

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6224074号
(P6224074)

(45) 発行日 平成29年11月1日(2017.11.1)

(24) 登録日 平成29年10月13日(2017.10.13)

(51) Int.Cl.	F 1		
H 01 S 3/10	(2006.01)	H 01 S 3/10	Z
B 23 K 26/067	(2006.01)	B 23 K 26/067	
B 23 K 26/00	(2014.01)	B 23 K 26/00	N
B 23 K 26/382	(2014.01)	B 23 K 26/382	
H 01 S 3/00	(2006.01)	H 01 S 3/00	B

請求項の数 16 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2015-504967 (P2015-504967)
(86) (22) 出願日	平成25年4月12日 (2013.4.12)
(65) 公表番号	特表2015-520938 (P2015-520938A)
(43) 公表日	平成27年7月23日 (2015.7.23)
(86) 国際出願番号	PCT/EP2013/057673
(87) 国際公開番号	W02013/153195
(87) 国際公開日	平成25年10月17日 (2013.10.17)
審査請求日	平成28年2月17日 (2016.2.17)
(31) 優先権主張番号	1253404
(32) 優先日	平成24年4月13日 (2012.4.13)
(33) 優先権主張国	フランス (FR)

(73) 特許権者	502205846 サントル ナショナル ドゥ ラ ルシェ ルシュ シアンティフィク フランス国 パリ セデックス 16 リ ュ ミシェル-アンジュ 3
(73) 特許権者	514261133 ユニヴェルシテ デ フランシューコンテ フランス ブサンソン リュ アラン サ バリ 18
(74) 代理人	110001210 特許業務法人 YK1 国際特許事務所
(72) 発明者	クーボイジエ フランソワ フランス キュセ シュル ロニヨン リ ュ ド バル ド キュセ 14

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】レーザナノ加工装置および方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の透過帯域を有する物質から製作されたサンプル(705)をレーザナノ穿孔するための装置であって、

所定の入射ビームから、非回折ビームを生成することができる集束モジュール(203、703)であって、前記非回折ビームが、集束モジュールの光軸にほぼ沿って配向される焦線に沿う、集束モジュールと、

前記物質の前記透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の第1の光パルス(I₁)を射出する第1の手段(202、701～702)であって、前記第1の光パルスが、前記集束モジュールによって集束後、前記物質内に、多光子吸収を介して前記焦線に沿って自由担体のプラズマを生成することができ、すなわち「プラズマチャネル」を形成する、第1の手段と、

前記物質の前記透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の少なくとも1つの第2の電磁波を射出する第2の手段(202、701～702)であって、前記第2の電磁波が、前記プラズマチャネルに空間的に重ね合わせられるように図られ、それによって、前記プラズマの前記自由担体による吸収を介して前記物質を加熱する、第2の手段とを備えることを特徴とする装置。

【請求項 2】

請求項1に記載の装置であって、前記第1の光パルスが、10ピコ秒より短い持続時間を持つことを特徴とする装置。

10

20

【請求項 3】

前記請求項のいずれか一項に記載の装置であって、前記第2の射出手段が、数分の1ピコ秒と数ミリ秒との間の範囲にある持続時間の光パルスを射出することが可能であることを特徴とする装置。

【請求項 4】

請求項3に記載の装置であって、前記第2の射出手段が、一連の光パルスを射出することが可能であることを特徴とする装置。

【請求項 5】

前記請求項のいずれか一項に記載の装置であって、前記第1および第2の射出手段が、2つの独立した同期式レーザ源によって形成されることを特徴とする装置。 10

【請求項 6】

請求項1～4のいずれか一項に記載の装置であって、前記第1および第2の射出手段が、単一のレーザパルスを射出するレーザ源(701)と、前記レーザ源によって射出された前記光波から第1の光パルスおよび少なくとも1つの第2の光パルスを生成することが可能な時間成形モジュール(702)とによって形成されることを特徴とする装置。

【請求項 7】

請求項6に記載の装置であって、前記時間成形モジュールが、少なくとも2つのチャネルを形成することが可能なビーム分割器(714)と、前記チャネルの少なくとも1つに、パルス伸長器(715)とを備えることを特徴とする装置。

【請求項 8】

請求項6に記載の装置であって、前記時間成形モジュールが、前記単一のレーザパルスを2つのパルスに分割するとともに、それを時間的に伸長する音響光学システム(721)を備えることを特徴とする装置。 20

【請求項 9】

請求項6～8のいずれか一項に記載の装置であって、前記時間成形モジュールの下流に周波数変換モジュール(718)をさらに備えることを特徴とする装置。

【請求項 10】

前記請求項のいずれか一項に記載の装置であって、前記集束モジュールが、ベッセルビームを生成することが可能であることを特徴とする装置。

【請求項 11】

請求項1～9のいずれか一項に記載の装置であって、前記集束モジュールが、エアリビームを生成することが可能であることを特徴とする装置。 30

【請求項 12】

前記請求項のいずれか一項に記載の装置であって、前記集束モジュールが、非回折ビームのマトリックスを形成することが可能であることを特徴とする装置。

【請求項 13】

所定の透過帯域を有する物質から製作されたサンプル(105)をレーザナノ穿孔するための方法であって、

前記物質の前記透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の第1のパルスを射出するステップと、 40

前記第1のパルスを空間成形するステップであって、前記第1のパルスが前記サンプル内に集束した後、焦線に沿って非回折ビームを形成することが可能になり、前記非回折ビームの光強度が、多光子吸収を介して前記焦線に沿って自由担体のプラズマを生成することを可能にし、すなわち「プラズマチャネル」を形成する、ステップと、

前記物質の前記透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の少なくとも1つの第2の電磁波を射出するステップであって、前記第2の電磁波が、前記プラズマチャネルに空間的に重ね合わせられ、それによって、前記プラズマの前記自由担体による吸収を介して前記物質を加熱する、ステップと

を含むことを特徴とする方法。

【請求項 14】

50

請求項 1 3 に記載の方法であって、前記第 1 のパルスの前記空間成形ステップが、前記第 1 のパルスの光強度を前記焦線上で実質的に一定にするために、前記パルスの振幅の空間変調をさらに含むことを特徴とする方法。

