

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5744727号
(P5744727)

(45) 発行日 平成27年7月8日(2015.7.8)

(24) 登録日 平成27年5月15日(2015.5.15)

(51) Int. Cl.	F I
B 2 3 K 26/36 (2014.01)	B 2 3 K 26/36
B 2 3 K 26/00 (2014.01)	B 2 3 K 26/00 N
B 2 3 K 26/04 (2014.01)	B 2 3 K 26/04
H O 1 J 37/317 (2006.01)	H O 1 J 37/317 D

請求項の数 20 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2011-517626 (P2011-517626)	(73) 特許権者	501419107
(86) (22) 出願日	平成21年7月9日(2009.7.9)		エフ・イー・アイ・カンパニー
(65) 公表番号	特表2011-527639 (P2011-527639A)		アメリカ合衆国オレゴン州97124, ヒルズバラ, ノースイースト・ドーソンクリーク・ドライブ5350
(43) 公表日	平成23年11月4日(2011.11.4)	(74) 代理人	100103171
(86) 国際出願番号	PCT/US2009/050135		弁理士 雨貝 正彦
(87) 国際公開番号	W02010/006188	(72) 発明者	マーカス・ストロー
(87) 国際公開日	平成22年1月14日(2010.1.14)		アメリカ合衆国 オレゴン州 97215
審査請求日	平成24年6月26日(2012.6.26)		ポートランド サウス・イースト クレイ・ストリート 4521
(31) 優先権主張番号	61/079,304	(72) 発明者	アミン・サムサバル
(32) 優先日	平成20年7月9日(2008.7.9)		アメリカ合衆国 オレゴン州 97034
(33) 優先権主張国	米国 (US)		レイク・オスウィーゴ パリサデス・テラス 2024

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ機械加工のための方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

加工物上に構造を形成し、または加工物上の構造を改変する方法であって、
加工物に向かってイオン・ビームを誘導すること
を含み、前記イオン・ビームが、前記加工物の結晶構造内において、加工物材料のアブレーションしきい値を低下させる光子吸収性欠陥を誘発し、
前記加工物に向かってイオン・ビームを誘導することが、ガリウム・イオンを前記加工物の表面から内部へ注入することと、空格子、格子間原子または欠陥複合体を生成することを含み、前記方法がさらに、
前記加工物に向かってレーザ・ビームを誘導すること
を含み、レーザ光子が、前記イオン・ビームによって形成された前記欠陥によって吸収されて、前記イオン・ビームによって処理された前記加工物上の材料を除去し、
前記除去される材料のサイズが前記イオン・ビームのスポット・サイズによって決められ、
前記イオン・ビームは、前記レーザ・ビームよりも小さいスポットに集束させることができ、
前記イオン・ビームと前記レーザ・ビームを前記加工物に向かって誘導することが、前記イオン・ビームと前記レーザ・ビームをパルスとして逐次的に誘導すること、または、前記イオン・ビームと前記レーザ・ビームを前記加工物に向かって連続的に照射する、
方法。

【請求項 2】

前記イオンが、金属合金源によって生成される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記イオンが、誘導結合プラズマ源によって生成される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記加工物に向かつての前記レーザー・ビームの前記誘導が、前記イオン・ビームによって誘発された欠陥を有する材料を除去するには十分だが、前記イオン・ビームによって誘発された欠陥のない材料を除去するには不十分なフルエンスを有する前記レーザー・ビームを誘導することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記加工物に向かつて前記レーザー・ビームを誘導することが、 10^{-3} ミリバール未満の圧力を有する環境中で前記加工物に向かつて前記レーザー・ビームを誘導することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記加工物に向かつて前記レーザー・ビームを誘導することが、前記加工物に向かつて、1 ナノ秒未満のパルス持続時間を有するパルス・レーザーを誘導することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

前記加工物に向かつて前記レーザー・ビームを誘導することが、前記加工物に向かつて、1 ピコ秒未満のパルス持続時間を有するパルス・レーザーを誘導することを含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

前記イオン・ビームと前記レーザー・ビームとがパルスとして前記加工物に交互に衝突する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

前記加工物に向かつて前記イオン・ビームを誘導することが、前記レーザー・ビームの強度プロファイルのピークと一致したまたはほぼ一致した領域に前記イオン・ビームを誘導することを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記加工物に向かつて前記イオン・ビームを誘導することが、前記レーザー・ビームを誘導すると同時に前記イオン・ビームを誘導することを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 11】

前記加工物に向かつて前記イオン・ビームを誘導することが、前記イオン・ビームを誘導して前記材料のアブレーションしきい値を低下させることを含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 12】

前記イオンが、液体金属イオン源 (LMIS) によって生成される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 13】

荷電粒子ビームおよびレーザー・ビームを使用して、加工物上に構造を形成し、または加工物上の構造を改変する方法であって、

前記加工物に向かつて、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導すること

を含み、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの一方のビームが、前記ビームが衝突した前記加工物上の材料の状態を変化させ、

前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導することが、ガリウム・イオンを前記加工物の表面から内部へ注入することと、空格子、格子間原子または欠陥複合体を生成することを含み、前記方法がさらに、

前記加工物に向かつて、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの他方のビームを誘導すること

10

20

30

40

50

を含み、前記他方のビームが、状態が変化した材料を前記加工物から除去し、
前記除去される材料のサイズが前記一方のビームのスポット・サイズによって決められ

、
前記一方のビームは、前記他方のビームよりも小さいスポットに集束させることができ

前記一方または前記他方のビームを前記加工物に向かって誘導することが、前記荷電粒子ビームと前記レーザー・ビームをパルスとして逐次的に誘導すること、または、前記荷電粒子ビームと前記レーザー・ビームを前記加工物に向かって連続的に照射することのいずれか一方を含む、

方法。

10

【請求項 1 4】

前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記一方のビームを誘導することが、前記加工物に向かってイオン・ビームを誘導することを含み、前記イオン・ビームが、前記加工物内において欠陥を誘発し、前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの前記他方のビームを誘導することが、前記加工物に向かって前記レーザー・ビームを誘導することを含む、請求項 1 3 に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記イオン・ビームが、前記加工物内において光子吸収性欠陥を誘発する、請求項 1 4 に記載の方法。

20

【請求項 1 6】

前記イオン・ビームが、前記加工物に衝突した位置のアブレーションしきい値を低減させる、請求項 1 3 に記載の方法。

【請求項 1 7】

前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記一方のビームを誘導することが、前記加工物に向かって前記レーザー・ビームを誘導することを含み、前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記他方のビームを誘導することが、前記加工物に向かって前記荷電粒子ビームを誘導することを含む、請求項 1 3 に記載の方法。

【請求項 1 8】

30

前記レーザー・ビームが前記加工物の昇華エネルギーを低下させる、請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記一方のビームを誘導すること、あるいは前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記他方のビームを誘導することが、前記加工物に向かってイオン・ビームを誘導することを含む、請求項 1 3 に記載の方法。

