

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6512612号
(P6512612)

(45) 発行日 令和1年5月15日(2019.5.15)

(24) 登録日 平成31年4月19日(2019.4.19)

(51) Int.Cl.	F I	
B 2 3 K 26/06 (2014.01)	B 2 3 K 26/06	
B 2 3 K 26/382 (2014.01)	B 2 3 K 26/382	
B 2 3 K 26/38 (2014.01)	B 2 3 K 26/38	Z
H O 1 S 3/00 (2006.01)	H O 1 S 3/00	B
H O 1 S 3/10 (2006.01)	H O 1 S 3/10	Z

請求項の数 17 (全 19 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2016-524023 (P2016-524023)	(73) 特許権者	506316557
(86) (22) 出願日	平成26年10月16日(2014.10.16)		サントル ナショナル ドゥ ラ ルシェ
(65) 公表番号	特表2016-535675 (P2016-535675A)		ルシュ シアンティフィック
(43) 公表日	平成28年11月17日(2016.11.17)		フランス国 75794 パリ セデック
(86) 国際出願番号	PCT/EP2014/072255		ス 16、リュ ミシエル - アンジュ
(87) 国際公開番号	W02015/055779	(74) 代理人	100105924
(87) 国際公開日	平成27年4月23日(2015.4.23)		弁理士 森下 賢樹
審査請求日	平成29年9月4日(2017.9.4)	(72) 発明者	クルヴォワジェ、フランソワ
(31) 優先権主張番号	1360131		フランス国 エフ-25870 キュセー
(32) 優先日	平成25年10月17日(2013.10.17)		シュール-ロニヨン、リュ デゥ ヴァル
(33) 優先権主張国	フランス (FR)	(72) 発明者	ラクール、ピエール-アンブロワーズ
			フランス国 エフ-25000 ブサンゾ
			ン、リュ デ ベルフォート 73
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ微細加工方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の材料でできた試料(10)のレーザ微細加工用の装置であって、
 所定の入射ビームから出発して、集光モジュールの光軸に概ね沿って配向される集束シリンドラにしたがって集光され、前記集束シリンドラの側面を規定する環状領域(410)で最大値を持つ強度分布を有する非回折ビームの生成を可能とする集光モジュール(603, 607)と、
 少なくとも一つの第1光パルス(I_1)の放射手段(601-602, 701-702)であって、前記第1光パルスが前記試料の材料の透過帯域に含まれるスペクトル帯域を有し、したがって前記材料中での線形吸収が制限され、前記集光モジュールにより前記試料中に集光した後、前記集束シリンドラの前記側面に位置する前記試料の領域内で多光子吸収による自由電荷のプラズマを生成するように設計される放射手段と、を備えることを特徴とする装置。

【請求項 2】

前記第1光パルスは、100ピコ秒より小さい時間幅を有することを特徴とする請求項1に記載の装置。

【請求項 3】

前記放射手段は、第1光強度閾値より高い所定の光強度の第1光パルスまたは第1光パルス列の放射を可能とし、前記第1光強度閾値は、プラズマ形成位置にて前記材料の物理化学的特性の変化を生じさせるのに十分であることを特徴とする請求項1または2に記載

の装置。

【請求項 4】

前記光強度は、プラズマ形成位置にて前記材料のアブレーションを生じさせるのに十分な第 2 光強度閾値より高いことを特徴とする請求項 3 に記載の装置。

【請求項 5】

前記放射手段は、プラズマ形成位置にて空間的に重畳されるように設計される少なくとも第 2 電磁波 (E_2) の放射を可能にすることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の装置。

【請求項 6】

前記放射手段は、単一レーザー光源 (701) と、前記レーザー光源から放射される光波から出発して第 1 光パルスおよび少なくとも第 2 光パルスの生成を可能にする時間領域調整モジュール (702) と、を備えることを特徴とする請求項 5 に記載の装置。

10

【請求項 7】

前記集光モジュールは、空間周波数の空間における環状の強度分布と、空間周波数の空間における $(k_r, \quad) = N$ の形式の位相とを有するビームの生成を可能とし、 (k_r, \quad) が円筒座標であり、N がゼロではない相対的な整数であることを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 8】

前記集光モジュールは、前記試料中に集光した後に複数の集束シリンダの同時形成を可能にすることを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の装置。

20

【請求項 9】

前記放射手段により放射されるパルスの偏光を調整する手段をさらに備えることを特徴とする請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 10】

集束シリンダの内側に含まれる材料を排出する手段をさらに備えることを特徴とする請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 11】

所定の透過帯域を有する材料でできた試料 (10) をレーザー微細加工する方法であって、

前記材料の透過帯域内に含まれるスペクトル帯域を有し、したがって前記材料中での線形吸収が制限される少なくとも第 1 パルスを放射すること (101) と、

30

前記試料中に集光した後に集束シリンダにしたがって集光され、前記集束シリンダの側面を規定する環状領域 (410) で最大値を持つ強度分布を有する非回折ビームの形成を可能にする前記第 1 パルスを空間的に調整すること (103) と、を備え、

前記非回折ビームの光強度は、前記集束シリンダの前記側面に位置する前記試料の領域内での多光子吸収による自由電荷のプラズマの生成を可能にすることを特徴とする方法。

【請求項 12】

プラズマ形成位置にて前記材料の物理化学的特性の変化を生じさせるのに十分な光強度を持つ第 1 光パルスまたは第 1 光パルス列を放射することを備えることを特徴とする請求項 11 に記載の方法。

40

【請求項 13】

前記光強度は、プラズマ形成位置にて前記材料のアブレーションを生じさせるのに十分であることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記材料の透過帯域内に含まれるスペクトル帯域を有し、自由電荷のプラズマの吸収による前記材料の加熱を生じさせるようにプラズマ形成位置にて空間的に重畳される少なくとも第 2 電磁波を放射することをさらに備えることを特徴とする請求項 11 に記載の方法。

【請求項 15】

少なくとも一つの貫通穴を形成するための所定の材料でできた試料の微細穴開けに適用

50

される方法であって、

第1光パルスの空間的な調整パラメータの制御により前記貫通穴の直径を制御することと、

前記試料および前記非回折ビームの相対的な位置を制御することと、を備えることを特徴とする請求項11から14のいずれか一項に記載の方法。

【請求項16】

前記貫通穴を形成するために集束シリンダの内側に含まれる材料を排出することをさらに備えることを特徴とする請求項15に記載の方法。

【請求項17】

試料の切断に適用される方法であって、切断面(100)に沿って前記非回折ビームを変位させることを備えることを特徴とする請求項11から14のいずれか一項に記載の方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高速レーザー微細加工のための方法および装置に関し、特にマイクロエレクトロニクス用材料の微細穴あけ加工に適する。

【背景技術】

【0002】

マイクロおよびナノエレクトロニクス用および太陽光発電用の半導体ウェハに、または、ウェハを貫通するチャンネルまたは「ビア」を開けするための様々な技術が知られている。

20

【0003】

これらの穴あけ加工技術は、例えば、イオンビームの集束(「Eビーム」と称されるプロセス)、または、その後に深反応性イオンエッチング(またはDRIE)が続くフォトリソグラフィを備える。高真空を必要とするEビーム技術は100nmより小さい直径の穴に適用され、加工が遅い。リソグラフィ技術はマスクの事前形成を必要とする；したがって、柔軟性に非常に乏しくコストがかかる。

