

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016 年 2 月 4 日(04.02.2016)



(10) 国際公開番号
WO 2016/017660 A1

- (51) 国際特許分類:
H01J 27/04 (2006.01) H01J 37/20 (2006.01)
H01J 37/08 (2006.01) H01J 37/305 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/071432
- (22) 国際出願日: 2015 年 7 月 29 日(29.07.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-154423 2014 年 7 月 30 日(30.07.2014) JP
- (71) 出願人: 株式会社日立ハイテクノロジーズ(HITACHI HIGH-TECHNOLOGIES CORPORATION) [JP/JP]; 〒1058717 東京都港区西新橋一丁目 2 4 番 1 4 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 浅井 健吾(ASAI Kengo); 〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP). 志知 広康(SHICHI Hiroyasu); 〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP). 高須久幸(TAKASU Hisayuki); 〒1058717 東京都港区西新橋一丁目 2 4 番 1 4 号 株式会社日立ハイテ

クノロジーズ内 Tokyo (JP). 岩谷 徹(IWAYA Toru); 〒1058717 東京都港区西新橋一丁目 2 4 番 1 4 号 株式会社日立ハイテクノロジーズ内 Tokyo (JP).

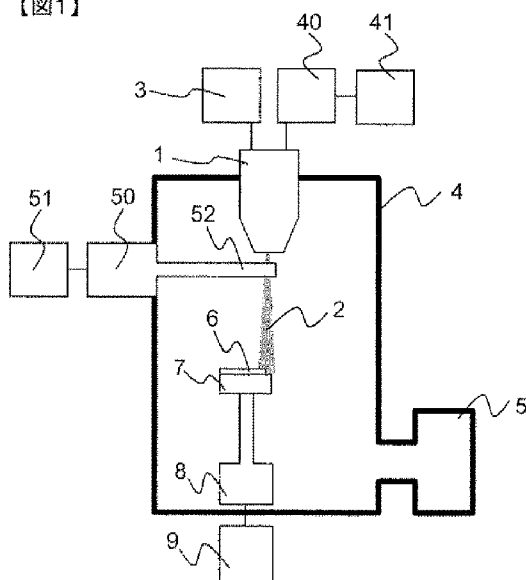
- (74) 代理人: 井上 学, 外(INOUE Manabu et al.); 〒1008220 東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 1 号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー

[続葉有]

(54) Title: ION-MILLING DEVICE AND ION-MILLING METHOD

(54) 発明の名称: イオンミリング装置およびイオンミリング方法

【図1】



(57) Abstract: Provided are: a Penning-discharge ion gun capable of thinly focusing a beam at a low acceleration voltage and low ion-beam current; an ion-milling device having said ion gun; and an ion-milling method. An ion-milling device for controlling the range of the half-value width of the beam profile of an ion beam (2) irradiated from an ion gun (1) at a specimen (6) to 200-350 μ m, and having the ion gun (1) for discharging an ion beam by ionizing externally supplied gas, a gas-flow adjustment unit (40) capable of varying the flow of gas to be supplied to the ion gun (1), and a current measurement unit (50) for measuring the current value of the ion beam (2) discharged from the ion gun (1), the ion-milling device being characterized in that the gas-flow adjustment unit (40) sets the gas flow to a value higher than the gas flow at which the ion beam current is at the maximum, on the basis of the gas flow set by the gas-flow adjustment unit (40) and the current value measured by the current measurement unit (50).

(57) 要約: 低い加速電圧において低いイオンビーム電流でかつビームを細く絞ることができるペニング放電方式のイオンガン、およびそれを有するイオンミリング装置・イオンミリング方法を提供する。イオンガン(1)から試料(6)へ照射されるイオンビーム(2)のビームプロファイルの半値幅を200 μ mから35

0 μ mまでの範囲に制御するイオンミリング装置であって、外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出する前記イオンガン(1)と、前記イオンガン(1)に供給される前記ガスの流量を可変させるガス流量可変部(40)と、前記イオンガン(1)から放出されるイオンビーム(2)の電流値を測定する電流測定部(50)と、を有し、前記ガス流量可変部(40)は、前記ガス流量可変部(40)にて定められる前記ガスの流量と前記電流測定部(50)にて測定される前記電流値とに基づき、前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定されることを特徴とするイオンミリング装置。



ロツパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： イオンミリング装置およびイオンミリング方法

技術分野

[0001] 本発明は、試料を作成するためのイオンミリング装置、イオンミリング方法に関する。

背景技術

[0002] イオンミリング法は、加速したイオンを試料へ衝突させて、イオンが原子や分子をはじき飛ばすスパッタ現象を利用して、試料を削る加工法である。また加工される試料は、上面にイオンビームの遮蔽板となるマスクを載せ、マスク端面からの突出部分がスパッタされることで平滑な断面が加工できる。この方法は、金属、ガラス、セラミック、電子部品、複合材料などを対象に用いられる。例えば電子部品においては、内部構造や断面形状、膜厚評価、結晶状態、故障や異物断面の解析といった用途に用いられる。また走査型電子顕微鏡をはじめとした各種測定装置による形態像、試料組成像、チャネリング像の取得やX線分析、結晶方位解析など取得するための断面試料作成方法として利用されている。

[0003] 前記のようなイオンミリング装置においては、イオンガンとして単純な構成で小型なペニング放電方式のイオンガンが用いられているものがある。ペニング放電方式のイオンガンは、イオンビームのエネルギーが大きいことに起因する高いミリング速度が特長である。特許文献1には高いミリング速度を維持するためにイオンガンから放出されるイオンビームの電流値を常に最大値に保つ方式が記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2007-48588号

特許文献2：特表2013-524467号

特許文献3：特開2012-156077号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0005] ペニング放電方式のイオンガンを搭載したイオンミリング装置はイオンビームのエネルギーが比較的大きい。このため高い加速電圧の条件下では大きなミリング速度を実現するため非常に有用である。そのため特許文献1のように、イオンガンから放出されるイオンビームの電流値は常に最大値に保つことが望ましく、イオンビーム電流値が加工中に低下する原因が、加工中の真空度変化に起因するものであることを開示し、加工中に電流値が最大となるガス圧が得られるように真空度変化を想定したガス流量を予め設定する加工方法が開示されている。このようにペニング放電方式のイオンガンでは従来から高いイオンビーム電流が要求されている。
- [0006] なお、特許文献2の図3には、ガス流量とイオンビーム電流値の関係が開示されており、ガス流量を想定値から増加させていくと、次第にイオンビーム電流値が低下することが開示されている。しかしながら、特許文献2の目的は高いイオンビーム電流値を確保することであるので、この低いイオンビーム電流値の領域を利用することに関する一切の言及はない。
- [0007] 一方で、融点が低い材料を加工する場合には、イオンビームのエネルギーによる熱の蓄積が原因となって、試料断面にダメージが発生することが懸念されている。近年、有機ELなどの電子デバイス分野においても有機高分子材料の活用が進んでおり、試料の熱ダメージを抑えるのに有効な低加速電圧での加工のニーズが高まっている。また、電子電気機器の端子コネクタなどに使用されるCu-Zn系合金や、鉛フリー半田など、またはこれらの材料よりも融点の低い材料の加工においても熱ダメージにより試料損傷が課題となっている。
- [0008] 特許文献2には低い加速電圧を使用することにより試料損傷を最小限に抑えることができることが開示されているが、ペニング放電方式のイオンガンにおいて低い加速電圧では、試料上のスポットサイズが増大することも開示されている。