【請求項 2 0】

前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記一方のビームを誘導すること、あるいは前記加工物に向かって、前記荷電粒子ビームまたは前記レーザー・ビームのうちの前記他方のビームを誘導することが、前記加工物に向かって電子ビームを誘導することを含む、請求項 1 3 に記載の方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本出願は、参照により本明細書に組み込まれている、2008年7月9日に出願した米国仮出願第 61 / 079, 304 号の優先権を主張するものである。

【0 0 0 2】

本発明は、レーザー・マイクロ機械加工 (laser micromachining) に関する。

50

【背景技術】

【0003】

基板から材料を除去して、マイクロスコピックまたはナノスコピック構造を形成するプロセスは、マイクロ機械加工と呼ばれる。材料を除去するプロセスは、ミリング (milling) またはエッチング (etching) とも呼ばれる。マイクロ機械加工に対しては、レーザ・ビームおよび荷電粒子ビームが使用される。これらのビームはそれぞれ、さまざまな用途において利点および限界を有する。

【0004】

レーザ・システムは、マイクロ機械加工にいくつかの異なる機構を使用する。いくつかのプロセスでは、基板に熱を供給して化学反応を誘発させるために、レーザを使用する。反応は、レーザが熱を供給する領域だけで起こるが、この熱は、レーザ・ビーム・スポットよりも広い面積に拡散する傾向があり、それによりプロセスの解像度が制限される。レーザ・マイクロ機械加工において使用される他の機構が光化学エッチングであり、光化学エッチングでは、基板の個々の原子によってレーザ・エネルギーが吸収され、それにより、これらの原子が、化学的に反応することができる状態にまで励起される。光化学エッチングは、光化学的に活性な材料に限定される。レーザ機械加工において使用される他の機構がレーザ・アブレーション (laser ablation) であり、レーザ・アブレーションでは、小さな体積に急速に供給されたエネルギーによって原子が基板から放出され、基板が加熱されることはない。高速パルス・フェムト秒レーザを使用するレーザ・アブレーションが例えば、Mourouの「Method for Controlling Configuration of Laser Induced Breakdown and Ablation」という名称の米国再発行特許第37,585号に記載されている。フェムト秒レーザ・アブレーションは、上述のプロセスの限界のいくつかを解決する。

【0005】

荷電粒子ビームにはイオン・ビームおよび電子ビームが含まれる。集束ビーム中のイオンは一般に、表面から材料を物理的に追い出すことによってマイクロ機械加工するのに十分な運動量を有する。電子はイオンよりもはるかに軽いので、電子ビームは一般に、エッチング剤との化学反応を誘発させることによって材料を除去することに限定される。イオン・ビームは一般に、液体金属イオン源またはプラズマ・イオン源によって生成される。荷電粒子ビームのスポット・サイズは、粒子のタイプおよびビーム中の電流を含む多くの因子に依存する。低電流を有するビームは一般に、高電流を有するビームよりも小さなスポットに集束させることができ、したがって、高電流を有するビームよりも小さな構造を形成することができるが、低電流ビームでは、構造体をマイクロ機械加工するのに、高電流ビームよりも長い時間がかかる。

【0006】

レーザは一般に、荷電粒子ビームよりもはるかに高速で基板にエネルギーを供給することができるので、そのため、レーザは一般に、荷電粒子ビームよりもはるかに早い材料除去速度を有する。しかしながら、レーザの波長は、荷電粒子ビーム中の荷電粒子の波長よりもはるかに大きい。ビームを集束することができるサイズはその波長によって制限されるため、レーザ・ビームの最小スポット・サイズは一般に、荷電粒子ビームの最小スポット・サイズよりも大きい。A. P. Joglekar他、「Optics at Critical Intensity: Applications to Nanomorphing」、Proceedings of the National Academy of Science、101巻16号、5856~5861頁(2004年) («Joglekar他») は、イオン化に対する臨界強度に近い約10ピコ秒よりも短いレーザ・パルスを使用して、波長よりも小さなフィーチャ (feature) を達成することができることを示している。それでも、Joglekar他によって達成可能なフィーチャ・サイズは、多くのナノテクノロジー用途に対して十分に小さいとは言えない。

【0007】

荷電粒子ビームは一般にレーザー・ビームよりも大きな解像度を有し、極めて小さな構造をマイクロ機械加工することができるが、ビーム電流は限られており、マイクロ機械加工操作は許容できないほどに低速となることがある。一方、レーザー・マイクロ機械加工は高速とすることができるが、そのより長い波長のため、解像度は本質的に限られている。

【0008】

レーザーのより高速なマイクロ機械加工能力と荷電粒子ビームのより高い精度の両方を利用する1つの方法は、試料を逐次的に加工する方法である。逐次加工は例えば、M. Paniccia他、「Novel Optical Probing and Micromachining Techniques for Silicon Debug of Flip Chip Packaged Microprocessors」、Microelectronic Engineering 46(27~34頁、1999年) (「Paniccia他」)によって記述されている。Paniccia他は、レーザー誘起化学エッチングを使用して大半の材料を除去し、次いで荷電粒子ビームを使用して、より精密な最終マイクロ機械加工を実施する、半導体フリップ・チップの活性部分にアクセスする既知の技法を記述している。この逐次加工の問題は、より高速ではあるが精密さに劣るレーザー・マイクロ機械加工をいつ停止し、より精密な荷電粒子ビーム加工をいつ開始するか決定することである。レーザー加工を停止するのが早すぎる場合には、荷電粒子ビームによって除去する材料が過剰に残り、レーザー加工を停止するのが遅すぎる場合には、加工物が損傷する。加工をいつ停止するかの決定は「終点決定(endpointing)」と呼ばれる。

【0009】

荷電粒子ビーム加工において終点を決定する技法は知られており、例えばRay他の米国特許公開第2005/0173631号に記載されている。このような技法は例えば、下にある回路が露出し、またはほぼ露出したときに2次粒子の放出が変化するように、ある変化する電圧を下にある回路に印加することを含む。この2次粒子の放出を観察することによって、オペレータは、埋込み導体などのフィーチャがいつ露出したか判定することができる。他の荷電粒子ビーム終点決定法は例えば、荷電粒子ビームによって注入された荷電粒子に起因するトランジスタの漏れ電流を検出することを含む。レーザー加工は一般に真空室内では実行されず、そのため2次電子およびイオンを捕集することはできない。

【0010】

イオン・ビーム加工では、イオン・ビームが衝突している材料がいつ変化したか判定するために、基板から放出された指定された周波数の光子を検出することも知られている。このような方法は例えば、本出願の譲受人に譲渡された、Ward他の「Focused Ion Beam Imaging and Process Control」という名称の米国特許第4,874,947号に記載されている。Ward他は、イオン・ビーム・システムにおいて光子を検出して終点を決定することを記載しているが、低い光子信号を捕集するのが困難であるため、この技法は広範には使用されていない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】米国仮出願第61/079,304号