【0004】

誘電体材料(例えばガラス)のマイクロ/ナノ構造形成の分野において、発明者らは、ベッセルビーム形式の「非回折」の空間形状を有するフェムト秒レーザービームの使用が材料の深部に蓄積されるエネルギーの制御に近づくための手段を与えることを示している。この技術は、特に、アブレーションされる材料を排出するのに十分な強度であり、かつ、局所化された微小爆発の生成を可能にする(例えば、M.K. Bhuyan et al., "High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams", Appl. Phys. Lett. 97, 081102 (2010)を参照)。したがって、単一レーザーパルスは、非常に高いアスペクト比のナノホール(ナノ管)の形成を可能にする。しかしながら、この技術は数百ナノメートルより小さい直径の穴に限定される。

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0005】

本発明の目的は、大きな直径(1マイクロより大きい)の貫通穴の高速穴あけ加工のための、特にマイクロエレクトロニクスにおける透明材料の微細加工に適用可能な、微細加工装置および方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

第1態様によれば、本発明は、所定の材料でできた試料のレーザー微細加工用の装置に関する。この装置は、所定の入射ビームから出発して、当該集光モジュールの光軸に概ね沿って配向される集束シリンダにしたがって集光される非回折ビームの生成を可能とする集光モジュールと、前記集光モジュールにより前記試料中に集光した後に試料の体積中の前

50

記集束シリンダの側面の位置にて多光子吸収による自由電荷のプラズマを生成するように設計される少なくとも一つの第1光パルス (I_1) の放射手段と、を備える。

【0007】

加工に望ましい材料の透過帯域に含まれるスペクトル帯域を第1光パルスが有するように放射手段を選択することにより、材料中での線形吸収が限定され、その結果、試料中での非線形多光子吸収により与えられるプロセスのおかげで材料の深さ方向の加工が可能となる。

【0008】

材料の透過帯域は、媒質の吸収係数が所定の値、例えば 0.5 cm^{-1} より小さいスペクトル帯域として定義され、厚さ 1 cm の媒質における 60% より大きい透過率に対応する。したがって、透明なスペクトル帯域は、例えばシリコン型の半導体材料でできた試料であれば 1100 nm を超えるスペクトル帯域である。それは、ガラスなどの誘電体材料であれば可視域および赤外域のスペクトル全体をカバーする。言い換えれば、第1光パルスのスペクトル帯域は、少なくとも二光子の光遷移によってのみ電子遷移が生じることができるように選択される。

10

【0009】

出願人らは、第1態様に係る装置が特に、集束シリンダにしたがって集光される非回折ビームの生成のおかげで、大きい直径の穴 (典型的に 1 μm より大きい) を形成するような試料の加工を可能にする一方で、単純な環状の回折ビームの伝搬から生じうるホットスポットおよび多重フィラメンテーションの現象を同時に防ぐことを示している。

20

【0010】

このような非回折ビームは、空間周波数 k_r の空間において、環状の強度分布および $(k_r, \theta) = N$ の形式の位相 (「ボルテックス位相」と称される) を有するビームであることが好ましい。ここで (k_r, θ) は円筒座標であり、 N は渦のトポロジカルチャージと呼ばれるゼロではない相対的な整数である。

【0011】

好ましくは、空間周波数 k_r の空間において、強度分布がゼロではない空間周波数 k_{r0} において強度最大値を示し、 $k_r = 0$ と $k_r = k_{r0} / 5$ の間に含まれる空間周波数において無視できる強度 (言い換えれば、強度最大値の 20 分の 1 以下) を示す。

【0012】

一変形例によれば、ベッセル - ボルテックスビームと呼ばれるこのような非回折ビームは、集光モジュールの光軸近傍の集光領域にて、 $I(r) = |J_N(k_0 r \sin \theta)|^2$ の径方向プロファイルにより近似的に記述されうる光強度 $I(r)$ を有する。ここで、 r は径方向の座標であり、 J_N は第1種ベッセル関数の N 次に対応する関数であり、 k_0 はレーザの中心波長 λ_0 での波数ベクトルであり、 θ はビームの円錐角と呼ばれる。ベッセル - ボルテックスビームのパラメータの選択は、集束シリンダの幾何学的配置の調整を可能にする。

30

【0013】

一変形例によれば、ベッセル - ボルテックスビームは、入射レーザビームから出発して、空間位相 $(k_r, \theta) = N$ を与える渦位相板の後にアキシコン型レンズを連続的に通過させることにより得られる。好ましくは、入射レーザビームが位相の適用領域にわたって実質的に一定な光強度、例えばガウシアン強度プロファイルを有する。代わりに、ベッセル - ボルテックスビームは、位相板または空間位相変調器を透過または反射するレーザビームから得られてもよい。

40

【0014】

一変形例によれば、集光モジュールは、試料中に複数の集束シリンダを形成するような並行する数本の非回折ビームの形成を可能にする。

【0015】

放射手段は、例えば、 100 ps より小さい時間幅を有する第1光パルスまたは第1光パルス列の放射を可能にするパルスレーザ光源を備える。

50

【 0 0 1 6 】

一変形例によれば、第 1 光パルスまたは第 1 光パルス列の光強度は、プラズマ形成位置および/または集束シリンダの内側および/または集束シリンダの外側にて材料の物理化学的特性の変化を生じさせるのに十分な第 1 光強度閾値より高い。

【 0 0 1 7 】

一変形例によれば、光強度は、プラズマ形成位置にて材料のアブレーションを生じさせるのに十分な第 2 光強度閾値よりも高い。

【 0 0 1 8 】

これらケースのいずれかにおいて、単一レーザーパルスを用いてまたはパルス列を用いて材料の加工が実行されてもよい。

10

【 0 0 1 9 】

一変形例によれば、放射手段は、第 1 光パルスにより生成されるプラズマの形成位置にて空間的に重畳するように意図された少なくとも第 2 電磁波の放射を可能にする。

【 0 0 2 0 】

出願人らは、プラズマ形成における不均一性の原因となる非線形効果、特にカー効果が時間シフトした二つのパルスの形で試料に入射するパルスの時間領域の調整により実際に制限されうること示している。したがって、100ピコ秒以下の時間幅、好ましくは10ピコ秒以下の時間幅を有する第1の超短光パルスは、集光モジュールを用いて試料中に集光した後に多光子吸収による自由電荷のプラズマの形成を可能にする。第1パルスよりも小さい光強度の第2の電磁波は、材料の物理化学的な特性の変化またはアブレーション

20

【 0 0 2 1 】

一変形例によれば、第 1 および第 2 パルスは、プラズマの自由電荷による吸収に基づく材料の加熱を第 2 パルスが可能にする程度に互いに時間的に十分に近い（第 1 および第 2 パルスは、プラズマの寿命よりも短い時間、材料によるが典型的に 1 から 10 p s だけ離れている。）

【 0 0 2 2 】

別の変形例によれば、レーザーパルスは、プラズマの寿命より長い期間だけ離れるが、熱緩和時間よりも短い（材料によるが、典型的に 1 から 100 n s ）。

【 0 0 2 3 】

一変形例によれば、前記第 2 電磁波はマイクロ波またはテラヘルツ波であってよく、これらの波の波長は、いかなる線形吸収も防ぐために、加工に求められるであろう材料の透明の範囲に含まれる。代わりに、前記第 2 電磁波は、材料の透明の範囲に含まれる波長を有する光波であってもよく、例えばピコ秒の数分の 1 から数ミリ秒の間の範囲の時間幅を持つ単一パルスの形またはパルス列の形で放射されてもよい。

30

【 0 0 2 4 】

前記第 1 および第 2 光パルスの形成のために、一変形例によれば、二つの別個の同期レーザー光源を用いることが可能である。

【 0 0 2 5 】

代わりに、前記第 1 および第 2 放射手段は、レーザーパルスを放射するための単一光源により形成され、前記レーザー光源から放射される光波から出発して第 1 および第 2 光パルスの生成を可能にする時間領域調整モジュールを備える。