【請求項 15】

請求項 1 3 および 1 4 のいずれか一項に記載の方法であって、

— 前記第 1 の光パルスの前記空間成形および光強度を介して、穿孔するチャネルの位置および長さを制御するステップと、

そのように形成された前記プラズマチャネル内に前記第 2 の電磁波（複数可）によって付与されるエネルギーを介して、前記チャネルの直径を制御するステップと
を含むことを特徴とする方法。 10

【請求項 16】

請求項 1 3 ~ 1 5 のいずれか一項に記載の方法であって、前記サンプルが半導体から製作されていることを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザナノ加工方法および装置に関し、特に、高アスペクト比ナノ穿孔（ドリル：drilling）またはウェーハ接合に適したレーザナノ加工方法および装置に関する。 20

【背景技術】

【0002】

たとえば、マイクロおよびナノ電子回路および光電回路用の半導体ウェーハ内またはそれを貫通して、チャネルまたは「ビア：vias」を穿孔する場合、深い穿孔孔、すなわち、高いアスペクト比を有する穿孔孔を達成することが求められており、アスペクト比とは、穿孔された孔の長さのその直径に対する比によって定義される。しかし、使用される技法には関係なく、深い孔の穿孔を達成することは極めて難しい。特に、直径がその深さより著しく小さい孔から、物質を取り出し、エネルギーを送り込むことが難しい。これら穿孔技法には、たとえば、集束イオンビーム技法（いわゆる「e - ビーム」法）や化学エッチングを伴うフォトリソグラフィ（または「反応性イオンエッチング」、略称 RIE）が含まれる。E - ビーム技術は、高い真密度を必要とし、100 nm より小さい直径の孔に適し、穿孔速度が遅く、達成される穿孔孔のアスペクト比が約 10 ~ 50 を限界とする。フォトリソグラフィの技術は、前以て被覆を生成することを必要とし、したがって、費用が掛かり、かなり柔軟性に欠ける。達成されるアスペクト比は約 10 である。 30

【0003】

誘電物質（ガラス）の高アスペクト比マイクロ / ナノ構造生成の分野では、本発明者は、ベッセルビームタイプの「非回折」空間特性を有するフェムト秒レーザビームを使用することにより、物質の深いところでのエネルギーの付与を制御することが可能になることを実証してきた。この技術は、物質を融蝕し（アブレート：ablated）除去するために十分に強度を有し局所化された微小爆発（マイクロ - エクスプロージョン：micro-explosion）を生じさせることをとりわけ可能にする（たとえば、エム . カ . ブーヤン（M. K. Bhuyan）他による「High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams」Appl. Phys. Lett. 97, 081102 (2010) 参照）。このように、単一のレーザパルスが、極めて高アスペクト比のナノ孔（ナノチャネル）を生成することを可能にする。 40

【0004】

しかし、この技法は、半導体のナノ加工に適用することができない。一方で、これら材質は、加工に従来使用されているパワーレーザの波長（UV、可視、および近赤外）には不透過性であり、したがって、それら材質中にそれらレーザビームを伝播させることは不可能である。他方で、半導体材は、高度に非線形性であり、融蝕に必要な光強度を有する非回折ビームが伝播すると、カーポローリングなどの非線形効果によって、伝播軸に沿って強度の 50

振動が生じ、その結果、伝播軸に沿って不均一なエネルギー付与が生じ、不十分な穿孔特性になる。

【0005】

さらに、ガラスのような誘電物質では、本出願人は、入口面の融蝕に際し、特に空気とガラスとの屈折率の非線形的差によって、非回折ビームを不安定化させる効果を認めており、それがさらに、伝播軸に沿ったエネルギーの付与の不均一性を生じる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明の一目的は、とりわけ高アスペクト比の穿孔に関し、半導体のような誘電物質のナノ加工に適用可能なナノ加工装置および方法を提供することである。 10

【課題を解決するための手段】

【0007】

第1の態様によれば、本発明は、所定の透過帯域を有する物質から製作されたサンプルをレーザナノ加工するための装置であって、

- 所定の入射ビームから、非回折ビームを生成することができる集束（フォーカッシング：focusing）モジュールであって、その非回折ビームが、集束モジュールの光軸にほぼ沿って配向される焦線に沿う、集束モジュールと、

- 前記物質の透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の第1の光パルスを射出する第1の手段であって、その第1の光パルスが、前記集束モジュールによって集束後、前記物質内に、多光子吸収を介して前記焦線に沿って自由担体（フリー・キャリア：free carriers）のプラズマを生成することができ、これによりプラズマチャネルを形成する、第1の手段と、

- 前記物質の透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の少なくとも1つの第2の電磁波を射出する第2の手段であって、その第2の電磁波が、前記プラズマチャネルに空間的に重ね合わせられるように図られ、それによって、プラズマの自由担体による吸収を介して前記物質を加熱する、第2の手段と

を備える装置に関する。 20

【0008】

本出願人は、そのような装置が、半導体を含めて、光波に対して透過性のスペクトル帯域を有するあらゆるタイプの物質において、高アスペクト比のナノ穿孔を可能にすることを実証してきた。特に、入射パルスの時間成形（一時的に形作ること：temporal shaping）によって、プラズマチャネルの形成において不均一性の原因になる非線形性、特にカーブ効果がサンプル内で抑制される。 30

【0009】

すなわち、たとえば10ピコ秒より短い持続時間の第1の超短光パルスが、集束モジュールを用いてサンプル内に集束された後、多光子吸収によって、自由担体のプラズマを形成することを可能にする。第1のパルスの光強度よりその光強度が低い1つ以上の第2の電磁波が、プラズマの自由担体による吸収を介してエネルギーを付与することが可能である。 40

【0010】

非回折ビームは、有利にはベッセル（Bessel）ビームまたはエアリ（Airy）ビームである。

【0011】

一変形形態によれば、前記第2の電磁波（複数可）は、マイクロ波またはテラヘルツ波でよく、これらの波の波長は、いかなる線吸収（リニアーナ吸収：linear absorption）も避けるために、加工したい物質の透過領域に含まれる。

