

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
27. Oktober 2022 (27.10.2022)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/223232 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01J 49/40 (2006.01) G01N 27/623 (2021.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2022/057761

(22) Internationales Anmeldedatum:

24. März 2022 (24.03.2022)

(25) Einreichungssprache:

Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache:

Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2021 204 046.2

22. April 2021 (22.04.2021) DE

(71) Anmelder: CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Ru-
dolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: ALIMAN, Michel; Dives-Sur-Mer-Strasse 7,
73447 Oberkochen (DE). RANCK, Albrecht; Saarstrasse
28, 73431 Aalen (DE).

(74) Anwalt: KOHLER SCHMID MÖBUS PATENT-
ANWÄLTE PARTNERSCHAFTSGESELLSCHAFT
MBB; Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): 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, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, 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, ST, SV, SY, TH,

(54) Title: APPARATUS FOR SPECTROMETRIC ANALYSIS OF A GAS AND LITHOGRAPHY SYSTEM

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG ZUR SPEKTROMETRISCHEN UNTERSUCHUNG EINES GASES UND
LITHOGRAPHIEANLAGE

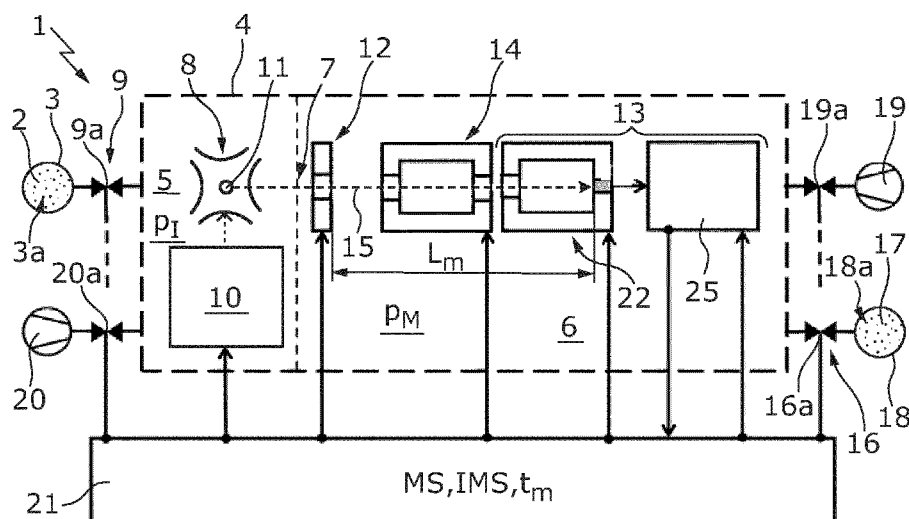


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to an apparatus (1) for spectrometric analysis of a gas (2) comprising: an extraction device (12) for extracting ions (11) of the gas (2) to be analysed from an ion chamber (5), an ion detector (13) for detecting the ions (11), an ion transfer device (14) for transferring the ions (11) from the extraction device (12) to the ion detector (13) along an ion transfer line (L_m), a feed device (16) for feeding a braking gas (17) to the ion transfer line (L_m), and an evaluation device (21) for determining transport times (t_m) during transport of the ions (11) from the extraction device (12) to the ion detector (13) along the ion transfer line (L_m). The apparatus (1) is designed to switch a pressure (p_M) along the ion transfer line (L_m) between



TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (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).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *Erfindenerklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

a first, lower pressure range (Δp_1) and a second, higher pressure range (Δp_2), and the evaluation device (21) is designed, in a first operational state (MS), to carry out a mass spectrometric analysis of the gas (2) using the transport times (t_m) of the ions (11) at the pressure (p_M) in the first pressure range (Δp_1) and, in a second operational state (IMS), to carry out an ion mobility spectrometric analysis of the gas (2) using the transport times (t_m) of the ions (11) at the pressure (p_M) in the second pressure range (Δp_2). The invention also relates to a lithography system, in particular an EUV lithography system, comprising at least one such apparatus (1).