40

【 0 0 2 6 】

好ましくは、第 1 態様に係る装置は、非回折ビームと試料の間の相対的な移動を可能にするスキャンモジュールをさらに備える。

【 0 0 2 7 】

一変形例によれば、装置は、放射手段により放射されるパルスの偏光を調整するモジュールをさらに備える。

【 0 0 2 8 】

一変形例によれば、装置は、集束シリンダの内側に含まれる材料を排出する手段をさら

50

に備える。

【0029】

第2態様によれば、本発明は、所定の透過帯域を示す材料でできた試料をレーザ微細加工する方法に関する。この方法は、微細穴開け、またはより一般的に、例えば切断のために材料中にストレスを加えることに適用されてよい。

【0030】

第1態様に係る方法は、前記材料の透過帯域内に含まれるスペクトル帯域を有する少なくとも第1パルスを放射することと、前記試料中に集光した後に集束シリンダにしたがって集光される非回折ビームの形成を可能にする前記第1パルスを空間的に調整することとを備え、前記非回折ビームの光強度は、試料の体積中の前記集束シリンダの側面の位置での多光子吸収による自由電荷のプラズマの生成を可能にする。

10

【0031】

一変形例によれば、この方法は、プラズマ形成位置および/または集束シリンダの内側および/または集束シリンダの外側にて材料の物理化学的特性の変化を生じさせるのに十分な光強度を持つ第1光パルスまたは第1光パルス列を放射することを備える。一変形例によれば、光強度は、プラズマ形成位置にて材料のアブレーションを生じさせるのに十分である。

【0032】

一変形例によれば、この方法は、前記材料の透過帯域内に含まれるスペクトル帯域を有し、プラズマ形成位置にて空間的に重畳される少なくとも第2電磁波を放射することを備える。

20

【0033】

一変形例によれば、前記第1パルスの空間的な調整は、集束シリンダにて前記第1パルスの光強度を実質的に一定とするために前記パルスの振幅を空間的に変調することを備える。

【0034】

このように記載される方法は、多数の用途を提供する。

【0035】

例えば、第2態様に係る方法は、少なくとも一つの貫通穴を形成するために、所定の材料でできた試料の微細穴開けに適用されることができ。

30

【0036】

したがって、この方法は、変形例に応じて、第1光パルスの空間的調整のためのパラメータを制御することにより前記貫通穴の直径を制御すること、および/または、試料と非回折ビームの相対的な位置を調整すること、および/または、同心のベッセル・ポルテックスビームおよび異なるトポロジカルチャージを重畳することを備える。

【0037】

一変形例によれば、この方法は、前記貫通穴を形成するために集束シリンダの内側に含まれる材料を、例えば化学的、超音波的または機械的手段(例えば空気または液体のジェット)により排出することをさらに備える。

【0038】

第2態様に係る方法は、一変形例によれば、材料中にストレス領域を誘起することによる試料の切断に適用されてもよい。

40

【0039】

第2態様に係る方法は、一変形例によれば、非常に大きな直径(典型的に数十ミクロンより大きい)を有する穴の「フライス加工」による穴開けに適用されてもよい。この場合、方法は、例えば除去されるべき領域の周りで集束シリンダを変位させることを備える。

【0040】

本出願に記載される方法は、誘電体材料、例えば、ガラス、熔融石英、水晶、ニオブ酸リチウム、ダイヤモンドに適用され、半導体材料に適用されてもよい。

【図面の簡単な説明】

50

【0041】

本発明の他の特長ないし特徴は、以下の図面で説明される記載を理解することにより明らかになるであろう。

【図1】本発明の一例に係る微細加工方法を示す図である。

【図2】一例に係るベッセル - ボルテックスビームの空間周波数の分布曲線を示すグラフである。

【図3】一実施例に係る、ガウシアンビームから出発してベッセル - ボルテックスビームを生成する様子を模式的に示す図である。

【図4A】第1実施例におけるベッセル - ボルテックスビームの縦方向形状に係る空間分布を示す画像である。

10

【図4B】第1実施例におけるベッセル - ボルテックスビームの横方向形状に係る空間分布を示す画像である。

【図5】第2実施例におけるベッセル - ボルテックスビームの縦方向形状に係る空間分布を示す画像である。

【図6】空間的調整モジュールの一例を有する本記載に係る装置を示す図である。

【図7】図7Aおよび7Bは、時間領域調整モジュールの具体例を有する本記載に係る二つの装置を示す。

【図8】図8A - 8Eは、微細穴開けに適用される本記載に係る方法の一変形例に実装される様々ステップにて加工される部品を模式的に示す図である。

【図9】図9A - 9Cは、様々な厚さの部品への微細穴開けに適用される本記載に係る方法の変形例を模式的に示す図である。

20

【図10】図10Aおよび10Bは、切断に適用される本記載に係る方法の一変形例に実装される様々なステップにて加工される部品を模式的に示す図である。

【図11】大直径を有する穴の微細穴開けに適用される本記載に係る方法の一変形例を模式的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0042】

図1は、試料への穴開け加工に適用される本記載に係る微細加工方法の第1の例を示す図である。

【0043】

30

この例によれば、微細加工方法は、パルスレーザ光源によるビームの放射101と、時間領域調整ステップ102（選択的）、空間的調整ステップ103および偏光調整ステップ104（選択的）の後の穴開けされる試料10へのビームの集光とを備える。これらは、本書にて後に詳述される。ビームのスキャンおよび試料の移動/回転（矢印106により記号化される）は、同一試料に対して連続的に複数の穴開け加工を実行するためのビームと試料の間の相対的な移動を可能にすることができる。一変形例によれば、本書にて後に詳述されるように、加工される部品が穴開け工程（ステップ105）の前に準備されてよく、穴開け加工後の部品の洗浄（ステップ107）がアブレーションされた材料を除去するために実行されてもよい。

【0044】

40

入射ビームの空間的調整は、集光後に非回折ビームが形成されることを可能にし、その結果、集束シリンダ、いいかえれば、所定の寸法の集束シリンダの伝搬軸に沿って一定のプロファイルを維持する特性を有するビームを形成する。したがって、「非回折」と記載される。このようなビームは、集束シリンダの表面で光強度の最大値を示す。

【0045】

本記載に係る非回折ビームは、概して言えば、空間周波数の領域にて環状の強度分布を有し、ゼロではない空間周波数 k_{r0} において強度最大値を持ち、かつ、空間周波数が0に近い範囲（例えば $k_r = 0$ と $k_r = k_{r0} / 5$ の間）の空間周波数において無視できる強度（典型的に強度最大値の20分の1以下）を持つ。さらにそれは、 $(k_r, \quad) = N$ の形式のスペクトルまたは空間位相を示す。ここで (k_r, \quad) は円筒座標であり、

50

Nは渦のトポロジカルチャージと呼ばれるゼロではない相対的な整数である。

【0046】

図2は、空間周波数領域での強度分布200の一例を示す。この空間(k_x, k_y)において、分布は $k_{r0} = 2 \sin / 0$ を中心とするガウシアン形状を有する径方向プロファイル($I(k_r)$)を持った環状であってよく、または、図2に示されるような、より尖った形状であってよい。このような形状は、レーザの中心波長 0 にて円錐角を持ったビームを生成する。このような非回折ビームは、例えば、V. Jarutisらによって記述される("Focusing of Laguerre-Gaussian beams by axicon", Optics Communication 184 (2000) 105 - 112)。