【0012】

あるいは、前記第2の電磁波（複数可）は、物質の透過領域にやはり含まれる波長の光波である。 50

【 0 0 1 3 】

後者の場合には、一変形形態によれば、第2の射出手段は、たとえば、数分の1ピコ秒と数ミリ秒との間に含まれる持続時間の1つのみの第2の光パルスを射出することを可能にする。あるいは、第2の射出手段は、一連のパルス（たとえばパルスの連射）、たとえば時間的に間隔が接近している一連の超短パルスを射出することを可能にすることができます。

【 0 0 1 4 】

前記第1のパルスおよび前記第2のパルス（複数可）を形成するために、一変形形態によれば、2つの独立した同期式レーザ源を使用することが可能である。

【 0 0 1 5 】

あるいは、前記第1および前記第2の射出手段は、単一のレーザパルスを射出するレーザ源によって形成され、前記レーザ源によって射出された光波から第1の光パルスおよび第2の光パルス（複数可）を生成することが可能な時間成形モジュールを備える。

【 0 0 1 6 】

たとえば、時間成形モジュールは、少なくとも2つのチャネルを形成することが可能なビーム分割器と、それらチャネルの少なくとも1つに、パルス伸長器とを備える。

【 0 0 1 7 】

別の例によれば、時間成形モジュールは、D A Z Z L E R（登録商標）タイプの音響光学システムを備える。

【 0 0 1 8 】

一変形形態によれば、第1の態様による装置は、前記時間成形モジュールの下流に周波数変換モジュールをさらに備える。この周波数変換モジュールは、特に半導体の場合、レーザ射出源からの波長を、加工する物質の透過帯域に適合させることができある。

【 0 0 1 9 】

有利には、第1の態様による装置は、非回折ビームとサンプルとを相対的に移動させることができ可能な走査モジュールをさらに備える。

【 0 0 2 0 】

一変形形態によれば、集束モジュールは、サンプル内に焦線の列を形成するために、複数の非回折ビームを平行に生成することが可能である。

【 0 0 2 1 】

第2の態様によれば、本発明は、所定の透過帯域を有する物質から製作されたサンプルをレーザナノ加工するための方法であって、

- 前記物質の透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の第1のパルスを射出するステップと、

- 前記第1のパルスを空間成形（空間的に形作る：spatial shaping）するステップであって、その第1のパルスが前記サンプル内に集束した後、焦線に沿って非回折ビームを形成することが可能になり、前記非回折ビームの光強度が、多光子吸収を介して前記焦線に沿って自由担体のプラズマを生成することを可能にし、これによりプラズマチャネルを形成する、ステップと、

- 前記物質の透過帯域に含まれるスペクトル帯域内の少なくとも1つの第2の電磁波を射出するステップであって、その第2の電磁波が、前記プラズマチャネルに空間的に重ね合わせられ、それによって、プラズマの自由担体による吸収を介して前記物質を加熱する、ステップと

を含む方法に関する。

【 0 0 2 2 】

一変形形態によれば、前記第1のパルスの空間成形ステップは、前記第1のパルスの光強度を前記焦線上で実質的に一定にするために、前記パルスの振幅の空間変調をさらに含む。

【 0 0 2 3 】

第1の例によれば、第2の態様による方法は、チャネルを形成するために、所定の物質

10

20

30

40

50

から製作されたサンプルのナノ穿孔に適用され、

- 前記第1の光パルスの空間成形および光強度を介して、穿孔するチャネルの位置および長さを制御するステップと、
- そのように形成されたプラズマチャネル内に前記第2の電磁波（複数可）によって付与されるエネルギーを介して、チャネルの直径を制御するステップとをさらに含む。

【0024】

第2の例によれば、第2の態様による方法は、第1のサンプルと第2のサンプルとの接合に適用され、

- 前記第1の光パルスの空間成形および光強度を介して、2つのサンプルの境界面での加熱チャネルの位置および長さを制御するステップと、
- そのように形成されたプラズマチャネル内に前記第2の電磁波によって付与されるエネルギーを介して、前記境界面上の融点を制御するステップとをさらに含む。

【0025】

有利には、第2の態様による方法は、半導体から製作されたサンプルをナノ加工するために使用され、たとえば、半導体サンプルにおいてチャネルをナノ穿孔し、あるいは、半導体からそれらの少なくとも1つが製作された2つのサンプルを接合するために使用される。用語「半導体」は、本記述では、その物質の価電子帯と伝導帯とがエネルギー的に分離しており（すなわちその物質がバンドギャップを有し）、その物質の伝導帯が室温で空または殆ど空である物質を意味すると理解されたい。たとえば、シリコン、ゲルマニウム、シリコンカーバイド（SiC）、シリコンゲルマニウム（SiGe）から選択される物質、砒化ガリウム／アルミニウム系（Al_xGa_{1-x}As）、砒化ガリウム／インジウム系（In_xGa_{1-x}As）、燐化ガリウム／インジウム系（InGaP）に属する物質、および酸化亜鉛（ZnO）、硫化亜鉛（ZnS）、テルル化亜鉛（ZnTe）などがそれに対応することができる。

【0026】

本願に記載の方法は、誘電物質、たとえばガラス、融解（フューズド：fused）石英、石英、ニオブ酸リチウム、ダイアモンドなどにも適用することができる。

【0027】

本発明の他の利点および特徴が、添付図面によって例示される説明を読むと明らかになる。

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】本発明によるナノ加工方法の1つの例を示す構成図である。

【図2】本発明による装置の1つの例的空間成形モジュールを示す構成図である。

【図3】ベッセルビームタイプの非回折ビームの集束状態を示す概略図である。

【図4】実験的に得られた例示的ベッセルビームの画像および強度の空間プロフィールの図であり、長手方向プロフィール（4A、4B）および断面プロフィール（4C、4D）を示す図である。

【図5】先行技術によってガラス内に得られるプラズマ密度の、面内の様相を示すシミュレーションの図である。

【図6】本発明の一実施形態による装置によってガラス内に得られるプラズマ密度の、面内の様相を示すシミュレーションの図である。

【図7A】本発明による装置の1つの実施形態の図である。

【図7B】本発明による装置の1つの実施形態の図である。

【図8】A～Dは貫通または盲穿孔孔（盲ドリル穴：blind drill holes）の穿孔、およびウェーハ接合に適用された本発明によるナノ加工方法の実施例の図である。

