

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4805251号
(P4805251)

(45) 発行日 平成23年11月2日 (2011. 11. 2)

(24) 登録日 平成23年8月19日 (2011. 8. 19)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 J 27/20 (2006. 01)

H O 1 J 27/20

H O 1 J 37/317 (2006. 01)

H O 1 J 37/317 E

H O 1 J 37/305 (2006. 01)

H O 1 J 37/305 A

H O 1 J 37/08 (2006. 01)

H O 1 J 37/08

C 2 3 C 14/32 (2006. 01)

C 2 3 C 14/32 F

請求項の数 23 (全 14 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2007-504128 (P2007-504128)
 (86) (22) 出願日 平成17年3月18日 (2005. 3. 18)
 (65) 公表番号 特表2007-529876 (P2007-529876A)
 (43) 公表日 平成19年10月25日 (2007. 10. 25)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2005/008983
 (87) 国際公開番号 W02005/091990
 (87) 国際公開日 平成17年10月6日 (2005. 10. 6)
 審査請求日 平成20年3月14日 (2008. 3. 14)
 (31) 優先権主張番号 60/554, 812
 (32) 優先日 平成16年3月19日 (2004. 3. 19)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 507135858
 ティーイーエル エピオン インク.
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
 1 8 2 1, ビルリカ, マニング ロード
 3 7 番地
 (74) 代理人 110000659
 特許業務法人広江アソシエイツ特許事務所
 (74) 代理人 100083932
 弁理士 廣江 武典
 (74) 代理人 100129698
 弁理士 武川 隆宣
 (74) 代理人 100129676
 弁理士 ▲高▼荒 新一
 (74) 代理人 100135585
 弁理士 西尾 務

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ガスクラスターイオンビームの改良された処理方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ガスクラスターイオンビームの発生装置であって、
 減圧された減圧チャンバと、

ガスクラスターイオンビーム通路を有する高エネルギーガスクラスターイオンビーム発生のための、前記チャンバ内のガスクラスターイオンビーム源と、

前記減圧チャンバ内の、減圧を上回る平均圧力を有する圧力コントロール領域と、
 を含んで構成され、

前記ガスクラスターイオンビーム通路の少なくとも一部が、前記圧力コントロール領域
 を通ることによって、前記圧力コントロール領域のより高い圧力により修飾されることを
 特徴とする装置。

10

【請求項 2】

前記ガスクラスターイオンビーム源がさらに、
 加圧されたガス源と、

前記減圧チャンバ内に前記加圧ガス源からの加圧ガスを導入してガスクラスターを形成
 するノズルと、

ガスクラスターをイオン化させてガスクラスターイオンビームを形成するイオナイザー
 と、

前記ガスクラスターイオンビームを加速して前記高エネルギーガスクラスターイオンビ
 ームを形成するアクセラレータとを含んで構成されている請求項 1 記載の装置。

20

【請求項 3】

前記圧力コントロール領域を通る前記ガスクラスターイオンビーム通路の部分が、前記圧力コントロール領域内の通路に沿って約 5×10^{-4} torr-cm以上の圧力-距離の積分を有する、請求項 1 記載の装置。

【請求項 4】

前記圧力コントロール領域の平均圧力をコントロールするシステムをさらに含んでいる請求項 1 記載の装置。

【請求項 5】

前記高エネルギーガスクラスターイオンビームが、少なくとも一部が多重イオン化されたガスクラスターイオンを含む請求項 1 記載の装置。

10

【請求項 6】

前記圧力コントロール領域が圧力チャンバを含む請求項 4 記載の装置。

【請求項 7】

前記減圧チャンバが前記ガスクラスターイオンビーム源を含むイオン化/加速化チャンバを有し、

前記圧力コントロール領域が圧力チャンバを含み、

前記圧力チャンバが前記イオン化/加速化チャンバよりも高圧であることを特徴とする請求項 1 記載の装置。

【請求項 8】

前記減圧チャンバがさらに処理チャンバを含み、

前記圧力チャンバが前記処理チャンバよりも高圧であることを特徴とする請求項 7 記載の装置。

20

【請求項 9】

前記圧力コントロール領域が、圧力セルを含む請求項 1 記載の装置。

【請求項 10】

前記ガスクラスターイオンビーム源がさらに以下の構成、

ガスクラスターをガスクラスターイオンビームにイオン化するイオナイザーと、

ガスクラスターイオンビームを高エネルギーガスクラスターイオンビームに加速するアクセラレータと、

を含む請求項 9 記載の装置。

30

【請求項 11】

前記圧力セル内の圧力をコントロールするシステムをさらに含む請求項 9 記載の装置。

【請求項 12】

前記高エネルギーガスクラスターイオンビームが、少なくとも一部が多重イオン化されたガスクラスターイオンを含む請求項 9 記載の装置。

【請求項 13】

前記圧力セルが、前記減圧チャンバよりも高い圧力を有する請求項 9 記載の装置。

【請求項 14】

対象物をガスクラスターイオンビームで処理する方法であって、

減圧チャンバ内のガスクラスターイオンビーム源からガスクラスターイオンビームを発生させる工程と、

40

高エネルギーガスクラスターイオンビームを形成するために、ビーム通路を有するアクセラレータにより前記ガスクラスターイオンビームを加速する工程と、

減圧チャンバ内に対象物を保持する工程と、

アクセラレータと対象物の間に加圧領域を提供し、前記ビーム通路の少なくとも一部が前記加圧領域を通過する工程と、

を含むことを特徴とする処理方法。

【請求項 15】

加圧ガス源を提供する工程と、

ノズルを提供する工程と、

50

前記加圧ガス源から前記減圧チャンバへ導入することによってガスクラスターを形成するために、加圧ガスを前記ノズルから放出する工程と、

イオナイザーを提供する工程と、

ガスクラスターをガスクラスターイオンビームへイオン化する工程と、
をさらに含む請求項 14 記載の方法。

【請求項 16】

前記加圧領域内で圧力をコントロールするシステムを提供する工程と、

前記システムにより前記加圧領域の圧力をコントロールする工程と、
をさらに含む請求項 14 記載の方法。

【請求項 17】

前記加圧領域を通る前記ビーム通路の少なくとも一部が、前記加圧領域内の通路に沿って約 5×10^{-4} torr-cm を超える圧力-距離の積分を有する、請求項 14 記載の方法。