【特許文献2】米国再発行特許第37,585号

【特許文献3】米国特許公開第2005/0173631号

【特許文献4】米国特許第4,874,947号

【非特許文献】

【0012】

【非特許文献1】A. P. Joglekar他、「Optics at Critical Intensity: Applications to Nanomorphing」、Proceedings of the National Academy of Science、101巻16号、5856~5861頁(2004年)

10

20

30

40

50

【非特許文献2】M. Paniccia他、「Novel Optical Probing and Micromachining Techniques for Silicon Debug of Flip Chip Packaged Microprocessors」、Microelectronic Engineering 46、(27~34頁、1999年)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

本発明の目的は、荷電粒子加工とレーザー加工の両方の利点を提供することによってマイクロ機械加工を改良することにある。

10

【課題を解決するための手段】

【0014】

荷電粒子ビームとレーザー・ビームの両方を、一方のビームが加工物を変化させ、もう一方のビームの加工を増強するような態様で、加工物に同時にまたは逐次的に照射する。好ましい一実施形態では、荷電粒子ビームを加工物に照射して、光子を吸収する吸収中心の働きをする欠陥を生成し、続いて、欠陥部位においてアブレーションしきい値を局所的に低下させる。実施形態は、従来の荷電粒子ビーム加工またはレーザー加工に比べて速い加工を提供し、従来のレーザー加工よりも小さなフィーチャを形成することができる。

【0015】

以上では、以下の本発明の詳細な説明をより理解できるように、本発明の特徴および技術上の利点をかなり広く概説した。以下では、本発明の追加の特徴および利点を説明する。開示された着想および特定の実施形態を、本発明と同じ目的を達成するために他の構造を変更または設計するベースとして容易に利用することができることを当業者は理解すべきである。さらに、このような等価の構造は、添付の特許請求の範囲に記載された本発明の趣旨および範囲を逸脱しないことを当業者は理解すべきである。

20

【0016】

次に、本発明および本発明の利点のより徹底的な理解のため、添付図面に関して書かれた以下の説明を参照する。

【図面の簡単な説明】

【0017】

30

【図1】試料からの放出物を使用してレーザー加工の終点を決定する本発明の一実施形態を示す図である。

【図2】試料から放出された光子を使用してレーザー加工の終点を決定する本発明の一実施形態を示す図である。

【図3】試料から放出された電子を使用してレーザー加工の終点を決定する本発明の一実施形態を示す図である。

【図4】レーザー加工の終点を決定する本発明の一実施形態に基づく好ましいステップを示す流れ図である。

【図5】荷電粒子ビームおよびレーザー・ビームのアブレーションしきい値に対する欠陥の影響および相対サイズを示す図である。

40

【図6】レーザー・ビームおよび荷電粒子ビームを試料に照射する好ましい1つのシステムを示す図である。

【図7】2つのビームを試料に照射する本発明の実施形態の好ましいステップを示す流れ図である。

【図8】レーザー・レンズなどの構成要素に対する2次粒子による損傷を低減させる一実施形態を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

本発明のさまざまな実施形態は、さまざまな手段を使用してレーザー加工を向上する。実施形態は一般に、試料とも呼ぶ加工物をマイクロ機械加工するために使用され、このマイ

50

クロ機械加工は一般に、加工物上に構造を形成し、または加工物上の構造を改変することを含む。この構造は一般にマイクロスコピック構造であり、本明細書ではこの用語が、ナノスコピック構造または数十ミクロンよりも小さな任意の構造を含むように使用される。本発明の実施形態は、十分なフルエンス (fluence) を供給する、既存のまたは今後開発される任意のタイプのレーザを使用することができる。好ましい1つのレーザは、短パルス・レーザ・ビーム、すなわちナノ秒ないしフェムト秒パルス・レーザ・ビームを提供する。適切なレーザには例えば、Ti:サファイア発振器、ファイバ・ベースのレーザ、あるいはイッテルビウム・ドープまたはクロム・ドープの薄ディスク・レーザ (thin disk laser) などがある。

レーザ加工の終点決定

短レーザ・パルス、すなわちナノ秒ないしフェムト秒レーザ・パルスによる基板のアブレーションには、基板からのさまざまな放出物が付随する。本発明の実施形態は、基板からの放出物を使用して、レーザ・マイクロ機械加工の進捗状況を決定し、ある加工段階がいつ完了したか判定する。放出粒子の放出イールド (emission yield) およびエネルギー・スペクトルは材料に依存する。第1の材料が除去されて第2の材料が露出すると、材料の境界面で放出物が増える。検出器は、放出物がいつ変化したか判定することができる。この放出物の変化は、ビームの下の材料が増えたことを示す。第2の材料に特有の放出物が検出されたとき、または第1の層に特有の放出が止んだときに、オペレータは、レーザ・ミリング操作の進捗状況を知ることができる。放出物の変化が検出されると、オペレータまたはシステムは、例えば加工を停止することにより、自動的にまたは手動でプロセスを変更することができる。

【0019】

試料からの放出物は、ルミネセンス、例えば赤外 (IR) から紫外 (UV) ~ X線範囲のルミネセンス、電子、イオン、中性原子または分子、および粒子/ドロップレット (droplet) を含む。異なる用途における終点決定には、加工中の材料のタイプおよび加工環境に応じた、異なるタイプの放出物が有用である。加工環境には例えば、大気圧の通常大気、高真空、すなわち圧力が約 10^{-3} ミリバール未満の真空、圧力約1ミリバールから50ミリバールの各種ガスなど走査型環境電子顕微鏡に適した真空、あるいは、適切な圧力の適切なガスの制御されたガス環境などが含まれる。表面から放出されたイオンを、質量分析法によって直接に分析して、表面から追い出された材料がいつ変化したか判定することができる。この変化は、境界に到達したことを示す。2次イオン質量分析用のシステムは、市販の集束イオン・ビーム・システムの一般的な付属システムである。一般にプラズマ・ブルーム (plasma plume) と呼ばれる展開中の放出物 (evolving emission) に中に存在する中性原子および分子をイオン化するため、展開中の放出物に、第2の時間遅延レーザ・ビームを共点集束させることができる。この第2のビームは、別個の追加のレーザを起源とすることができ、または標準ビーム・スプリッタを使用することによって1次ビームと同じレーザを起源とすることができる。1次ビームの到着と2次ビームの到着との間の間隔 (時間遅れ) は、2次ビームの経路長を調整することによって調整することができる。次いで、この2次イオン化によって生じたイオンを質量分析法によって分析することができる。粒子およびドロップレットも誘導結合プラズマ質量分析法によって分析することができる。

【0020】

終点決定にルミネセンスを使用するときには、ミリングされた穴の底を「予見する (looking ahead)」ことができるという利点がある。すなわち、レーザ・パルスによって生成されたプラズマは、パルスによって除去される体積を超えて伝搬するため、表面の直ぐ下の原子がレーザ・パルスによって励起される。したがって、表面の直下から光子が放出され、この放出物は、マイクロ機械加工をいつ止めるべきかについてのより適時の指標を提供する。すなわち、第2の材料からの光子を指標として使用するときには、第1の材料が完全に除去される少し前に、第2の材料からの光子を検出することができる。同様に、第1の材料からの光電子放出も、第1の材料が完全に除去される少し前に減