【0047】

図3は、入射ビーム I_0 (例えば、ガウシアンビームまたは所定の半径の円盤にわたって平坦な強度プロファイルを持つ「トップハット」ビーム)から出発してベッセル-ボルテックス型のビームを生成する一例に係る方法を示す。図4Aおよび4Bは、第1例に係るZ軸に沿って伝搬するベッセル-ボルテックス型のビームの空間分布を示し、それぞれビームの縦方向断面(X, Z)および横方向断面(X, Y)を示す。

【0048】

図3に示される例において、入射ビーム I_0 は、位相(k_r, θ) = N を付与可能な「渦位相板」と呼ばれる位相板31を通過した後、図3のシリンダ310により模式的に示される環状の強度分布を得るために、アキシコン型、または、より一般的には、(r) = r (円筒座標)の形式の空間位相を付与可能な任意の種類の子を通過する。図4Aおよび4Bに示されるように、このようにして得られるビームの強度分布は、伝搬軸に沿うゼロの強度と、環状領域410で最大値を持つ強度分布とを有する。このメインローブの周りで、二次的ローブ(411 - 413)はより小さい強度を有する。このビームは、特に伝搬長L、中心の暗領域の半径R(いいかえれば集束シリンダ310の半径)およびメインローブの厚さeにより特徴付けられる。伝搬長Lは、例えば、光強度が最大光強度の半分以上に維持される集束シリンダの長さとして定義される。伝搬の間、最大強度の環状領域はほとんど変化せず、伝搬長と厚さの比率として得られる非回折ビームのアスペクト比の定義によれば、アスペクト比は5以上である。ベッセル-ボルテックスビームの特性は、ベッセル-ボルテックスビームの生成を可能にする要素のパラメータ、特に、渦のトポロジカルチャージN、調整システムに入射するガウシアンビームの「くびれ」(ここで、くびれは強度が I_{max} / e^2 に等しくなるビーム半径により定義され、 I_{max} は最大光強度である)、および、ベッセルビームの円錐角を選択することにより独立して調整できる。例えば、トポロジカルチャージを増やすことにより、集束シリンダの直径が増大する。集束シリンダのメインローブの厚さは、円錐角が増えたとき、または同様に、フーリエ空間でのピーク強度が k_r のより高い値に向けて移動したときに減少する。入射ガウシアンビームのくびれが増えたとき、または同様に、初期強度分布の幅が増えたときに、伝搬長Lが増える。

【0049】

一変形例によれば、環状調整および渦調整を与えるために単一の空間調整素子を用いることができるであろう。

【0050】

ベッセル-ボルテックスビームは、本記載に係る装置および方法に利益をもたらすために用いられる複数の特別な特徴を有する。

【0051】

非回折ビーム、特にベッセル-ボルテックス型ビームの材料中の非線形伝搬は、準定常的である。これは、たとえ高強度であっても、これらのビームが空間および時間領域において非常に小さな変形しかなされないことを意味する。これは、高強度でのカー効果(自己収束)および材料中のレーザパルスにより生成される自由電子プラズマとの相互作用に起因して変形するガウシアンビームの伝搬とは極めて対照的である。

【0052】

10

20

30

40

50

有利なことに、ベッセル - ボルテックス型ビームの優れた定常性は、十分に大きい円錐角（好ましくは、約 10 度より大きい）に対して得られることを本出願人は示している。

【 0 0 5 3 】

最後に、ベッセル - ボルテックス型ビームの変形例は、波面にわずかな追加の変形を付与することにより形成されてもよい。例えば、図 5 に示されるように、ビームの非線形な準定常性の特性を同時に維持しつつ、中心の「暗」領域の直径が伝搬の間に減ったり増えたりしてもよい。この変形は、アフォーカル系における集光光学系の単純な縦方向のミスアライメントにより実現されてもよい。この変形は、マスクまたは位相板での $= ar^2$ の形式の二次の項の追加により得ることもできる。

10

【 0 0 5 4 】

本記載にて実現されるパルスの空間的調整のおかげで、非常に高い光強度（例えばフェムト秒パルスを用いる）を持つ単一レーザパルスを用いて材料中にナノ爆発を生じさせ、円筒状の中空を生成することが可能である。その結果、材料はシリンダの側面にて蒸発するだけである。このシリンダの内側に残る材料は、重力により、または、超音波洗浄などの他の方法を用いることにより排出されてよい。

【 0 0 5 5 】

アブレーション閾値下で機能することも可能である；その結果、レーザパルスに起因して物理的および/または化学的特性の変化を受けた後、選択的な化学的攻撃のステップ（例えば、石英ガラスの場合のフッ化水素酸または水酸化カリウム）が除去（アブレーション）自体を生じさせることを可能にする。

20

【 0 0 5 6 】

その結果、数十ミクロンの深さにわたって数十ミクロンの直径のオーダの大きさを持つチャンネルの穴開けが単一レーザパルスを用いて実現することができ、これは、処理速度の観点で非常に魅力的な技術を提供する。

【 0 0 5 7 】

図 1 に示す一変形例によれば、時間領域調整ステップ 102 は、単一レーザ光源を用いて、試料が形成される材料の透過帯域に含まれるスペクトル帯域を持つ第 1 および第 2 光パルスの生成を可能にしてもよい。第 1 パルスは、短い時間、例えば 100 ピコ秒より小さく、有利には 10 ピコ秒より小さく、好ましくはピコ秒の数分の 1 を有し、多光子吸収により集束シリンダの位置で自由電荷のプラズマの形成を可能にする。第 2 パルスは、より長くまたは連続であってよく、レーザアブレーションを可能にするエネルギーの大部分の蓄積を可能にする。第 2 パルスは、第 1 パルスにより生成される励起が第 2 パルスが到達する時間まで活性であることを可能にするために第 1 と同期されてもよい（典型的に、この励起は材料に応じて 0.1 から 5 ピコ秒間継続する）。その強度が十分である場合、第 2 パルスは、イオン化アバランシェ効果による影響を受けてプラズマ密度を増幅させることもできる。第 2 パルスは、プラズマの自由電荷を励起し、材料の加熱に寄与するような態様にて、プラズマ寿命にわたって生成されてもよい。第 2 パルスは、より長い時間の後に生成されてもよいが、熱緩和時間より短く、つまり、典型的に 100 nm より小さい。

30

40

【 0 0 5 8 】

適切な時間幅および波長を持った二つのパルスの形での入射ビームの時間領域調整は、より低いエネルギーでの励起の実行を可能にし、したがって材料中を伝搬する間の非線形効果を最小化を可能にし、その結果、より長い時間幅の第 2 パルスのおかげで、ダメージまたはアブレーションを生じさせるための材料の加熱に必要なエネルギー密度の蓄積を可能にする。

【 0 0 5 9 】

第 1 レーザ光源および時間領域調整モジュールを用いる代わりとして、二つの別個のレーザ光源が第 1 および第 2 パルスの生成に用いられてよい。さらに、エネルギーの蓄積は、電磁波のスペクトル帯域が材料の透過帯域に含まれており、かつ、第 1 パルスにより形

50

成されるプラズマの自由電荷に吸収されることができる限りにおいて、光波ではない、例えばマイクロ波やテラヘルツ波の形式の電磁波を用いて実行されることができる。代替的に、エネルギーの蓄積は、短くて速いパルス列により達成されてもよい。

【 0 0 6 0 】

図 6 は、一つの実施例における本記載に係る微細加工装置 6 0 を示し、より具体的には集光モジュールの一例を示す。

【 0 0 6 1 】

装置 6 0 は、この例において、 I_1 で示される超短第 1 パルスの放射に適合したレーザー光源 6 0 1 を備える。選択的に、時間領域調整モジュール 6 0 2 は、既に説明したように、または、以下に詳述されるように、第 1 および第 2 光パルスの生成を可能にすることが