【請求項 18】

前記高エネルギーガスクラスターイオンビームが、少なくとも一部が多重イオン化されたガスクラスターイオンを含む請求項 14 記載の方法。

【請求項 19】

加速されたガスクラスターイオンビームを提供する方法であって、

減圧チャンバ内のガスクラスターイオンビーム源からガスクラスターイオンビームを発生させる工程と、

前記ガスクラスターイオンビームを、ビーム通路およびエネルギー分布を有するガスクラスターイオンを含む高エネルギーガスクラスターイオンを形成するために、減圧チャンバ内のアクセラレータにより加速する工程と、

減圧チャンバ内に加圧領域を供給する工程と、

ガスクラスターイオンビーム通路の少なくとも一部が前記加圧領域を通過するように、高エネルギーガスクラスターイオンのビーム通路を導く工程と、

ガスクラスターイオンビームを生成する工程と、
を含む方法。

【請求項 20】

前記加圧領域を通る前記ガスクラスターイオンビーム通路の少なくとも一部が、前記加圧領域内の通路に沿って約 5×10^{-4} torr-cm を超える圧力-距離の積分を有する、請求項 19 記載の方法。

【請求項 21】

前記加圧領域内で圧力をコントロールするシステムを提供する工程と、

前記加圧領域の圧力をコントロールする工程と、

をさらに含む請求項 19 記載の方法。

【請求項 22】

前記コントロールする工程が、前記加圧領域内を通路に沿って約 5×10^{-4} torr-cm を超える圧力-距離の積分を有するように圧力コントロールされる請求項 21 記載の方法。

【請求項 23】

前記高エネルギーガスクラスターイオンビームが、少なくとも一部が多重イオン化されたガスクラスターイオンを含む請求項 19 記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ガスクラスターイオンビームにより表面処理を行う方法および装置に関し、特に、表面処理効果が改善された、修飾ガスクラスターイオンビームの処理方法および装置に関する。

【背景技術】

【0002】

10

20

30

40

50

表面処理のためにクラスターイオンビームを使用することは公知である（例えば、米国特許 5 8 1 4 1 9 4 ; デグチら）。ガスクラスターとは、標準温度と圧力下で気体状態である物質のナノサイズ集合体のことを言う。そのようなガスクラスターは典型的には緩く結束した数個から数千個の分子から成る集合体で構成されている。クラスターは電子衝撃等によってイオン化でき、制御可能なエネルギーを有する方向性ビームにすることができる。そのようなイオンは典型的には、それぞれが $q \times e$ （ e は電荷であり、 q は 1 以上の整数でクラスターイオンの荷電状態を表す）の正電荷を運搬する。非イオン化クラスターもまた、クラスターイオンビームの中に存在するかもしれない。大型クラスターイオンはしばしば最も有効である。なぜなら、クラスターイオン当たりのエネルギーを多量に運ぶことができるだけでなく、分子当たりのエネルギーは抑えることができるからである。クラスターは衝撃により分解し、個々の分子は全クラスターイオンのエネルギーのほんの一部を運搬しているだけである。その結果、大型クラスターイオンの衝撃効果は多大であるが、非常に浅い表面領域に限定される。このことから、クラスターイオンは様々な表面改質処理に有効利用でき、従来のモノマーイオンビーム処理による深い内層面の損傷を抑えることができる。

10

【 0 0 0 3 】

ガスクラスターイオンビーム（以下 G C I B という）の製造および加速方法は米国特許 5 8 1 4 1 9 4 に述べられている。ここでは、その内容を引用する。現在、利用可能なクラスターイオン源は多分散のサイズ N を有するクラスターイオンを発生させる（ N は各クラスターイオンの分子数、アルゴンのような単原子ガスの場合には、単原子ガスは分子として扱い、そのような単原子ガスのイオン化された原子は、分子イオンまたは単にモノマーイオンとして扱う）。

20

【 0 0 0 4 】

多くの有益な表面処理効果は G C I B s で表面を衝撃処理することにより達成される。これらの処理には限定されないが、洗浄、平滑化、エッチング、ドーピング、膜形成ないし膜成長などが含まれる。多くの場合、G C I B 処理によって産業上の実用的な生産を達成するために、G C I B 電流が数百から数千マイクロアンペア必要であることが知られている。G C I B の強度およびイオン化を増強する努力は、より高い電荷の状態のクラスター（ $q > 1$ ）の生産に向けられている。イオン化が電子衝撃によって行われるとき、ランダムな電子衝撃が進行する。非イオン化されたクラスターに対するイオン化されたクラスターの比率を高めるためには、電子衝撃が高くなければならず、その荷電状態の分布はおおよそ以下のポアソン統計式 $P(q)$ に近似する。