【図9A】エアリビームを用いて適用されているナノ加工方法を示す概略図である。

【図9B】エアリビームの強度分布を示す画像である。

10

20

30

40

50

【発明を実施するための形態】**【0029】**

図1は、本発明の一実施形態によるナノ加工方法を示す構成図である。

【0030】

この例では、ナノ加工方法は、パルス式レーザ源によるビームの射出101、ならびに、より詳細に以下に説明する時間成形ステップ102および空間成形ステップ103後の、穿孔するサンプル105上へのビームの集束を含む。ビームの走査104およびサンプルの並進／回転（矢印106によって記号化されている）によって、所定のサンプルに複数の穿孔孔を順次生成するために、ビームとサンプルとを相対的に移動させることができる。

10

【0031】

この例では、時間成形ステップ102は、単一のレーザ源から、サンプルがそれから形成されている物質の透過帯域に含まれる帯域内の第1および第2の光パルスを発生させるステップを含む。物質の透過帯域は、その媒体の吸収係数が所定の値より低いスペクトル領域であり、その所定の値は、たとえば 0.5 cm^{-1} であり、それはその媒体を通る透過率が厚さ1cmの媒体に対して60%より大きいことに対応する。スペクトル透過帯域は、したがって、たとえば、半導体シリコンから製作されたサンプルに対しては 1100 nm より上のスペクトル帯域である。言い換えれば、第1および第2のパルスは、少なくとも2つの光子を含む光学遷移（オプティカル・トランジション：optical transition）を介するだけで電子遷移（エレクトロニック・トランジション：electronic transition）を生じることができるように選択される。第1のパルスは、持続時間が短く、たとえば持続時間が10ピコ秒より短く、好ましくは持続時間が約数分の1ピコ秒である。連続波にさえもなり得る長い方の第2のパルスは、これら電子を励起することが可能であり、エネルギーの大部分が、レーザ融蝕を定着させる（デポジット：be deposited）ことができる。第2のパルスは、第1のパルスによって生成された励起が、第2のパルスが到達するときに確実に未だ有効であるようにするために、第1のパルスと同期させることができる（通常、その励起は、物質に応じて、0.1~5ピコ秒の間継続する）。第2のパルスは、その強度が十分であれば、なだれイオン化効果を介してプラズマ密度を増幅することもできる。ただし、2つのパルスのそれぞれの強度は、カー効果などの非線形効果による伝播の不安定性を発生させないために、抑制する必要がある。

20

【0032】

別法として、別々の2つのレーザ源を使用して、第1および第2のパルスを生成することができる。

【0033】

入射ビームの空間成形103は、集束後、非回折ビームを形成することを可能にし、このビームは、サンプル内に焦線を形成する。非回折ビームは、たとえばベッセルビームまたはエアリビームであり、より一般的には、その伝播軸に沿って一定のプロフィールを有する所定の大きさの焦線を持つ特性を有する任意のビームであり、それゆえ用語「非回折」になる。この空間成形は、短い第1のパルスに適用され、以下に説明するように、第2のパルスにも適用することができる。パルスの持続時間が短い場合（通常、数分の1ピコ秒より短い場合）、ビームの非線形伝播は、集束度を増すことによって、すなわち、ビームの断面での最高強度の光点の大きさを減少させることによって、高強度において安定化させることができる。しかし、非線形効果（特にカー効果）が極めて強い場合、ビームの安定化には、極めて高度の集束度（通常 20° より大きい角度）が必要になる。したがって、極めて長く、極めて集束した非回折ビーム、たとえばベッセルタイプのビームを生成することは、高価で嵩張り、整列の困難な、極めて大きな直径のレンズを必要とするので、もはや技術的に不可能である。

40

【0034】

入射ビームを、適切な持続時間および波長の2つのパルスの形態に時間的に成形すると、低エネルギー励起を達成することを可能にし、それによって、物質中を伝播する際の非

50

線形効果を最小限に抑えることが可能になり、次いで、より長い第2のパルスを用いて、物質を融蝕または接合するために加熱するのに必要なエネルギー強度を付与することが可能になる。別法として、エネルギーは、その電磁波のスペクトル帯域が、物質の透過領域に含まれてあり、第1のパルスによって形成されたプラズマの自由担体によって吸収することができれば、光波ではない電磁波、たとえばマイクロ波またはテラヘルツ波を用いて付与することもできる。あるいは、エネルギーは、以下の説明で詳述されるように、間隔の接近した短い一連のパルスによって付与することができる。

【0035】

このように、産業的に受容できる大きさからなる光学手段を使用して、単一のステップで、半導体によって製作され得るサンプルに、長いと同時に細いチャネルを生成することが可能になる。第1のレーザパルスによって、穿孔するチャネルの長さおよび位置を設定することができ、他方、第2のパルス（または第1の光パルスに続く一連のパルス）のエネルギー密度によって、チャネルの直径を設定することができる。ウェーハ接合の分野に関しては、第2のパルスのエネルギー密度が、物質を融解するために、局部的に温度を調節することを可能にすることができる。各パルスの持続時間およびエネルギーパラメータは、有害な非線形効果を最低限に抑えるように決定されるが、また、エネルギーが物質内に確実に局部的に付与されるようにも決定される。具体的には、超短パルスによる励起が、媒体内の欠陥によって誘起されるイオン化より多くの自由担体を、多重光子イオン化によって生成することを可能にし、それによって、プラズマチャネルの形状のより良好な制御を可能にする。

10

【0036】

図2は、本発明によるナノ加工装置1の一実施形態を示す。

【0037】

装置1は、レーザ源201と、たとえばI₁およびI₂でそれぞれ示された第1および第2のパルスを発生することを可能にする時間成形モジュール202とを備え、それらの実施形態が以下に詳述される。装置は、サンプル内のパルスの空間的形態を成形する集束モジュール203をさらに備え、所定の入射ビームから非回折ビーム210をサンプル内に焦線に沿って生成することを可能にする。非回折ビームは、たとえばベッセルまたはエアリビームである。焦線は、ほぼ集束モジュールの光軸に沿う向きになる。この例では、2つの光パルスI₁およびI₂は、同じモジュール203を通過し、それによって、サンプル内で両パルスを確実に重ね合わせることが容易になる。別法として、第1の光パルスのみが、集束モジュール203内で空間成形を受ける。

