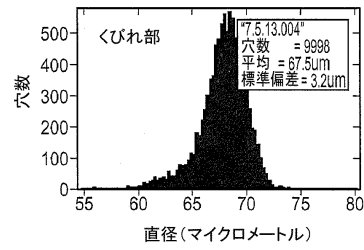


10

【 図 2 4 B 】

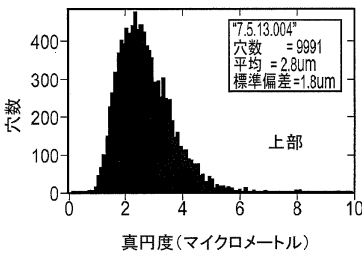


【 図 2 4 C 】

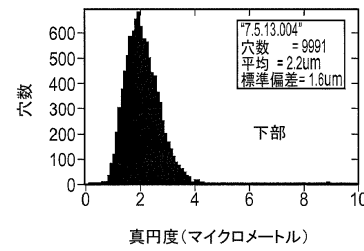


20

【 図 2 5 A 】



【 図 2 5 B 】

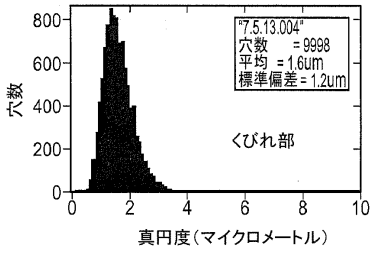


30

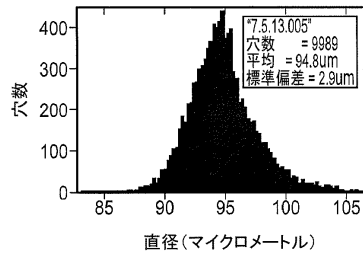
40

50

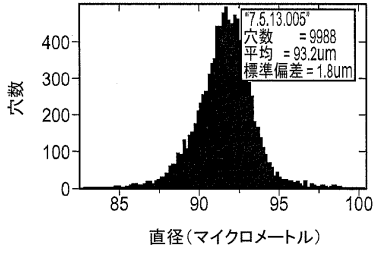
【図 2 5 C】



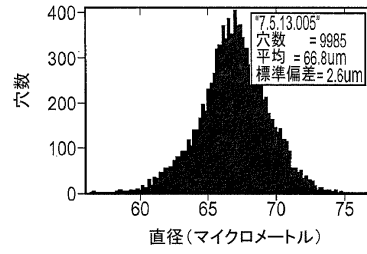
【図 2 6 A】



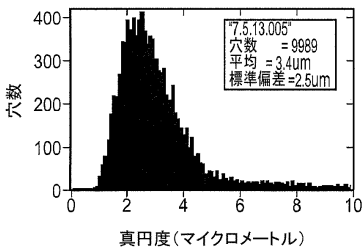
【図 2 6 B】



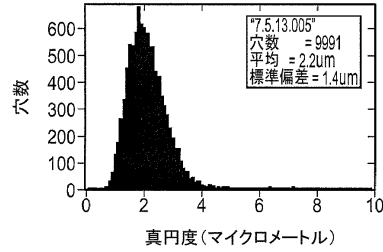
【図 2 6 C】



【図 2 7 A】



【図 2 7 B】



10

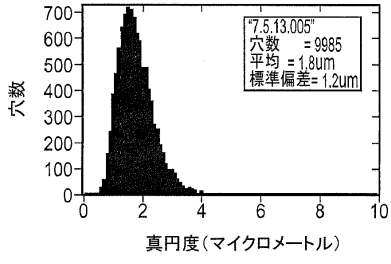
20

30

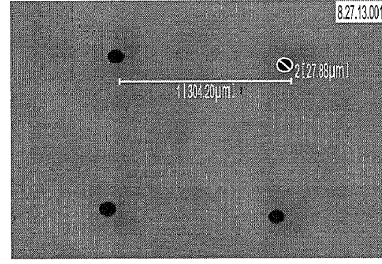
40

50

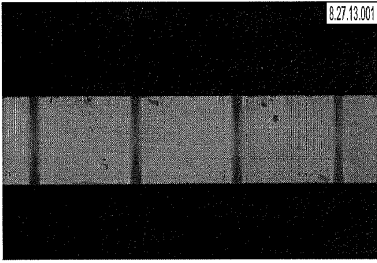
【図 27C】



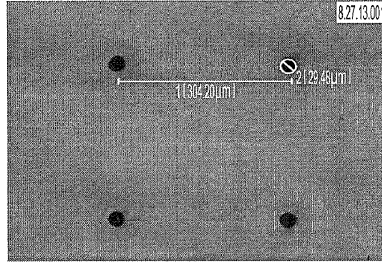