30

【 0 0 0 5 】

（式 1）

$$P(q) = \frac{\bar{q}^q}{q!} e^{-\bar{q}}$$

【 0 0 0 6 】

（式中、 q は荷電、

40

\bar{q}

はイオナイザー処理後の平均イオン化クラスターの電荷状態を示す。）

【 0 0 0 7 】

このように、高くイオン化されたクラスタービームは、ビーム中に高度に荷電したクラスターイオンを含んでいる。たとえば、理論的に G C I B の 9 5 % の荷電状態が平均して 3 とすれば、8 % 以上が 6 以上の荷電を有する。しかし、そのような高荷電状態のクラスターは、荷電交換反応や、部分的に蒸発し得るので、荷電状態の分布やエネルギー分布が異なることとなり、実用的ビームにおいては正確な荷電状態、エネルギー分布を容易には予測できない。

【 0 0 0 8 】

50

従来技術においては、イオンビームの最適な運搬は低圧力状態下に達成されると理解されている。また、産業上の経済的スケールにおいて、物質表面の効率的な処理のために通常必要とされる適度な高強度 G C I B s が、ガスクラスタリーオンの形で本質的な量のガスを標的部位に運搬されることも知られている。G C I B のガスクラスタリーオンが標的に到達したとき、クラスターは分解して分子状のガスとして放出される。G C I B が標的部位に衝突し、ビーム全体のガス負荷が放出されるのである。アルゴンビームの有するビーム電流を I_B とし、ガス流を F (s c c m) とすると、ビームの運搬は下式により表される。

【 0 0 0 9 】

(式 2)

$$F = 2.23 \times 10^{-18} \left(\frac{N}{q} \right) \left(\frac{I_B}{e} \right)$$

【 0 0 1 0 】

この式によれば、ビーム電流 4 0 0 μ A で N/q 比 5 0 0 0 のとき、ビームは 2 7 s c c m のガス流を運搬する。典型的な G C I B 処理装置の場合には、このガス負荷に対する低圧環境維持のために、大容量、複数の真空ポンプが採用される。

【 0 0 1 1 】

高強度 G C I B s は多様な荷電状態のクラスターを含んでおり、加速電圧 $V_{A c c}$ (数 k V 程度) で加速すると、ビームに対して q 値が加わり、 $q \cdot V_{A c c}$ の増加したエネルギーをもつクラスターが生成する。一般的に、対象物の表面を G C I B を用いて処理すると得られる多くの有益な効果は、ビーム内のガスクラスタリーオンのエネルギーに依存している。たとえば、表面のエッチングは、高いエネルギーのクラスターを用いればより早く進行する。G C I B 処理の他の有利な適用としては、表面のスミージング (平滑化) があり、他の方法に比べて原子或いは近原子レベルで優れた効果を示す。ある種のビーム状態における G C I B による表面処理は、例外的平滑面を生じるが、G C I B 処理が表面を常に平滑にするとは限らないことに留意すべきである。事実、初期表面が比較的平滑であるときは、G C I B 処理により却って表面を荒らす場合もある。表面のエッチングやスミージングは、状況に応じて実施する。処理条件を最適化する通常の技術 (たとえば、クラスターガス源の選択や、加速電圧の選択、G C I B 電流の選択、G C I B 処理方法の選択など) を使用するとき、すでに平滑な表面に対する、適度なエッチング速度 (同時に進行するスミージング速度) や表面を荒らさないようにする適当な G C I B ビームの条件がしばしば見つからない。G C I B 処理による進取的なエッチング速度は、通常高エネルギー、高強度の G C I B 状態を必要とするが、表面を荒らさず平滑化するためには、低いエネルギーの (もしくはエッチングのためには実用的ではない状態の) ビームが望ましいことも知られているのである。そのような場合、所望の目的を達成するためにいくつかの G C I B ステップを組み合わせることが必要であった。そのようなプロセスとしては、最初のビーム状態を進取的 (aggressive) なエッチングができる条件、次いで最初のエッチングにより生じた荒さを減少させるようなエッチング条件、そしてエッチングが生じないがスミージングできるような条件による他のステップを適用する。そのようなステップの組み合わせもしくは複合化は、期待される最終的な結果には到達していないけれども、ある重要なプロセスにおいて低い生産性ではあるが技術的には知られている。たとえば、フェンナーらの米国特許 6 3 7 5 7 9 0 には、多段階の処理を G C I B 処理装置に適用させて、そのような複合処理が可能であることを開示している。

【 0 0 1 2 】

G C I B の形成にイオン化ガスクラスターの生産に有効なイオナイザーを適用すると、広い範囲のイオン化された状態のビームが得られるが、これらは対象物の G C I B 処理による高生産性が求められる場合に必要な強力なビーム (式 1 で示すような) の生産条件では、特にマルチイオン化されたガスクラスターが含まれている。そのようなビームに、適

10

20

30

40

50

度なエッチング速度を得るためのエネルギーを与えるのに十分な状態で加速されると、表面のスムージングだけでなく、表面を荒らす方向にも作用する。この問題は、G C I B プロセスの複合化または多段階化によって少なくとも軽減はされるが、所望の速度での生産性を上げてはいない。さらに、多くの異なるビーム状態を有する複合化処理であっても、究極レベルの平滑化は得られておらず、他の重要な処理方法が必要とされているのである。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

上述の通り、本発明の目的は、良好なエッチング能力だけでなく良好なスムージング能力を有するビームを形成する特徴を有するG C I Bの修飾方法を提供することを目的とする。

10

【0014】

本発明の他の目的は、より表面のスムージング能力が改善されたビームを形成する特徴を有するG C I Bの修飾方法を提供することを目的とする。

【0015】

本発明のさらに別の目的は、対象物を高いエッチング速度で、究極の平滑面を形成するための能力を有するG C I Bを修飾する装置を提供することを目的とする。

【0016】

そしてまた、他の目的は、より表面のスムージング能力が改善されたG C I Bの製造装置であって、G C I Bを修飾する装置を提供することを目的とする。

20

【0017】

そして、これらの目的は本発明における、G C I Bの形成の間に環境圧力およびその幾何学的コントロールによって達成された。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