10

20

30

40

50

衰し始める。終点決定は、レーザ・ビームまたは荷電粒子ビームによって起こる表面からの放出光子の流れを検出することによって実行することができる。

【0021】

光子以外の放出物を終点決定に使用するときには一般に、空気分子が放出物の捕集を妨げないように、基板を低圧環境中または真空中に維持しなければならない。光子を指標として使用するときには、レーザを、真空中で、大気圧で、または制御されたガス環境中で操作することができる。

【0022】

検出器は、1つまたは複数のタイプの放出物の強度を決定する一般的な検出器とすることができる。検出器は一般に、(基準を含む)粒子を計数し、または粒子電流を測定し、検出器感度を粒子エネルギーの関数として定義する特性エネルギー応答を有する。終点決定に使用される信号の変化を検出する能力を最大にするため、検出器出力を適時に微分することができる。エネルギー、電荷、質量または電荷対質量比が異なる粒子を検出するため、複数の検出器を並行して使用することができる。例えば、光電子増倍管、半導体検出器などの広帯域光子検出器を使用して、基板から放出された光の強度を測定することができる。終点決定信号の材料依存性が最大になるように、この検出器を最適化することができる。例えば、エネルギー・フィルタリング分光計(energy filtering spectrometer)を、埋込み層または被覆層からの予想される特定の信号を検出するように調整することができる。ある実施形態では、回折格子を使用して光を分散させ、スリットを使用して所与の周波数帯内の光を通過させ、次いでその光を広帯域光子検出器によって検出することができる。スリットの代わりに、被覆材料に特有の光を吸収し、埋込み材料に特有の光を透過させ、または埋込み材料に特有の光を吸収し、被覆材料に特有の光を透過させる1つまたは複数の吸収フィルタを使用して、埋込み材料が露出し、またはほぼ露出したときに信号を提供することもできる。あるいは、回折格子を使用して、電荷結合素子アレイ上に光を分散させることもできる。放出スペクトルは、アレイ内の異なるセルにおいて測定される信号の強度によって決定される。異なるセルにおいて測定された信号を使用して、被覆および埋込み層から放出された特性信号の強度を監視することができる。

【0023】

金属、半導体、絶縁体などのさまざまな材料が、ミリング中の材料層、またはミリング中の材料層の下の材料層を構成する。例えば、一般的な材料には、Si、SiO₂、Cu、Al、Au、Ag、Cr、Mo、Pt、W、Ta、低k誘電体、高k誘電体、Al₂O₃、SiC、Si₃N₄、GaN、AlN、Al_xGa_(1-x)N、In_xGa_(1-x)As、In_xGa_(1-x)AsおよびGeなどがある。終点決定指標として光子を検出するとき、これらの光子は一般に、0.01nmから1000nm、より典型的には300nmから800nmの波長を有することになる。より短波長用のX線検出器からより長波長用の赤外線検出器までの適切な検出器を使用することができる。当業者は、さまざまな被覆材料およびその下の材料の特性放出スペクトルを容易に決定することができる。被覆材料の特性信号の周波数とその下の材料の特性信号の周波数とが互いに近くないとき、終点決定の実現はより容易になる。

【0024】

終点決定指標として電子を使用するときには、イオン・ビーム・カラムと電子ビーム・カラムを含むデュアル・ビーム・システムなどの荷電粒子ビーム・システムにおいて現在使用されているタイプの電子検出器を使用することが好ましい。このような検出器には例えば、電子が衝突したときに光を放出するシンチレータと放出された光信号を増幅する光電子増倍管とを備える高効率エバーハート・ソーンリー(Everhart-Thornley)検出器が含まれる。エバーハート・ソーンリー検出器は一般にレーザ軸からずらして取り付けられ、試料によって放出された電子を引き寄せさせるため、シンチレータの前のスクリーンに、試料に対する電圧が印加される。指定されたエネルギー・レベルよりも低い電子を排除するため、試料にバイアスをかけて、低エネルギー電子の捕集を防ぐこと

10

20

30

40

50

ができる。検出される電子は一般に約20 eV未満のエネルギーを有するが、一部の用途では1,000 eVまでのエネルギーを有する電子が有用であることがある。ある実施形態では、基板材料に特有の電子電流を有する幅広いエネルギー帯内の電子が捕集される。他の実施形態では、材料を特徴づけるために電子のエネルギーが決定される。

【0025】

いくつかの実施形態では、真空室内で試料表面から放出された粒子を検出するのではなく、試料からグラウンドへの電流を測定することができる。例えばプローブによって直接に、または例えば試料ステージを介して間接的に、グラウンドを試料に物理的に接触させる。グラウンドへまたはグラウンドから流れる電流は、ビームが衝突している試料表面を出る電流に等しい。

10

【0026】

図1は、本発明を実施する好ましいシステム100を示す。ビーム103を生成するレーザー102は一般に、機械加工中の材料に対するしきい値よりも高いフルエンスで操作される。例えば、Mourouは、10 nJから1 mJの範囲のエネルギーおよび0.1 J/cm²から100 J/cm²の範囲のフルエンスを有する好ましい1つのビームを教示している。一実施形態では、レーザー・ビームのエネルギーが30 nJ、フルエンスが0.4 J/cm²である。ビーム103は試料104に誘導され、試料104は、基板材料106および被覆材料108を含むことがある。試料104は一般に、異なる材料からなるいくつかの層を有する。試料104は一般に、2軸精密X-Yステージ109上に配置される(追加の軸は、最初の2軸に垂直な方向の平行移動、傾斜および回転を含むことができる)。検出器110は、試料104からの放出物112を検出する。被覆材料108が除去され、基板材料106が露出すると、放出物112は変化する。コンピュータ120は検出器110から信号を受け取り、信号の変化は、ビームの下の材料が変化したことを示し、それにより、オペレータが、機械加工の進捗状況を監視し、適切な処置をとることを可能にし、あるいはシステムが、加工がそれ以上進まないようにレーザー102を自動的に停止するなどの措置を自動的にとることを可能にする。コンピュータ120に接続された表示装置122は、試料104の画像を含む情報をオペレータに提供することができる。上述のとおり、この検出器は、レーザー・アブレーションまたは他のレーザー加工の結果として放出された光子、電子、イオン、中性粒子またはドロップレットを検出することができる。システム100は、任意選択で、加工または画像化目的に使用することができる、電子ビーム・カラムまたはイオン・ビーム・カラム、あるいはその両方などの1つまたは複数の荷電粒子ビーム・カラム130、および試料104の画像を形成する2次電子検出器132を含む。荷電粒子ビーム・カラム130または2次電子検出器132が使用されるときには、基板は真空中に維持される。ある実施形態では、画像を形成するための2次電子信号の検出および終点決定信号の検出に、検出器110を使用することができる。