【図 28A】



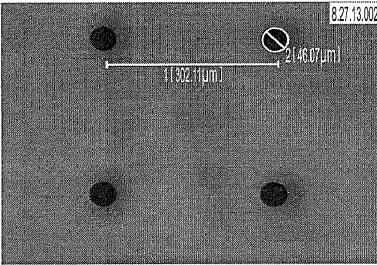
【図 28B】



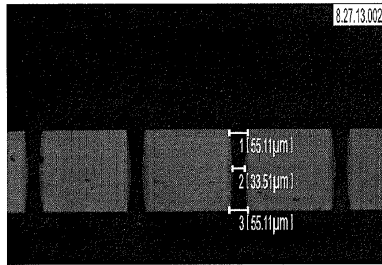
【図 28C】



【図 29A】



【図 29B】




10

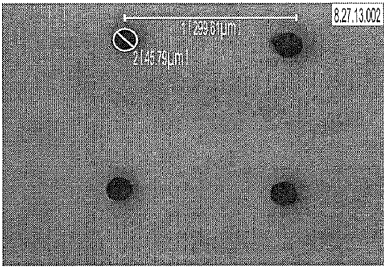
20


30

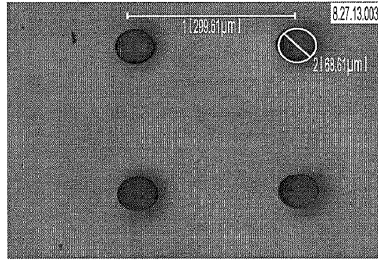
40


50

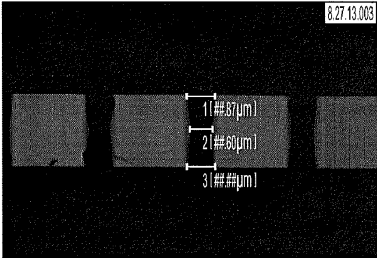
【 29 C】




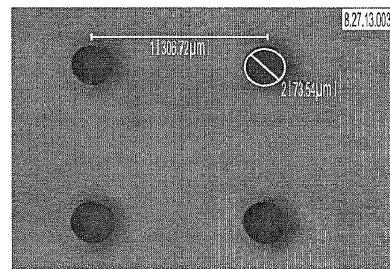
【 30 A】




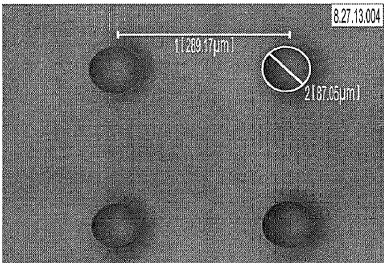
【 30 B】




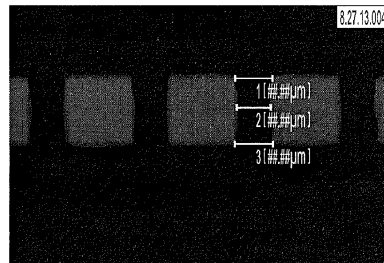
【 30 C】



【 31 A】



【 31 B】




10

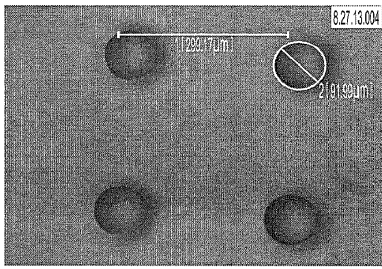
20


30

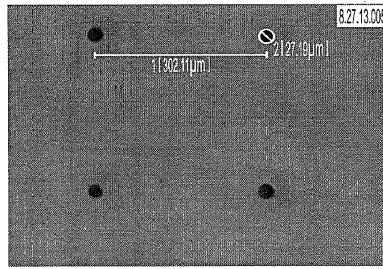
40


50

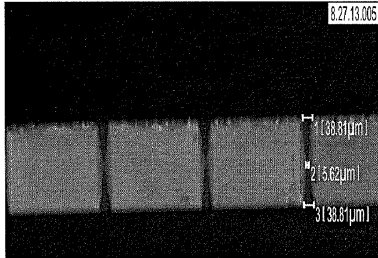
【 3 1 C】




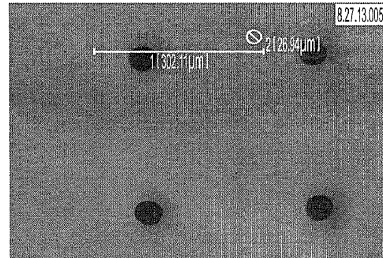
【 3 2 A】




【 3 2 B】