[0009] 発明者が本点を検討した結果、ペニング放電方式のイオンガンでは、カソードと加速電極出口孔の間には電位差が生じているため、その空間にはレンズが構成されている。レンズの強度はカソードと加速電極出口孔の電位差に比例するため、加速電圧が高いほどレンズ強度が大きくなり、ビームが小さく絞られることになる。しかしながら、低い加速電圧ではレンズ効果が弱いいため、イオンビームは広がり、試料上のスポット径が大きくなるという課題があることが判明した。

[0010] 特許文献3では低加速電圧でのイオンビーム電流の制御が容易なイオンガンとしてホローアノード放電方式のイオンガンが開示されている。しかしながら、ホローアノード放電方式のイオンガンでは高い加速電圧においてペニング放電方式のイオンガンに比べて加工速度が著しく低いことが特許文献3にも示されている。低い加速電圧の硬においてホローアノード放電方式のイオンガンを適用した場合には、高いミリング速度との両立ができないという課題がある。

[0011] このような点を課題として認識し、本願発明者は実験を繰り返し行った。本願発明はこれらにより得られた知見からなされたものであり、その目的は特に、低い加速電圧において簡便な方法でビームのスポット径を小さくすることが可能となることを特徴とするペニング放電方式もしくはそれに準ずる形状のイオンガン、およびそれを有するイオンミリング装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明に掛かるイオンガンおよびそれを有するイオンミリング装置、イオンミリング方法は、前記目的を達成するため、具体的な一態様として、イオンガンから試料へ照射されるイオンビームのビームプロファイルの半値幅を $200\mu\text{m}$ から $350\mu\text{m}$ までの範囲に制御するイオンミリング装置であって、外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出する前記イオンガンと、前記イオンガンに供給される前記ガスの流量を可変させるガス流量可変部と、前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定

する電流測定部と、を有し、前記ガス流量可変部は、前記ガス流量可変部にて定められる前記ガスの流量と前記電流測定部にて測定される前記電流値とに基づき、前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定されることを特徴とする。

[0013] また、他の具体的な一態様として、本発明に掛かるイオンガンおよびそれを有するイオンミリング装置、イオンミリング方法は、イオンビームによるビームプロファイルの半値幅を $200\ \mu\text{m}$ から $350\ \mu\text{m}$ までの範囲に制御し試料を加工するイオンミリング方法であって、外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出する放出ステップと、イオンガンの加速電極に $2\ \text{kV}$ から $4\ \text{kV}$ までの範囲の電圧が印加される印加ステップと、前記イオンガンに供給される前記ガスの流量を可変させる流量可変ステップと、前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定する測定ステップと、前記流量可変ステップにて定められる前記ガスの流量と前記測定ステップにて測定される前記電流値とに基づき、前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定する設定ステップと、前記設定ステップにて設定された前記イオンビームを前記試料に照射する照射ステップと、を有する。

[0014] また、他の具体的な一態様として、本発明に掛かるイオンガンおよびそれを有するイオンミリング装置、イオンミリング方法は、外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出するイオンガンと、前記外部から供給されたガスを前記イオンガンに供給されるガスの流量を変化させるガス流量可変部と、前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定する電流測定部と、前記電流測定部と電氣的に接続されたイオンビーム電流制御部と、前記ガス流量可変部と電氣的に接続されたガス流量制御部と、を有するイオンミリング装置であって、前記イオンミリング装置は、前記電流測定部により計測されたイオンビーム電流値の測定データに基づき、前記ガス流量制御部へ前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量よりも多い流量を設定させ、前記イオンガンから試料へ照射されるイオン

ビームのビームプロファイルの半値幅を $200\ \mu\text{m}$ から $350\ \mu\text{m}$ までの範囲に制御することを特徴とする。

発明の効果

[0015] 本発明においては、低加速電圧において簡便な方法でイオンビームを細く絞ることができる。これにより、試料に対する熱ダメージを低減することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図である。

[図2]本発明のイオンガンと関連する周辺部の構成を示す断面図の一例である。

[図3]イオンビーム電流が最大値となるように設定する従来条件のペニング放電方式のイオンガンの加速電圧とスポット深さの関係を示す説明図の一例である。

[図4]本発明のイオンミリング加工装置における動作を説明するガス流量とイオンビーム電流の関係を示す説明図の一例である。

[図5]本発明の効果を示す説明図の一例である。

[図6]本発明の別の効果を示す説明図の一例である。

[図7]本発明のスポット深さを示す説明図の一例である。

[図8]本発明の別の動作を説明するガス流量とイオンビーム電流の関係を示す説明図の一例である。

[図9]本発明の別のスポット深さを示す説明図の一例である。

[図10]本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図の他の一例である。

[図11]本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図の他の一例である。

発明を実施するための形態

[0017] 本願発明者は実験を繰り返し行うことにより、イオンガンのイオン化室内に供給されるガス流量を制御することでイオンビームのビームプロファイル

が制御可能なことを見出した。特にイオンビーム電流が最大値となるガス流量を計測し、ガス流量をイオンビーム電流が最大値となる流量値よりも多い流量に設定することにより、イオンビームによるビームプロファイルを制御し、ビームプロファイルの半値幅を $200\mu\text{m}$ から $350\mu\text{m}$ の範囲まで小径化することを可能であることを見出した。また本発明によれば、イオンビームのプロファイルが小径化するにしたがって、イオンビーム電流値も低減されるため、熱ダメージの低減に大きく寄与できることも確認された。

[0018] これにより、低加速電圧において簡便な方法でイオンビームを細く絞ることができるペニング放電方式のイオンガンおよびそれを有するイオンミリング装置、イオンミリング方法を提供することができる。特に本発明によれば、加速電圧とアルゴンガス流量の設定により所望のイオンビーム電流値とイオンビーム形状とミリング速度を任意に選択することができるため、冷却機構と組み合わせたミリング装置において冷却源の冷却性能を有効に活用できるため、熱ダメージの小さなミリング加工として効果が高い。これは特に、Cu-Zn合金や、鉛フリー半田、有機高分子材料のイオンミリング加工において非常に有用である。

[0019] 以下、本発明の好ましい実施形態について図面を参照して説明する。

[0020] 図1は本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図である。ペニング放電方式、もしくはそれに準ずる形状のイオンガン1は、その内部にイオンを発生するために必要な構成要素が配置され、イオンビーム2を試料6に照射するための照射系を形成する。ガス源41はガス流量可変部40を介してイオンガン1に接続され、ガス流量可変部40により制御されたガス流量がイオンガン1のイオン化室内に供給される。イオンビーム2の照射とそのイオンビーム電流は、イオンガン制御部3によって制御される。イオンビーム2のイオンビーム電流は、電流測定部50によって測定される。

[0021] 電流測定子52はイオンビームのシャッタの役割も兼ねており、電流測定子駆動部51により稼動する機構を有する。真空チャンバー4は、真空排気系5によって大気圧または真空中に制御される。試料6は試料台7の上に保持

され、試料台 7 は試料ステージ 8 によって保持されている。試料ステージ 8 は、真空チャンバー 4 が大気開放したときに真空チャンバー 4 の外へ引き出すことができ、また試料 6 をイオンビーム 2 の光軸に対して任意の角度に傾斜させることができるための機構要素をすべて含んでいる。試料ステージ駆動部 9 は、試料ステージ 8 を左右へスイングすることができ、その速度を制御することができる。