10

【 0 0 6 2 】

この装置はさらに、試料中のパルスの空間的な調整のための集光モジュール 6 0 3 を備える。これは、所定の入射ビームから出発して、試料中に集光シリンダにしたがった非回折ビーム 3 1 0 の生成を可能にする。非回折ビームは、例えば、ベッセル - ボルテックス型である。集光シリンダは、集光モジュールの光軸に沿って概ね配向される。時間領域調整モジュールにより二つの光パルスが形成される場合、同じモジュール 6 0 3 を二つのパルスが通過することが有利であり、これは試料中でのパルスの空間的な重畳を容易にすることができる。

【 0 0 6 3 】

図 6 の例において、集光モジュール 6 0 3 は、既述されたようなベッセル - ボルテックス型などの非回折ビームを生成するように設計される光学系 6 1 2 と、次に試料中のビームサイズを縮小するための結像系 (6 0 4 , 6 0 9) とを備える。

20

【 0 0 6 4 】

既に説明したように、ビームの空間的な調整は二つの見方を備える。一方では空間周波数領域での環状強度分布の生成を目的とし、他方では渦型の位相をビームに与えることを目的とする。これら二つの調整機能は、同じ光学素子により独立的または一体的に実行されてもよい。

【 0 0 6 5 】

渦型の調整の実行を可能にする光学素子は、例えば、反射モードまたは透過モードの位相ホログラム、反射または透過モードの強度ホログラム (具体的にはバイナリ) 、空間位相変調器、異方性の分布が光学的に刻まれたガラス板 (例えば、M. Beresna et al. "Polarization sensitive elements fabricated by femtosecond laser nanostructuring of glass", Optical Material Express Vol. 1 N° 4 (2011) を参照) である。

30

【 0 0 6 6 】

環状の強度分布を形成するために、 $(r) = r$ (円筒座標) の形式の空間位相を与えるための本書で上述した全ての素子を用いることができる。同じ目的のために、アキシコンまたは中心に穴を持つミラーをさらに用いることができる。有利には、環状調整および渦調整を適用するための単一の空間調整素子が用いられるであろう。

【 0 0 6 7 】

また、並行して、同一またはわずかに異なる特性を持つこれらのビームを形成できることが有利である。これは、ホログラフィック構造のマトリックス、もしくは、特に微小アキシコンのマトリックスのおかげで実現されてもよい。

40

【 0 0 6 8 】

一変形例によれば、装置 6 0 はさらに、非回折ビームの偏光を調整するためのモジュールを備えてもよい。特に円偏光は、ビームの位置にかかわらず均一なダメージを得ることを可能にする。イオン化効率の観点での利益は、ラジアルまたはオルソラジアル偏光から得られてもよい。

【 0 0 6 9 】

結像系は、いかなる二次の位相歪みも導入されないための例えば「望遠鏡」または「4

50

f」形式のシステムであり、例えば光学素子604と顕微鏡レンズ609を備える。図6の例において、顕微鏡レンズ609は、試料中でのビームサイズを大幅に縮小させることを可能にする。好ましくは、加工に望まれる試料の領域を特定してビームに対する正しい位置決めを確実にするため、顕微鏡レンズは加工される試料の像がカメラ606に形成されることをも可能にする。カメラ606の前には集光レンズ607が配置される。

【0070】

図6の例において、光学素子604の焦点面に配置される空間フィルタ611は、光学系612により形成される回折像の空間的なフィルタリングを可能にし、関心のある非回折ビームに対応する空間周波数のみが選択されるようにする。

【0071】

一変形例によれば、空間的な調整は、伝搬軸上のビーム強度の調整を可能にし、とりわけ可能な限り均一にする振幅変調を備えてもよい。この振幅変調は、集光モジュールの特定の変調系（例えばミラーマトリックスまたは位相変調器）により実現されてもよく、または、このような変調系が既に非回折ビームの形成に用いられている場合、それが既存の変調系に一体化されてもよい。この場合、例えば図6に示す空間フィルタ611を用いて空間的にフィルタされるであろう回折次数にエネルギーの一部が向けられてもよい。

【0072】

アブレーションされるある場所と別の場所との間での移動のための時間を減らすため、例えばガルバノミラー型のシステム608または非平行な面を持つ回転板のシステムといったレーザビーム用の変位系を用いることが有利かもしれない。

【0073】

図7A、7Bは、既述したような第1および第2光パルスの形成を目的とする、本発明に係る微細加工装置の例70Aおよび70Bにおける時間領域調整モジュールの二つの実施例を示す。

【0074】

各装置70Aおよび70Bは、レーザ光源701と、前記第1および第2光パルス I_1 および I_2 の生成を可能にする時間領域調整モジュール702とを備える。この装置はさらに、所定の入射ビームから出発して上述したような非回折ビーム310（例えばベッセル-ボルテックス型）の生成を可能にするビームの空間的調整のための集光モジュール703を備える。例えば集光モジュールは、非回折ビームを生成するように設計される光学系712と、ビーム縮小のための望遠鏡と偏向およびスキャンのためのミラー一式とを備えた光学ブロック709とを備える。図7Aおよび7Bの例において、周波数変換モジュール718は、加工される材料の透過帯域にパルスの波長を適合させることを可能にする。例えばシリコンの場合、好ましくは波長1550nmが選択されるであろう。この波長の超短パルスは、ファイバ技術もしくはその他の技術を使用し、周波数変換系718に導入される、例えば中心が800nm（例えばチタン：サファイア技術を用いる）または1030nmから1064nm（例えばイッテルビウム技術を用いる）のレーザ701により得られてもよい。ここで、後者は光パラメトリック増幅器（OPA）または光パラメトリック発振器（OPO）であってよい。周波数変換モジュールは、時間領域調整モジュール702の下流に配置されてよく、時間領域調整はより短い波長でより容易に実装される。

【0075】

図7Aは、時間領域調整モジュール702の第1例を示す。この例において、レーザ光源701により放射されるパルス I_0 は、ビームスプリッタ板714により二つに分割される。第1パルス I_1 は、ミラー719により反射された後、偏向板717を用いて周波数変換モジュール718に送られる。減衰器713は、試料705の特性にしたがってパルス I_1 の光強度が加工に望ましいように適合されることを可能にする。第2パルスは、パルス I_2 を形成するために、例えば回折格子システム、プリズムまたは音響光学結晶などのフェムト秒の従来技術にて既知の手段715により時間領域で伸長される。このパルスはその後、同様にして、周波数変換モジュール718に向けられる。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 6 】

図 7 B は、時間領域調整モジュール 7 0 2 の第 2 例を示す。この例では、パルス I_0 が二つに分割され、かつ、D A Z Z L E R (登録商標) (F A S T L I T E (登録商標) 製) 型の音響光学システム 7 2 1 の助けにより時間領域で伸長される。電子制御シャッタ 7 2 0 は、例えば高パルスレートのレーザ光源が用いられる場合にパルス列の中からのパルスの選択を可能にする。

【 0 0 7 7 】

図 7 A および 7 B に示される装置 7 0 A および 7 0 B の代わりとして、二つの別個の同期レーザ光源が用いられてよい。二つのパルスは、加工される材料の透過帯域内に含まれるスペクトル帯域を有する。この場合、ビームの時間伸長手段を用いる必要はない。

