(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 198 449 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
24.01.2018 Bulletin 2018/04

(21) Numéro de dépôt: **08838185.0**

(22) Date de dépôt: **08.10.2008**

(51) Int Cl.:
H01J 49/40 *(2006.01)*

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2008/063462

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2009/047265 (16.04.2009 Gazette 2009/16)

(54) **SONDE ATOMIQUE TOMOGRAPHIQUE GRAND ANGLE A HAUTE RESOLUTION**

HOCHAUFLÖSENDE WEITWINKEL-ATOMSONDE

WIDE ANGLE HIGH RESOLUTION ATOM PROBE

(84) Etats contractants désignés:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorité: **12.10.2007 FR 0707178**

(43) Date de publication de la demande:
23.06.2010 Bulletin 2010/25

(73) Titulaires:
- **Cameca**
  92230 Gennevilliers (FR)
- **Centre National de la Recherche Scientifique**
  75794 Paris Cedex 16 (FR)

(72) Inventeurs:
- **BOSTEL, Alain**
  F-27370 La Haye Du Theil (FR)
- **YAVOR, Mikaïl**
  Saint Petersbourg 197372 (RU)
- **RENAUD, Ludovic**
  F-75011 Paris (FR)
- **DECONIHOUT, Bernard**
  F-76000 Rouen (FR)

(74) Mandataire: **Lucas, Laurent Jacques et al**
Marks & Clerk France
Conseils en Propriété Industrielle
Immeuble Visium
22, Avenue Aristide Briand
94117 Arcueil Cedex (FR)

(56) Documents cités:
JP-A- 2007 040 966 **US-A1- 2006 113 470**

- **CEREZO A ET AL: "Design of a scanning atom probe with improved mass resolution" REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, MELVILLE, NY, US, vol. 71, no. 8, 1 août 2000 (2000-08-01), pages 3016-3023, XP012038436 ISSN: 0034-6748**
- **CEREZO A: "Einzel lenses in atom probe designs" SURFACE SCIENCE NETHERLANDS, vol. 246, no. 1-3, avril 1991 (1991-04), pages 460-466, XP007904810 ISSN: 0039-6028**

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 2 198 449 B1

Description

[0001] La présente invention concerne l'amélioration de la résolution en masse des Sondes Tomographiques Laser Grand Angle. Elle concerne plus particulièrement les sondes atomiques appelées sondes atomiques 3D ou "3D atom probe" selon la dénomination anglo-saxonne.

[0002] La sonde atomique est un instrument bien connu de l'homme du métier qui permet d'analyser des échantillons à l'échelle atomique. De nombreuses configurations instrumentales relevant de cette technique d'analyse sont décrites dans l'ouvrage "Atom probe field Ion microscopy", de Miller et al. Publié en 1996par Clarendon Press/Oxford.

[0003] Il est classique d'utiliser, pour cette analyse, un échantillon en forme de pointe, porté à un potentiel donné par rapport au potentiel du détecteur et de disposer, au voisinage de cet échantillon, une électrode portée à un potentiel intermédiaire entre celui de l'échantillon et du détecteur.

[0004] Il est également classique de disposer, en plus de cette électrode une autre électrode mise à la masse, ou bien une grille également mise à la masse. De la sorte le détecteur étant mis à la masse, les ions arrachés à l'échantillon suivent une trajectoire qui les projette sur le détecteur sans subir l'influence d'un quelconque champ électrique pouvant modifier cette trajectoire. La quasi-totalité du trajet des ions est ainsi réalisée dans un espace dit "sans champ".

[0005] Il est également connu qu'un paramètre essentiel pour obtenir une mesure fine et précise des caractéristiques des ions détectés par une sonde atomique, est la mesure du temps de vol des ions détectés, c'est à dire du temps mis par l'ion considéré pour parcourir l'espace séparant l'échantillon duquel ils sont arrachés du détecteur. Plus précisément, le temps de vol est l'intervalle de temps entre un événement déclencheur de l'arrachage de l'ion et son impact sur le détecteur. L'événement déclencheur peut être une impulsion électrique portée sur l'électrode voisine de l'échantillon ou une impulsion d'un faisceau laser dirigé sur l'échantillon. Dans la mesure où la mesure du temps de vol est essentielle dans l'instrument pour identifier le rapport m/q d'un ion détecté, m étant la masse de l'ion et q sa charge électrique, il est avantageux d'augmenter la distance L entre l'échantillon et le détecteur afin d'augmenter également le temps de vol. Cependant le faisceau d'ions émis étant de nature divergente, une contrepartie de cette augmentation de la distance L est qu'une grande partie du faisceau émis peut alors échapper au détecteur, le détecteur ayant quant à lui des dimensions définies et nécessairement limitées. Pour pallier cet inconvénient, il est connu d'interposer un dispositif convergent tel qu'une lentille de type "Einzel" entre l'échantillon et le détecteur pour focaliser le faisceau d'ions sur le détecteur. La lentille "Einzel" est, par ailleurs, un dispositif bien connu en optique des particules chargées et dont le principe n'est pas détaillé ici. Pour plus d'informations sur les lentilles "Einzel" on peut notamment se référer au tome 2 de l'ouvrage "Principles of electron optics", de P.W.Hawkes et E.Kasper, publié en 1989 par Academic press.

[0006] Parmi les sondes atomiques tomographiques, on distingue en particulier les sondes atomiques connues dans la littérature sous le nom de "3DAP" ou "**T**ri**D**imensional **A**tom **P**robe" selon la dénomination anglo-saxonne ou encore sous le nom de "PoSAP" ou "**Po**sition **S**ensitive **A**tom **P**robe". Ces sondes sont avantageusement caractérisées par le fait qu'avec un tel détecteur on mesure à la fois, outre l'instant de l'impact qui mesure le temps de vol d'un ion, la position, dans un plan, de cet impact sur le détecteur. Cependant, une telle mesure n'est réellement possible que si la position du point d'impact d'un ion donné est liée de manière univoque à sa position dans l'échantillon analysé. Cette condition se traduit par le fait que deux trajectoires distinctes d'ions ne doivent pas aboutir au même point d'impact sur le détecteur.

[0007] Or, s'il est facile de faire varier simplement l'angle d'émission capté par le détecteur avec une lentille Einzel, une forte focalisation du faisceau d'ions émis à l'aide d'une telle lentille, conduit à l'apparition d'une aberration sphérique sur la lentille, aberration qui produit sur les trajectoires externes des effets parasites très gênants pour le fonctionnement de la sonde 3D. En pratique, du fait de cette aberration, des trajectoires distinctes ont un même point d'impact pour extrémité.

[0008] Un but de l'invention est de proposer une solution pour obtenir une sonde tomographique, une sonde 3D à impulsions, une sonde à impulsions laser en particulier, présentant simultanément un grand angle d'analyse (une grande acceptance) et une grande résolution en masse consécutive à une grande longueur de vol.

[0009] A cet effet l'invention a pour objet une sonde atomique tomographique comprenant:

- Un dispositif porte-échantillon pour recevoir un échantillon de matériau à analyser présentant une zone d'extraction de forme sensiblement pointue,
- Un détecteur sensible en position et en temps, de diamètre utile D, et espacé de l'échantillon d'une distance L;
- Une lentille électrostatique composée de trois électrodes, une première électrode ou extracteur, disposée à proximité de l'échantillon, une deuxième électrode, intermédiaire, et une troisième électrode, disposées entre l'électrode intermédiaire et le détecteur, les trois électrodes présentant une symétrie de révolution autour de l'axe Oz passant par la pointe de l'échantillon et perpendiculaire au plan P du détecteur;

et caractérisée en ce que la distance L étant supérieure à 2.75 D, les potentiels respectifs de l'échantillon, de la première électrode de la lentille et du détecteur sont tels que les ions issus de l'échantillon monté sur le porte-

échantillon soient attirés vers la première électrode et vers le détecteur; le profil en coupe de l'électrode intermédiaire, dans un plan de coupe rOz, définissant trois points M_1, M_2 et M_3 de coordonnées respectives (r_1, z_1), (r_2, z_2) et (r_3, z_3) par rapport à une origine z_0 sur la pointe de l'échantillon, qui répondent aux conditions suivantes, étant entendu que le sens positif selon l'axe Oz va de l'échantillon au détecteur:

$$z_1 < z_2 < z_3,$$

$$|z_1 - z_0| < D/3,$$

$$|z_2 - z_1| < 0.65 \cdot D,$$

$$|z_3 - z_1| > 1.4 \cdot D,$$

$$r_2 = r_1,$$

$$0.1 \cdot D < r_1 < 0.65 \cdot D,$$

$$D < r_3 < 1.6 \cdot D;$$

tous les points du profil en coupe de l'électrode étant situés en dehors de la zone du plan de coupe délimitée par le profil d'un cône à embout cylindrique limité par les points M_1, M_2 et M_3.

[0010] Selon une variante de réalisation de la sonde atomique tomographique selon l'invention, le détecteur ou une grille disposée à proximité du détecteur est à un potentiel égal à celui de l'extracteur.

[0011] Selon une variante de réalisation de la sonde atomique tomographique selon l'invention, le détecteur, ou une grille disposée à proximité du détecteur, est mis(e) à un potentiel intermédiaire entre celui de l'échantillon et celui de l'électrode extracteur.