[0022] 図 2 は、本発明のイオンガンと関連する周辺部の構成を示す断面図の一例である。イオンガン 1 はイオンガン内部にガスを供給するガス流量可変部 40 と、アノード 13 と、カソード 11 とカソード 12 と、永久磁石 14 と、加速電極 15 と、インシュレータ 16 により構成され、イオンガンベース 17 に固定される。イオンガン制御部 3 は放電電源 21 と加速電源 22 に電氣的に接続されており、放電電圧と加速電圧を制御している。

[0023] このようなペニング放電方式のイオンガンでは、カソード 12 と加速電極出口孔 33 の間には電位差が生じるため、その空間にはレンズが構成される。レンズの強度はカソード 12 と加速電極出口孔 33 の電位差に比例するため、加速電圧が高いほどレンズ強度が大きくなり、ビームが絞られる。ただし、低い加速電圧ではレンズ効果が弱くなるため、ビームの広がりが顕著になり、試料上のスポット径が大きくなる。

[0024] 図 3 は、イオンビーム電流が最大値となるように設定する従来条件のペニング放電方式のイオンガンの加速電圧とスポット深さの関係を示す説明図の一例である。加速電圧 6 kV で加工した場合のビームプロファイルに比べて、加速電圧 4 kV で加工したビームプロファイルはビーム痕の深さが浅くなる一方、イオンビームのスポットサイズが増大する。このため低損傷加工を目的に低加速電圧を選択したにもかかわらず、試料上の熱拡散の影響は大きくなることわかる。

[0025] 本願発明者は、ペニング放電方式のイオンガンにおいて低い加速電圧であってもイオンビームのスポットサイズが増大せず、ビームスポットの小径化が可能なイオンミリング加工を目的として実験を繰り返し行い、イオンガン

1のイオン化室内18に供給されるガス流量を制御することでイオンビームプロファイルが制御できることを見出した。特にイオンビーム電流の最大値が得られるガス流量を計測し、イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定することで、ビームプロファイルの半値幅が $200\mu\text{m}$ から $350\mu\text{m}$ までの範囲にイオンビームを小径化することが可能であることを見出した。

[0026] 図4は、本発明のイオンミリング加工装置における動作を説明するガス流量とイオンビーム電流の関係を示す説明図の一例である。ここで実験に適用したイオンガン1の構成は、アノード内径31が $8\text{mm}\phi$ 、アノード出口孔32は $4\text{mm}\phi$ 、カソード出口孔33は $4\text{mm}\phi$ 、加速電極出口孔34は $2\text{mm}\phi$ である。放電電源21の印加電圧は 1.5kV 、加速電源22の印加電圧は 4kV とし、イオンガン1のイオン化室18内に供給されるガス源41はアルゴンである。被加工材にはシリコンを用い、ミリング時間は1時間に設定した。

[0027] 図4からイオンガン1に導入されるガス流量を増加させることによりイオンビーム電流が変化し、実験に適用したイオンガン構成においては、アルゴンガス流量が0から $0.2\text{cm}^3/\text{分}$ までの範囲ではイオンビーム電流が増大する傾向を示し、アルゴンガス流量が0.2から $1.0\text{cm}^3/\text{分}$ までの範囲ではイオンビーム電流が減少していく傾向を示す。またアルゴンガス流量が0から $0.3\text{cm}^3/\text{分}$ までの範囲ではイオンビーム電流値が大きくばらつき非常に不安定な領域となる。このイオンビーム電流が不安定となる領域は、加速電圧 4kV で放出されるイオンビームが、カソード出口孔33と加速電極出口孔34の間に生じる電位差が小さいため、レンズ効果が弱くイオンビームが広がり、加速電極出口孔34の $2\text{mm}\phi$ を通過できず加速電極出口孔34の周辺部分に衝突している影響である。

[0028] この現象はイオンビーム電流の不安定化ばかりでなく、加速電極に付着するリポジションや加速電極出口孔の変形、リデポジションによる汚染などの悪影響が生じることになる。図4の結果からアルゴンガス流量を増加させる

ことにより、イオンビームが加速電極出口孔 34 の周辺部分に衝突する影響が排除され、安定したイオンビーム電流値が得られていることが分かる。

[0029] 図 5 に本発明におけるアルゴンガス流量とイオンビームプロファイルの半値幅の関係の一例を示す。図 5 は、アルゴンガス流量が $0.3 \text{ cm}^3/\text{分}$ の条件ではビームプロファイルの半値幅が $350 \mu\text{m}$ 、アルゴンガス流量が $0.5 \text{ cm}^3/\text{分}$ の条件ではビームプロファイルの半値幅が $250 \mu\text{m}$ 、アルゴンガス流量が $0.65 \text{ cm}^3/\text{分}$ の条件でビームプロファイルの半値幅が $200 \mu\text{m}$ 以下と、アルゴンガス流量を増大させることでイオンビームが小径化していくことを示している。

[0030] また、図 6 に本発明におけるアルゴンガス流量とイオンミリング速度の関係の一例を示す。図 6 は、アルゴンガス流量が $0.3 \text{ cm}^3/\text{分}$ の条件ではイオンミリング速度が毎時 $90 \mu\text{m}$ 、アルゴンガス流量が $0.9 \text{ cm}^3/\text{分}$ の条件ではイオンミリング速度が毎時 $70 \mu\text{m}$ と低下する傾向は見られるがその減少率はそれほど大きくはなく、ミリング対象物によっては実用十分なミリング速度を有することを示している。

[0031] 図 7 は本発明におけるスポット深さを示す説明図の一例である。ここでは加速電圧条件は 4 kV であり、被加工材料にはシリコンを用い、ミリング時間を 1 時間に設定した場合のビームプロファイルである。従来例として示したものはアルゴンガス流量が $0.07 \text{ cm}^3/\text{分}$ の場合であり、実施例として示したものはアルゴンガス流量が $0.9 \text{ cm}^3/\text{分}$ の場合である。本発明によれば従来例と比較してイオンビームプロファイルの半値幅が約 40% に低減されている。イオンビームの深さ、すなわちミリング速度はほぼ同等である。

[0032]

[表1]

表1

【表1】本発明の動作パラメータの好ましい範囲の一例

	好ましい範囲	より好ましい範囲	設定例
加速電圧(kV)	4	4	4
ガス流量(cm ³ /分)	≥0.3	≥0.6	0.9
ガス圧(Pa)	≥ 6.0×10^{-2}	≥ 1.4×10^{-1}	2.0×10^{-1}
イオンビーム電流(μA)	≤85	≤55	45
ビームスポット半値幅(μm)	≤370	≤230	190
ビームスポット深さ(μm)	≤90	≤75	75

[0033] 表1に、加速電圧4 kVの条件でシリコンを1時間ミリング加工した場合の好ましいパラメータ範囲、より好ましいパラメータ範囲及び設定例の一覧を示す。好ましい範囲としては、ガス流量は0.3 cm³/分以上とし、このとき真空チャンバー4内の圧力は 6.0×10^{-2} Pa以上となり、得られるイオンビーム電流値は85 μA以下、イオンビームスポットの半値幅は370 μm以下、ビームスポット深さは90 μm以下である。