10

【 0 0 7 8 】

一変形例によれば、第 2 パルスの時間幅およびエネルギーは、第 2 パルスが単独で材料中に加えられた場合にいかなる影響も生じないように調整される。この場合、パルスの同期は、より柔軟なパラメータである。第 2 パルスは、第 1 パルスの前に送られてもよい。材料中に蓄積されるエネルギーは、したがって第 2 パルスの最後と第 1 パルスの最初との間の時間差に比例する。特にこの手法は、第 1 パルスと比べて第 2 パルスの時間幅が長い場合に同期の正確性に係る制約を低減させることを可能にする。

【 0 0 7 9 】

一変形例によれば、本発明に係るナノ加工装置は、レーザにより放射されるパルス列の中から一以上のパルスを選択することを可能にする電子制御シャッタを備える。シャッタは、機械式または光学式であってもよい。後者の場合、例えばその後偏光子が続くポッケルスセルであることができる。

20

【 0 0 8 0 】

代替的に、時間領域調整はパルス列の生成を備える。最初のパルスは、超短であり、集光モジュールの助けによる多光子吸収により得られる集光シリンダでの自由電荷のプラズマの生成を可能にする。後続のパルスは、エネルギーの蓄積を可能にする。第 1 パルスの時間幅は、例えば 1 0 p s より短い。第 2 パルスは、長くても短くてもよいがそれぞれ低強度である。したがって、典型的に 1 0 p s より短い時間幅を用いて、例えば材料中の自由電荷のプラズマの寿命より短い時間幅(つまり、ガラス中で約 1 0 0 f s)を用いて、超短の第 2 パルスの列をプラズマの自由電荷の吸収によるエネルギーの蓄積および材料の加熱の生成に用いることができる。これらパルスは互いに近づけられており、例えばパルス間の時間差は 1 0 p s より小さい。前記パルスの強度は、カータイプの非線形効果によるビームの不安定化を避けるのに十分な程度に低い。一方でその強度は、自由電荷の生成に寄与し、プラズマ密度を増幅するの十分であってよい。パルス列の生成は、図 7 A , 7 B を参照して記載される手段、特に D A Z Z L E R (登録商標) または複数の遅延ラインにより得られてもよい。代わりに、例えば D A Z Z L E R (登録商標) を用いて、時間領域にてエアリー型のビームを生じさせる三次の位相に多重のサブパルスをスペクトル的に刻み込むことも可能である。一変形例によれば、第 1 および第 2 パルスの時間差は、材料中の自由電荷のプラズマの寿命より大きい、熱緩和時間より小さい。

30

【 0 0 8 1 】

図 8 から 1 0 は、本記載に係る微細加工方法の様々な用途を示す。

40

【 0 0 8 2 】

図 8 A から 8 E は、1 ミクロン以上のオーダの直径を有する貫通穴を形成するための微細穴開け加工法の第 1 の用途を示す。

【 0 0 8 3 】

図 8 A は、アブレーション工程前の部品 1 0 を示す。試料を形成する材料は、例えば厚さが数十ミクロンのガラス板であり、形成される穴は、例えば数ミクロンまたはさらに言えば数十ミクロンの直径を有する。

【 0 0 8 4 】

一変形例によれば、アブレーション後のデブリの堆積を制限するため、または、空気 /

50

ガラス界面の交差時にビームの変形を低減させるような線形屈折率および/または非線形屈折率の適合を可能にするため、穴開け工程の前に、例えば、穴開け後に化学洗浄により除去可能なポリマーの層を穴開けされる部品の表面に堆積させることにより、部品が準備されてもよい。

【0085】

穴開け工程は、好ましくは外気中で実行され、または、一変形例によれば、アブレーション後のデブリの堆積の限定もしくは上述の屈折率適合の実現のいずれかのために水中または液体媒質中で実行され、さもなければ、裏面に進行する穴開け加工を可能にするために多重パルスアブレーションモードにて実行される。

【0086】

図8Bは、集束シリンダ310にしたがって集光される非回折ビームを集光した後、例えば試料の体積中の集束シリンダの側面の位置にて材料のアブレーションを生じさせるのに適合したパルスの光強度を形成するために空間的に調整された一以上のパルスによる試料の照射を示す。

【0087】

図8Cは、中空の円筒形状を有する材料のアブレーションされた部分21を示す。中央のアブレーションされていない円筒22は、アブレーションの最後において依然として存在する。

【0088】

図8Dは、この方法の最後のステップを示し、残存する円筒材料22が排出される。これは、それ自身の重みでの重力によりなされることができる。

【0089】

形成される部品は例えば図8Eに示され、材料中に円形断面の複数の穴20iが形成される試料10を備える。

【0090】

空気もしくは液体のジェットを用いて、または、穴開けされる部品の一面を減圧させることを通じて、円筒22を排出することも可能である。代わりに、超音波槽での洗浄工程を用いて、または、アブレーションされる材料の機能として選択される化学的攻撃を用いて、円筒を排出することが可能である。例えば、溶融石英またはガラスであれば、フッ化水素酸(HF)を用いる化学的攻撃または水酸化カリウム(KOH)を用いる化学的攻撃により残存する円筒を除去することが有利であるかもしれない。これらは、前の点で述べたような洗浄工程と組み合わせることもできる。

【0091】

穴開け加工それ自体が関係している限りにおいて、複数の戦略が利用されてもよい。

【0092】

図9Aに示される第1変形例によれば、穴開けされる部品がベッセル-ボルテックスビームのほぼ中心に配置され、上述のように、特に図7A, 7Bに見ることができるよう、部品にダメージを誘起するための一以上のレーザショットが十分なパワーを持つ単一の第1パルスの形式、または、第1パルス列の形式、または、異なる時間領域の特性を示す第1および第2パルスの連続の形式のいずれかで放射される。

【0093】

厚い試料の場合、いいかえれば、ベッセル-ボルテックスビームの回折長より厚い場合、複数の変形が可能である。第1の例によれば、集束シリンダの軸に沿って部品が縦方向に移動させられる。図9Bおよび9Cに示される第2の例によれば、穴開けされる部品が様々な縦方向の位置の連続するレーザショットにより照らされることができる。

【0094】

図9Bは、縦軸Zを持つ第1ベッセル-ボルテックスビームの生成を示し、図9Cは、個別に生成された後に同じ軸Z上に縦シフト付きで重畳されるベッセル-ボルテックス型の二つの別のビーム92, 93の生成を示す。この場合、これら様々なビームに起因する複数のレーザ照射により部品の変位なしにダメージが誘起される。この第2の戦略は、部

10

20

30

40

50

品の表面と中心（コア）との間のダメージ閾値の違いに起因する潜在的な問題を避けることが可能になるために有利であることに留意されるべきである。

【0095】

他の変形例は、微細穴開け加工向けに想定される。

【0096】

例えば、穴開けされる部品は、一様に誘起されるダメージを分散するように、二つのレーザショットの間にビーム軸周りに一回転してもよい。

【0097】

同じ部品に複数の穴開け加工を実現するため、それぞれの場所間で部品を移動させること、または、ベッセル - ボルテックスビームを並行して生成することを可能とする装置の助けにより複数の場所でのアブレーションを同時に実行することが可能である。この解決策は、好ましくは、「多重化ホログラム」として知られるホログラムを用いて得られるかもしれない。

【0098】

例えば大きな直径（典型的に数十ミクロンより大きい）の穴を形成するために、穴開けされる部品の同じ場所に複数のレーザショットが実行されてもよい。しかしながら、異なる直径を持つ同心のシリンダ上にダメージ領域を生成するため、ベッセル - ボルテックスビームについてわずかに異なるパラメータを用いる。異なるパラメータを持つこれらのビームは、ビームを生成する異なる手段を用いること、または、各照射間もしくは複数の場所での照射の各順序間のパラメータを変化させることのいずれかにより形成されてもよい。図11は、6から10の範囲のトポロジカルチャージを有するベッセル - ボルテックスビームについての様々な強度プロファイルを示す。これら強度プロファイルは、それぞれ410, 420, 430, 440, 450の符号が付されている。有利には、最小半径のアブレーションのシリンダを規定するビームを用いて開始した後にアブレーションのシリンダの半径を徐々に増加させてアブレーションが実行される。この理由は、アブレーションのシリンダにて材料が不透明または高拡散となり、より小さい半径のシリンダへの光の伝搬を遮断することによる。