[0012] Selon une autre variante de réalisation de la sonde atomique tomographique selon l'invention, le diamètre d de l'ouverture de l'extracteur est adapté de façon à intercepter la partie périphérique du faisceau d'ions émis de façon à bloquer les ions ayant les trajectoires les plus périphériques.

[0013] Selon cette autre variante de réalisation, l'extracteur comporte plusieurs diaphragmes de diamètres d'ouverture différents, pouvant être alternativement disposés au niveau de l'ouverture centrale de l'extracteur.

[0014] Selon cette autre variante de réalisation, les différents diaphragmes sont réalisés sur une barrette mobile pouvant coulisser devant l'ouverture de l'extracteur de façon à placer le diaphragme voulu devant l'ouverture; le mouvement de coulisse de la barrette étant automatisé.

[0015] Selon une troisième variante de réalisation de la sonde atomique tomographique selon l'invention, les trois électrodes sont configurées et agencées de façon à ménager dans la chambre de vol un espace libre suffisant pour loger un dispositif amovible de réglage de la sonde.

[0016] Selon une quatrième variante de réalisation de la sonde atomique tomographique selon l'invention, une deuxième lentille électrostatique est placée entre la première lentille électrostatique et le détecteur.

[0017] Selon cette autre variante de réalisation, la première lentille électrostatique est configurée pour focaliser les trajectoires les moins ouvertes à proximité du plan médian de la deuxième lentille électrostatique.

[0018] Avantageusement, les différentes variantes de réalisation peuvent être combinées ou associées.

[0019] L'invention présente l'avantage de permettre pour un angle d'ouverture donné du faisceau d'ion émis et une surface de détecteur donnée, de réaliser une sonde atomique tomographique, en particulier une sonde "3D", présentant une longueur d'analyse sensiblement supérieure aux sondes existantes.

[0020] Les caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux appréciées grâce à la description qui suit, description qui expose l'invention au travers d'un mode de réalisation particulier pris comme exemple non limitatif et qui s'appuie sur les figures annexées, figures qui représentent:

- la figure 1, une illustration du principe général de fonctionnement d'une sonde tomographique classique;
- la figure 2, une illustration schématique, d'un échantillon en cours de mesure adapté à une sonde tomographique;
- la figure 3, une illustration du principe physique de la mesure réalisée au moyen d'une sonde tomographique;
- la figure 4, l'illustration du principe de fonctionnement d'une sonde tomographique intégrant une lentille "Einzel" dans la chambre de vol des ions;
- les figures 5 et 6, des illustrations du phénomène d'aberration qui apparaît dans le cas d'une forte focalisation;
- la figure 7, une illustration du dispositif de focalisation de la sonde atomique selon l'invention;
- la figure 8, une illustration d'un exemple de faisceau obtenu au moyen du dispositif de focalisation de la sonde atomique selon l'invention;
- la figure 9, l'illustration d'un autre exemple de faisceau focalisé obtenu au moyen du dispositif de focalisation de la sonde atomique selon l'invention;
- les figures 10, 11 et 12, des illustrations d'une variante de réalisation de la sonde atomique selon l'invention;
- la figure 13, l'illustration d'une autre variante de réa-

lisation de la sonde atomique selon l'invention.

[0021] On s'intéresse d'abord aux figures 1 à 3, figures qui présentent de manière schématique la structure de base d'une sonde atomique tomographique, notamment d'une sonde atomique dite sonde "3D". Ce type de sonde est bien connu de l'homme du métier, aussi n'est-il pas question, dans ce document, de décrire en détail un tel dispositif. Les figures 1 à 3 permettent cependant de rappeler les points suivants.

[0022] Une sonde atomique tomographique 3D est destinée à réaliser l'analyse d'un échantillon de matériau 11, couche atomique après couche atomique. A cet effet elle comporte basiquement un dispositif porte-échantillon sur lequel est monté l'échantillon 11 du matériau à analyser et un détecteur 12 situé à une distance déterminée L de l'échantillon. Elle comporte également des moyens (non représentés sur la figure 1) pour évaporer (arracher), sous forme ionique, les atomes constituant l'échantillon de matériau analysé et les accélérer de façon à ce que les ions ainsi libérés suivent une trajectoire qui amène chaque ion 13 évaporé à percuter la surface du détecteur 12 en un point donné 14 déterminé par la position de cet ion à la surface de l'échantillon avant son arrachement. Ainsi, par érosion atome par atome permettant une reconstitution de la composition de l'échantillon couche atomique par couche atomique il est possible de déterminer la composition suivant trois dimensions de l'échantillon considéré.

[0023] Afin d'isoler l'ensemble des perturbations extérieures la sonde comporte également une enceinte sous vide (non représentée sur la figure 1), dont le potentiel est, par exemple, celui de la masse du système dans lequel la sonde prend place.

[0024] On obtient ainsi, comme l'illustre la figure 3, un dispositif comportant une source d'ions constituée par l'échantillon 11, une chambre d'analyse, ou chambre de vol, de longueur L (longueur d'analyse) et un détecteur plan 12 dont les dimensions couvrent une surface circulaire de diamètre D. Selon le type de sonde, le champ électrique régnant dans la chambre de vol prend des valeurs variables et peut par exemple être nul. Dans ce dernier cas, les ions se propagent à vitesse constante à l'intérieur de la chambre de vol.

[0025] A l'arrivée d'un ion sur le détecteur, celui-ci mesure la position (x, y) sur sa surface du point d'incidence de l'ion reçu. Le détecteur mesure également le "temps de vol", durée comptée à partir de l'instant correspondant à l'arrachement de l'ion considéré. Une correction géométrique est en outre opérée pour prendre en compte la position du point d'impact dans le calcul de la distance parcourue entre la pointe et le détecteur. Par suite, la position à la surface de l'échantillon, occupée par l'ion considéré avant son arrachement est déduite de manière connue de la position de son point d'impact à la surface du détecteur, par application d'une simple règle de projection.

[0026] Dans le cas d'une sonde tomographique dite "3D" le détecteur 12 détermine également l'instant d'arrivée de l'ion considéré, par rapport à une référence de temps connue, correspondant généralement à l'instant auquel a débuté l'analyse de l'échantillon 11. La mesure de cet instant permet avantageusement de connaître la profondeur à laquelle se situait l'ion considéré par rapport à la surface initiale de l'échantillon et de réaliser ainsi un véritable positionnement en trois dimensions de l'atome à l'origine de l'ion considéré dans l'échantillon 11 de matériau analysé.

[0027] Comme l'illustrent les figures 1 à 3, l'échantillon 11 se présente comme un morceau de matériau ayant la forme d'une pointe sensiblement conique avec une extrémité formant une calotte sphérique de rayon R variable au cours du temps d'analyse. En effet, l'analyse tomographique consistant à arracher, à évaporer les uns après les autres, les atomes formant les couches d'atomes constituant le matériau, le rayon de cette calotte sphérique 21, initialement de valeur R_1 donnée, une valeur R_2 correspondant à la calotte sphérique 22, existant à la fin de l'analyse; l'érosion de la pointe amenant par la même occasion une variation équivalente de la distance entre l'échantillon 11 et le détecteur 12.

[0028] Comme l'illustre la figure 3, la longueur L de la chambre d'analyse et le diamètre D du détecteur définissent un angle θ tel que $\tan(\theta/2)=(D/2)/L$. θ est appelé «angle d'acceptance» de la sonde. Seules les trajectoires contenues dans le cône de demi-angle $\theta/2$ percutent le détecteur. Si D est trop faible, certaines trajectoires ne sont pas interceptées par le détecteur et les ions suivant ces trajectoires n'occasionneront aucun impact sur celui-ci. Ces ions non détectés ne faisant l'objet d'aucune analyse, seront évaporés en pure perte.

[0029] Par suite, θ étant ainsi défini, une sonde atomique tomographique peut être également caractérisée, de manière connue, par différents paramètres qui sont notamment son grandissement G et par la différence de potentiel V qui doit exister entre la pointe 11 constituant l'échantillon et l'entrée de la chambre d'analyse proprement dite, différence de potentiel responsable de l'accélération imprimée aux ions évaporés pour traverser la chambre d'analyse de longueur L le champ électrique à appliquer. Cette différence de potentiel est classiquement définie par la relation E= V/R, où E représente le champ électrique d'évaporation et R le rayon de courbure de la pointe c'est à dire le rayon de la calotte sphérique constituant son extrémité.

[0030] Le grandissement est donné par la relation G=L/bR, dans laquelle L représente sensiblement la longueur de la chambre d'analyse et bR la distance à l'extrémité 23 de la pointe d'un point P, ou point de projection, à partir duquel les trajectoires ioniques sont toutes définies. Le coefficient b qui dépend de la géométrie de l'instrumentation, pointe, détecteur et chambre sous vide est typiquement compris entre 1 et 2.