本発明の理解を助けるため、以下に図面を参照しつつ説明する。

【0019】

図1は従来技術による典型的なG C I B処理装置100の基本構成を示す概略図である。この装置の真空容器102は3つの連通チャンバーであるビーム源チャンバ104、イオン化/加速チャンバ106および処理チャンバ108に分割されている。これらの3つのチャンバはそれぞれ真空ポンプシステム146a、146bおよび146cで適当な作動圧に減圧されている。ガス保存シリンダ111に保存された濃縮性ガス112（たとえばアルゴンまたはN₂）はガス測定バルブ113とガス供給チューブ114を介して滞留チャンバ116に圧力下で送られ、適当な形状のノズル110を介して低圧の真空チャンバ内に放出される。そこで超音速ガスジェット118が発生する。ジェット流の膨張により冷却され、ガスジェット118の一部がクラスターに濃縮される。それぞれのクラスターは数個から数千個の弱い結合原子または分子で構成される。高圧が有害である下流領域（たとえばイオナイザー122、高電圧電極126、処理チャンバ108）で圧力を最小にするために、クラスタージェットから、クラスタージェットに濃縮されなかったガス分子を、ガススキマー開口部120が部分的に分離する。ここで適当な濃縮性ガス112は、限定されないが、アルゴン、窒素、二酸化炭素、酸素、その他のガスおよびガス混合物である。

30

40

【0020】

ガスクラスターを含んだ超音速ガスジェット118が形成された後に、クラスターはイオナイザー122内でイオン化される。イオナイザー122は典型的には電子衝撃型イオナイザーであり、1以上の白熱フィラメント124から熱電子を発生させ、電子を加速および指向させて、イオナイザー122をジェットが通過する際にガスジェット118内のガスクラスターと衝突させる。電子衝撃によって電子がクラスターから飛び出し、クラスターの一部が正にイオン化される。またあるクラスターは2個以上の電子を放出し、多重イ

50

オン化 (multiply ionized) される。適切にバイアスされた高電圧電極 126 のセットはイオナイザーからクラスターイオンを抽出して、ビームを形成および加速して所望のエネルギー (典型的には数百 V から数百 kV あるいはそれ以上) を与え、それらを合焦 (focuses) させて G C I B 128 を形成させる。フィラメント電源 136 は、フィラメントに電圧 V_f を与え、イオナイザーフィラメント 124 を加熱する。アノード電源 134 はアノード電圧 V_A を与えフィラメント 124 から飛び出す熱電子を加速してクラスター含有ガスジェット 118 を照射してイオンを発生させる。導出電源 138 は導出電圧 V_E を与え高電圧電極をバイアスしてイオナイザー 122 のイオン化領域からイオンを導出し、G C I B 128 を形成する。加速電源 140 は加速電圧 V_{acc} を与え、イオナイザー 122 に関する高電圧電極をバイアスし、全 G C I B 加速ポテンシャルを V_{acc} と等しくする。一以上のレンズ電源 (142、144 など) が与えられ、焦点電位 (V_{L1} 、 V_{L2} など) の高電圧電極をバイアスして G C I B 128 を焦点させる。

10

【0021】

G C I B で処理される半導体ウェハーまたは他の対象物である対象物 152 は対象物ホルダー 150 に保持され、G C I B 128 の通路内に配置される。ほとんどの適用形態では、大型対象物を空間的に均質に処理することを期待するので、スキャン処理システムは空間的に同種の結果を生じるように大きなエリアで G C I B 128 を均質にスキャンすることが望ましい。

【0022】

G C I B 128 は変化せず、軸 129 を有し、対象物 152 はその表面を G C I B 128 によって効果的に処理するために機械的にスキャンされる。X スキャンアクチュエーター 202 は対象物ホルダー 150 に直線運動を与え、紙面に対して垂直方向への動作 208 を行う。Y スキャンアクチュエーター 204 は対象物ホルダー 150 に同様に直線運動を与え、X スキャン動作 208 に直交するように Y スキャン動作 210 の方向へ動かす。X スキャンと Y スキャン動作の組み合わせによって、対象物ホルダー 150 に保持された対象物 152 が動かされ、G C I B 128 を通してラスタの様な (raster-like) なスキャン動作をすることにより、G C I B 128 による対象物 128 表面の均質な (もしくはプログラムされた) 照射が行われる。対象物 152 を G C I B 128 の軸に対して傾斜して、対象物ホルダー 150 に保持することにより対象物 152 の表面に対するビーム入射角 206 を持たせる。ビーム入射角 206 は通常 90 度もしくはそれ以外の角度であってよく、典型的には 90 度または 90 度近辺である。Y スキャン処理の間に、対象物ホルダー 150 に保持された対象物 152 は 152A と 150A で示された位置を交互に移動する。これら 2 つの位置間での移動中に対象物 152 が G C I B 128 のスキャンを受け、両端の位置においては G C I B 128 の通路から完全にはずれている (オーバースキャン) ことが分かる。図 1 には明確に示されてはいないけれども、X スキャン動作の方向 208 (紙面に対して垂直方向) に対しても同様にスキャンおよびオーバースキャンがされているのである。