20

30

【0027】

図2は、検出器が光子検出器210を含むシステム200を示し、光子検出器210は、試料104からの光を分散させる回折格子212、あるいはその代わりにプリズムとして概略的に示されたモノクロメータ(monochromator)と、この分散光を、周波数に応じて異なる点に集束させるレンズ214と、下にある材料に特有のスペクトルを有する光を通過させるスリット216と、スリット216を通過した光を検出する光子検出器218とを含む。コンピュータ120は光子検出器210から信号を受け取り、この信号を解釈して、レーザー・ビームの下の材料がいつ変化したか判定する。コンピュータ120は例えば、ある加工段階が完了したことを放出物の変化が示しているときに、オペレータに信号を提供し、または加工がそれ以上進まないようにレーザー102を自動的に停止することができる。基板の下に配置された代替光子検出器222が示されている。光子検出器のこのような配置は、基板が特性光信号に対して透明であるとき、すなわち基板材料のバンド・ギャップが検出中の光子のエネルギーよりも大きいときにのみ有用である。試料の下の光子検出器が使用されるときには、ステージが、光を透過させる隙間または透明な窓224を含む。光子検出器222は、スリットおよび光電子増倍管を使用する検出

40

50

器ではなく、異なる周波数に対応する異なる位置における光信号の強度を検出する電荷結合素子 (CCD) のアレイ 226 を含む広帯域スペクトル検出器である。いずれの位置でも両方のタイプの検出器を使用することができる。

【0028】

図3は、電子を検出して終点を決定するレーザ加工システム300を示す。システム300では、基板104が真空室302内に配置される。電子検出器306は、スクリーン308、シンチレータ310および光電子増倍管312を含むエバーハート-ゾーンリー検出器である。スクリーン308には約50ボルトの低電圧が印加され、シンチレータには約10,000Vの高電圧が印加される。電子は、試料からスクリーンへ向かって加速され、次いでより大きなエネルギーに加速されて、シンチレータ内で光子の放出を引き起こす。それらの光子は電子に変換され、光電子増倍管において増倍される。

10

【0029】

図4は、図1のシステムの動作を示す流れ図である。ステップ402で、基板に向かってレーザを誘導する。ステップ404で、基板からの放出物を検出する。判断ブロック406で、レーザ・マイクロ機械加工が被覆材料を貫通切削し、またはほぼ貫通切削したことを、放出物の変化が示しているかどうかを判定する。レーザ・マイクロ機械加工が被覆材料を貫通切削し、またはほぼ貫通切削したことを、放出物の変化が示している場合には、プロセスを変更する。そうでない場合には、ステップ402に戻ってプロセスを継続する。プロセスの変更は例えば、レーザ・ビームを停止すること、パルスあたりのフルエンスなどのレーザ・パラメータを変えること、ガス流量を変えること、電子またはイオン・ビームをブランキング (blanking) すること、あるいは試料を支持しているステージを動かすことを意味する。放出物は、連続的にまたは定期的に監視することができる。放出物を定期的に監視する場合には、監視期間と監視期間の間に被覆材料が完全に除去された場合にその下の材料に対する許容できない損傷を防ぐため、その周期は十分に短くなければならない。

20

【0030】

いくつかの実施形態では、電子ビームなどの荷電粒子ビームを使用して、レーザ・マイクロ機械加工の終点決定信号を生成することができる。この電子ビームは、例えばレーザ・アブレーション中のレーザ・ビームと同じ点に入射し、このレーザ・ビームと同時にまたは逐次的に使用することができる。陰極ルミネセンスまたは後方散乱電子を終点決定信号として使用する場合には、電子ビーム・エネルギーを調整して、終点決定の「予見」能力を調節することができる。

30

デュアル・ビーム加工

例えばMourouに記載されているとおり、フェムト秒パルス・レーザは、高い材料除去速度を提供することができ、アブレーションしきい値よりも高いフルエンスを局所的に提供することにより、それに付随する基板の損傷は比較的小さい。しかしながら、最小フィーチャ・サイズは限られている。後述する実施形態では、試料をマイクロ機械加工するのに、荷電粒子ビームとレーザ・ビームとを使用する。一方のビームが、試料表面のある領域の状態を変化させて、もう一方のビームによる材料の除去を容易にする。状態を変化させることには例えば、注入不純物を含む欠陥を生成して、光子を吸収する断面積を大きくすることが含まれる。用語「状態」は、一般的な意味で使用され、その試料領域を特徴づける特性の集合を意味する。好ましい実施形態は、加工速度が速いレーザ・ビームの利点と、スポット・サイズが小さい荷電粒子ビームの利点とを組み合わせる。したがって、実施形態は、荷電粒子ビーム単独よりも高速に、レーザ・ビーム単独よりも高い精度で、材料をマイクロ機械加工し、または材料を付着させることができる。

40

【0031】

ある実施形態では、荷電粒子ビームがない場合には、レーザ・ビームが、加工物の材料のアブレーションを誘発しないように、レーザ・ビームのフルエンスが十分に低い。例えば、荷電粒子ビームを使用して、小さな体積の中に欠陥または不純物を生成することができる。これらの欠陥または不純物は光子を吸収し、局所的なアブレーションしきい値を低

50

下させて、イオン・ビームの影響を受けた材料を除去するレーザー・ビームによる局所加工を容易にする。荷電粒子ビームは一般に、レーザー・ビームよりもはるかに小さなスポットに集束させることができるため、これらの実施形態は、イオン・ビームの小さなスポット・サイズとレーザーのより高速な除去の両方を利用する。すなわち、レーザーは、荷電粒子ビームの影響を受けた領域内の材料は除去するが、他の領域内の材料は実質的に除去しない。したがって、除去される領域のサイズは、イオン・ビームのスポット・サイズによって決まり、材料除去速度は、レーザーによって基板に供給されるエネルギーが大きいほど増大する。ある実施形態では、除去速度が、荷電粒子ビームが光子吸収性欠陥を生成することができる速度によって制限される。

【0032】

他の実施形態では、入来光子と基板フォノンの間に結合が存在しないか、または弱い結合しか存在しないために、基板の融解が必ずしも起こらないようなエネルギー（熱）を、入射レーザー・ビームを使用して加工物に提供することによって、FIBスパッタリング速度を増大させる。これは、入来イオンが、それらのエネルギーのより大きな部分を投じて、準融解状態の基板の原子を除去することを可能にする。試料に入射するフェムト秒レーザー・ビームのパルス幅およびフルエンスを、融解しきい値よりもわずかに低くなるように調整すると、集束イオン・ビームが、レーザー・ビームの強度プロファイルのピークの近くに一致する。次いで、イオン・ビームによって提供されるエネルギーは、空間局所性（spatial locality）をほとんど失うことなく、増大した速度で基板材料をスパッタリングすることができる（図1参照）。その結果、スパッタ・イールド（sputter yield）およびスパッタ速度が増大し、イオン・ビームのサイズ程度のサイズを有するフィーチャが形成される。