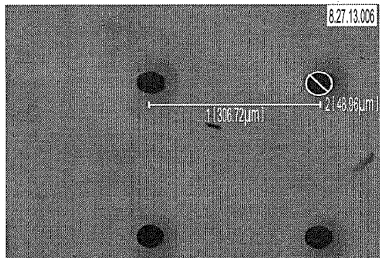



【 3 2 C】

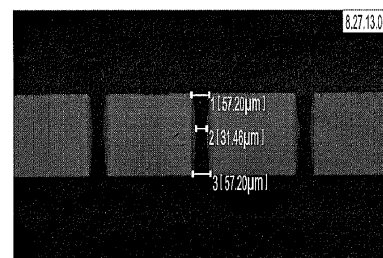


10

【 3 3 A】



【 3 3 B】




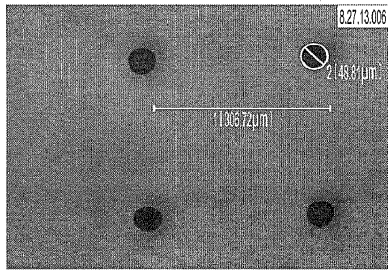
20


30

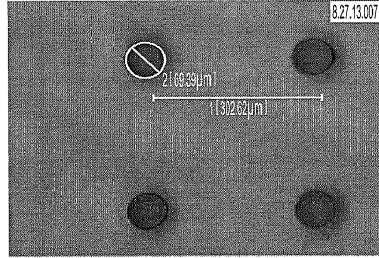
40


50

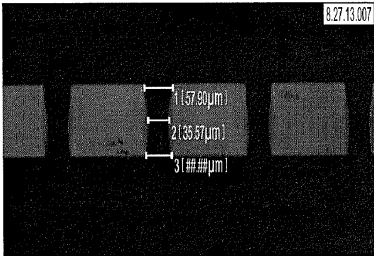
【 3 3 C】




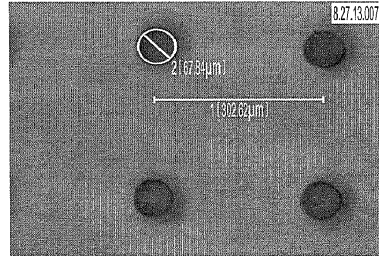
【 3 4 A】




【 3 4 B】

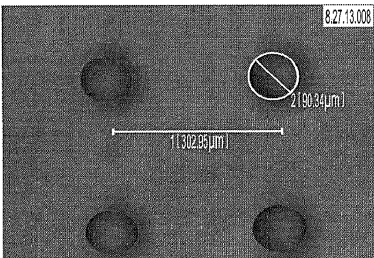



【 3 4 C】

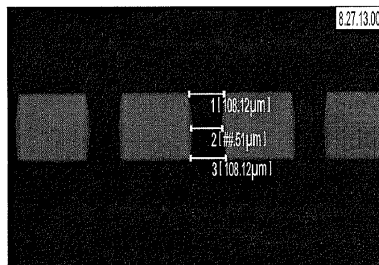


10

【 3 5 A】



【 3 5 B】




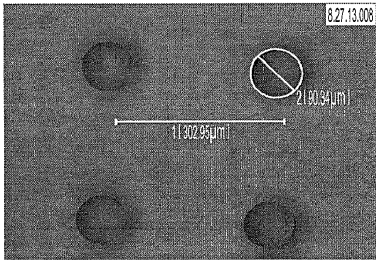
20


30

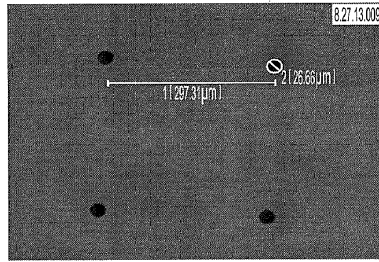
40


50

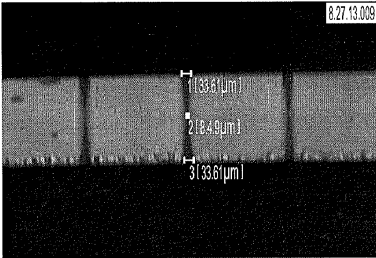
【 3 5 C】




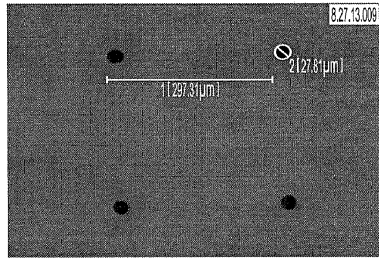
【 3 6 A】




【 3 6 B】