[0031] Dans un tel dispositif, les ions évaporés, par effet de champ, à la surface de la pointe 11 sont identifiés par spectrométrie de masse à temps de vol. Ainsi, v la

vitesse de déplacement des ions est déterminée par la tension d'accélération des ions d'après la formule:

$$\frac{1}{2}Mv^2 = neV$$

où M représente masse de l'ion, v sa vitesse, n le nombre de charges élémentaires portées par l'ion; e la charge élémentaire, c'est à dire la charge de l'électron et V la tension d'accélération appliquée.
Par suite, le temps de vol d'un ion étant donné par la relation:

$$T = \frac{L}{v},$$

la masse de l'ion sera déterminée d'après le temps de vol, selon la relation:

$$M = \frac{2neV}{L^2}T^2$$

[0032] La résolution de masse $\delta M/M$ étant proportionnelle à la précision sur le temps de vol $\delta T/T$, il est avantageux d'avoir le temps de vol T le plus grand possible, et par conséquent, la distance L la plus grande possible. Autrement dit, comme la mesure du temps de vol est essentielle dans l'instrument pour identifier le rapport m/q d'un ion détecté, m étant la masse de l'ion et q sa charge électrique, il est avantageux d'augmenter la distance L entre l'échantillon et le détecteur afin d'augmenter également le temps de vol. Une contrepartie de cette augmentation de la distance L est une réduction de l'angle d'acceptance θ=2 arctan(D/2L): Une grande partie du faisceau émis peut alors échapper au détecteur de dimension D, certaines trajectoires 15 n'étant par interceptées par le détecteur 12.

[0033] Ainsi, pour augmenter L, et donc la résolution en masse sans pour autant réduire l'angle d'acceptance θ, il est généralement nécessaire d'ajouter à l'agencement illustré par les figures 1 à 3, un dispositif pour focaliser le faisceau d'ions émis par l'échantillon 11 sur le détecteur 12 constitué. Ce dispositif peut par exemple être constitué comme l'illustre la figure 4, par une lentille électrostatique 41 telle que une lentille "Einzel", dispositif bien connu en optique des particules chargées, placée entre l'échantillon 11 et le détecteur 12. Suivant un principe bien connu la lentille "Einzel" constituée de trois électrodes 42, 43 et 44, placées sur le trajet des ions et configurées pour faire régner sur une portion de la trajectoire de ces ions un champ électrique qui agit directement sur cette trajectoire. De cette façon le faisceau initialement divergent 45 est modifié en un faisceau convergent 46, la convergence obtenue étant fonction de l'intensité du champ électrique produit.

[0034] Pour créer ce champ électrique, les électrodes constituant la lentille sont placées aux potentiels adéquats. Ainsi, par exemple, pour une sonde tomographique dans laquelle le détecteur est mis au potentiel de la masse la lentille "Einzel" peut comporter une première électrode 42, placé au voisinage de l'échantillon 11, elle-même à la masse, puis une deuxième électrode 43 portées à un potentiel positif, puis enfin une troisième électrode 44 portées également à la masse, de sorte qu'en sortie de la lentille, les ions poursuivent leurs trajectoires dans un espace sans champ électrique. Dans ce cas, la première électrode 42 joue également le rôle de l'électrode extractrice, ou contre-électrode, ou encore électrode locale, qui est généralement mise en place dans les sondes atomiques tomographiques pour localiser le champ électrique qui produit l'accélération initiale des ions évaporés de l'échantillon.

[0035] Un tel dispositif de focalisation permet avantageusement de limiter le pourcentage d'ions dont les trajectoires ne rencontrent pas le détecteur. Néanmoins son efficacité reste généralement limitée par le fait que toute lentille électrostatique présente ce qu'on appelle une aberration sphérique qui se traduit par une sur-convergence de la région externe de la lentille et une surfocalisation pour les trajectoires les plus excentrées qui fait que, comme l'illustre les figures 5 et 6 (vues schématiques en coupe) sur deux exemples de configurations de lentilles, un même point 51, 61, du détecteur peut intercepter plusieurs trajectoires distinctes à la fois, d'où il résulte un problème d'indétermination de la position d'origine d'un ion ayant percuté le détecteur en ce point.

[0036] En ce qui concerne la configuration de la figure 5, celle-ci correspond par exemple à une sonde atomique dans laquelle, l'échantillon 11 voit sa pointe portée à une tension de 15kV, tandis que la première électrode 42 de la lentille "Einzel" (la plus proche de l'échantillon), qui sert d'électrode extractrice, est à la masse, que la seconde électrode 43 est portée à une tension de 14kV et que la troisième électrode 44 (la plus proche du détecteur) est également portée à la masse, tout comme le détecteur 12. Dans cette configuration, les dimensions relatives de la deuxième et de la troisième électrode sont telles que pendant la plus grande partie de leur trajet les ions restent soumis à un champ électrique focalisateur.

[0037] En ce qui concerne la configuration de la figure 6, celle-ci correspond par exemple à une sonde atomique dans laquelle, l'échantillon 11 voit sa pointe portée à une tension de 15kV, tandis que la première électrode 42 de la lentille "Einzel" (la plus proche de l'échantillon), qui sert d'électrode extractrice, est à la masse, que la seconde électrode 43 est portée à une tension de 12,5kV et que la troisième électrode 44 (la plus proche du détecteur) est également portée à la masse, tout comme le détecteur 12. Dans cette configuration, contrairement à la configuration précédente, les dimensions relatives de la deuxième et de la troisième électrode sont telles que pendant la plus grande partie de leur trajet les ions traversent un espace sans champ, dans lequel il n'y a

pas d'effet de focalisation.

[0038] On s'intéresse à présent aux figures 7 et 8 qui permettent de présenter la structure de la sonde atomique selon l'invention. Celle ci présente une structure générale parfaitement connue, avec un porte-échantillon destiné à recevoir l'échantillon 11 de matériau à analyser, et un détecteur 12 sensible aux impacts des ions évaporés de l'échantillon et propulsés contre sa surface sensible. Classiquement, la sonde selon l'invention comporte encore une électrode accélératrice, ou extracteur, positionnée à proximité de l'échantillon et une lentille électrostatique de type "Einzel" pour focaliser le faisceau d'électrons produit, constitué de trois électrodes adjacentes 71, 72 et 73, la première électrode de la lentille "Einzel" étant constituée par l'électrode accélératrice. Classiquement encore, les électrodes de la lentille électrostatique sont polarisées de telle sorte que compte tenu des polarisations respectives de l'échantillon et du détecteur, les ions évaporés soient dans un premier temps accélérés vers le détecteur, pour être ensuite soumis pendant une partie de leur trajet, correspondant à la traversée de la lentille, à un champ électrique focalisateur.

[0039] Les trois électrodes sont par ailleurs préférentiellement configurées et agencées de façon à ménager dans la chambre de vol un espace libre suffisant pour loger un dispositif amovible de réglage de la sonde. Le dispositif de réglage peut être par exemple un microscope ionique à émission de champ ou "Field ion microscope" selon la dénomination anglo-saxonne.

[0040] La zone du détecteur, peut par ailleurs, suivant le mode de réalisation considéré, être porté à un potentiel intermédiaire entre celui de l'échantillon et celui de l'électrode extractrice 71. La mise au potentiel considéré est réalisée directement ou par l'intermédiaire d'une grille disposée à proximité du détecteur. Selon une variante de réalisation ce potentiel est celui auquel est porté l'extracteur.

[0041] Pour pouvoir disposer d'une longueur d'analyse L (longueur de vol) sensiblement plus grande que celle accessible avec les sondes existantes, la géométrie et l'agencement des électrodes 71, 72 et 73 constituant la lentille électrostatique répondent ici à des caractéristiques techniques spécifiques décrites dans la suite de la description.

[0042] Selon l'invention, les électrodes de la lentille électrostatique, sont constituées de pièces mécaniques comportant une ouverture centrale et présentant une symétrie de révolution autour d'un axe central, confondu avec l'axe 74 joignant le sommet de la pointe formant l'échantillon 11 de matériau au détecteur 12 et perpendiculaire au plan du détecteur.

[0043] La première électrode 71, ou extracteur, située à proximité de l'échantillon 11 et jouant le rôle d'électrode extractrice est préférentiellement une pièce de faible épaisseur présentant un trou 78 de passage des ions, un trou circulaire par exemple.

[0044] De même la troisième électrode 73 de la lentille électrostatique est une électrode quelconque, préférentiellement de relativement faible épaisseur et présentant une ouverture centrale 79 d'un diamètre supérieur ou du moins sensiblement égal au diamètre D du détecteur 12, de façon à permettre la propagation jusqu'au détecteur des ions évaporés, et ce, quelle que soit la trajectoire empruntée par ces ions dans la lentille.

[0045] En ce qui concerne la deuxième électrode 72, électrode centrale de la lentille, celle-ci présente une forme permettant de définir un espace interne dont les dimensions varient avantageusement sur la longueur de l'électrode. Ainsi, selon l'invention la deuxième électrode 72 comporte un premier segment 711 adjacent à la première électrode 71 et présentant une ouverture cylindrique centrée sur l'axe 74, d'un rayon r_1 adapté au passage du faisceau d'ions évaporés. Elle comporte également un deuxième segment 712, présentant une ouverture cylindrique centrée sur l'axe 74 et de rayon r_2 le rayon r_2 adapté à la largeur du faisceau étant supérieur au rayon r_1. Elle comporte encore un troisième segment 713, présentant une ouverture conique reliant l'ouverture du premier segment à celle du deuxième segment. De la sorte, comme l'illustre la vue en coupe de la figure 7, le profil 75 de la surface intérieur de la deuxième électrode décrit une ligne brisée passant par les trois points $M_1(z_1, r_1)$, $M_2(z_2, r_2)$ $M_3(z_3, r_3)$. Selon l'invention, z_1, z_2, et z_3 représentent les abscisses sur l'axe 74 des points M1, M2, et M3 par rapport à une origine O d'abscisse z_0 se situant au niveau de la pointe de l'échantillon de matériau 11 et matérialisé sur la figure par l'intersection des axes 74 et 714. Les paramètres r_1, r_2 et r_3 représentent quant à eux les valeurs du rayon de l'ouverture au point considéré. Ces paramètres sont définis de façon à remplir les conditions suivantes:

a) $0;1 \cdot D < r_1 < 0.65 \cdot D$

b) $r_2 = r_1$

c) $D < r_2 < 1.6 \cdot D$

d) $|z_1 - z_0| < D/3$

e) $|z_2 - z_1| < 0;65 \cdot D$

f) $|z_3 - z_1| < 1.4 \cdot D$

g) en tout point $M_i(r_i, z_i)$ de la zone M2M3 du profil 75, c'est-à-dire pour $z_i > z_2$ on a:

$$r_i \geq A \cdot z_i + B$$

avec

$$A = \frac{r_3 - r_2}{z_3 - z_2} \text{ et } B = \frac{r2 \cdot z_3 - r_3 \cdot z_2}{z_3 - z_2}$$

[0046] La condition g) revient à énoncer que tous les points du profil en coupe 75 de l'électrode situés entre M_1 et M_3, doivent être situés en dehors de la zone du plan de coupe délimitée par le profil d'un cône limité par les points M_2 et M_3.