[0034] より好ましい範囲としては、ガス流量は0.6 cm³/分以上とし、このときの真空チャンバー4内の圧力は 1.4×10^{-1} Pa以上となり、得られるイオンビーム電流値は55 μA以下、イオンビームスポットの半値幅は230 μm以下、ビームスポット深さは75 μm以下である。設定例として抽出したのは、ガス流量は0.9 cm³/分とし、このときの真空チャンバー4内の圧力は 2.0×10^{-1} Paとなり、得られるイオンビーム電流値は45 μA、イオンビームスポットの半値幅は190 μm、ビームスポット深さは75 μmである。表1に示したように加速電圧とアルゴンガス流量の設定によりイオンビーム電流値とイオンビーム形状とミリング速度を任意に選択することができることがわかる。

[0035] 図8は本発明における動作を説明するためのガス流量とイオンビーム電流の関係を示す説明図の一例である。ここで実験に適用したイオンガン1の構成は、アノード内径31が8 mm φ、アノード出口孔32は4 mm φ、カソー

ド出口孔 33 は 4 mm ϕ 、加速電極出口孔 34 は 2 mm ϕ である。放電電源 21 の印加電圧は 1.5 kV、加速電源 22 の印加電圧は 3 kV とし、イオンガン 1 のイオン化室 18 内に供給されるガス源 41 はアルゴンである。被加工材にはシリコンを用い、ミリング時間は 1 時間に設定した。

[0036] 図 6 からイオンガン 1 に導入されるガス流量を増加させることによりイオンビーム電流が変化し、実験に適用したイオンガン構成においては、アルゴンガス流量が 0 から 0.35 cm³/分までの範囲ではイオンビーム電流が増大する傾向を示し、アルゴンガス流量が 0.35 から 1.0 cm³/分までの範囲ではイオンビーム電流が減少していく傾向を示す。またアルゴンガス流量が 0 から 0.35 cm³/分までの範囲ではイオンビーム電流値が大きくばらつき非常に不安定な領域となる。

[0037] このイオンビーム電流が不安定となる領域は、加速電圧 3 kV で放出されるイオンビームが、カソード出口孔 33 と加速電極出口孔 34 の間に生じる電位差がより小さいため、レンズ効果が弱くイオンビームがさらに広がり、加速電極出口孔 34 の 2 mm ϕ を通過できず加速電極出口孔 34 の周辺部分に衝突している影響である。この現象はイオンビーム電流の不安定化ばかりでなく、加速電極に付着するリポジションや加速電極出口孔の変形、リデポジションによる汚染などの悪影響が生じることになる。図 8 の結果からアルゴンガス流量を増加させることにより、イオンビームが加速電極出口孔 34 の周辺部分に衝突する影響が排除され、安定したイオンビーム電流値が得られていることが分かる。

[0038] 図 9 は本発明におけるスポット深さを示す説明図の一例である。ここでは加速電圧条件は 3 kV であり、被加工材料にはシリコンを用い、ミリング時間を 1 時間に設定した場合のビームプロファイルである。従来例として示したものはアルゴンガス流量が 0.07 cm³/分の場合であり、実施例として示したものはアルゴンガス流量が 0.9 cm³/分の場合である。本発明によれば従来例と比較してイオンビームプロファイルの半値幅が約 30% に低減されている。イオンビームの深さ、すなわちミリング

速度はほぼ同等である。

[0039] [表2]

表2

【表2】本発明の動作パラメータの別の好ましい範囲の一例

	好ましい範囲	より好ましい範囲	設定例
加速電圧(kV)	3	3	3
ガス流量(cm ³ /分)	≥0.3	≥0.6	0.9
ガス圧(Pa)	≥6×10 ⁻²	≥1.4×10 ⁻¹	2×10 ⁻¹
イオンビーム電流(μA)	≤65	≤45	35
ビームスポット半値幅(μm)	≤330	≤300	195
ビームスポット深さ(μm)	≤40	≤30	30

[0040] 表2に、加速電圧3 k Vの条件でシリコンを1時間ミリング加工した場合の好ましいパラメータ範囲、より好ましいパラメータ範囲及び設定例の一覧を示す。好ましい範囲としては、ガス流量は0.3 cm³/分以上とし、このとき真空チャンバー4内の圧力は6.0×10⁻² Pa以上となり、得られるイオンビーム電流値は65 μA以下、イオンビームスポットの半値幅は330 μm以下、ビームスポット深さは40 μm以下である。

[0041] より好ましい範囲としては、ガス流量は0.6 cm³/分以上とし、このときの真空チャンバー4内の圧力は1.4×10⁻¹ Pa以上となり、得られるイオンビーム電流値は45 μA以下、イオンビームスポットの半値幅は300 μm以下、ビームスポット深さは30 μm以下である。設定例として抽出したのは、ガス流量は0.9 cm³/分とし、このときの真空チャンバー4内の圧力は2.0×10⁻¹ Paとなり、得られるイオンビーム電流値は35 μA、イオンビームスポットの半値幅は195 μm、ビームスポット深さは30 μmである。

[0042] 表2に示したように加速電圧とアルゴンガス流量の設定によりイオンビーム電流値とイオンビーム形状とミリング速度を任意に選択することができる。上記のような構成によれば、イオンビームプロファイルが任意に制御できるため、ミリング対象物の材料特性に合わせて条件を選定する

ことで低い加速電圧の条件でのイオン電流の安定した制御が容易であり、加速電極に付着するリデポジションや加速電極出口孔の変形、リデポジションによる加速電極の汚染を抑えて、安定したイオン電流を得ることができるイオンガンを備えたイオンミリング装置を実現できる。

[0043] 図10は本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図の他の一例である。図1で示した装置構成に、試料冷却を目的とした試料ステージ冷却部70を付加したイオンミリング装置であって、真空チャンバー4の大気側に冷却源72と冷却制御部73とを配置して、真空チャンバー4内の発熱源である試料6および試料台7とを、熱伝達部71にて接続した試料ステージ冷却部70を備えたイオンミリング装置である。

[0044] 熱伝達部71に樹脂チューブの内部にイオン液体を充填した金属性の網線を、冷却源72に液体窒素デュワーを適用し、試料6および試料台7に接続された場合には、試料の冷却範囲は装置の構成上700 μ m ϕ が限界となる。このため、図3に示したようにイオンビーム電流が最大値となるように設定する従来条件のペニング放電方式のイオンガンのビームプロファイルではビームスポット領域が大きくなりすぎるため、試料6を十分に冷却することができず、試料の熱破損（熱ダメージ）が回避できない。

[0045] 本発明によれば、表1及び表2に示したように加速電圧とアルゴンガス流量の設定により所望のイオンビーム電流値とイオンビーム形状とミリング速度を任意に選択することができる。このため、装置の冷却性能とミリング対象物の材料特性を考慮して最適なイオンビーム電流とイオンビームプロファイルを有するイオンミリング加工との組み合わせの選択が可能となる。ここでは試料ステージ冷却部70の代表例として前記の構成を例示したが、試料ステージ冷却部70が他の構成による場合であっても、本発明を適用することができる。

[0046] このように冷却源の冷却性能を有効に活用できるイオンビームを任意に形成できることを示し、イオンビーム電流値の増減も含めた選択をすることが可能となり、より大きな冷却効果が期待できる。イオンミリング速度が大き