20

【0038】

非回折ビームを生成することを可能にする集束モジュール203は、図2に示されるもののような、たとえばベッセルビームを生成するための、「直接」タイプのモジュールでもよい。この例では、そのモジュールは、非回折ビームを生成することのできる光学システム212を備え、次いで、サンプル内のビームの大きさを減少させる写像システムを備える。光学システム212は、既知の方式でベッセルビームを生成するために、アキシコンレンズと、アキシコンミラーと、(MEMS)微小ミラーのマトリックスと、反射もししくは透過タイプの空間位相変調器(spatial phase modulator)、または、一般的に、回転対称による線形位相変調(linear phase modulation)を適用することのできる任意の光学システムとを備え得る。写像システムは、2次位相歪(quadratic phase distortion)を誘起しないために、たとえば「テレスコープ」または「4f」タイプのシステムであり、光学素子204と、マイクロスコープ対物レンズ209とを備える。図2の例では、マイクロスコープ対物レンズ209は、サンプル内のビームの大きさを著しく減少させることができる。有利には、マイクロスコープ対物レンズは、さらに、加工するサンプルの画像をビデオカメラ206上に形成することを可能にし、そのビデオカメラの前には、サンプルの加工したい領域を正確に示すことを可能にし、ビームの正確な配置を確実にするために、集束対物レンズ207が配置される。図2の例では、光学素子204の焦点面内に配置された空間フィルタ211が、光学システム212によって形成された回折パターンに空

30

40

50

間的にフィルタをかけることを可能にし、それによって、対象とする非回折ビーム、たとえば零次のベッセルビームに対応する空間周波数のみを選択する。

【0039】

別法として、たとえばエアリビームを発生させる場合、集束モジュール203は「間接」タイプのものであり、入射ビームの空間成形は、レンズのフーリエ面において達成される（エアリビームの生成に関しては、たとえば、ペ.ポリンキン(P. Polynkin)等による「Curved Plasma Channel Generation Using Ultrasound Airy Beams」Science 324, 229-232 (2009) を参照されたい）。図2に示されているもののような写像システム204、209が、フーリエ変換を行うレンズの焦点画像面からエアリビームの大きさを減少させることができる。10

【0040】

図3および4は、概略図、および実験画像またはシミュレーションによって得られた画像によって、ベッセルタイプの非回折ビームを形成するのに適した空間成形手段によって得られた非回折ビームを示す。

【0041】

図3に概略的に示されている集束／空間成形モジュールは、アキシコンタイプの光学システム303である。この例では、入射ビーム301はガウス空間分布を有する。既知の方式では、その光強度分布 $I_0(z)$ が零次のベッセル関数に従う焦線310が形成される。焦線の長さDは、アキシコン303の構造によって定義される円錐角 の正弦に対する、光学システム303に入射するガウスビーム301の幅wの比に比例する。20

【0042】

図4A～4Dは、空気中で測定されたベッセルビームの光強度の画像および空間プロフィールを、長手方向プロフィール(4A、4B)および横断プロフィール(4C、4D)について示す。図4A(画像401)に見ることができるように、約20 μmの距離を超えて一定なプロフィールを有する伝播が、1 μmより小さい焦点直径(画像402、図4C)と共に達成されている。画像401の強度の空間プロフィールを示す曲線403(図4B)は、伝播軸zに沿って不均一な光強度の分布を示す。図3の強度曲線 $I_0(z)$ によって示されるこの不均一性は、入射ビームのガウス空間分布に関係する。

【0043】

一変形形態によれば、空間成形は、特にビームの強度を可能な限り一様にするために、伝播軸に沿ったビームの強度を調節することができる振幅変調器を含み得る。この振幅変調は、集束モジュールの特定の変調システム、たとえばミラーのマトリックスもしくは位相変調器によって達成することができるか、または非回折ビームを形成するためにその種の変調システムが既に使用されているときにその既存のシステムに統合することができるかのいずれかである。この場合、エネルギーの一部分は、たとえば図2に示されている空間フィルタ211を用いて、空間的にフィルタが掛けられる回折次数へ逸らされることがある。

【0044】

図5は、カーブ非線形性の存在における、ナローギャップ(誘電または半導体)媒体での、ベッセル空間構造を有する超短パルスによるプラズマの生成に対応する数値シミュレーションを示す。図5では、高強度では、伝播軸に沿って生成される電荷密度(「プラズマチャネル」)に大きな変化があることを見ることができ、これは、焦線が境界面(たとえば空気／ガラス)を横切る場合により際立つ。したがって、エネルギー付与が特に不均一になる。図6は、一連の複数のパルスによって生成される同様な空間プラズマ分布を示し、第1の超短であるが低エネルギーのパルスが、プラズマチャネルを生成することを可能にし、第2のパルスまたは引き続く一連のパルスが、たとえば融蝕またはウェーハ接合の目的で物質を加熱するために、エネルギーを付与することを可能にする。総光エネルギーは、両事例の先の場合と同等であるが、図6に示された事例では、プラズマ分布は僅かな変化しか示さず、エネルギー付与は明らかにより一様である。4050

【0045】

上記に説明した方法によって、約10ナノメートルから数ミクロンまでの直径を有するチャネルを、1から500に亘る範囲で制御可能なアスペクト比をもって生成することができる。ウェーハ接合の場合には、非回折ビームの焦点領域を極めて長くすることができる、非回折ビームは、本来的に、境界面に対するビームの位置決めにおける制約を著しく軽減することができる。