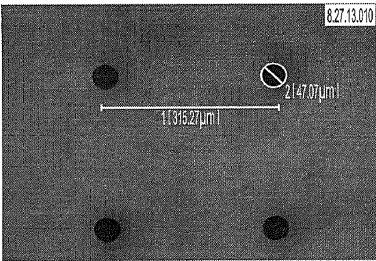



【 3 6 C】

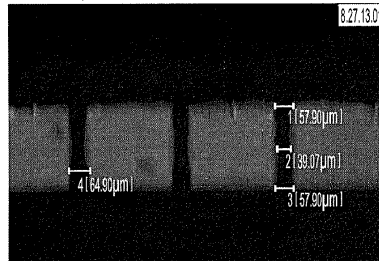


10

【 3 7 A】



【 3 7 B】




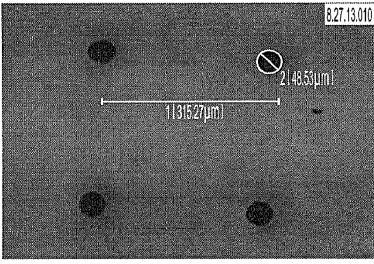
20


30

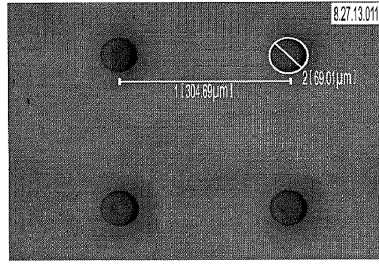
40


50

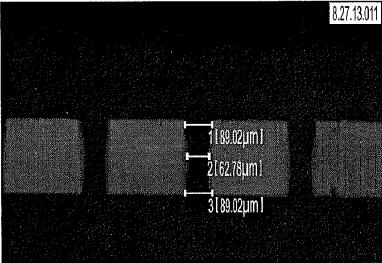
【 3 7 C】




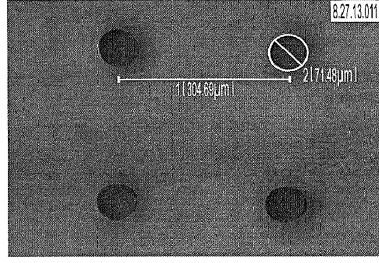
【 3 8 A】




【 3 8 B】

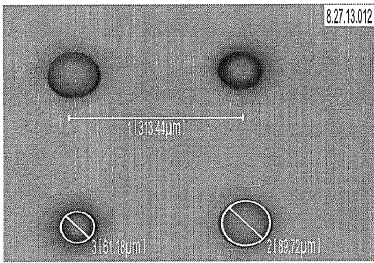



【 3 8 C】

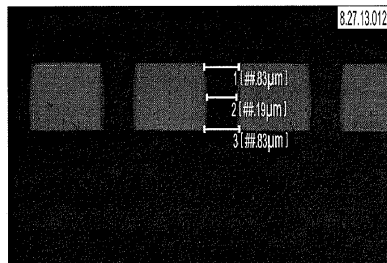


10

【 3 9 A】



【 3 9 B】




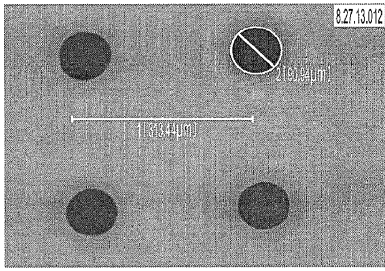
20


30

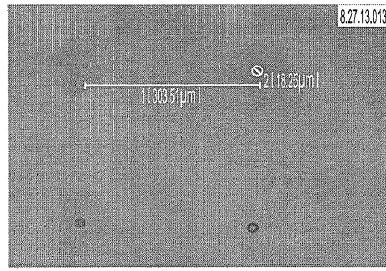
40


50

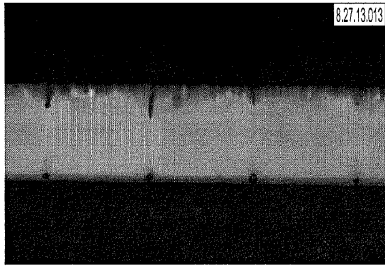
【 3 9 C】




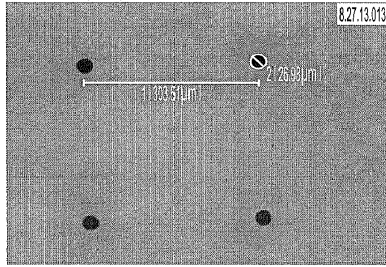
【 4 0 A】




【 4 0 B】

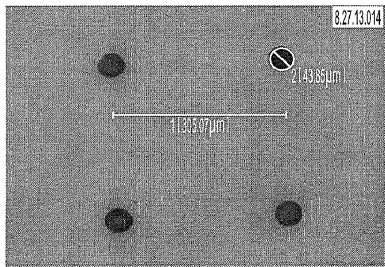