く低下しないことから、特に今まで熱ダメージ低減のためミリング速度を落とさざるを得なかったミリング対象物に対して、実用十分なミリング速度を実現できることを示している。このように本発明は、試料の冷却を目的として試料ステージ冷却部を備えたイオンミリング装置と組み合わせることにより、低熱ダメージミリング装置として、より大きな効果を得ることができる。

[0047] 図 1 1 は本発明のイオンミリング加工装置の構成を示す説明図の他の一例である。中央制御部 8 0 は少なくともガス流量制御部 8 1 とイオンビーム電流制御部 8 2 を備え、少なくとも電流測定部 5 0 とガス流量可変部 4 0 に電氣的に接続されている。電流測定部 5 0 に配置されている電流測定子 5 2 は電流測定子駆動部 5 1 によりイオンビーム 2 の軸上へ配置、及びイオンビーム 2 の軸上から退避する機構を有する。電流測定子 5 2 が電流測定子駆動部 5 1 によりイオンビーム 2 の軸上への配置されている場合に、電流測定部 5 0 の出力が中央制御部 8 0 に送られ、中央制御部 8 0 はイオンビーム電流制御部 8 2 によりイオンビーム電流値をモニターする。さらに中央制御部 8 0 はガス流量制御部 8 1 によりガス流量可変部 4 0 を駆動させ、イオンガン 1 のイオン化室 1 8 に供給するガス流量を変動させる。このとき中央制御部 8 0 は電流測定部 5 0 による計測されたイオンビーム電流値のばらつきをモニターし、図 4 や図 8 に示した測定データを自動的に取得する。中央制御部 8 0 は測定データからばらつきのない安定したイオンビームが取得できるガス流量を自動的に設定することで安定したイオンミリング加工を行うことができる。

符号の説明

[0048] 1 イオンガン、2 イオンビーム、3 イオンガン制御部、4 真空チャンバー、5 真空排気系、6 試料、7 試料台、8 試料ステージ、9 試料ステージ駆動部、11 カソード、12 カソード、13 アノード、14 永久磁石、15 加速電極、16 インシュレータ、17 イオンガンベース、18 イオン化室、21 放電電源、22 加速電源、31 ア

ノード内径、３２ アノード出口孔、３３ カソード出口孔、３４ 加速電極出口孔、４０ ガス流量可変部、４１ ガス源、５０ 電流測定部、５１ 電流測定子駆動部、５２ 電流測定子、７０ 試料ステージ冷却部、７１ 熱伝達部、７２ 冷却源、７３ 冷却制御部、８０ 中央制御部、８１ ガス流量制御部、８２ イオンビーム電流制御部

請求の範囲

- [請求項1] イオンガンから試料へ照射されるイオンビームのビームプロファイルの半値幅を $200\ \mu\text{m}$ から $350\ \mu\text{m}$ までの範囲に制御するイオンミリング装置であって、
- 外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出する前記イオンガンと、
- 前記イオンガンに供給される前記ガスの流量を可変させるガス流量可変部と、
- 前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定する電流測定部と、を有し、
- 前記ガス流量可変部は、前記ガス流量可変部にて定められる前記ガスの流量と前記電流測定部にて測定される前記電流値とに基づき、前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定されることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項2] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
- 前記イオンガンの加速電極には $2\ \text{kV}$ から $4\ \text{kV}$ までの範囲の電圧が印加されることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項3] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
- 加速電極の出口径が $2\ \text{mm}\ \phi$ であることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項4] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
- 前記試料および試料台からの熱を冷却源に伝達する熱伝達部を備えることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項5] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
- 前記ガスは不活性ガス及び反応性ガスから成る群から選択されることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項6] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
- 前記ガスは、アルゴンであることを特徴とするイオンミリング装置

。

- [請求項7] 請求項6に記載のイオンミリング装置において、
前記アルゴンガスは、毎分0.3～0.5立方センチメートルの流量で前記イオンガンに供給されることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項8] 請求項6に記載のイオンミリング装置において、
前記アルゴンガスは、毎分0.3立方センチメートル以上の流量で前記イオンガンに供給されることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項9] 請求項1に記載のイオンミリング装置において、
前記イオンガンはペニング放電方式であることを特徴とするイオンミリング装置。
- [請求項10] イオンビームによるビームプロファイルの半値幅を200 μm から350 μm までの範囲に制御し試料を加工するイオンミリング方法であって、
外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出する放出ステップと、
イオンガンの加速電極に2 kVから4 kVまでの範囲の電圧が印加される印加ステップと、
前記イオンガンに供給される前記ガスの流量を可変させる流量可変ステップと、
前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定する測定ステップと、
前記流量可変ステップにて定められる前記ガスの流量と前記測定ステップにて測定される前記電流値とに基づき、前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量に設定する設定ステップと、
前記設定ステップにて設定された前記イオンビームを前記試料に照

射する照射ステップと、を有するイオンミリング方法。

[請求項11]

請求項10に記載のイオンミリング方法において、

前記試料はCu-Zn系合金または鉛フリー半田、もしくは前記Cu-Zn系合金または鉛フリー半田よりも融点の低い材料であることを特徴とするイオンミリング方法。

[請求項12]

外部から供給されたガスをイオン化してイオンビームを放出するイオンガンと、

前記外部から供給されたガスを前記イオンガンに供給されるガスの流量を変化させるガス流量可変部と、

前記イオンガンから放出されるイオンビームの電流値を測定する電流測定部と、

前記電流測定部と電氣的に接続されたイオンビーム電流制御部と、

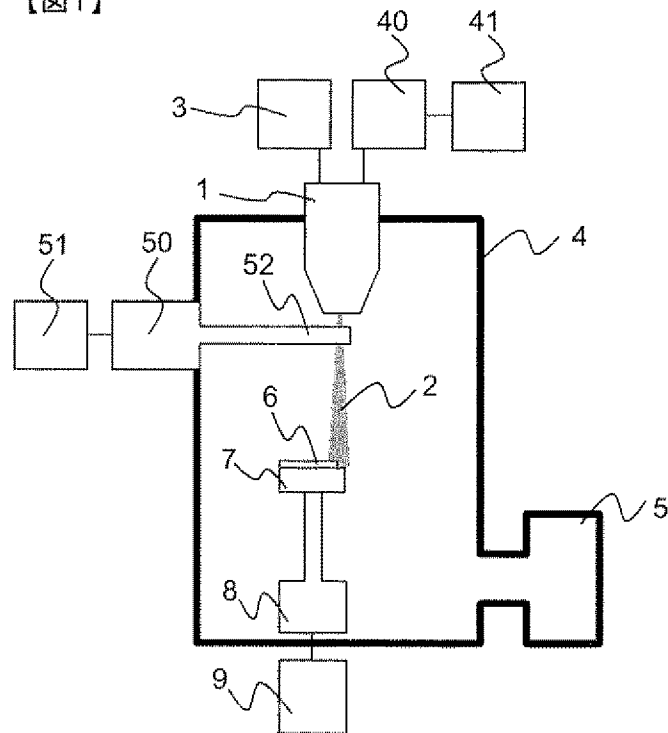
前記ガス流量可変部と電氣的に接続されたガス流量制御部と、を有するイオンミリング装置であって、