[0047] Des calculs menés par ailleurs par la déposante, et non présenté ici, montre que grâce à cette configuration particulière des électrodes constituant la lentille électrostatique, il est possible en appliquant les potentiels adéquats sur les différentes électrodes, comme l'illustre la figue 8, d'obtenir une focalisation du faisceau d'ions 81 suffisante pour ramener sur le détecteur un ensemble de trajectoires affectées d'aberrations de faible ampleur. L'invention permet notamment d'utiliser dans une sonde atomique un détecteur de position 12 d'un diamètre D, placé à une distance L' supérieure à 2L de l'échantillon 11, L étant telle la longueur d'analyse maximale sans focalisation, longueur définie de manière connue par la relation $\tan(\theta/2)=(D/2)/L$, équivalente à $L=1.374\ D$ lorsque la demi-ouverure $\theta/2$ est de 20°. Ainsi, pour un angle d'ouverture θ égal à $\pm$ 20° et pour un diamètre de détecteur D égal à 80 mm, il est avantageusement possible grâce à la sonde atomique selon l'invention, d'obtenir une longueur d'analyse supérieure à deux fois la valeur $L = 1{,}374 \cdot D = 109$ mm tout en interceptant avec le détecteur toutes les trajectoires des ions émis correspondant à cet angle d'ouverture. En augmentant la distance d'analyse d'un facteur au moins égal à 2, il est possible d'obtenir, en appliquant au faisceau d'ion un champ électrique focalisateur d'intensité appropriée (c'est à dire appliquant sur les électrodes les tensions de polarisation appropriées), une résolution en masse améliorée d'un facteur supérieur à deux. Cette résolution est avantageusement obtenue sans subir au niveau du détecteur les effets de confusion des points d'impacts, ou tout au moins en subissant ces effets de manière très amoindrie, effets consécutifs à l'aberration sphérique de la lentille électrostatique. L'angle d'ouverture restant par ailleurs inchangé, l'augmentation de résolution se fait ici sans entraîner de limitation supplémentaire de la surface analysée.

[0048] Ainsi grâce à ses caractéristiques de structure, la sonde selon l'invention, permet d'augmenter de manière très importante la longueur d'analyse pouvant être utilisée. L'intensité de la focalisation reste quant à elle définie par la valeur des tensions de polarisation appliquées aux différentes électrodes de la lentille focalisatrice réalisée. Suivant les polarisations appliquées, le faisceau d'ion sera plus ou moins focalisé, l'objectif étant cependant que le faisceau focalisé couvre la plus grande surface possible sur le détecteur. Le faisceau d'ion focalisé pourra alors par exemple prendre selon les cas la forme du faisceau 81 illustré sur la figure 8, ou encore celle du faisceau 91 illustré sur la figure 9. Dans le cas de la figure 8 le faisceau 81 est obtenue en appliquant, par exemple, une tension de 13,7 kV à la deuxième électrode 72 et en portant la première et la troisième électrode à la masse, le détecteur étant par ailleurs lui-même mis à la masse et l'échantillon étant quant à lui porté à une tension de 15 kV. Dans le cas de la figure 9, le faisceau 91 est obtenue en appliquant, par exemple, une tension de 15,1 kV à la deuxième électrode 72 et en portant la première et la troisième électrode à la masse, le détecteur et l'échantillon étant par ailleurs, comme dans le cas précédent, portés respectivement à la masse et à une tension de 15 kV.

[0049] L'architecture de la sonde atomique selon l'invention, telle qu'elle est présentée dans les paragraphes précédents, correspond à une architecture commune de base, la sonde selon l'invention pouvant dans la pratique comporter certaines variantes de réalisation correspondant à des applications spécifiques telles que celles présentées de manière non limitative dans la suite de la description.

[0050] On s'intéresse à présent aux figures 10 à 12, qui illustrent une première variante de réalisation de la sonde selon l'invention. Dans cette variante, présentée à titre d'exemple de réalisation non limitatif, la première électrode 71 constituant la lentille focalisatrice, l'électrode extractrice, comporte une ouverture centrale 78 équipée d'un dispositif à ouvertures multiples. Ce dispositif consiste, comme l'illustre la figure 12, en une barrette de diaphragmes 112 agencée de façon à coulisser devant l'ouverture centrale 78 de l'électrode 71. Les diamètres des différents diaphragmes 111 de la barrette 112, inférieurs à celui de l'ouverture centrale 78, sont définis de façon à diminuer de manière plus ou moins forte le diamètre de l'orifice de passage des ions émis par l'échantillon 11. Ainsi, comme l'illustrent les figures 10 et 11, il est avantageusement possible, suivant les besoins, d'adapter le diamètre de l'ouverture 78 de façon à laisser passer la totalité du faisceau 81 d'ion émis ou à éliminer du faisceau les ions présentant les trajectoires les plus périphériques, notamment pour limiter la largeur de la surface d'échantillon analysée et donc l'angle d'ouverture du faisceau d'ions correspondant qui sera détecté par le capteur. Le diamètre d de l'ouverture de l'extracteur est ainsi adapté de façon à intercepter la partie périphérique du faisceau d'ions émis de façon à bloquer les ions ayant les trajectoires les plus périphériques.

[0051] Il est à noter que, comme l'illustre la figure 12, les différents diaphragmes sont agencés sur la barrette de façon à ce que la distance entre deux diaphragmes contigus soit suffisante pour qu'à l'exception du diaphragme utilisé, tous les autres soient parfaitement masqués par l'électrode. Le positionnement dans les deux dimensions perpendiculaires à l'axe du faisceau peut, par ailleurs, être effectué par un mécanisme adapté, éventuellement contrôlé par un calculateur et disposé à l'extérieur de l'enceinte de la sonde.

[0052] On s'intéresse ensuite à la figure 13, qui illustre une seconde variante de réalisation de la sonde selon l'invention. Dans cette variante, présentée également à titre d'exemple de réalisation non limitatif, la sonde atomique selon l'invention comporte une deuxième lentille focalisatrice, du type lentille "Einzel" par exemple, placée

entre la première lentille et le détecteur. Cette configuration particulière permet d'opérer une compensation de l'aberration sphérique résiduelle que présente la première lentille focalisatrice, malgré sa configuration particulière, cette aberration sphérique de la première lentille ne pouvant pas toujours être évitée.

[0053] La sonde atomique selon l'invention, dans cette variante de réalisation, comporte, outre les trois électrodes 71, 72 et 73 constituant la première lentille, deux électrodes complémentaires 132 et 133, l'électrode 132 étant placée adjacente de l'électrode 73 et l'électrode 133 étant placée adjacente de l'électrode 132, entre cette électrode et le détecteur 12.

[0054] L'électrode 133, est portée à un potentiel sensiblement égal à celui de l'électrode 73, tandis que l'électrode 132 est portée à un potentiel permettant à l'ensemble des trois électrodes 73, 132 et 133 de constituer ainsi une seconde lentille électrostatique à l'intérieur de laquelle règne un champ électrique.

[0055] Dans cette configuration particulière à deux lentilles la deuxième électrode 72 de la première lentille et la deuxième électrode 131 de la seconde lentille sont portées à des potentiels définis pour:

- réaliser, à l'aide de la première lentille, la focalisation des trajectoires de faible ouverture sur le plan médian de la deuxième lentille, matérialisé par la ligne pointillée 134 sur la figure 13. De la sorte la deuxième lentille, constituée par les électrodes 73, 132 et 133, est sans effet sur les trajectoires de faible ouverture.
- opérer, à l'aide de la première lentille, une surfocalisation des trajectoires de plus fortes ouvertures. Les aberrations qui apparaissent alors sont corrigées en appliquant le potentiel approprié à l'électrode centrale 132 de la seconde lentille.

[0056] Le champ électrique appliqué au faisceau d'ion à l'intérieur de la seconde lentille électrostatique peut selon le cas d'utilisation envisagé être un champ accélérateur ou retardateur

[0057] Un tel dispositif peut par exemple être obtenu à partir d'une structure telle que celle illustrée par la figure 13. Le détecteur 12 étant porté au potentiel de masse et l'échantillon 11 à un potentiel de 15 kV, L'électrode extractrice 71 est alors portée à la masse ainsi que les électrodes 73 et 133, tandis que l'électrode centrale 72 de la première lentille est portée à une tension de 15,3 kV et que l'électrode centrale 132 de la deuxième lentille est portée à une tension de 14,5 kV.