【 4 0 C】

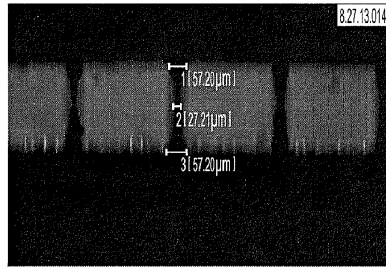


10

【 4 1 A】



【 4 1 B】




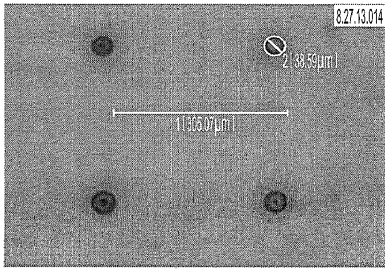
20


30

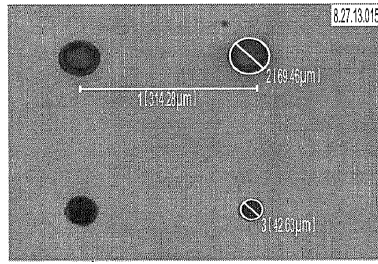
40


50

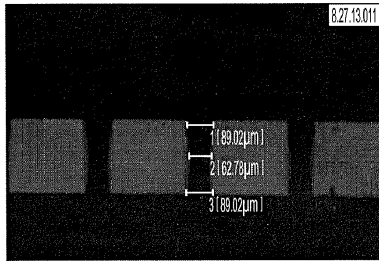
【 4 1 C】




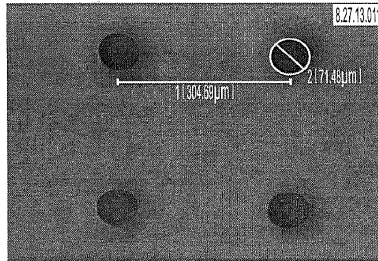
【 4 2 A】




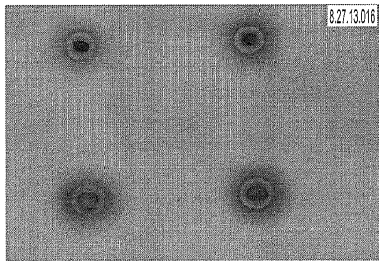
【 4 2 B】




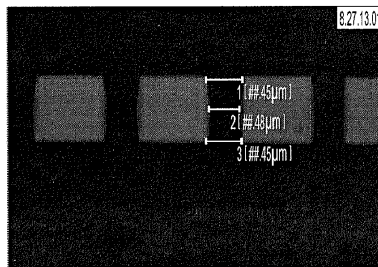
【 4 2 C】



【 4 3 A】



【 4 3 B】




10

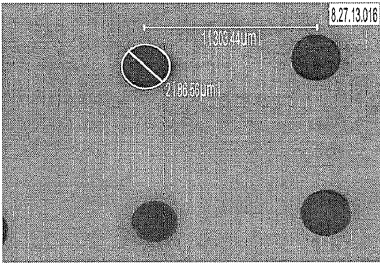
20


30

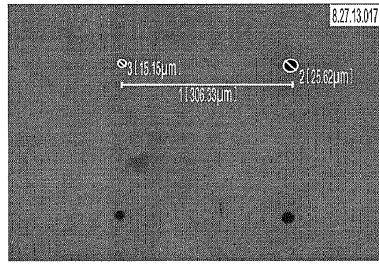
40


50

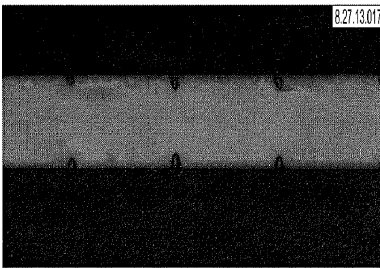
【 4 3 C】




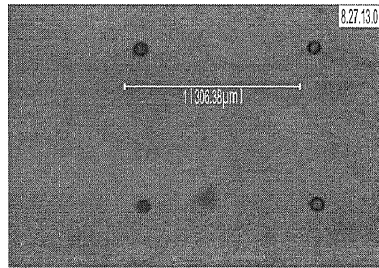
【 4 4 A】




【 4 4 B】

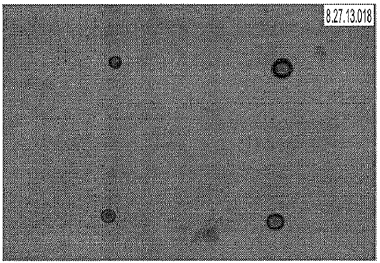



【 4 4 C】