【0046】

図7Aおよび7Bは、本発明によるナノ加工装置の例2および3に実装された時間成形モジュールの2つの例を示す。

【0047】

装置2および3のそれぞれは、レーザ源701と、前記第1および第2の光パルス I_1 および I_2 を生成することができる時間成形モジュール702とを備える。装置は、所定の入射ビームから非回折ビーム710、たとえばベッセルまたはエアリビームを上記の方式で生成することができる、ビームの空間成形のための集束モジュール703をさらに備える。たとえば、集束モジュールは、非回折ビームを生成することができる光学システム712と、ビームの大きさを減少させるテレスコープおよびビームを偏向し走査することができる1組のミラーを備える光学ブロック709とを具備する。図7Aおよび7Bの例では、周波数変換モジュール718が、加工する物質の透過帯域にパルスの波長を適合させることができる。たとえばシリコンの場合には、1550nmの波長が、好ましくは選択されることになる。この波長での超短ビームは、たとえば、ファイバレーザであり得るレーザ701による800nmを中心とし(たとえばチタンサファイア技術による)または1030nm~1064nmの(たとえばイットルビウム技術による)超短ビームを、周波数変換システム718に入射することによって獲得することができ、その周波数変換システムは、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)であり得る。周波数変換モジュールは、時間成形モジュール702の下流に配置することができ、時間成形は、波長が短い方が実行し易くすることができる。

【0048】

図7Aは、第1の例示的時間成形モジュール702を示す。この例では、レーザ源701によって射出されたパルス I_0 は、ビーム分割器714を用いて2つに分割される。第1のパルス I_1 は、ミラー719によって反射され、次いで、偏向板717を用いて周波数変換モジュール718に伝送される。減衰器713は、加工したいサンプル705の性質に応じて、パルス I_1 の光強度を調節することができる。第2のパルスは、パルス I_2 を形成するために、フェムト秒技術分野で既知の手段715、たとえば回折格子システム、プリズムシステム、または音響光学結晶によって時間的に伸長される。このパルスは、次いで、同様にして、周波数変換モジュール718へ導かれる。

【0049】

図7Bは、第2の例示的時間成形モジュール702を示す。この例では、パルス I_0 は、2つのパルスに分割され、DAZZLER(登録商標)タイプ(FASTLINE(登録商標)によって市販されている)の音響光学システム721によって時間的に伸長される。電気制御式シャッタ720が、たとえば高繰返し率のレーザ源が用いられているとき、一連のパルスから1つのパルスを選択することを可能にする。

【0050】

図7Aおよび7Bに示された装置2および3の代替として、独立した2つの同期式レーザ源を使用することができる。その場合、第1のレーザ源は、上記のように、第1の超短パルスを射出することができる。第2のレーザ源は、その持続時間が、たとえば、加工するチャネルの直径に応じて、1ピコ秒から数ミリ秒の間にるように選択される第2のパルスを射出することができる。2つのパルスは、加工する物質の透過帯域に含まれるスペクトル帯域を有する。この場合、ビームを時間的に伸長する手段を使用する必要はない。

【0051】

一変形形態によれば、第2のパルスの持続時間およびエネルギーは、第2のパルスが、

10

20

30

40

50

単独で物質に照射されても、効果がないように調節される。この場合、パルスの同期は、より柔軟なパラメータになる。第2のパルスは、第1のパルスよりも早く透過させることもできる。その場合、物質内のエネルギー付与は、第2のパルスの終了と第1のパルスの開始との時間差に比例する。特に、この手法は、第2のパルスが第1のパルスに対して長いとき、同期の精度上の制約を軽減することができる。

【0052】

一変形形態によれば、本発明によるナノ加工装置は、レーザ（複数可）によって射出された一連のパルスから1つ以上のパルスを選択することができる電気制御式シャッタを備える。シャッタは、電気式でも光学式でもよい。光学式の場合、シャッタは、たとえば偏光器に続くポッケルスセルが対応することができる。

10

【0053】

別法として、時間成形が一連のパルスの生成を含み、これらパルスの第1の超短パルスが、集束モジュールによって、サンプル内に焦線に沿って多光子吸収により自由担体のプラズマを発生させることができ、引き続く諸パルスが、エネルギーを付与することができる。第1のパルスは、持続時間がたとえば10 psより短い。第2の諸パルス（複数のパルス）は、より長かったりより短かったりし得るが、それぞれ低い強度を有する。すなわち、一連の第2の超短パルスを、プラズマの自由担体による吸収を介してエネルギーの付与および物質の加熱のために使用することが可能になり、それらパルスは、通常、持続時間が10 psより短く、たとえば、寿命時間が物質内の自由担体のプラズマの寿命時間より短い（すなわち、ガラス内で約100 fs）。諸パルスは、時間的に間隔が近接しており、たとえば諸パルス間の時間間隙は10 psより小さい。前記パルスの強度は、カー効果などの非線形効果によってビームが不安定化されるのを防止するのに十分な低さである。その一方で、諸パルスの強度は、自由担体を生成し、プラズマ密度を増幅するのに寄与するのに十分であり得る。一連のパルスは、特にDAZZLER（登録商標）または複数のディレイラインを有する、図7Aおよび7Bを参照して説明された手段によって生成することができる。別法として、たとえばDAZZLER（登録商標）を用いて、3次位相をスペクトル的に加え、それによって複数のピークを含むエアリビームを時間的に形成することができる。

20

【0054】

図8A～8Dは、本発明によるナノ加工方法の様々な適用例を示す。これらの図において、プラズマチャネルが線分810によって示されている。図8Aおよび8Bは、半導体から製作されたサンプル805の前面および背面の融蝕をそれぞれ示す。図8Cは貫通融蝕を示し、図8Dは、2つのサンプル806と807との接合を示す。

30

【0055】

一変形形態によれば、サンプルに複数のチャネルを順次穿孔するために、ビームとサンプルとを相対的に移動させることができる。これは、ビームのみをビーム走査法によって移動させることにより、または並進および回転台によって空間の様々な軸に沿ってサンプルを移動させることのいずれかによって、あるいは両方を組み合わせて達成することができる。接合用途については、電気的にまたはコンピュータを介して、相対移動とシャッタとを同期させることができる。ビームとサンプルとの相対移動は、特に、融蝕または接合の領域（図8A～8Dの810）を設定することを可能にする。融蝕については、ビームは、物質を除去するために（前または背）面と交差するように配置される。物質内のビームの深さが、融蝕領域の長手方向配置を設定する。