【0099】

大きな直径の穴を開けする場合、「フライス加工」のプロセスを用いることもできる。この場合、方法は、例えば空洞にされる領域の周囲で集束シリンダを変位させることを備える。

【0100】

図10Aおよび10Bは、ガラス板型の誘電体材料の板または半導体材料のウェハなどの試料を切断するための本記載に係る方法の別の用途を示す。

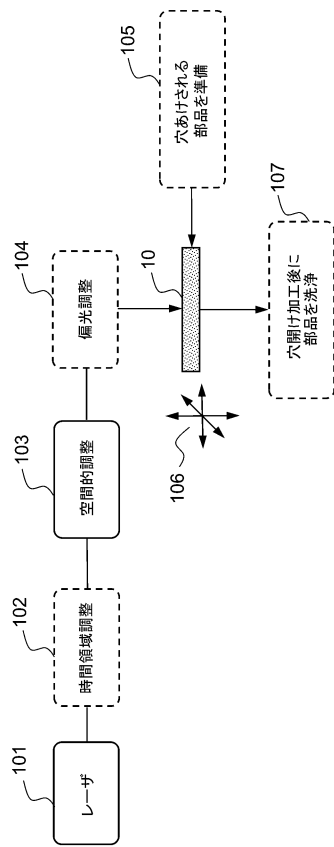
【0101】

試料10は、例えば上述したようなベッセル - ボルテックス型のビームを用いて照らされ、集束シリンダの側面に位置する体積120i, 120j, 120k, 120l内の材料の物理化学的特性の変化を生じさせるようにして試料がビームに対して変位される（図10A）。これら材料の変化は、垂直面100にストレスが加えられた領域を誘起し、材料の脆弱化およびこの面での切断をもたらす（図10B）。照らされるこの面は、有利には、傾斜端部を持つ切り欠きを生成するために傾斜してもよい。優れた表面品質は、このようにして得ることができる（平坦度は典型的に / 20より優れる）。

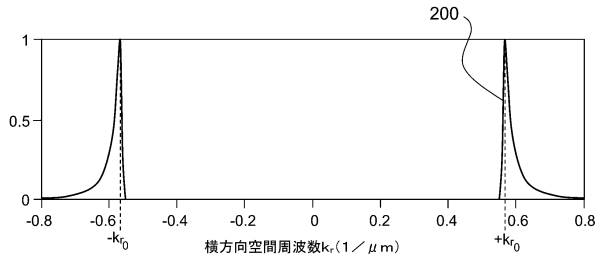
【0102】

一定数の詳細な実施例を通じて説明がなされたが、本発明に係るレーザ微細加工の方法および装置は、当業者であれば明らかであろう様々な変形例、改良例および改善例を備える。以下の請求項に記載されるように、これら様々な変形例、改良例および改善例が本発明の範囲の一部を形成することが理解されよう。