前記イオンミリング装置は、前記電流測定部により計測されたイオンビーム電流値の測定データに基づき、前記ガス流量制御部へ前記イオンビーム電流が最大となるガス流量よりも多いガス流量よりも多い流量を設定させ、前記イオンガンから試料へ照射されるイオンビームのビームプロファイルの半値幅を $200\mu\text{m}$ から $350\mu\text{m}$ までの範囲に制御することを特徴とするイオンミリング装置。

[図1]

図1

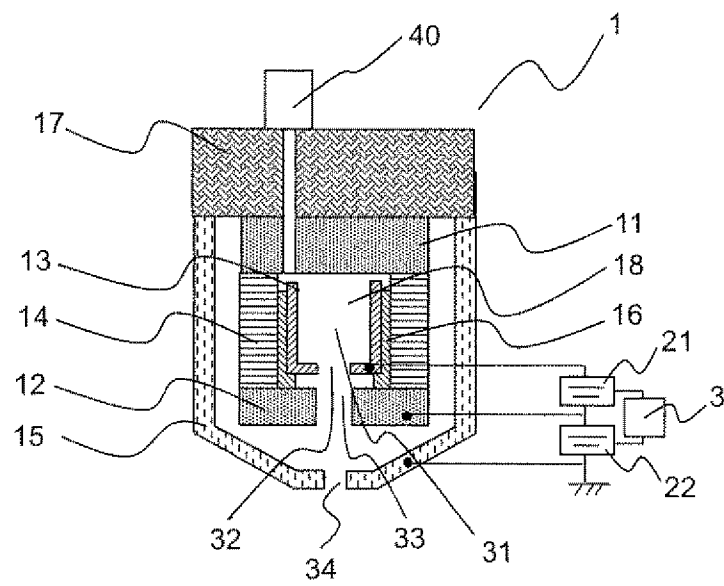
【図1】



[図2]

図2

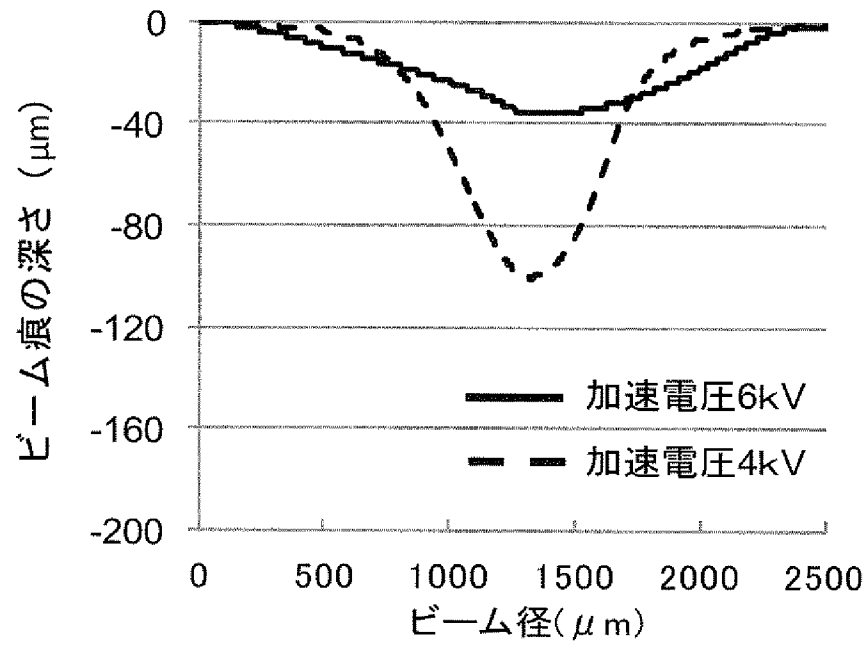
【図2】



[図3]

図3

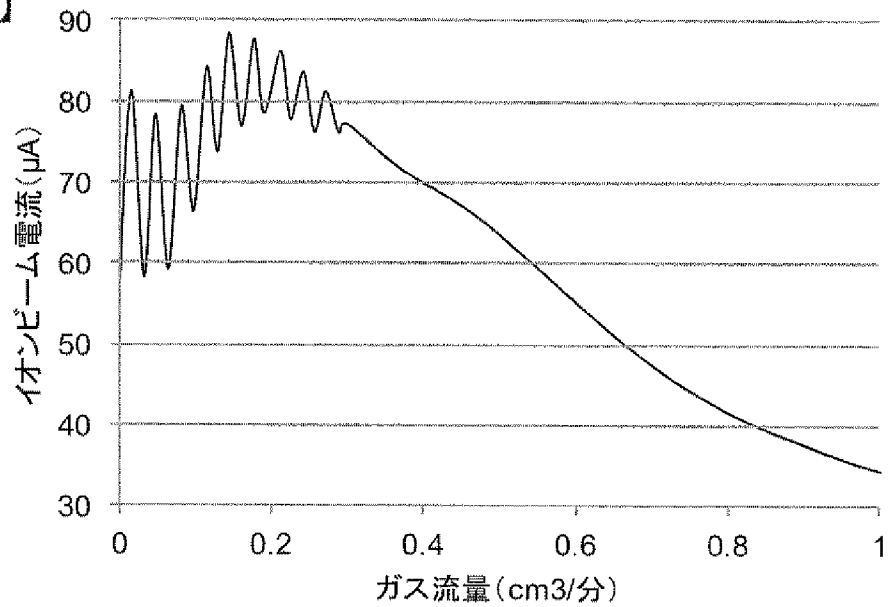
【図3】



[図4]