【0033】

さまざまな実施形態では、レーザー・ビームと荷電粒子ビームとが同時に試料に衝突することがあり、またはレーザー・ビームと荷電粒子ビームとが異なる時刻に衝突することがある。これらのビームはともに、連続的にまたはパルスとして照射することができる。例えば一実施形態では、荷電粒子ビームを加工物に照射しているときに、複数のレーザー・パルスを照射することができる。他の実施形態では、レーザーを加工物に照射しているときに、複数の荷電粒子ビーム・パルスを照射することができる。ある実施形態では、両方のビームが連続的に照射され、他の実施形態では、レーザー・ビームのパルスと荷電粒子ビームのパルスとが交互に照射される。

【0034】

パルス・レーザーでは、試料に入射するフェムト秒レーザー・ビームのパルス幅およびフルエンスを調整することによって、変化していない材料のアブレーションしきい値よりもわずかに低くなり、レーザー・ビームの強度プロファイルのピークが、集束イオン・ビームの衝突領域と一致するように、パワーを調整する。連続波レーザーを調整して適切なパワーを提供することもできる。レーザー・ビームは次いで、主にイオン・ビームを誘導した領域に吸収される。レーザーは、変化した領域のアブレーションを引き起こすエネルギーを超えるエネルギーが、加工物の材料を融解するには不十分であるように、照射されることが好ましい。

【0035】

ビームが異なる時刻に衝突する場合、加工対象の加工物の材料の状態に対するレーザー・ビームおよび荷電粒子ビームの効果は累積的である。すなわち、一方のビームの限局された効果は、もう一方のビームが誘導されているときにも依然として存在する。例えば、30 keV Ga⁺ビームなどの荷電粒子ビームを使用する場合には、空格子（vacancy）、格子間原子（interstitial）、欠陥複合体（defect complex）、注入ガリウムなどの光子吸収性欠陥を加工物中に生成するために、イオン・パルスがレーザー・パルスに先行するように、イオン・ビームとレーザー・ビームとをパルスとして逐次的に誘導することができ、これらの欠陥および不純物は比較的に安定であるため、イオン・パルスとレーザー・パルスの間の遅延時間は比較的に長くすることができる。

10

20

30

40

50

【0036】

累積効果は、レーザ・ビームを照射して大量除去プロセスを実行し、続いて荷電粒子ビームを照射して第2の微細除去プロセスを実行する先行技術の逐次加工とは対照的である。このような先行技術の逐次加工では、それぞれのビームが独立して加工物を加工し、どちらのビームも、後続のビームによる加工を容易にするような形では基板材料を変化させない。先行技術の完了した最初のビーム動作が、表面近くに影響を与えた小さな体積を残すことがあるが、この最初のビーム動作は、後続のビーム動作の動作に対して重大な効果を持たない。先行技術では、後続のビーム動作によって機械加工される体積に比べて、最初のビームの影響を受けた体積が小さい。

【0037】

図5は、相対的に幅が広いレーザ・ビームの強度プロファイル502および相対的に幅が狭いイオン・ビームの電流分布504を示す。線506はアブレーションしきい値を示し、アブレーションしきい値は、イオン・ビーム加工によって表面材料の状態が変化したところが、レーザ・ビームのフルエンスよりも低くなっている。したがって、レーザ・ビームは、イオン・ビームがアブレーションしきい値を低下させた領域においてのみ、材料を除去する。レーザ・ビームとイオン・ビームをこのように組み合わせると、除去速度が、イオン・ビーム単独で達成可能な除去速度よりも速くなり、フィーチャ・サイズが、レーザ・ビーム単独で達成可能なフィーチャ・サイズよりも小さくなる。アブレーションしきい値は基板材料の固有の特性であり、当業者は、さまざまな材料のアブレーションしきい値を、経験的にまたは文献から容易に決定することができる。例えばイオン・ビームによって誘発された欠陥のないシリコンは、約 170 mJ/cm^2 の単一パルス・アブレーションしきい値を有する。そのため、本発明のこの実施形態に従ってシリコンをマイクロ機械加工するためには、好ましくはレーザ・フルエンスをこの値よりも小さくすべきである。

【0038】

図6はシステム600を示し、このシステムでは、レーザ・システム602が、真空室608内の調整可能な2軸X-Yステージ607（最初の2軸に垂直な方向の平行移動、傾斜および回転する追加の軸を含むことができる）上に保持された加工物606に向かってレーザ・ビーム604を誘導する。集束イオン・ビーム・カラム610は、基板の領域に向かって集束イオン・ビーム612を誘導する。イオン・ビームは一般に、レーザ・ビームよりも小さなスポットに集束させることができる。イオン・ビームは、液体金属イオン源を起源とすることが好ましい。このような源は、Ga、In、Bi、Sn、Liなどの単一元素源、またはAuSiBe、AsPdBなどの合金源とすることができる。プラズマ・イオン源を使用することもできる。プラズマ源は、より幅広い種類の種を荷電粒子ビームに提供することができる。誘導結合磁気強化イオン源（inductively coupled, magnetically enhanced ion source）は、エネルギーの広がり小さいことによって、試料において小さなビーム・スポットを形成することが容易になるため、好ましい。液体金属イオン源からのイオン・ビームは、 100 nm 未満のスポット・サイズに集束させることができ、レーザ・ビーム604は、 $1\text{ }\mu\text{m}$ から $10\text{ }\mu\text{m}$ のスポット・サイズに集束させることができる。イオン・ビームは一般に最大約 50 keV のエネルギーを有し、最大 60 nA のイオン電流で機能する。Siをミリングする好ましい一実施形態では、イオン・ビームの電流が 1 nA 、エネルギーが 30 keV 、スポット・サイズが約 45 nm であり、レーザ・ビームのフルエンスが 100 mJ/cm^2 、パルス幅が 150 femtosecond 、スポット・サイズが $2\text{ }\mu\text{m}$ である。任意選択で、加工物606の一部分の画像を形成するためおよび別の電子ビーム加工のために、電子ビーム・カラム620が使用される。基板から放出された電子を検出してイオン・ビームまたは電子ビーム像を形成するために、2次電子検出器622が使用される。コンピュータ640は、システム600の動作を、オペレータ・コマンドを介して手動でまたは自動的に制御し、基板の画像ならびに操作上の制御および選択肢をオペレータに提供することができる表示装置642を含む。