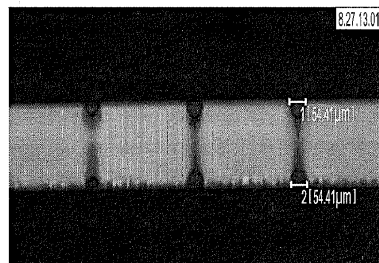


10

【 4 5 A】



【 4 5 B】




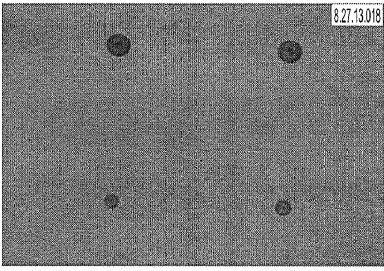
20


30

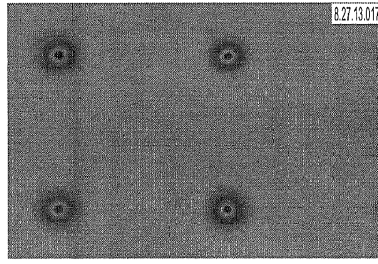
40


50

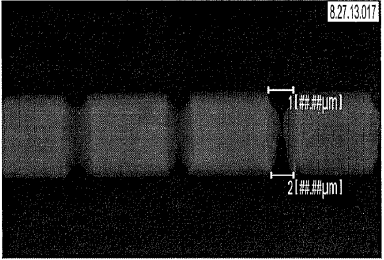
【 4 5 C】




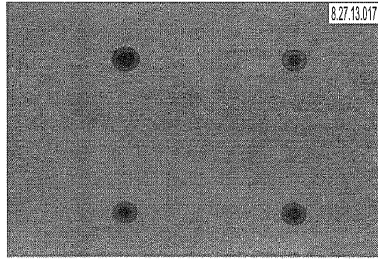
【 4 6 A】




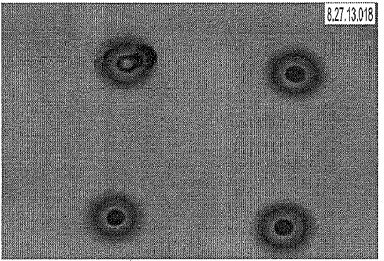
【 4 6 B】




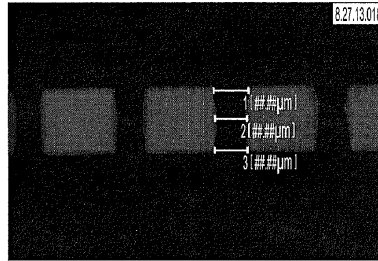
【 4 6 C】



【 4 7 A】



【 4 7 B】



10

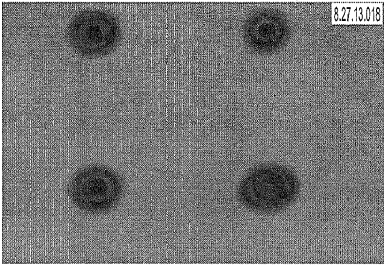
20

30

40

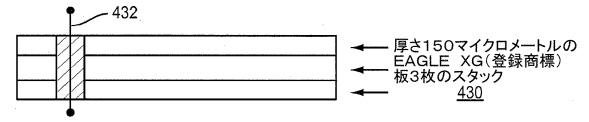
50

【図 47C】

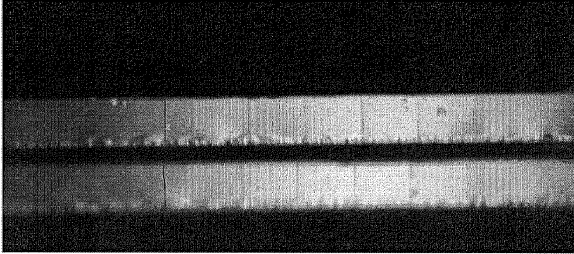


【図 48】

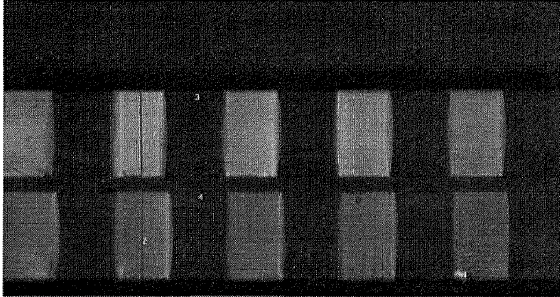
スタックの3枚の板全部を貫通する穿孔を形成する焦線



【図 49】

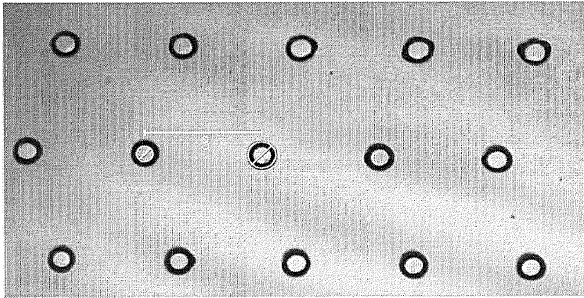


【図 50】