20

30

【0023】

ビーム電流センサ 218 は G C I B 128 の通路の対象物ホルダー 150 の後ろに設けられ、対象物ホルダー 150 が G C I B 128 の通路をスキャンアウトされたとき G C I B 128 のサンプルをとらえる (intercept)。ビーム電流センサ 218 は典型的にはファラデーカップなどであり、ビームの入射口を除いて閉じられており、電気絶縁マウント 212 で真空容器 102 の壁に固定されている。

40

【0024】

マイコンベースのコントローラ 220 は X スキャンアクチュエーター 202 と Y スキャンアクチュエーター 204 に電氣的ケーブル 216 を介して接続され、両アクチュエーターを制御して対象物 152 が G C I B 128 の内外に出入りさせ、G C I B 128 に対して均一的にスキャンし、G C I B 128 による対象物 152 の適切な処理を実現する。コントローラ 220 はリード 214 を介してビーム電流センサ 218 で集められるビーム電流のサンプルを受信し、G C I B をモニターし、所定の G C I B 照射量が投射されたとき

50

に G C I B 1 2 8 から対象物 1 5 2 を取り除くことにより G C I B の照射量を制御する。

【 0 0 2 5 】

図 2 は本発明の具体例として G C I B 処理装置 3 0 0 の概略を示す。調節壁 (b a f f l e) 3 0 2 (複数の調節板を用いても良いが、例では簡略化するために一枚の板のみ示している) は分離された圧力チャンバ 3 0 4 を形成し、イオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 および処理チャンバ 1 0 8 の圧力よりも高い圧力を加えることができる。

【 0 0 2 6 】

イオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 は G C I B 1 2 8 を圧力チャンバ 3 0 4 へ導入するためのイオン化 / 加速化チャンバ開口部 3 0 6 を有している。調節壁 3 0 2 は、圧力チャンバ 3 0 4 から G C I B 1 2 8 の出口となる圧力チャンバ開口部 3 0 8 を有する。圧力チャンバ 3 0 4 を通過する G C I B 1 2 8 は、その通路 D_1 に沿った、長さ d_1 を有する。また調節壁 3 0 2 は、処理チャンバ 1 0 8 に対して 1 以上の開口部 3 1 0 を有していてもよい。圧力チャンバから処理チャンバ 1 0 8 通じるこの圧力チャンバ開口部 3 0 8 および付加的な開口部 3 1 0 は、トータルのガスコンダクタンス C_p を有する。イオン化 / 加速化チャンバ 3 0 6 のガスコンダクタンスは C_A である。圧縮ガス 3 1 4 はガス保存シリンダ 3 1 2 内に保存されている。圧縮ガス 3 1 4 は好ましくは不活性ガスであり、好適にはアルゴンである。ガス計測バルブ 3 1 6 は好ましくはマスフローコントロールタイプの計測バルブであり、ガス供給チューブ 3 1 8 およびディフューザ 3 2 0 を通して圧力チャンバ 3 0 4 に圧縮ガス 3 1 4 を調整しつつ流している。圧力チャンバ 3 0 4 に導入されたガス 3 1 4 は、イオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 および処理チャンバ 1 0 8 の基礎圧力と比較して、圧力チャンバ 3 0 4 内を加圧する。

【 0 0 2 7 】

Q_{IN} はディフューザ 3 2 0 を通して圧力チャンバ 3 0 4 内に流れ込むガス流量を示す。

Q_A は圧力チャンバ 3 0 4 とイオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 の間のイオン化 / 加速化チャンバ開口部 3 0 6 を通る流量を示す。

Q_p は圧力チャンバ 3 0 4 と処理チャンバ 1 0 8 の間の圧力チャンバ開口部 3 0 8 および開口部 3 1 0 を通る流量を示す。

P_C は圧力チャンバ 3 0 4 内の真空圧を示し、

P_p は処理チャンバ 1 0 8 内の真空圧を示し、(図 2 には示されてはいないが) 通常の真空圧ゲージを用いて測定した値であり、

P_A はイオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 内の真空圧を示し、前記同様に測定した値である。

前記を用いて以下の式にて表すことができる。

【 0 0 2 8 】

$$Q_{IN} = Q_A + Q_p \quad (\text{量的保存}) \quad \text{式3}$$

$$Q_{IN} = (P_C - P_A)C_A + (P_C - P_p)C_p \quad \text{式4}$$

$$P_C = \frac{Q_{IN} + P_A C_A + P_p C_p}{C_A + C_p} \quad \text{式5}$$

さらに以下の場合 (好ましくは操作状態において) :

$$P_C \gg P_p \text{ であり } P_C \gg P_A, \text{ のとき} \quad \text{式6}$$

$$P_C \approx Q_{IN} / (C_A + C_p) \quad \text{式7}$$

【 0 0 2 9 】

コンダクタンス C_A および C_p は計算もしくは経験上決定でき、 Q_{IN} はガス計測バルブ 3 1 6 (好ましくはマスフローコントロールバルブ) によって制御できる。また P_C お

10

20

30

40

50

よび P_A は通常の真空圧センサを用いて測定できるから、式 5（もしくは式 6 の条件が満たされれば式 7）を使用することによって、 P_C が既知量として表されるので、ガス計測バルブ 316 の調整により容易に制御することができる。

【0030】

また、任意に、圧力センサ 322 は圧力チャンバ 304 の中に設けることもできる。圧力センサ 322 はケーブル 324 によって圧力コントローラおよび読み出し表示装置 326 とつながっている。圧力コントローラと読み出し表示装置 326 は圧力チャンバ 304 内の圧力を直接読み取る。