10

20

30

40

50

【0039】

図7は、本発明に基づく好ましい1つの方法を示す流れ図である。ステップ702で、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームである第1のビームを、加工物のある領域に誘導して、そのビームの影響を受けた材料の状態を変化させる。例えば、電流1 nAの30 kVのガリウム・ビームなどのイオン・ビームを加工物の表面に誘導して、光子を吸収し、基板材料のアブレーションしきい値を局所的に低下させる、空格子、格子間原子および注入ガリウムを含む欠陥を誘発させる。ステップ704で、第1のビームを誘導した領域を含むある試料領域に向かって、第1のビームとは異なる第2のビームを誘導する。例えば、第1のビームがイオン・ビームであった場合には、第2のビームをレーザー・ビームとすることができる。レーザー・ビームは、イオン・ビームのピーク強度の近傍に入射することが好ましい。ステップ702と704は、同時にまたは逐次的に実行することができる。逐次的に実行する場合には、一方のビームによって誘発された状態の変化が、もう一方のビームを照射したときにも依然として存在するように、これらのステップを十分に短い時間間隔で実行すべきである。イオン・ビームを使用して効果を誘発させる一実施形態では、欠陥が安定であるため、これらのビームの照射間の時間遅れは重要ではない。判断ブロック706で、マイクロ機械加工が完了しているか否かを判定する。プロセスが完了したかどうかの判定は、例えば上述のいずれかの終点決定技法を使用することによって判定することができる。例えば、穴をミリングする場合、ステップ706では、穴が十分に深いかどうかを判定する。マイクロ機械加工が完了している場合、プロセスは終了となる。マイクロ機械加工が完了していない場合には、ステップ702に戻ってプロセスを継続する。

10

20

電荷分離による損傷の防止

基板表面から材料が追い出されたときに、追い出された粒子が、レンズに付着し、またはレンズの材料をスパッタリングすることによって、レーザー・レンズの光学的品質を低下させることがある。図8は、2次粒子によるレーザー・レンズおよび真空システム内の他の構成要素の損傷を低減させることができる1つのシステムを示す。図8は、試料806に向かって荷電粒子ビーム804を誘導する、集束イオン・ビーム・カラムなどの荷電粒子ビーム・カラム802を含むシステム800を示す。システム800はさらに、レーザー・ビーム812を試料806上に集束させるレンズ810を有するレーザー・システム808を含む。レーザー・システム808と荷電粒子ビーム804は同じ点に入射することが好ましい。すなわち、レーザー・システム808と荷電粒子ビーム804は試料806の同じ領域に衝突することが好ましい。レーザー・ビームは一般に、試料806上において、荷電粒子ビームよりも大きなスポット・サイズを有する。垂直方向を向いたレーザー・システム808および垂直に対して傾斜した荷電粒子ビーム802が示されているが、これらのシステムはともに、適切な任意の向きに配置することができる。

30

【0040】

試料806は精密可動ステージ816上に置かれる。荷電粒子ビーム804が試料806に衝突すると、電子およびイオンを含む2次粒子818が放出される。このイオンがレーザー・レンズ810に衝突し、その光学的品質を低減させることがある。2次粒子818の経路をレーザー・レンズ810からそらして、損傷を低減させ、または排除する電場を生み出すため、電極820および822を電圧源(図示せず)に接続する。電極820および822を使用して、画像化または終点決定用の2次粒子818を検出することもできる。2次電子信号を増幅するため、電極820に増幅器824を接続することができる。これに加えて、またはこれに代えて、画像化または終点決定用の陽イオン信号を増幅するため、電極822に増幅器826を接続することもできる。

40

【0041】

好ましい一実施形態では、電極820と電極822の間に約300 Vから400 Vの電位が印加される。好ましい電圧は実施態様によって異なるが、一般的には数十ボルトから数千ボルトとし、好ましくは数百ボルトとする。電極820および822の形状を変更して、レーザー・レンズまたは試料の上方の他の構成要素に衝突する粒子、イオンを再誘導するように電場を整形することができる。ある実施形態では、単一の電極を使用することが

50

できる。ある実施形態では、電極 820 の代わりに、磁場を使用して、損傷に敏感な構成要素から荷電粒子をそらすこともできる。

【0042】

本発明の好ましい実施形態によれば、

・加工物の第1の領域に向かってイオン・ビームを誘導し、荷電粒子が、加工物の結晶構造内において、加工物材料のアブレーションしきい値を低下させる光子吸収性欠陥を誘発し、

・加工物に向かってレーザ・ビームを誘導し、レーザ光子が、イオン・ビームによって形成された欠陥によって吸収されて、イオン・ビームによって処理された加工物上の材料を除去する

ことによって、試料上に構造が形成され、または試料上の構造が改変される。

【0043】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物の第1の領域に向かってイオン・ビームを誘導することは、加工物中にイオンを注入することを含む。これらのイオンは、液体金属イオン源(LMIS)、金属合金源または誘導結合プラズマ源によって生成される。

【0044】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物の第1の領域に向かってイオン・ビームを誘導することは、加工物の表面から内部へガリウム・イオンを注入すること、あるいは空格子、格子間原子または欠陥複合体を生成することを含む。LMISの例にはこのほかIn、Bi、Sn、Liなどがあり、合金源の例にはAuSiBe、AsPdBなどがある。

【0045】

本発明の好ましい実施形態によれば、イオン・ビームとレーザ・ビームとがパルスとして逐次的に誘導される。

【0046】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物に向かってレーザ・ビームを誘導することは、荷電粒子ビームによって誘発された欠陥を有する材料を除去するには十分だが、荷電粒子ビームによって誘発された欠陥のない材料を除去するには不十分なフルエンスを有するレーザ・ビームを誘導することを含む。例えば、試料に向かってレーザ・ビームを誘導することは、試料に向かって、1ナノ秒未満または1ピコ秒未満のパルス持続時間を有するパルス・レーザを誘導することを含むことができる。

【0047】

本発明の好ましい実施形態によれば、試料に向かってレーザ・ビームを誘導することは、 10^{-3} ミリバール未満の圧力を有する環境中で試料に向かってレーザ・ビームを誘導することを含む。

【0048】

本発明の好ましい実施形態によれば、荷電粒子ビームとレーザからのパルスとが試料に交互に衝突する。

【0049】

本発明の好ましい実施形態によれば、試料のある領域に向かってレーザ・ビームの1つを誘導することは、試料に向かって連続粒子ビームを照射することを含み、試料の領域に向かってレーザ・ビームまたは荷電粒子ビームを誘導することは、試料に向かって連続レーザ・ビームを誘導することを含む。

【0050】

本発明の好ましい実施形態によれば、試料上の領域の一部(subset)に向かって荷電粒子ビームを誘導することは、レーザ・ビームの強度プロファイルのピークと一致したまたはほぼ一致した領域に荷電粒子ビームを誘導すること、レーザ・ビームを誘導すると同時に荷電粒子ビームを誘導すること、および/あるいは荷電粒子ビームを誘導して材料のアブレーションしきい値を低下させることを含む。

【0051】

本発明の好ましい実施形態によれば、

・加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導し、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの前記一方のビームが、ビームが衝突した加工物上の材料の状態を変化させ、

・加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちのもう一方のビームを誘導し、前記もう一方のビームが、状態が変化した材料を加工物から除去する

ことによって、荷電粒子ビームおよびレーザー・ビームを使用して、試料上で構造が形成され、または改変される。

【0052】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導することは、加工物に向かってイオン・ビームを誘導することを含み、イオン・ビームは、加工物内において欠陥を誘発し、加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちのもう一方のビームを誘導することは、加工物に向かってレーザー・ビームを誘導することを含む。