40

【0056】

一変形形態によれば、平行加工工程を実施するために、たとえば、複数の非回折ビームを形成する光学システムのマトリックスを使用して、または、複数の非回折ビームを平行に生成することを可能にする空間位相変調器もしくはホログラムを使用して、複数のビームを平行に生成することも可能である。

【0057】

図9Aおよび9Bは、本発明による方法の一変形形態を示し、エアリタイプの非回折ビ

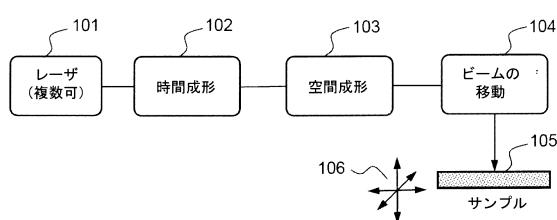
50

ームが集束モジュールによって生成されている。ベッセルビームによって複数のナノチャネルを逐次穿孔する際、チャネル同士が互いに十分に接近している場合、レーザ光が、融蝕限度に達する前に、先に既にチャネルが穿孔されている領域を通過してしまう可能性がある。この場合、光の一部分が散乱し、ビームが部分的に変形し得る。この場合にエアリビーム 910 を使用する利点は、図 9B に示されているように、レーザの強度が平面の単一の象限のみに包含されていることにある。したがって、光によって占められる部分が、先にチャネルが穿孔されている領域に決して重ならないように配置することによって、エアリビームの主ロープによりチャネル（図 9A の 920）を穿孔することが可能になる。

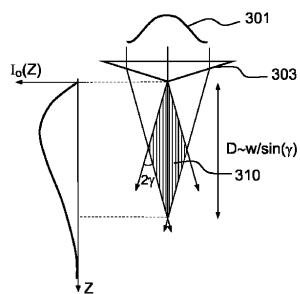
【0058】

多数の詳細な実施形態を通して説明してきたが、本発明によるレーザナノ加工方法および装置は、当業者には明白と見られるであろう様々な変形形態、修正形態、および改良形態を含み、これら様々な変形形態、修正形態、および改良形態は、添付特許請求の範囲によって定義されるような本発明の範囲の一部分を形成することを理解されたい。10

【図 1】



【図 3】



【図 2】

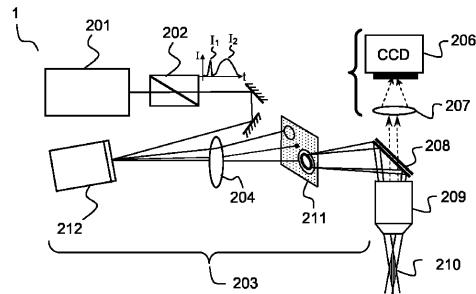
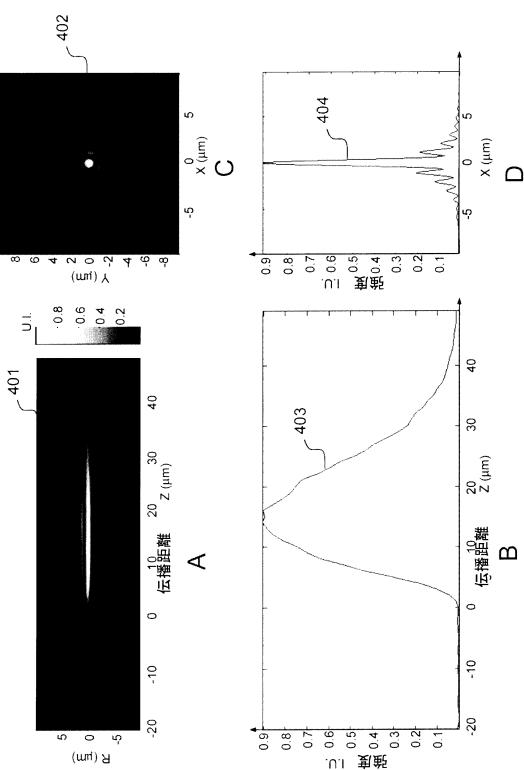