【0031】

圧力チャンバ 304 は P_A および P_P より高い圧力 P_C を有する。GCIB 128 は高圧の圧力チャンバ 304 を通過するので、以下に示されるように、GCIB の特性はその処理の適合性を向上させる方向で修飾される。GCIB の修飾の程度は圧力 P_C および圧力チャンバ 304 内の GCIB の通過距離 d_1 に関係がある。より明確には、 P_C が GCIB 通路 D_1 に沿ってほぼ一定の時は、GCIB 特性の修飾程度は、圧力 P_C と距離 d_1 の積に ($P_C d_1$) に関係する。圧力チャンバ内の圧力 P_C が通路 D_1 に沿っていくらかの空間的变化を持っているときは、GCIB 特性の修飾程度は、通路 D_1 (圧力 - 距離のインテグラル (PDI)) に沿って、0 から d_1 までの積分 ($P_C(x) \cdot dx$) に関係する。圧力 - 通路距離の積および / または PDI は共に単位 (torr · cm) として表すことができる。

【0032】

図 3 は本発明の第二の具体例である GCIB 処理装置 350 を表す概略図である。圧縮ガス 314 はガス保存シリンダ 312 内に保存されている。圧縮ガス 314 はたとえばアルゴンのような不活性ガスが好ましい。マスフローコントロールバルブ 352 は、圧力チャンバ 304 内のガス供給チューブ 318 およびディフューザ 320 を通る圧縮ガス 314 の流れを制御する。マイクロプロセッサベースのプログラム可能な多目的コントローラ 358 は、GCIB 処理装置 350 の部分的ないし全体の制御に用いられ、圧力センサ 322 からケーブル 324、圧力センサコントローラおよび読み出し表示装置 326、ケーブル 360 を通して圧力チャンバ 304 内の圧力測定信号を受信する。コントローラ 358 はまたケーブル 360、マスフローコントロールバルブ 352 を制御し、圧力チャンバ 304 内へのガス 314 の流入をセットし調整する。圧力センサ 322 からの圧力測定信号が利用されるかどうかに応じて、コントローラ 358 は開ループもしくは閉ループの制御アルゴリズムによる圧力チャンバ 304 内の圧力 P_C を制御する能力を有する。コントローラ 358 は他のセンサからの信号も受信し、ケーブル 360 を通して GCIB 処理装置 350 の総合制御の一部として他のシステムへ制御信号を送信する。これら他の接続は識別子 (identifier) 362 によって表される。

【0033】

図 4 は本発明の第三の具体例である GCIB 処理装置 400 を表す概略図である。イオン化 / 加速化チャンバ 106 と処理チャンバ 108 は互いに連通しており、実質的に同じ圧力 P_{P2} を有する。圧力セル 402 は、 P_{P2} よりも高い圧力 P_{C2} を、その圧力セル内部 408 においてかけることができる。圧力セル 402 は圧力セル入口開口部 404 と圧力セル出口開口部 406 を有する。GCIB 128 は開口部 404 を通って圧力セル 402 内に入り開口部 406 を通って圧力セルから出る。圧力セル 402 を通る GCIB 128 の通路 D_2 は、長さ d_2 を有する。圧力セル入り口 404 と出口 406 はトータルガスコンダクタンス C_{P2} を有する。圧縮ガス 314 は、ガス保存シリンダ 312 内に保存されている。圧縮ガス 314 はたとえばアルゴンのような不活性ガスが好ましい。マスフローコントロールバルブ 352 は、ガス供給チューブ 318 およびディフューザ 410 を通って圧力セル 402 内への圧縮ガス 314 の流入を制御する。この具体例における多目的コントローラ 358 もまた、マイクロプロセッサベースのプログラム可能であり、GCIB 処理装置 400 の部分的ないし全体の制御に用いられ、ケーブル 324、圧力センサ

10

20

30

40

50

コントローラおよび読み出し表示装置 3 2 6、ケーブル 3 6 0 を通して圧力センサ 4 1 2 から測定圧力信号を P_{p2} として受信する。コントローラ 3 5 8 はまた、ケーブル 3 6 0、マスフローコントロールバルブコントローラ 3 5 6、ケーブル 3 5 4 を通してマスフローコントロールバルブ 3 5 2 を制御し、圧力チャンバ 3 0 4 内のガス 3 1 4 の流れをセットし調整する。圧力センサ 4 1 2 からの圧力測定信号が利用されるかどうかに応じて、コントローラ 3 5 8 は開ループもしくは閉ループの制御アルゴリズムによる圧力セル 4 0 2 内の圧力 P_{c2} を制御する能力を有する。本発明に式 1 2 を適用することにより実施可能であるので、圧力 P_{p2} を測定することは必ずしも不可欠ではない。コントローラ 3 5 8 は他のセンサからの信号も受信し、ケーブル 3 6 0 を介して G C I B 処理装置 3 5 0 の総合制御の一部として他のシステムへ制御信号を送信する。これら他の接続は識別子 3 6 2 によって表される。

10

【 0 0 3 4 】

Q_{IN2} はディフューザ 4 1 0 を通して圧力セル 4 0 2 内に流れ込むガス流量を示す。

Q_{p2} は処理チャンバ 1 0 8 とイオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 の間にある圧力セル 4 0 2 の、入口 4 0 4 から出口 4 0 6 を通して全体の流量を表す。