Revendications

1. Une sonde atomique tomographique comprenant:

- Un dispositif porte-échantillon pour recevoir un échantillon (11) de matériau à analyser présentant une zone d'extraction de forme sensiblement pointue,
- Un détecteur sensible en position (12) de diamètre utile D et espacé de l'échantillon (11) d'une distance L;
- Une lentille électrostatique composée de trois électrodes, une première électrode (71) ou extracteur, disposée à proximité de l'échantillon (11), une deuxième électrode (72), intermédiaire, et une troisième électrode (73), distale, disposées entre l'électrode intermédiaire (72) et le détecteur (12), les trois électrodes présentant une symétrie de révolution autour de l'axe Oz passant par la pointe de l'échantillon et perpendiculaire au plan P du détecteur;

caractérisée en ce que la distance L étant supérieure à 2.75 D, les potentiels respectifs de l'échantillon (11), de la première électrode (71) de la lentille et du détecteur (12) sont tels que les ions issus de l'échantillon (11) monté sur le porte-échantillon soient attirés vers la première électrode (71) et vers le détecteur (12); le profil en coupe (74) de la l'électrode intermédiaire (72), dans un plan de coupe rOz passant par l'axe Oz, définissant trois points M_1, M_2 et M_3 de coordonnées respectives (r_1, z_1), (r_2, z_2) et (r_3, z_3) par rapport à une origine z_0 sur la pointe de l'échantillon, qui répondent aux conditions suivantes:

$$z_1 < z_2 < z_3,$$

$$|z_1 - z_0| < D/3,$$

$$|z_2 - z_1| < 0.65 \cdot D,$$

$$|z_3 - z_1| > 1.4 \cdot D,$$

$$r_2 = r_1,$$

$$0.1 \cdot D < r_1 < 0.65 \cdot D,$$

$$D < r_3 < 1.6 \cdot D;$$

tous les points du profil en coupe de l'électrode étant situés en dehors de la zone du plan de coupe délimitée par le profil (77) d'un cône à embout cylindrique limité par les points M_1, M_2 et M_3.

2. Sonde atomique tomographique selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** le détecteur (12) ou

une grille disposée à proximité du détecteur est à un potentiel égal à celui de l'extracteur (71).

3. Sonde atomique selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** le détecteur ou une grille disposée à proximité du détecteur est à un potentiel intermédiaire entre celui de l'échantillon (11) et celui de l'électrode extracteur (71).

4. Sonde atomique tomographique selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisée en ce que** le diamètre d de l'ouverture (77) de l'extracteur (72) est déterminé de façon à intercepter la partie périphérique du faisceau d'ions émis de façon à bloquer les ions ayant les trajectoires les plus périphériques.

5. Sonde atomique tomographique selon la revendication 4, **caractérisée en ce que** l'extracteur comporte plusieurs diaphragmes (111) de diamètres d'ouverture différents, pouvant être alternativement disposés au niveau de l'ouverture centrale (77) de l'extracteur (72).

6. Sonde atomique tomographique selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les différents diaphragmes (111) sont réalisés sur une barrette mobile (112) pouvant coulisser devant l'ouverture (77) de l'extracteur (71) de façon à placer le diaphragme voulu devant l'ouverture; le mouvement de coulisse de la barrette étant automatisé.

7. Sonde atomique tomographique selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les trois électrodes (71, 72 et 73) sont configurées et agencées de façon à ménager dans la chambre de vol un espace libre suffisant pour loger un dispositif amovible de réglage de la sonde.

8. Sonde atomique tomographique selon la revendication 7, **caractérisée en ce que** l'espace libre est suffisant pour disposer un "Field ion microscope" dans la sonde.

9. Sonde atomique tomographique selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** une deuxième lentille électrostatique (73, 131 et 132) est placée entre la première lentille électrostatique (71, 72 et 73) et le détecteur (12).

10. Sonde atomique tomographique selon la revendication 9, **caractérisée en ce que** la première lentille électrostatique (71, 72 et 73) est configurée pour focaliser les trajectoires les moins ouvertes à proximité du plan médian de la deuxième lentille électrostatique (73, 131 et 132).

11. Sonde atomique tomographique selon la revendication 9, **caractérisée en ce que** la deuxième lentille électrostatique (73, 131 et 132) génère un champ électrique retardateur.

12. Sonde atomique tomographique selon la revendication 9, **caractérisée en ce que** la deuxième lentille électrostatique (73, 131 et 132) génère un champ électrique accélérateur.

13. Sonde atomique tomographique selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** l'extracteur (71) est soumis à un potentiel impulsionnel.

14. Sonde atomique tomographique selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** les ions du matériau sont arrachés de l'échantillon (11) au moyen d'un laser pulsé.

15. Sonde atomique tomographique selon la revendication 14, **caractérisée en ce que** l'extracteur (71) est soumis à un potentiel impulsionnel synchronisé avec l'émission laser.

Patentansprüche

1. Tomografische Atomsonde, die Folgendes umfasst:

- eine Probentragvorrichtung zum Aufnehmen einer Probe (11) eines zu analysierenden Materials mit einer Extraktionszone mit einer im Wesentlichen spitzen Form,
- einen positionsempfindlichen Detektor (12) mit einem nützlichen Durchmesser D, der von der Probe (11) um eine Distanz L beabstandet ist;
- eine elektrostatische Linse bestehend aus drei Elektroden, einer ersten Elektrode (71) oder einem Extraktor, angeordnet in der Nähe der Probe (11), einer zweiten Elektrode (72), Zwischenelektrode genannt, und einer distalen dritten Elektrode (73), die zwischen der Zwischenelektrode (72) und dem Detektor (12) angeordnet sind, wobei die drei Elektroden eine Umdrehungssymmetrie um die Achse Oz aufweisen, die durch die Spitze der Probe und lotrecht zur Ebene P des Detektors verläuft;

dadurch gekennzeichnet, dass, da die Distanz L größer ist als 2,75 D, die jeweiligen Potentiale der Probe (11), der ersten Elektrode (71) der Linse und des Detektors (12) so sind, dass die von der am Probenträger montierten Probe (11) ausgehenden Ionen zur ersten Elektrode (71) und zum Detektor (12) angezogen werden; wobei das Querschnittsprofil (74) der Zwischenelektrode (72), in einer durch die Achse Oz verlaufenden Querschnittsebene rOz, drei Punkte M_1, M_2 und M_3 mit jeweiligen Koordinaten (r_1, z_1), (r_2, z_2) und (r_3, z_3) mit Bezug auf einen Ursprung z_0 auf der Spitze der Probe definieren, die

die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$z_1 < z_2 < z_3,$$

$$|z_1\text{-}z_0| < D/3,$$

$$|z_2\text{-}z_1| < 0{,}65\ D,$$

$$|z_3\text{-}z_1| > 1{,}4\ D,$$

$$r_2 = r_1,$$

$$0{,}1\ D < r_1 < 0{,}65\ D,$$

$$D < r_3 < 1{,}6\ D;$$

wobei sich alle Punkte des Querschnittprofils der Elektrode außerhalb der Zone der durch das Profil (77) eines Kegels begrenzten Querschnittsebene befinden, am zylindrischen Ende durch die Punkte M_1, M_2 und M_3 begrenzt.

2. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Detektor (12) oder ein in der Nähe des Detektors angeordnetes Gitter auf einem Potential gleich dem des Extraktors (71) ist.

3. Atomsonde nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Detektor oder ein in der Nähe des Detektors angeordnetes Gitter auf einem Zwischenpotential zwischen dem der Probe (11) und dem der Extraktorelektrode (71) ist.

4. Tomografische Atomsonde nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Durchmesser d der Öffnung (77) des Extraktors (72) so bestimmt wird, dass der periphere Teil des emittierten Ionenstrahls abgefangen wird, um die Ionen mit den peripherischsten Flugbahnen zu sperren.

5. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Extraktor mehrere Membranen (111) mit unterschiedlichen Öffnungsdurchmessern hat, die alternativ an der zentralen Öffnung (77) des Extraktors (72) angeordnet sein können.

6. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die unterschiedlichen Membranen (111) auf einem mobilen Steg (112) realisiert sind, der vor der Öffnung (77) des Extraktors (71) gleiten kann, um die gewünschte Membran vor der Öffnung zu platzieren; wobei die Gleitbewegung des Stegs automatisiert ist.

7. Tomografische Atomsonde nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die drei Elektroden (71, 72 und 73) so konfiguriert und ausgelegt sind, dass in der Flugkammer ein freier Raum bereitgestellt wird, der zum Aufnehmen einer entfernbaren Vorrichtung zum Einstellen der Sonde ausreicht.

8. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** der freie Raum zum Anordnen eines "Field Ion Microskope" in der Sonde ausreicht.

9. Tomografische Atomsonde nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine zweite elektrostatische Linse (73, 131 und 132) zwischen der ersten elektrostatischen Linse (71, 72 und 73) und dem Detektor (12) platziert ist.

10. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste elektrostatische Linse (71, 72 und 73) zum Fokussieren der am wenigsten offenen Flugbahnen in der Nähe der Medianebene der zweiten elektrostatischen Linse (73, 131 und 132) konfiguriert ist.

11. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite elektrostatische Linse (73, 131 und 132) ein elektrisches Verzögerungsfeld erzeugt.

12. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zweite elektrostatische Linse (73, 131 und 132) ein elektrisches Beschleunigungsfeld erzeugt.

13. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Extraktor (71) einem Impulspotential ausgesetzt wird.

14. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ionen des Materials mit einem Impulslaser von der Probe (11) gelöst werden.

15. Tomografische Atomsonde nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Extraktor (71) einem mit der Laseremission synchronisierten Impulspotential ausgesetzt wird.

Claims

1. Tomographic atom probe comprising:

- a sample-holding device for receiving a sample (11) of material to be analysed having an extraction area of substantially pointed shape,
- a position-sensitive detector (12) of useful diameter D and spaced apart from the sample (11) by a distance L;
- an electrostatic lens consisting of three electrodes, a first electrode (71) or extractor, arranged in proximity to the sample (11), an intermediate second electrode (72), and a distal third electrode (73) arranged between the intermediate electrode (72) and the detector (12), the three electrodes having a symmetry of revolution about the axis Oz passing through the point of the sample and perpendicular to the plane P of the detector;

characterized in that, since the distance L is greater than 2.75 D, the respective potentials of the sample (11), of the first electrode (71) of the lens and of the detector (12) are such that the ions deriving from the sample (11) mounted on the sample-holder are attracted towards the first electrode (71) and towards the detector (12); the cross-sectional profile (74) of the intermediate electrode (72), in a cross-sectional plane rOz passing through the axis Oz, defining three points M_1, M_2 and M_3 of respective coordinates (r_1, z_1), (r_2, z_2) and (r_3, z_3) relative to an origin z_0 on the point of the sample, which satisfy the following conditions:

$$z_1 < z_2 < z_3,$$

$$|z_1 - z_0| < D/3,$$

$$|z_2 - z_1| < 0.65 \cdot D,$$

$$|z_3 - z_1| > 1.4 \cdot D,$$

$$r_2 = r_1,$$

$$0.1 \cdot D < r_1 < 0.65 \cdot D,$$

$$D < r_3 < 1.6 \cdot D;$$

all the points of the cross-sectional profile of the electrode being situated outside the area of the cross-sectional plane delimited by the profile (77) of a cone with cylindrical tip limited by the points M_1, M_2 and M_3.

2. Tomographic atom probe according to Claim 1, **characterized in that** the detector (12) or a grating arranged in proximity to the detector is at a potential equal to that of the extractor (71).

3. Atom probe according to Claim 1, **characterized in that** the detector or a grating arranged in proximity to the detector is at an intermediate potential between that of the sample (11) and that of the extractor electrode (71).

4. Tomographic atom probe according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** the diameter d of the aperture (77) of the extractor (72) is determined in such a way as to intercept the peripheral portion of the beam of emitted ions so as to block the ions that have the most peripheral trajectories.

5. Tomographic atom probe according to Claim 4, **characterized in that** the extractor comprises a number of diaphragms (111) of different aperture diameters, that can be alternately arranged at the level of the central aperture (77) of the extractor (72).

6. Tomographic atom probe according to Claim 5, **characterized in that** the different diaphragms (111) are produced on a moving bar (112) that can slide in front of the aperture (77) of the extractor (71) so as to place the desired diaphragm in front of the aperture; the sliding movement of the bar being automated.

7. Tomographic atom probe according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the three electrodes (71, 72 and 73) are configured and arranged in such a way as to provide, inside the flight chamber, a free space that is sufficient to house a removable probe adjusting device.

8. Tomographic atom probe according to Claim 7, **characterized in that** the free space is sufficient to have a field ion microscope in the probe.

9. Tomographic atom probe according to any one of the preceding claims, **characterized in that** a second electrostatic lens (73, 131 and 132) is placed between the first electrostatic lens (71, 72 and 73) and the detector (12).

10. Tomographic atom probe according to Claim 9, **characterized in that** the first electrostatic lens (71, 72 and 73) is configured to focus the least open trajectories in proximity to the median plane of the sec-

ond electrostatic lens (73, 131 and 132).

11. Topographic atom probe according to Claim 9, **characterized in that** the second electrostatic lens (73, 131 and 132) generates a delaying electrical field.

12. Topographic atom probe according to Claim 9, **characterized in that** the second electrostatic lens (73, 131 and 132) generates an accelerating electrical field.

13. Topographic atom probe according to Claim 1, **characterized in that** the extractor (71) is subjected to a pulsed potential.

14. Topographic atom probe according to Claim 1, **characterized in that** the ions of the material are separated from the sample (11) by means of a pulsed laser.

15. Topographic atom probe according to Claim 14, **characterized in that** the extractor (71) is subjected to a pulsed potential synchronized with the laser emission.