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur spektrometrischen Untersuchung eines Gases (2), umfassend: eine Extraktionseinrichtung (12) zur Extraktion von Ionen (11) des zu untersuchenden Gases (2) aus einer Ionenkammer (5), einen Ionen-Detektor (13) zur Detektion der Ionen (11), eine Ionen- Transferseinrichtung (14) zum Transfer der Ionen (11) von der Extraktionseinrichtung (12) zu dem Ionen-Detektor (13) entlang einer Ionen- Transferstrecke (L_m), eine Zuführungseinrichtung (16) zur Zuführung eines Bremsgases (17) zu der Ionen-Transferstrecke (L_m), sowie eine Auswerteeinrichtung (21) zur Bestimmung von Transportzeiten (t_m) beim Transport der Ionen (11) von der Extraktionseinrichtung (12) zu dem Ionen-Detektor (13) entlang der Ionen-Transferstrecke (L_m). Die Vorrichtung (1) ist ausgebildet, einen Druck (p_M) entlang der Ionen-Transferstrecke (L_m) zwischen einem ersten, niedrigeren Druckbereich (Δp_1) und einem zweiten, höheren Druckbereich (Δp_2) umzuschalten und die Auswerteeinrichtung (21) ist ausgebildet, in einem ersten Betriebszustand (MS) anhand der Transportzeiten (t_m) der Ionen (11) bei dem Druck (p_M) in dem ersten Druckbereich (Δp_1) eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases (2) durchzuführen und in einem zweiten Betriebszustand (IMS) anhand der Transportzeiten (t_m) der Ionen (11) bei dem Druck (p_M) in dem zweiten Druckbereich (Δp_2) eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases (2) durchzuführen. Die Erfindung betrifft auch eine Lithographieranlage, insbesondere eine EUV- Lithographieranlage, die mindestens eine solche Vorrichtung (1) aufweist.

Vorrichtung zur spektrometrischen Untersuchung eines Gases und Lithographieanlage

Bezugnahme auf verwandte Anmeldung

Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2021 204 046.2 vom 22. April 2021, deren gesamter Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur spektrometrischen Untersuchung eines Gases, umfassend: eine Extraktionseinrichtung zur Extraktion von Ionen des zu untersuchenden Gases aus einer Ionenkammer, einen Ionen-Detektor zur Detektion der Ionen, eine Ionen-Transfereinrichtung zum Transfer der Ionen von der Extraktionseinrichtung zu dem Ionen-Detektor entlang einer Ionen-Transferstrecke, eine Zuführungseinrichtung zur Zuführung eines Bremsgases zu der Ionen-Transferstrecke, sowie eine Auswerteinrichtung zur Bestimmung von Transportzeiten beim Transport der Ionen von der Extraktionseinrichtung zu dem Ionen-Detektor entlang der Ionen-Transferstrecke. Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Lithographieanlage, insbesondere eine EUV-Lithographieanlage, die mindestens eine solche Vorrichtung aufweist. Im Sinne dieser Anmeldung wird unter einem Gas auch ein Gasgemisch, d.h. eine Mischung aus zwei oder mehr Gasen verstanden.

In der Massenspektrometrie („Mass Spectrometry“ oder MS) werden Ionen üblicherweise ins Ultrahochvakuum transportiert, um dort das einheitslose Massenladungsverhältnis (m/z , nachfolgend: „ mz “) eines geladenen Partikels

(in Form eines Ions) mittels der reibungs- oder kollisionsfreien, bekannten Lorentzkraft (1) und des kinetischen Impulserhaltungssatzes (2) bestimmen zu können:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \xi_c \cdot \vec{v} \quad (1)$$

$$\vec{F} = mH \cdot m_z (d\vec{v}/dt) \quad (2)$$

wobei $mH = 1,66056 \times 10^{-27}$ kg die atomare Masseneinheit, $\vec{E}$ die elektrische Feldstärke, $\vec{v}$ die Partikelgeschwindigkeit und $\vec{B}$ die magnetische Feldstärke bezeichnen.

Bei einem höheren Druck stoßen die geladenen Partikel gegen neutrale Moleküle und verursachen sogenannte Stoßverluste, welche in Gleichung (1) durch den Term $(\xi_c \cdot \vec{v})$ berücksichtigt werden. Im Hochvakuum ist die mittlere freie Weglänge der geladenen Partikel groß genug, so dass praktisch keine Stöße stattfinden; in diesem Fall kann der Stoßverlustterm $(\xi_c \cdot \vec{v})$ vernachlässigt werden.

Im Hochvakuumbereich ergibt sich das Massenladungsverhältnis m_z , welches eine Funktion von physikalischen Kenngrößen (z.B. t für sogenannte Time-of-Flight-, TOF-, r für Sektor- und f_{ion} für Ionenresonanz-Massenspektrometer) darstellt:

$$m_z \sim t^2 \quad (3.1)$$

$$m_z \sim r^2 \quad (3.2)$$

$$m_z \sim f(f_{ion}) \quad (3.3)$$

Im Feinvakuum ist dagegen die mittlere freie Weglänge der Partikel klein gegenüber der Partikelflugzeit, so dass mehrere Stöße stattfinden, bevor diese