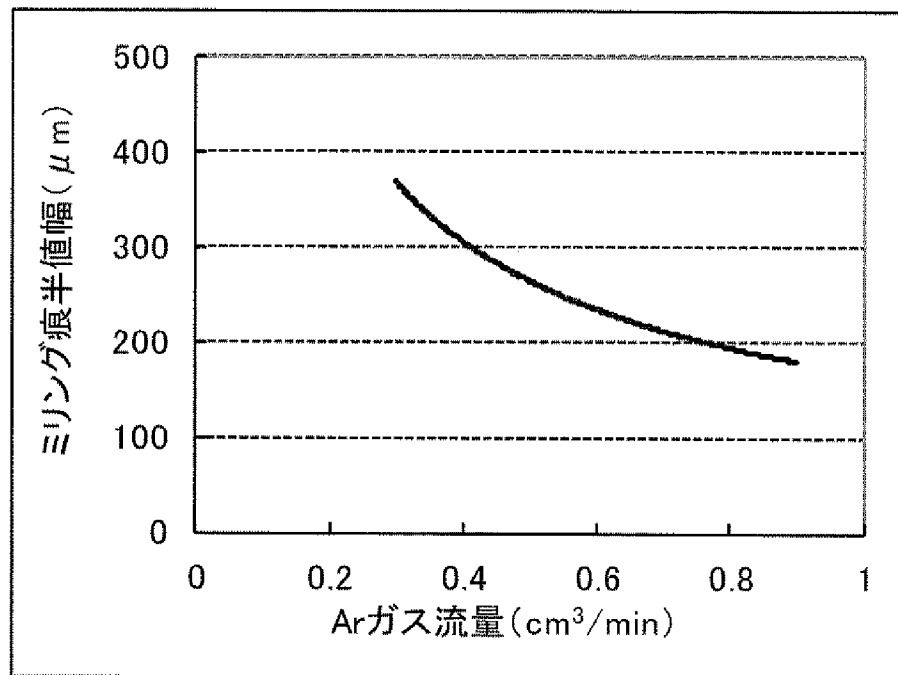
図4

【図4】



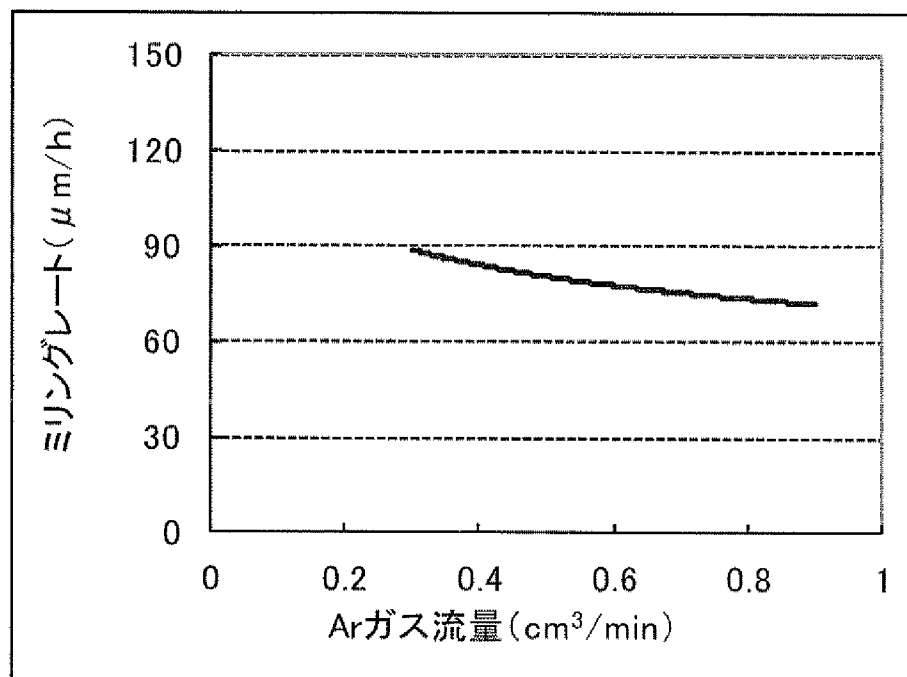
[図5]

【図5】 図5



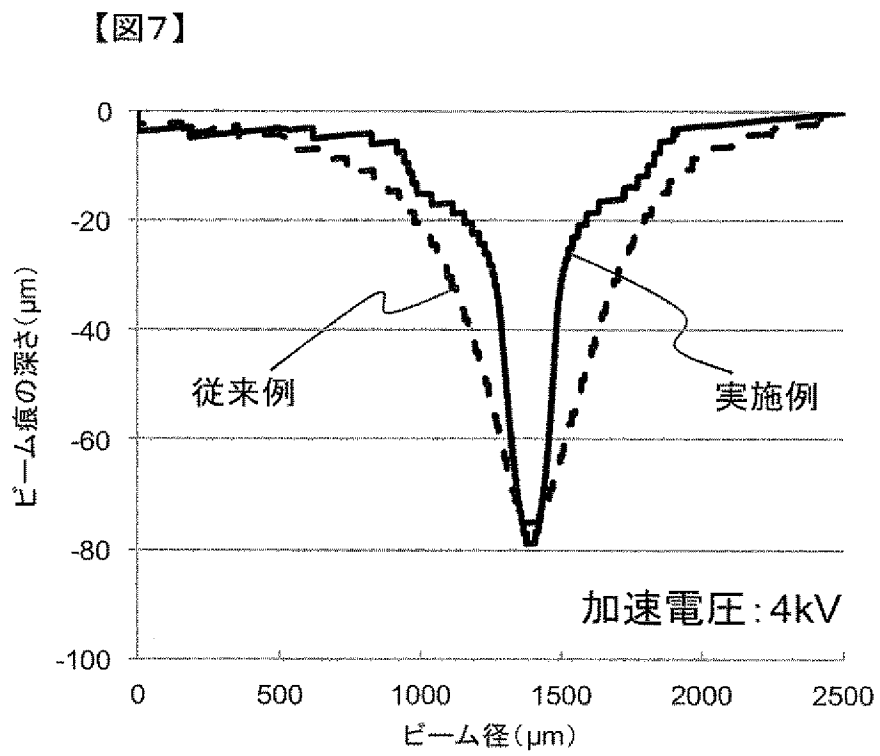
[図6]

【図6】 図6



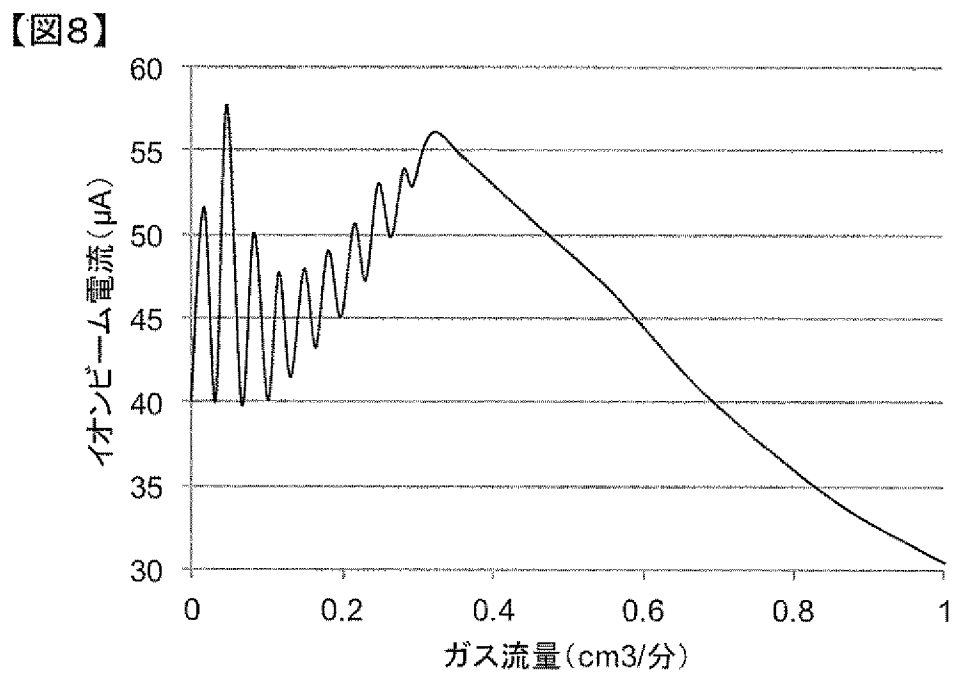
[図7]