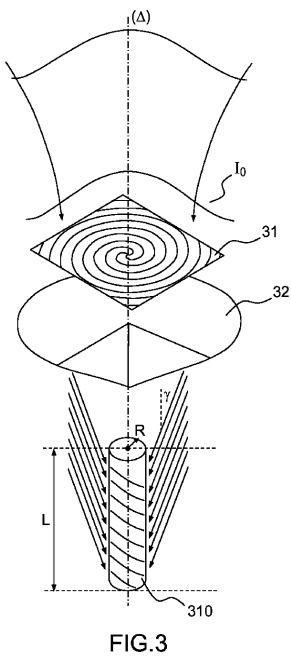
【図1】



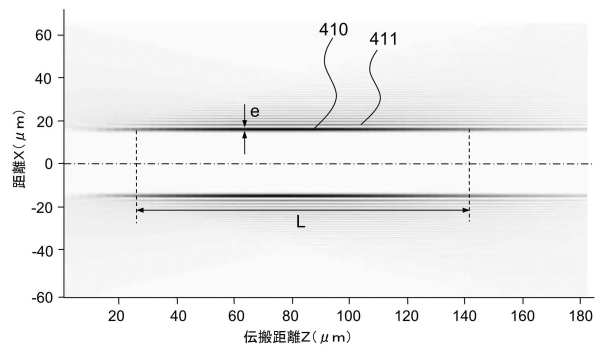
【図2】



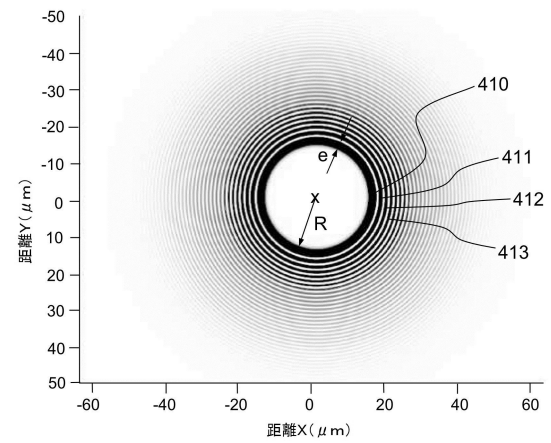
【図3】



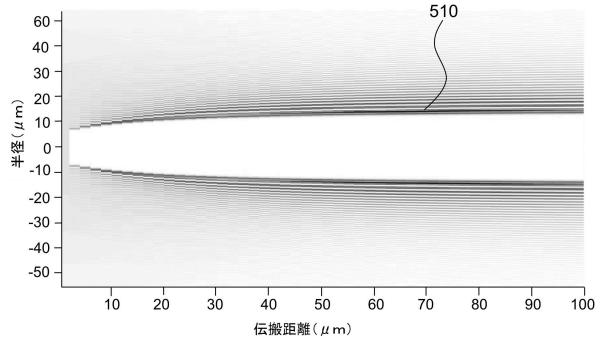
【図4A】



【図4B】



【 図 5 】



【 図 6 】

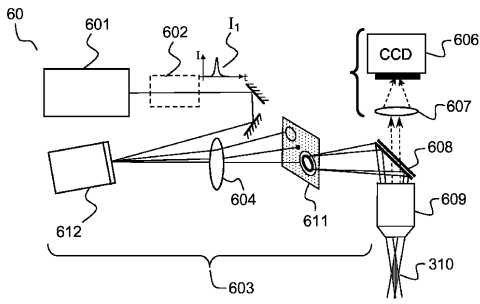


FIG.6

【 図 7 A 】

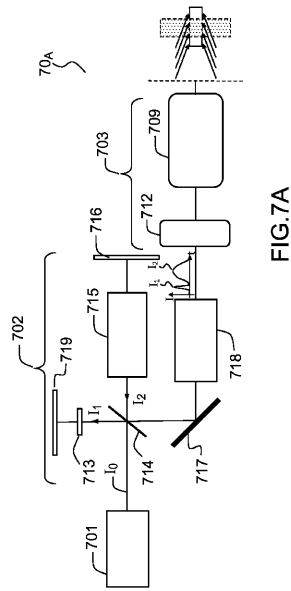


FIG.7A

【 図 7 B 】

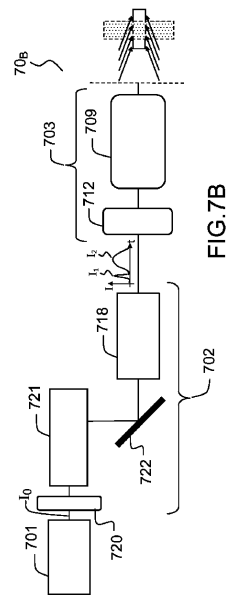


FIG.7B

【 図 8 A 】

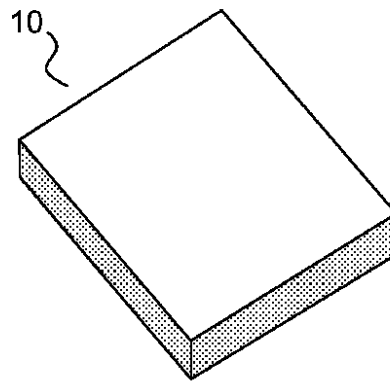


FIG.8A

【 図 8 B 】

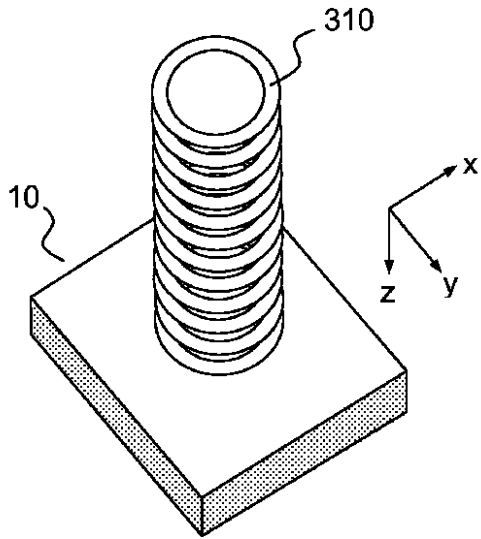


FIG.8B

【 図 8 C 】

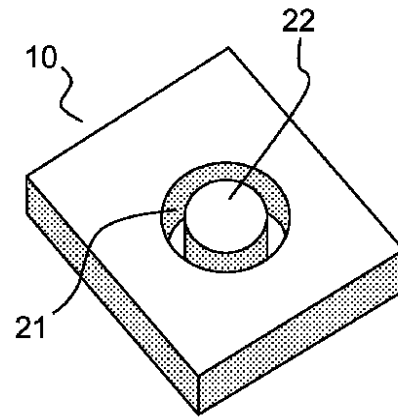


FIG.8C

【 図 8 D 】

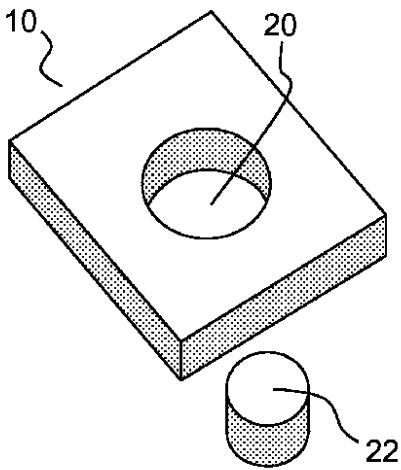


FIG.8D

【 図 8 E 】

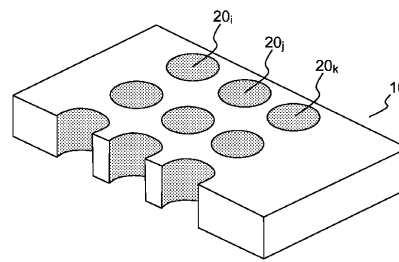


FIG.8E

【 図 9 A 】

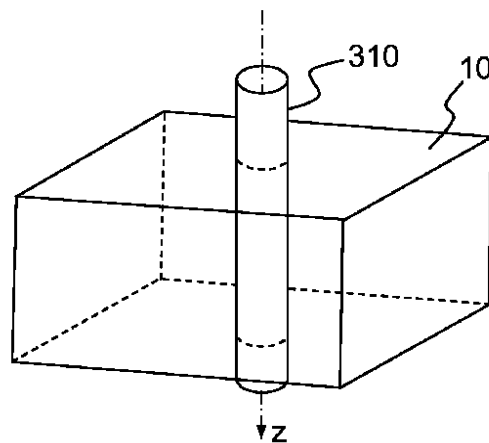


FIG.9A

【図9B】

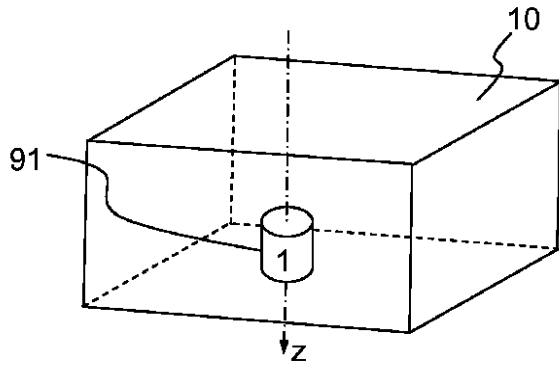


FIG.9B

【図10A】

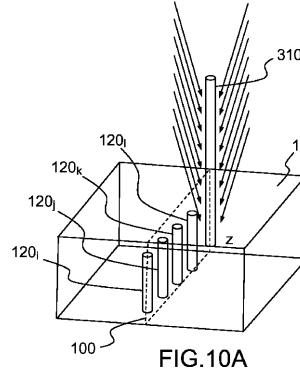


FIG.10A

【図9C】

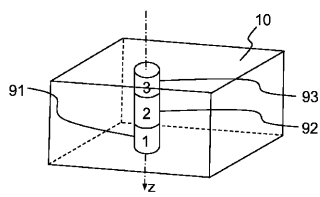


FIG.9C

【図10B】

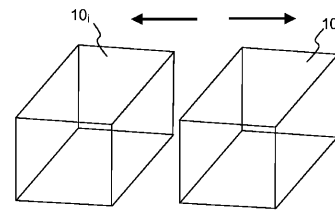
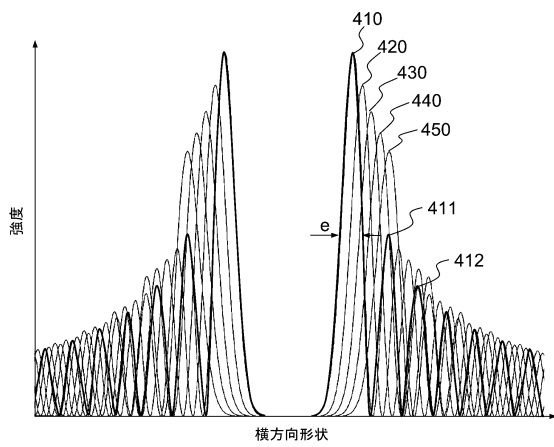


FIG.10B

【図11】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 21/302 (2006.01) H 0 1 L 21/302 2 0 1 B

(72)発明者 クーエイロン、アルノー
フランス国 エフ - 9 1 1 9 0 ジフ シュル イヴェット、チェミン デ ジャウメロン 2

審査官 岩見 勤

(56)参考文献 特開2004 - 136358 (JP, A)
特開2010 - 247230 (JP, A)
特開2007 - 196277 (JP, A)
特開2005 - 153013 (JP, A)
特開2008 - 062263 (JP, A)
特表2015 - 520938 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)
B 2 3 K 2 6 / 0 0 - 2 6 / 7 0
H 0 1 S 3 / 0 0
H 0 1 S 3 / 1 0
H 0 1 L 2 1 / 3 0 2