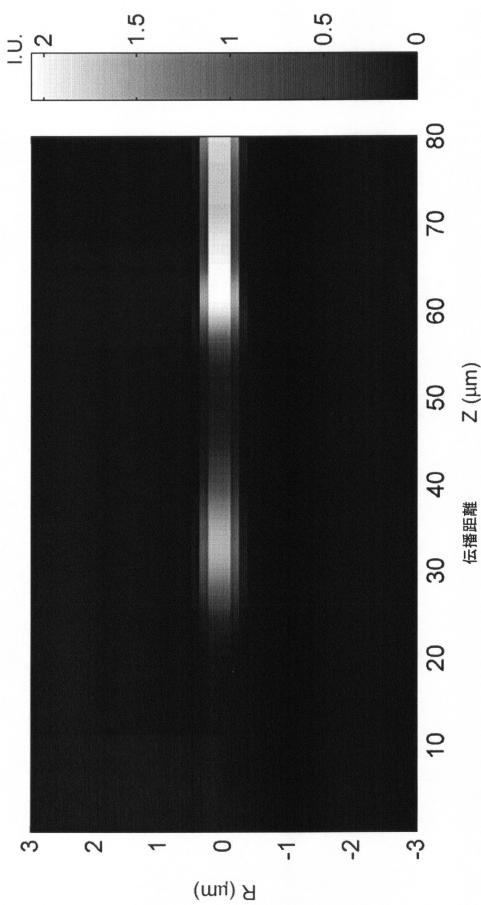
FIG.3

FIG.2

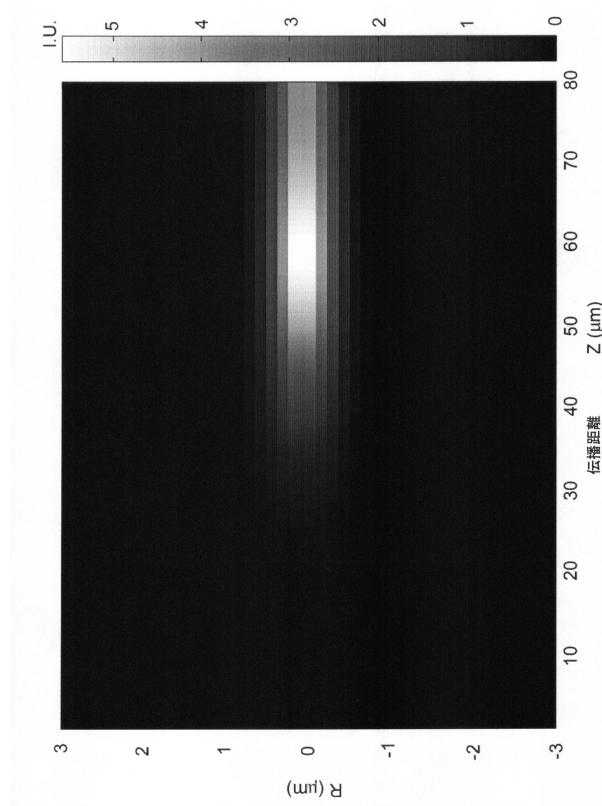
【図4】



【図5】



【図6】



【図7 A】

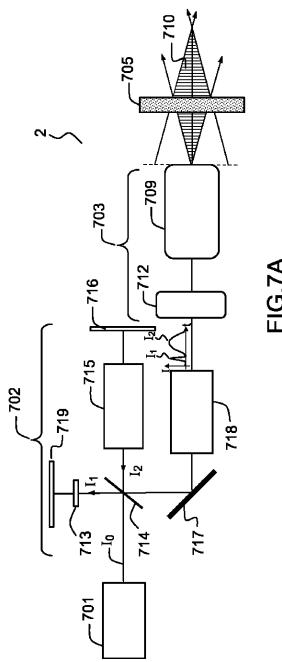


FIG.7A

【図 7 B】

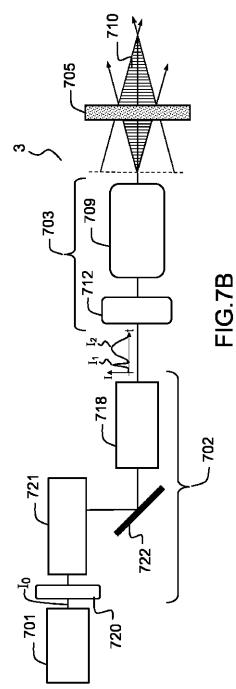


FIG.7B

【図 8 A】

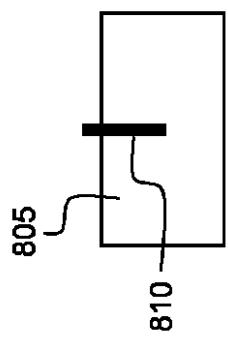


FIG.8A

【図 8 B】

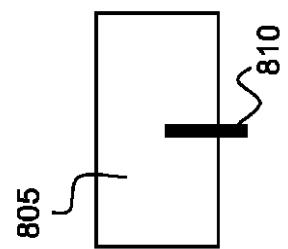


FIG.8B

【図 8 C】

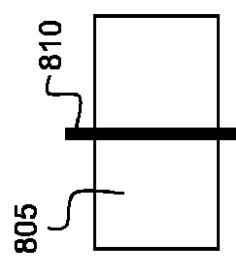


FIG.8C

【図 9 A】

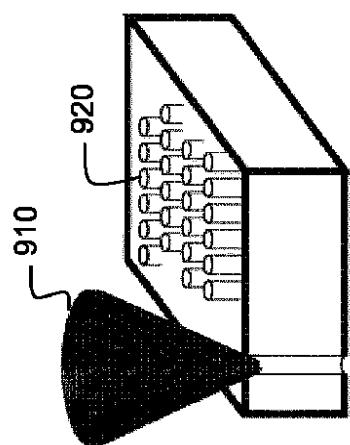


FIG.9A

【図 8 D】

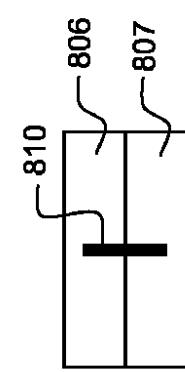


FIG.8D

【図 9 B】

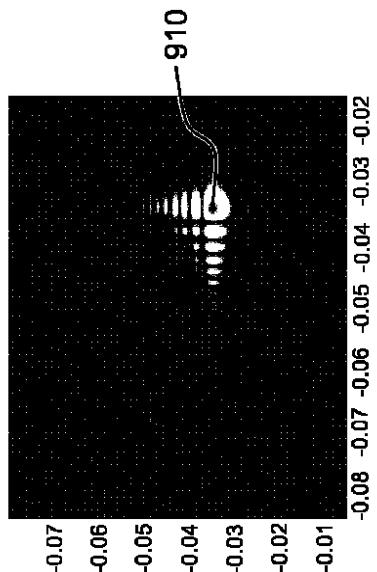


FIG.9B

フロントページの続き

(72)発明者 ラクールト ピエール - アンプロワーズ
フランス ブサンソン リュ ド ベルフォール 73
(72)発明者 ジャコウ マキシム
フランス ブサンソン アリー ド リル オー モワノー 17
(72)発明者 フーファロ ルカ
フランス オクソン デシュ リュ マウポミエー 3
(72)発明者 デュドレ ジヨン
フランス ブサンソン テア リュ アルベール メタン 13
(72)発明者 ド ラバシュレリー ミシェル
フランス フェリエール - ル - ポワ リュ デュ シャトー 5

審査官 佐藤 俊彦

(56)参考文献 特開2004-136358 (JP, A)
特開2001-212685 (JP, A)
米国特許出願公開第2005/0226287 (US, A1)
国際公開第2012/006736 (WO, A2)
米国特許出願公開第2011/0180729 (US, A1)
特開2009-031634 (JP, A)
特開2006-305586 (JP, A)
特開平08-076152 (JP, A)
特開2007-196277 (JP, A)
特開2010-075996 (JP, A)
特開2004-154813 (JP, A)
特開2004-170874 (JP, A)
特開2008-055477 (JP, A)
特開2006-269878 (JP, A)
特表2011-517299 (JP, A)
米国特許第05394411 (US, A)
米国特許出願公開第2006/0099810 (US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00 - 3/30
B23K 26/00 - 26/70