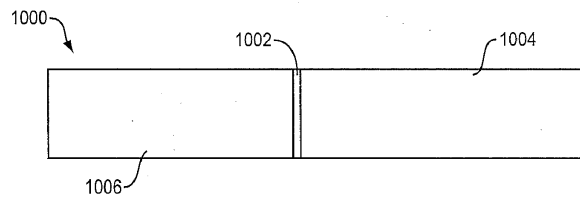


10

【図 51】



【図 52A】



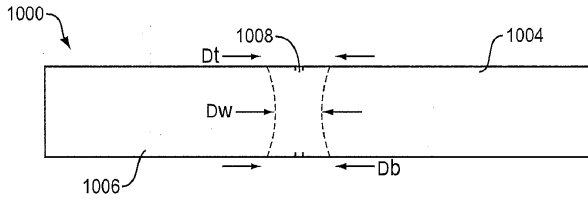
20

30

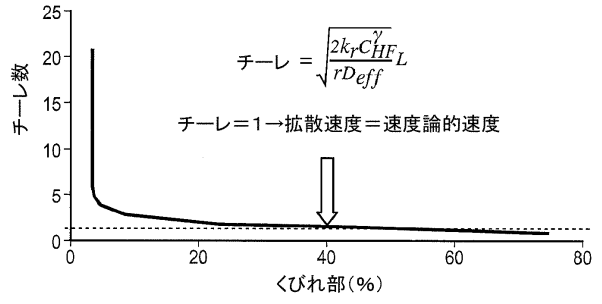
40

50

【図 5 2 B】

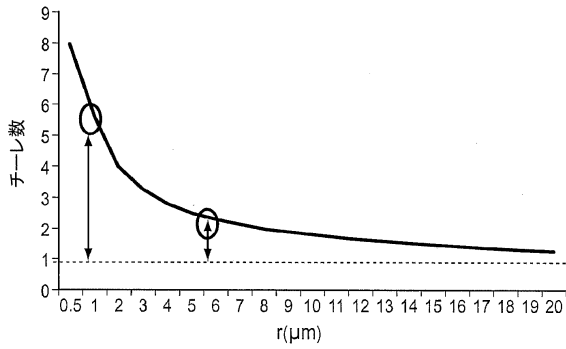


【図 5 3】

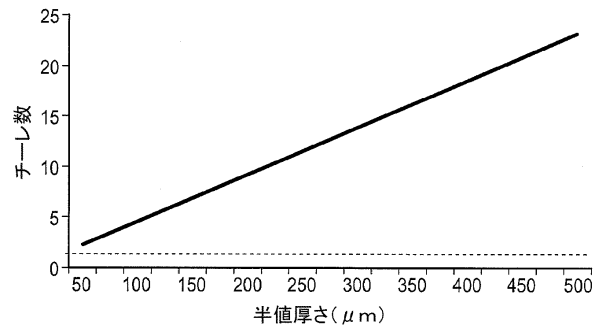


10

【図 5 4】

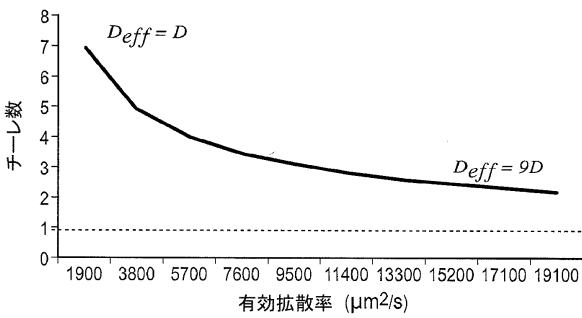


【図 5 5】

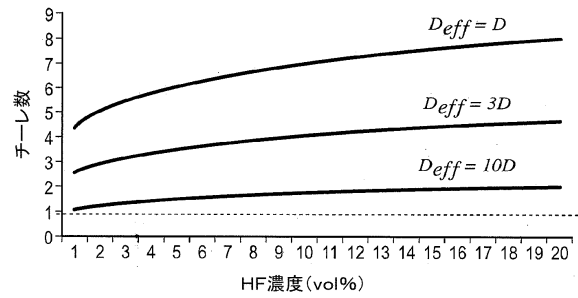


20

【図 5 6】



【図 5 7】



30

40

50

【 5 8 】



50 μm

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

(31)優先権主張番号 62/073,191

(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)

(31)優先権主張番号 14/535,800

(32)優先日 平成26年11月7日(2014.11.7)

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

30 コーニング ホーンビー ロード 4226

(72)発明者 カルロス エー ポンズ シーパーマン

アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 02141 ケンブリッジ コーネリアス ウェイ 20

(72)発明者 シヤマラ シャンミューガム

アメリカ合衆国 ニューヨーク州 14870 ペインテッド ポスト ケイティ レイン 6

(72)発明者 セルジオ ツダ

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 スィグモンド ヴァルガ

アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 02139 ケンブリッジ アルバニー ストリート 224
アパートメント 212

(72)発明者 ロバート スティーヴン ワグナー

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 須藤 英輝

(56)参考文献 特開2009-142886(JP,A)

米国特許出願公開第2013/0247615(US,A1)

特表2013-528492(JP,A)

特表2011-517622(JP,A)

国際公開第2007/096958(WO,A1)

特開2013-144613(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

C03B 33/09

C03C 15/00-23/00

B23K 26/00-26/70

H05K 3/00

H05K 3/46

B26F 1/00-3/16