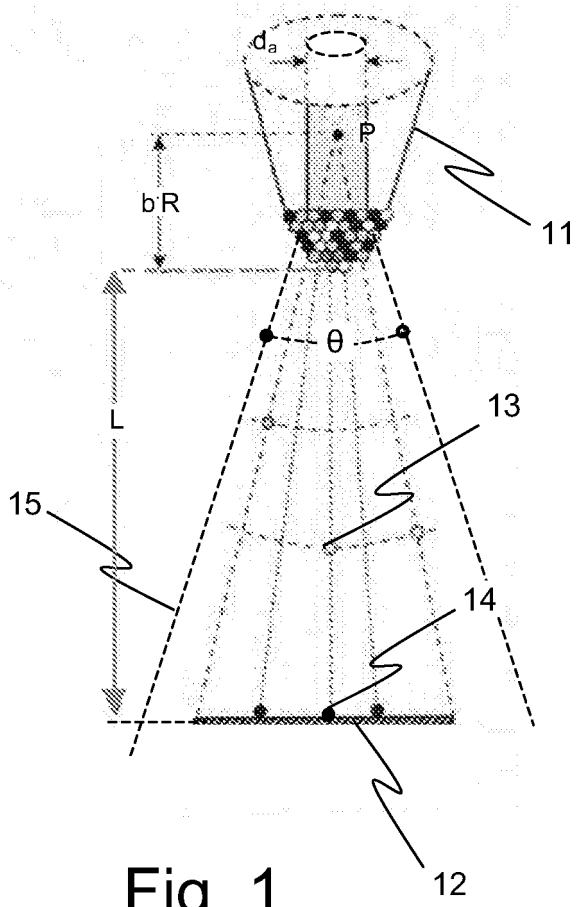

Fig. 1

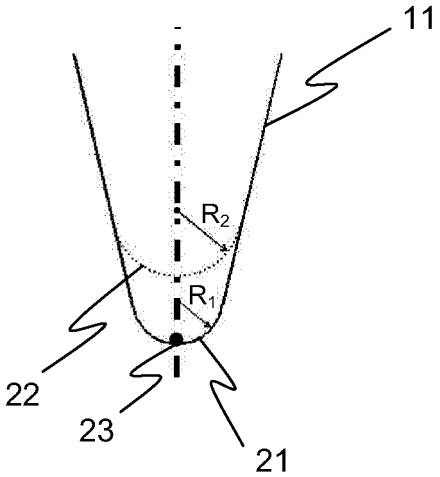

Fig. 2

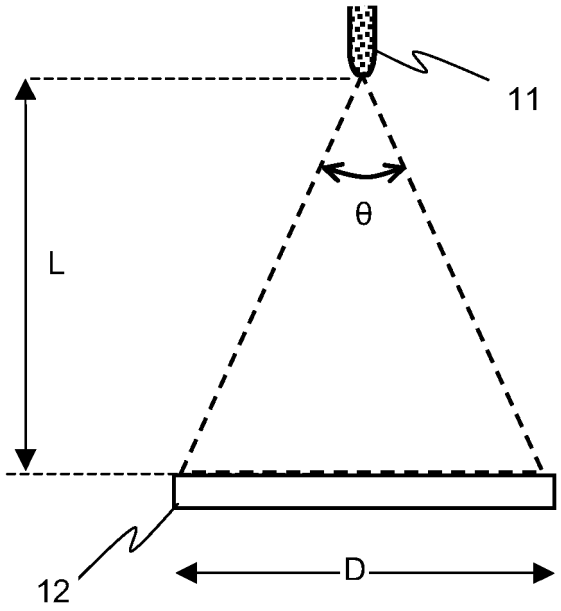

Fig. 3

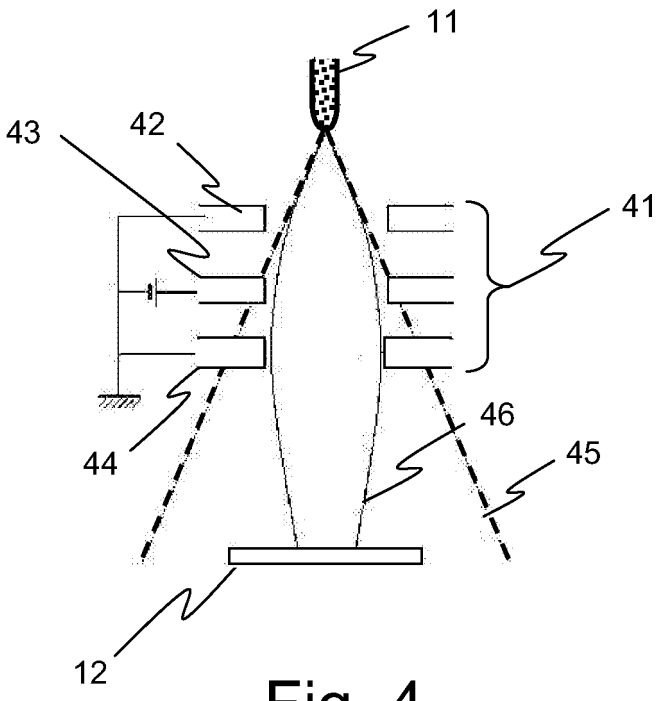

Fig. 4

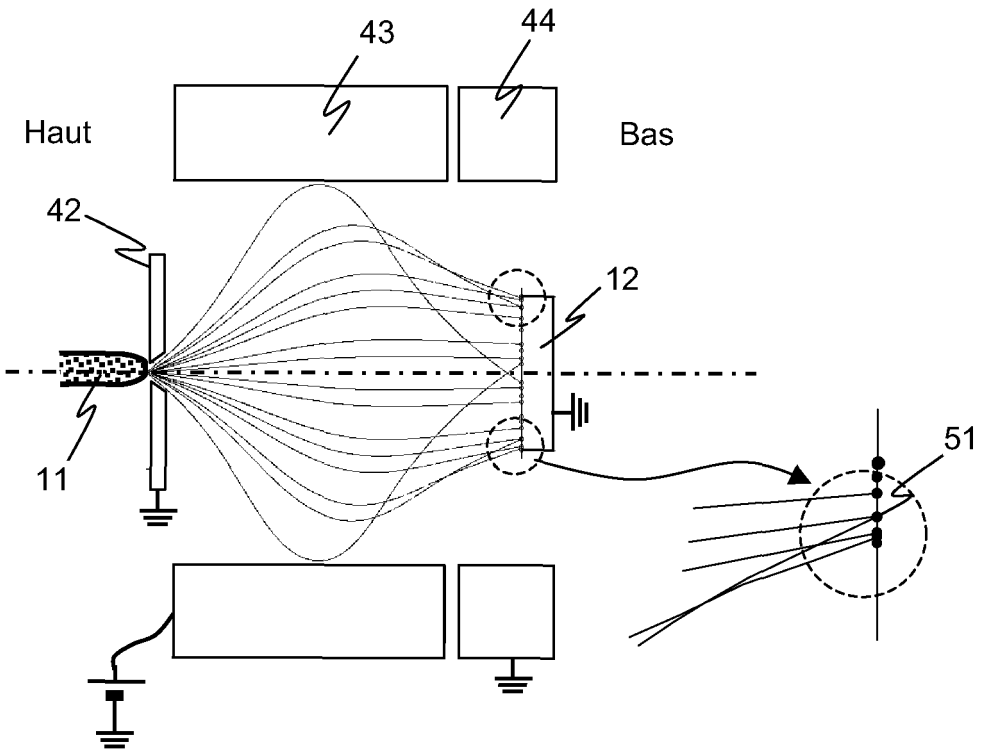

Fig. 5

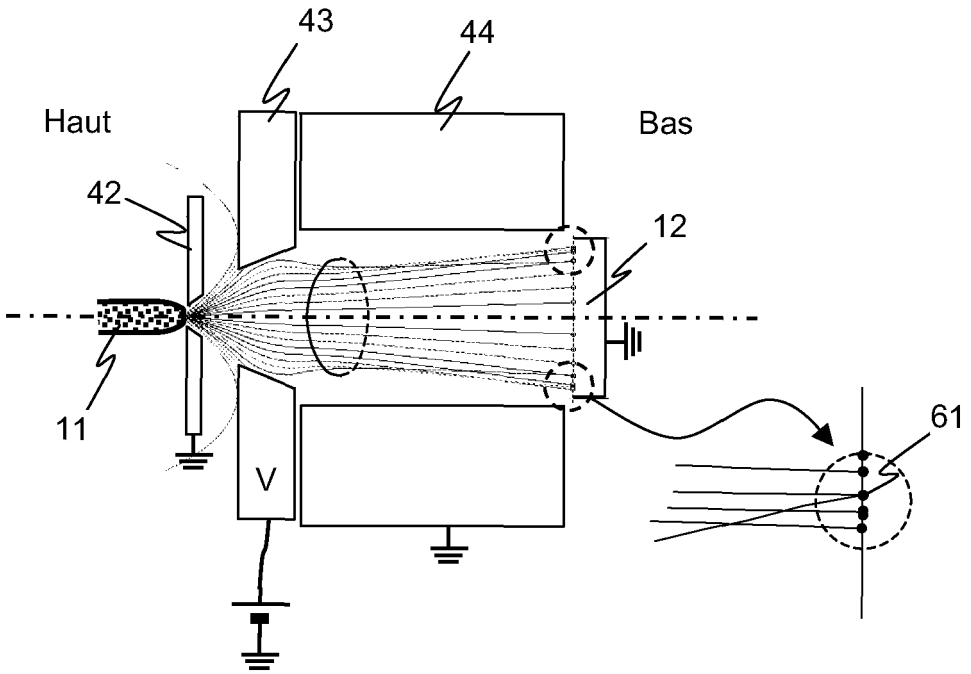

Fig. 6

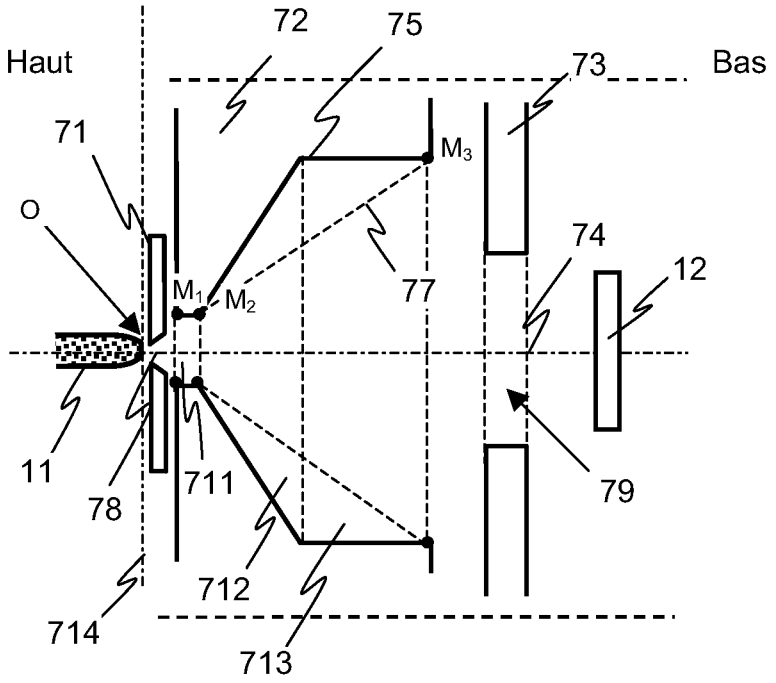
72
75
Haut
73
Bas
71
M3
O
74
12
77
M1
M2
11
78
711
79
712
714
713