10

【0053】

本発明の好ましい実施形態によれば、イオン・ビームは、加工物内において光子吸収性欠陥を誘発する。

【0054】

本発明の好ましい実施形態によれば、イオン・ビームは、イオン・ビームが加工物に衝突した位置のアブレーションしきい値を低減させる。

20

【0055】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導することは、加工物に向かってレーザー・ビームを誘導することを含み、加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちのもう一方のビームを誘導することは、加工物に向かって荷電粒子ビームを誘導することを含む。

【0056】

本発明の好ましい実施形態によれば、レーザー・ビームは加工物の昇華エネルギーを低下させる。

【0057】

本発明の好ましい実施形態によれば、加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちの一方のビームを誘導すること、あるいは加工物に向かって、荷電粒子ビームまたはレーザー・ビームのうちのもう一方のビームを誘導することは、加工物に向かってイオン・ビームを誘導すること、または加工物に向かって電子ビームを誘導することを含む。

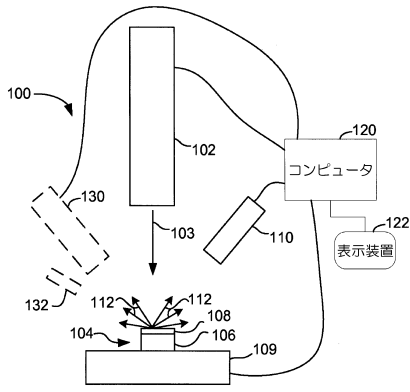
30

【0058】

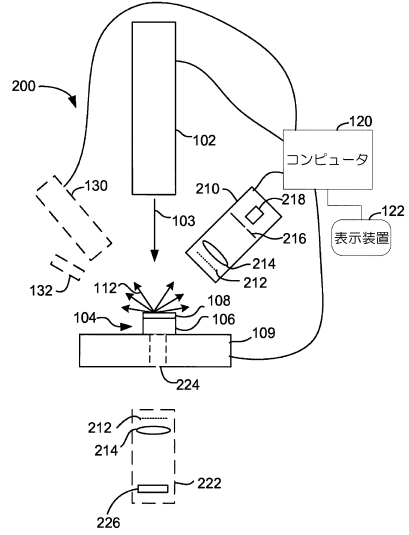
本発明および本発明の利点を詳細に説明したが、添付の特許請求の範囲によって定義される本発明の趣旨および範囲から逸脱することなく、さまざまな変更、置換および改変を加えることができることを理解すべきである。さらに、本出願の範囲が、本明細書に記載されたプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法およびステップの特定の実施形態に限定されることは意図されていない。当業者なら本発明の開示から容易に理解するように、本明細書に記載された対応する実施形態と実質的に同じ機能を実行し、または実質的に同じ結果を達成する既存のまたは今後開発されるプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを、本発明に従って利用することができる。したがって、添付の特許請求の範囲は、その範囲内に、このようなプロセス、機械、製造、組成物、手段、方法またはステップを含むことが意図されている。

40

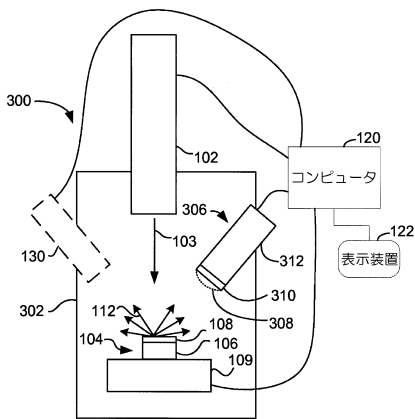
【図1】



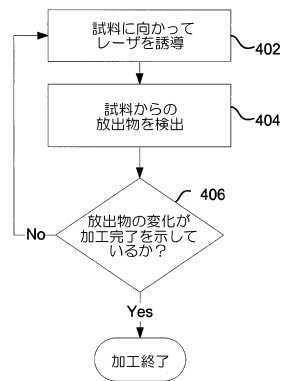
【図2】



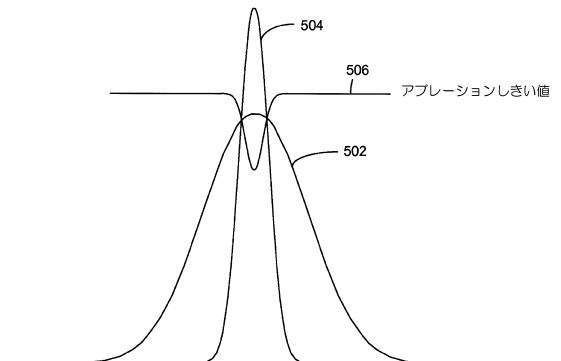
【図3】



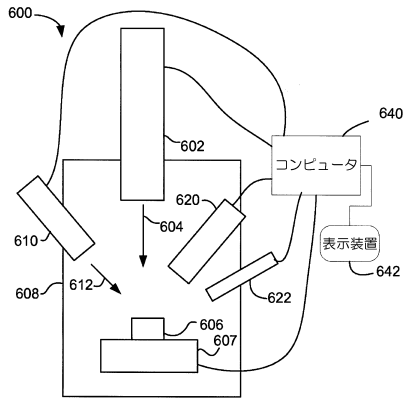
【図4】



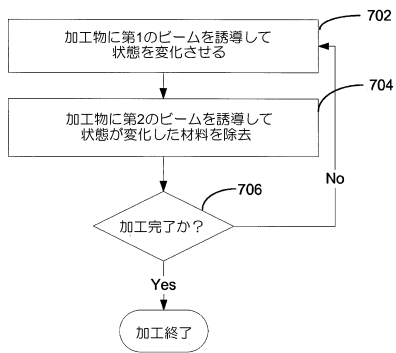
【図5】



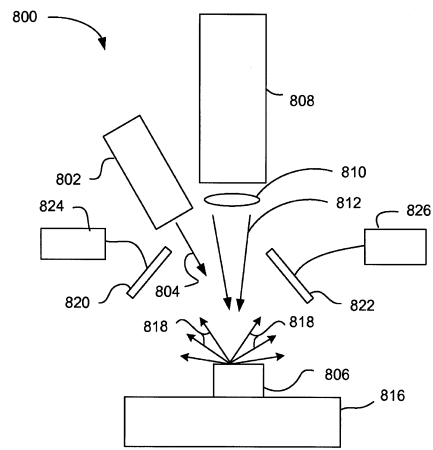
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 マーク・ウトロート

アメリカ合衆国 オレゴン州 97224 スカプース ダッチ・キャニオン・ロード 29430

(72)発明者 ミロス・トス

アメリカ合衆国 オレゴン州 97210 ポートランド ノース・ウェスト グリサン・ストリート 2386 エイ・ピー・ティ 7

審査官 青木 正博

- (56)参考文献 特開平03-038833(JP,A)
特開2005-268224(JP,A)
特開2004-014309(JP,A)
特開平07-335589(JP,A)
特表2007-503685(JP,A)
特開平08-036982(JP,A)
特開2008-068275(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B23K 26/00 - 26/70
B23K 15/00
H01J 37/317