P_{c2} は圧力セル 4 0 2 内の真空圧を示し、

P_{p2} は処理チャンバ 1 0 8 およびイオン化 / 加速化チャンバ 1 0 6 内の真空圧を示し、圧力センサ 4 1 2 を用いて測定した値である。

前記を用いて以下の式にて表すことができる。

【 0 0 3 5 】

20

$$Q_{IN2} = Q_{P2} \quad (\text{量的保存}) \quad \text{式8}$$

$$Q_{IN2} = (P_{C2} - P_{P2}) C_{P2} \quad \text{式9}$$

$$P_{C2} = (Q_{IN2} / C_{P2}) + P_{P2} \quad \text{式10}$$

さらに以下の場合 (好ましくは操作状態において)

$$P_{C2} \gg P_{P2} \quad \text{のとき} \quad \text{式11}$$

$$P_{C2} \approx Q_{IN2} / C_{P2} \quad \text{式12}$$

【 0 0 3 6 】

30

コンダクタンス C_{p2} は計算もしくは経験上決定でき、 Q_{IN2} はマスフローコントロールバルブ 3 5 2 によって制御される。また P_{p2} は、圧力センサ 4 1 2 を用いて測定でき、式 1 0 (もしくは式 1 1 の条件が満たされれば式 1 2) として示される。さらに P_{c2} は既知の量として表され、マスフローコントロールバルブ 3 5 2 を調整することによって、容易に制御することができる。

【 0 0 3 7 】

運転中は、圧力セル 4 0 2 は P_{p2} よりも高い圧力で操作される。G C I B 1 2 8 が圧力が上昇した圧力セル 4 0 2 を通るときに、G C I B の特徴が修飾されて、ある種の G C I B 処理の適合性を向上させるように改善される。G C I B の特徴が修飾される程度は、圧力 P_{c2} に関連し、圧力セル 4 0 2 中の G C I B 通路の長さ d_2 に関連する。さらに明確には、 P_{c2} は、G C I B 通路 D_2 に沿っておおよそ一定である場合、G C I B の特徴を修飾する程度は、圧力 P_{c2} と長さ d_2 の積 ($P_{c2} \cdot d_2$) に依存する。また圧力セル内の圧力 P_{c2} が通路 D_2 に沿って空間的に変化する場合には、G C I B 特性の修飾程度は通路 D_2 に沿って、0 から d_1 までの積分 ($P_{c2}(x) \cdot dx$) (圧力 - 距離のインテグラル (P D I)) に関係する。圧力と通路長さの積および / または P D I はともに、単位 (torr · cm) として表すことができる。

40

【 0 0 3 8 】

図 5 はケース A から G まで圧力セル内の圧力条件を変化させて G C I B 特性を測定した結果を示すグラフである。オリジナル G C I B は 3 0 k V の電位差によって加速されたアルゴンガスクラスタリーオンビームである。グラフは、ガスクラスタリーオンの分布 (縦

50

軸、任意の単位) と対するガスクラスタイオンエネルギーを電荷で割った値(横軸、 keV/q) をプロットしたものである。ケース A から G までは、圧力セルの PDI 値を 1.0×10^{-4} から 1.3×10^{-3} torr-cm まで変化させたものである。ケース A の 1.0×10^{-4} torr-cm では、実質的に圧力セルがほとんど無いに等しいケースであるが、ガスクラスタイオンエネルギーは $22 \text{ keV}/q$ 近傍に狭いピークを示している。PDI 値を上げると、分布が広がってエネルギー分布のピークが低い方に動いていく。このようなエネルギー分布の修飾は単にビーム加速電位を下げることによって(本発明を用いないで)は得られない。より大きな PDI 値から得られるこのような分布は、GCIB に高いスムージング性能を与え、低いエッチングの速度を与える。

【0039】

10

図 6 は PDI 値に対する GCIB のエッチング速度を示したグラフである。この場合の対象物は SiO_2 表面を有し、 30 kV の加速電圧によってアルゴン GCIB を加速して処理され、 3×10^{15} のガスクラスタイオン/ cm^2 の全量で照射されたものである。エッチング速度は PDI 値が増加するに従ってゆっくりと低下し、高い PDI 値になると速度低下が急激におこり、そしてほぼゼロに近づく。

【0040】

図 7 は PDI 値に対する処理後の表面粗度を原子間力顕微鏡を用いて測定したグラフである。この場合の対象物は SiO_2 表面を有し、 30 kV の加速電圧によってアルゴン GCIB を加速して処理され、 3×10^{15} のガスクラスタイオン/ cm^2 の全量で照射されたものである。低い PDI 値では、PDI 値が増加するに従って急激に荒さが解消され、高い PDI 値になると粗度が低レベルで落ちついて、さらなる効果増進はない。

20

【0041】

図 6 および 7 については SiO_2 のエッチングおよび平滑化について示した。しかし、同様な結果は他の材料であっても得られ、たとえば金属や、酸化物、セラミックス、半導体、などにおいても同様である。PDI (または圧力 - 通路長の積) が 5×10^{-4} torr-cm より大きいと、(表面が荒らされることなしに) 有意な平滑化が達成され、エッチング速度の減少も少ない。高いエッチング速度ならびに、優れた平滑化および/または表面が荒らされることのない処理は、従来の GCIB 源の調整や、加速化電圧の調整によっては得られないことが多い。PDI 値を高めることによって、エッチング速度が次第に低下するが、高度な平滑化が得られる。高い PDI 値においては、従来の GCIB 源の調整によ

30

【0042】

以上、本発明を種々な具体例を示して説明したが、本発明の思想の範囲内でそのほかの様々な改良・改善が可能であると理解されるべきである。

【図面の簡単な説明】

【0043】

【図 1】図 1 は従来技術の GCIB 処理装置の基本的構成を示す概略図である。

【図 2】図 2 は本発明の具体例である GCIB 処理装置 300 を示す概略図である。

【図 3】図 3 は本発明の第二の具体例である GCIB 処理装置 350 を示す概略図である。

40

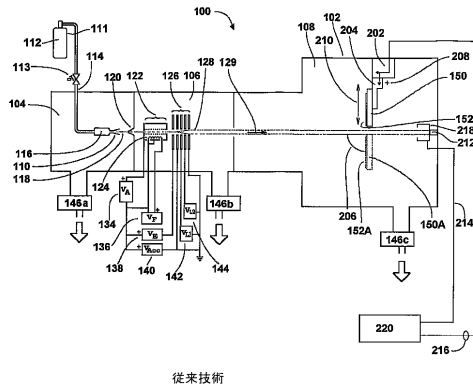
【図 4】図 4 は本発明の第三の具体例である GCIB 処理装置 400 を示す概略図である。