図7

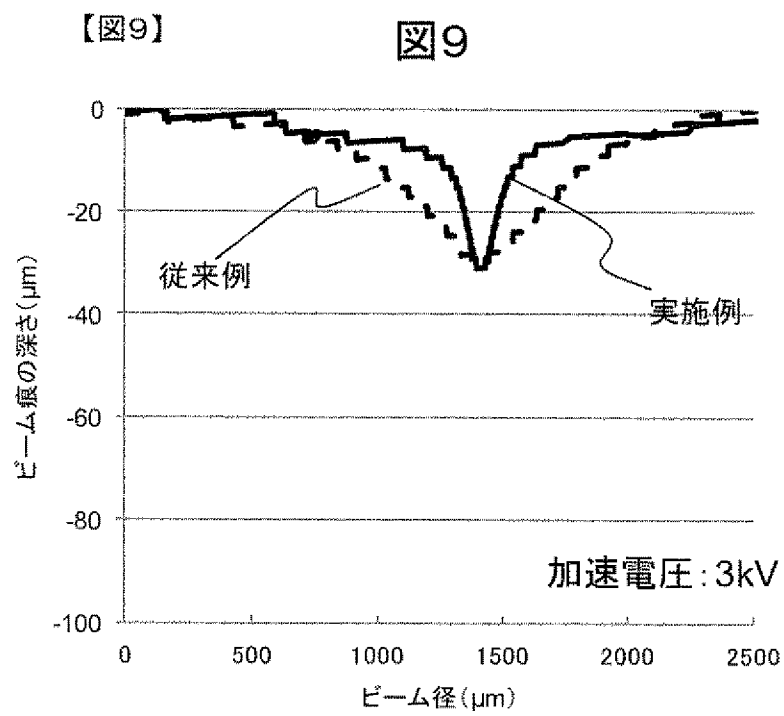


[図8]

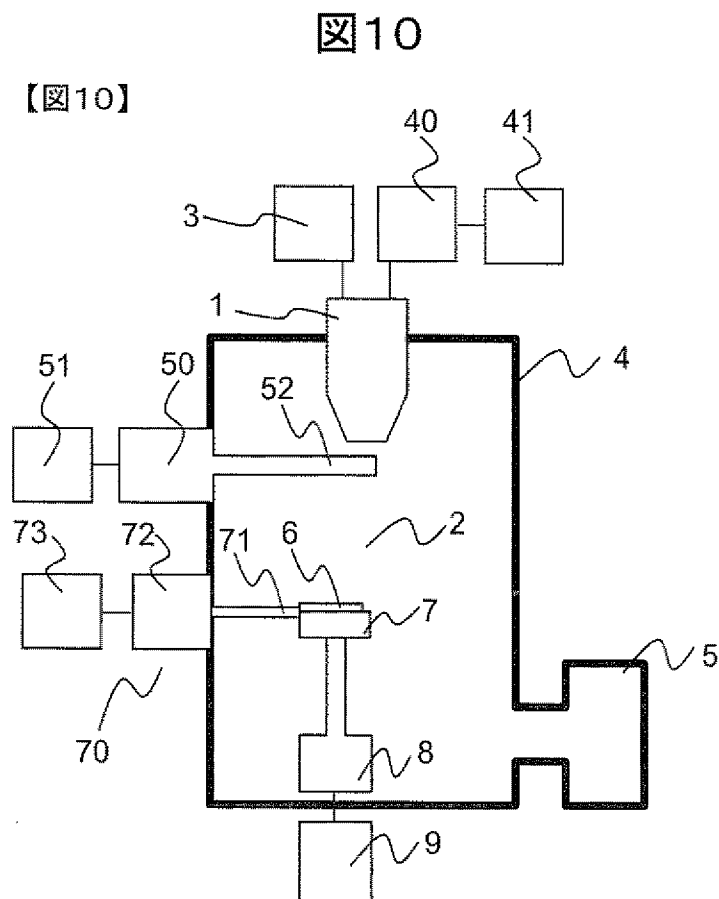
図8



【図9】



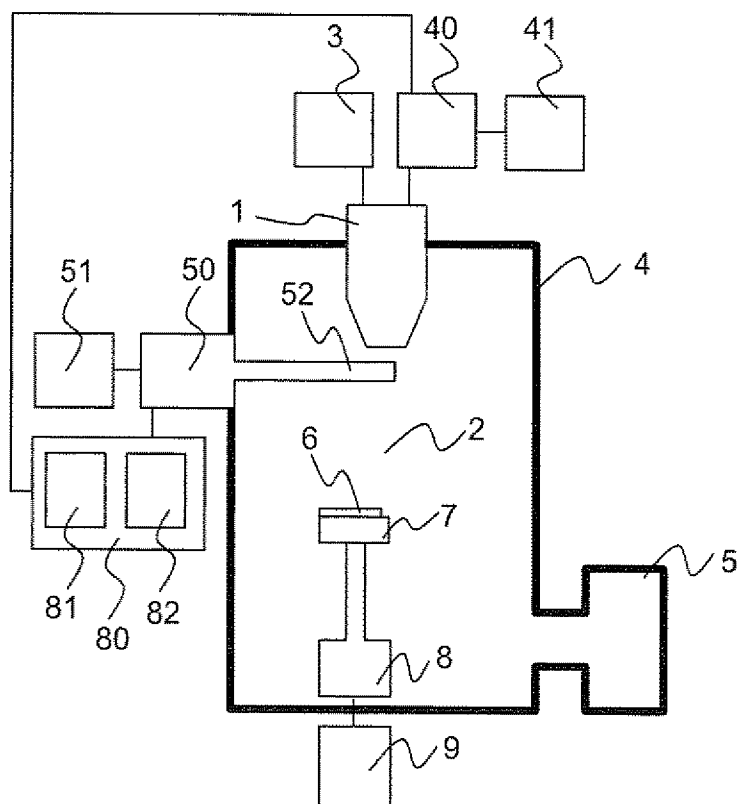
【図10】



[図11]

図11

【図11】



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/071432

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01J27/04(2006.01)i, H01J37/08(2006.01)i, H01J37/20(2006.01)i, H01J37/305(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01J27/04, H01J37/08, H01J37/20, H01J37/305

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2013-524467 A (E.A. Fischione Instruments, Inc.), 17 June 2013 (17.06.2013), paragraphs [0005], [0016] to [0023]; fig. 2 & WO 2011/127394 A1 page 2, lines 6 to 12; page 5, line 17 to page 8, line 22; fig. 2 & US 2011/0248179 A1 & EP 2561540 A	1-12
Y	JP 2007-48588 A (JEOL Ltd.), 22 February 2007 (22.02.2007), paragraphs [0037] to [0053]; fig. 3, 5 to 6 (Family: none)	1-12

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
30 September 2015 (30.09.15)

Date of mailing of the international search report
13 October 2015 (13.10.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/071432

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2012-33335 A (Hitachi High-Technologies Corp.), 16 February 2012 (16.02.2012), paragraphs [0013] to [0028]; fig. 1 to 2 (Family: none)	4, 11

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01J27/04(2006.01)i, H01J37/08(2006.01)i, H01J37/20(2006.01)i, H01J37/305(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01J27/04, H01J37/08, H01J37/20, H01J37/305

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 5 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 5 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 5 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2013-524467 A（イー エイ フィシオネ インストルメンツ インコーポレーテッド）2013.06.17, [0005], [0016] - [0023], 図2 & WO 2011/127394 A1（2頁6行-12行, 5頁17行-8頁22行, F I G. 2）& US 2011/0248179 A1 & EP 2561540 A	1-12
Y	JP 2007-48588 A（日本電子株式会社）2007.02.22, [0037] - [0053], 図3, 図5-図6（ファミリーなし）	1-12

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

3 0 . 0 9 . 2 0 1 5

国際調査報告の発送日

1 3 . 1 0 . 2 0 1 5

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

小野 健二

2 G

5 0 6 1

電話番号 03-3581-1101 内線 3226

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2012-33335 A (株式会社日立ハイテクノロジーズ) 2012.02.16, [0013] - [0028], 図1 - 図2 (ファミリーなし)	4, 11