Fig. 7

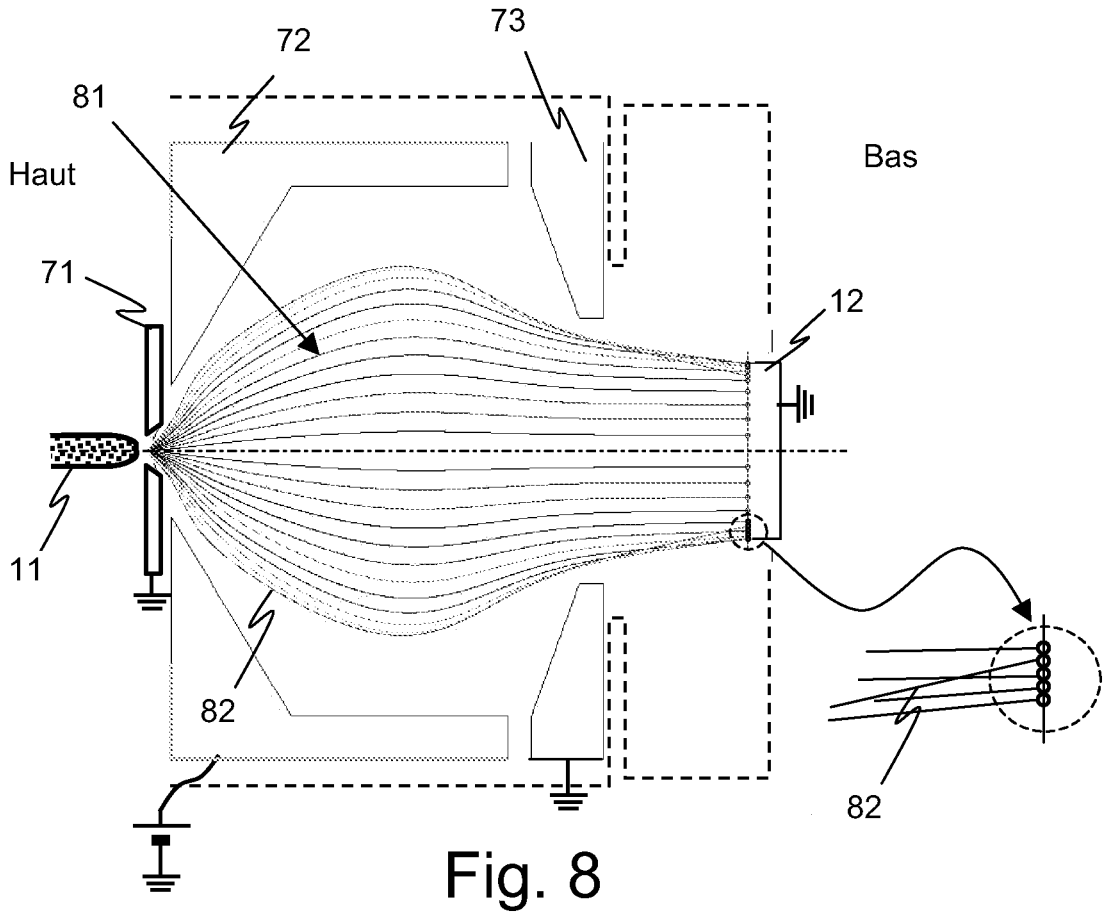
73
72
81
Haut
Bas
71
12
11
82
82

Fig. 8

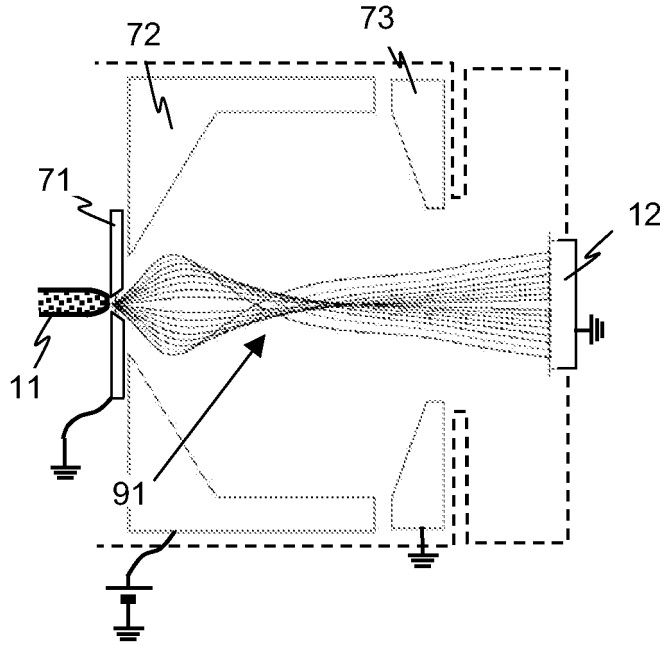

Fig. 9

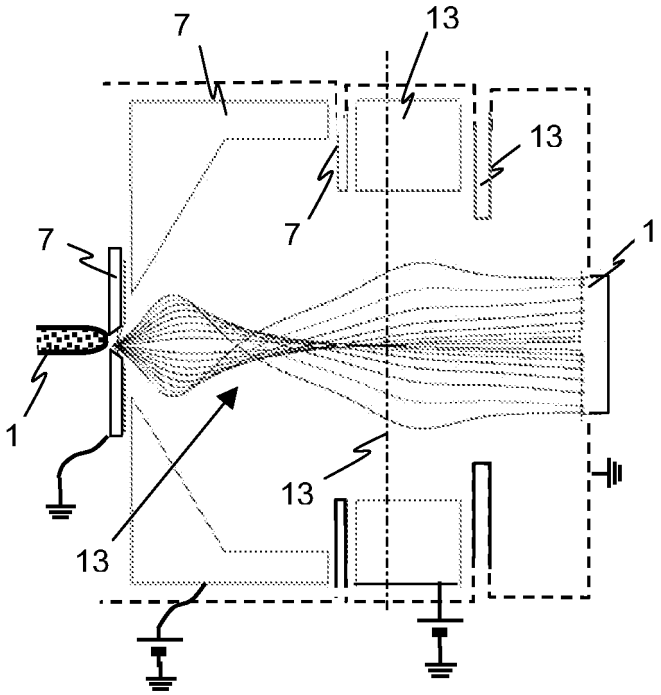

Fig. 13

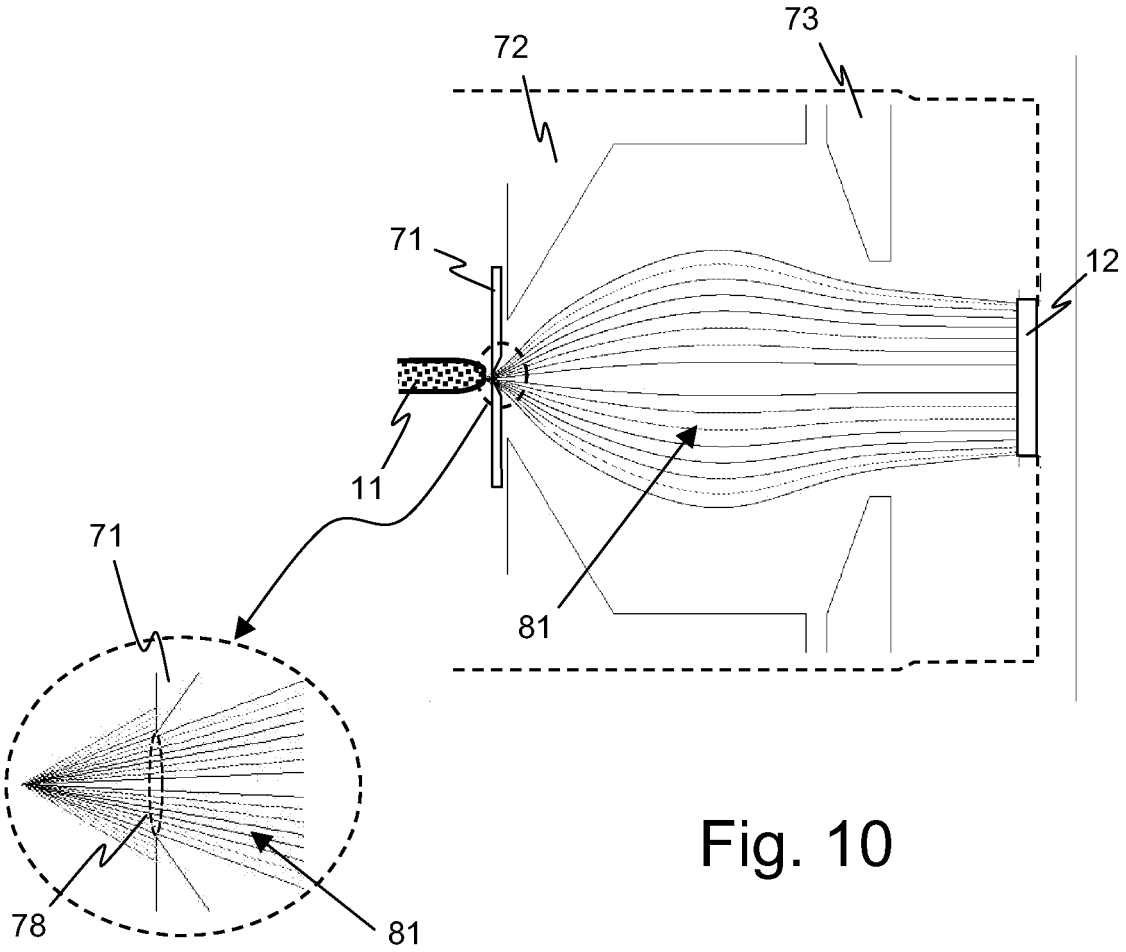

Fig. 10

Fig. 11

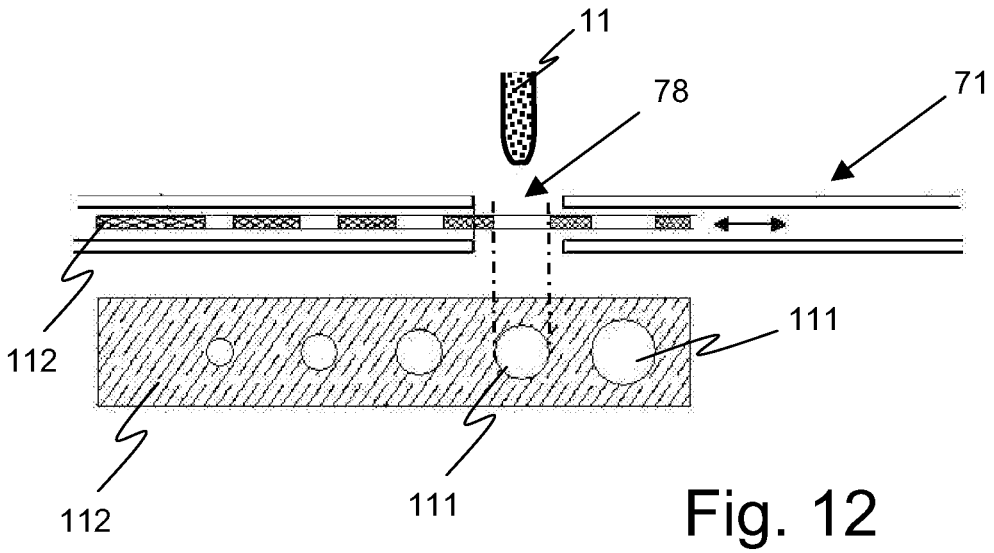

Fig. 12

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Littérature non-brevet citée dans la description

- **MILLER et al.** Atom probe field Ion microscopy. Clarendon Press/Oxford, 1996 **[0002]**
- **P.W.HAWKES ; E.KASPER.** Principles of electron optics. Academic press, 1989 **[0005]**