【図 5】図 5 は種々の圧力状態で、圧力セル内を通過させたときの GCIB の特性を測定したグラフである。

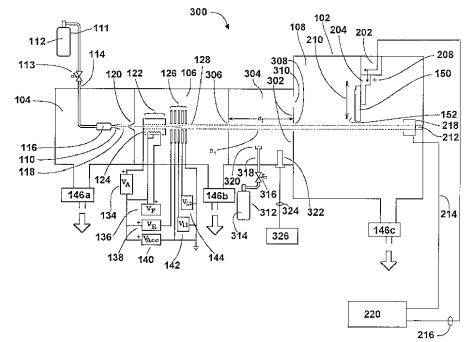
【図 6】図 6 は GCIB のエッチング速度を PDI (圧力 - 距離を積分した) 値と対比したグラフである。

【図 7】図 7 は PDI 値による表面粗度を原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて測定したグラフである。

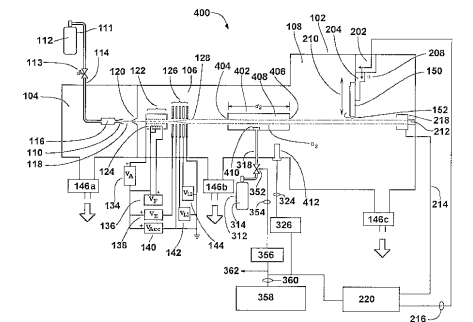
【図 1】



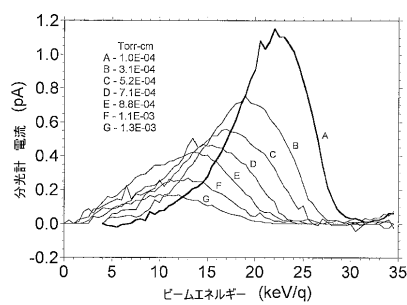
【図 2】



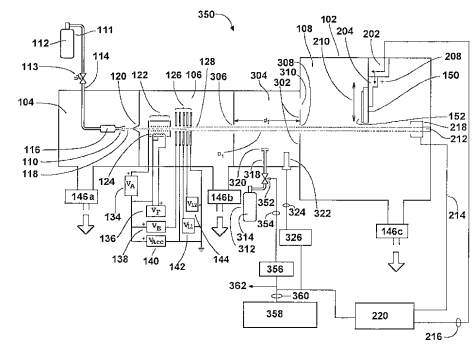
【図 4】



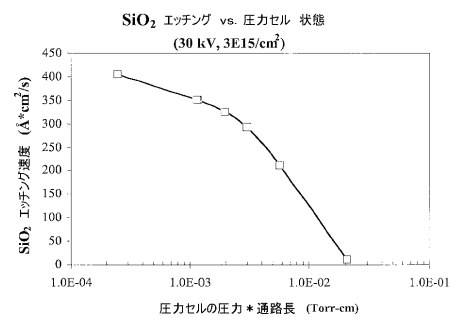
【図 5】



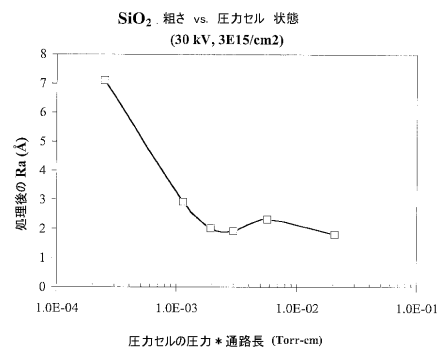
【図 3】



【図 6】



【図 7】



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
H 0 1 L 21/205 (2006.01) H 0 1 L 21/205

- (72)発明者 スウェンソン, デービッド, アール.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0 1 8 2 1, ビルリカ, マニング ロード 3 7 番地 エ
ピオン コーポレーション内
- (72)発明者 ハウタラ, ジョン, ジェイ.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0 1 9 1 5, ベバリー, ロベット ストリート 7 8 番地
- (72)発明者 グウィン, マシュー, シー.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0 1 4 7 5, ウィンチェンドン, ノース セントラル ス
トリート 7 0 1 番地
- (72)発明者 マック, ミカエル, イー.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0 1 9 4 4, マンチェスター, ヒッデン レッジ ロード
7 番地
- (72)発明者 タバト, マーチン, イー.
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0 1 8 2 1, ビルリカ, マニング ロード 3 7 番地 エ
ピオン コーポレーション内

審査官 遠藤 直恵

- (56)参考文献 特開平 0 7 - 0 8 6 1 6 4 (J P , A)
特開 2 0 0 0 - 0 8 7 2 2 7 (J P , A)
特表 2 0 0 3 - 5 2 1 8 1 2 (J P , A)
特表 2 0 0 5 - 5 1 2 3 1 2 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 0 1 5 6 9 7 (J P , A)
特表平 0 3 - 5 0 3 4 2 5 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

H01J 27/00-27/26, 37/08, 37/30-37/36 H01L 21/302, 21/205, 21/365, 21/31, 21/203, 21/363