den Partikel-Detektor erreichen und die durch den Term $(\xi_c \cdot \vec{v})$ hervorgerufenen Stoßverluste nicht vernachlässigt werden können; Partikel mit unterschiedlichen Stoßquerschnitten bewegen sich daher unterschiedlich schnell. Diese Information – auch als Driftzeit bezeichnet – ist besonders von Interesse in der sogenannten Ionenmobilitätsspektroskopie (Ion-Mobility Spectrometry oder IMS), bei der hauptsächlich die Beweglichkeit der Partikel in einem gegebenen Medium, nachfolgend Bremsgas genannt, gemessen wird. Insbesondere ist es möglich, Partikel gleicher Massen (sogenannte isomere Partikel) aber ungleicher Beweglichkeit messtechnisch zu unterscheiden. Ein Massenspektrometer ist demgegenüber in der Regel nicht in der Lage, zwischen Isomeren zu unterscheiden (z.B. zwischen Kohlenwasserstoffen gleicher Masse aber unterschiedlicher Anordnung).

Geladene Partikel (nachfolgend: Ionen) werden üblicherweise in Ionen-Transferoptiken, die auch als Ionen-Transfereinrichtungen (Ion-Guides) bezeichnet werden, z.B. vom Fein- zum Mittelvakuum, elektrisch gebündelt geführt. Wenn die Ionen mit unterschiedlichem Massenladungsverhältnis und/oder Ionenquerschnitten durch einen elektrischen oder magnetischen Ion-Guide eingelassen werden, bewegen sie sich durch das bereitgestellte neutrale Medium in Form des Bremsgases (in der Regel einem leichten Edelgas oder Gasgemisch mit einem Massenladungsverhältnis mz_c) im Mittel mit unterschiedlichen, statistisch wohl definierten Geschwindigkeiten. Die Driftzeit oder Transportzeit t_m am Ende der Ionen-Transferstrecke der Ionen-Transferoptik mit der Länge L_m – in welcher eine rein elektrische Feldstärke $\vec{E}_m$ herrscht – kann gemessen werden und als Maß für die Beweglichkeit der Ionen ausgewertet werden; und unter Einbeziehung von Gleichung (1) im Gleichgewichtszustand (bei annähernd gleicher Partikelgleitgeschwindigkeit) ergibt sich für eine Partikelmasse mz der Ladung q ein „Beweglichkeitsfaktor“ oder eine Mobilität K_m :

$$K_m = q/\xi_c = L_m/(t_m \cdot E_m) \quad (4)$$

Die Mobilität K_m hängt außer von den Massenladungsverhältnissen (mz , mz_c) der Ionen bzw. des Bremsgases auch von den Stoßquerschnitten Ω der Partikel bzw. Ionen, vom Druck p und von der Temperatur T des Bremsgases ab:

$$K_m = f(mz, mz_c, \Omega, p, T) \sim \sqrt{\frac{1}{mz} + \frac{1}{mz_c}} \cdot f_1(\Omega, p, T) \quad (5)$$

In der sogenannten Gas-Chromatographie (GC) werden die Moleküle einer Partikelprobe durch eine lange Driftstrecke geleitet (Kapillare mit einem fließenden Trägergas). Der spezifische Streuquerschnitt jeder Molekülsorte führt zu einer charakteristischen Driftzeit t_m , nach der das Molekül in einem Massenspektrometer (MS) detektiert werden kann. Diese als GC-MS bekannte Analysemethode liefert sowohl Informationen über die Massenverteilung als auch über isomere Molekülstrukturen der Partikelprobe.

Massenspektrometrie und Ionenmobilitäts-Spektrometrie sind somit komplementäre Messmethoden, die gemäß dem Stand der Technik in unterschiedlichen Geräten und Einsatzfeldern durchgeführt werden. Die Verkopplung dieser beiden Messmethoden in einem so genannten Ionen-Mobilitäts-Massenspektrometer ist für viele Anwendungen von großem Interesse, vgl. beispielsweise den Artikel „Deciphering drift time measurements from travelling wave ion mobility spectrometry studies“, David P. Smith et al., EJMS (European Journal of Mass Spectrometry), 15, 113-130 (2009). Eine solche Verkopplung, bei welcher ein Ionen-Mobilitäts-Spektrometer zur Separation der Ionen gemäß ihrer Mobilität und ein Massen-Spektrometer zur Separation der Ionen gemäß ihres Massenladungsverhältnisses hintereinandergeschaltet werden, ist jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden.

Insbesondere für die Massenspektrometrie bringt der Übergang vom Fein- zum Hochvakuumbereich zudem einen erheblichen Aufwand und Herausforderungen mit sich:

- Bereitstellung eines gegenüber dem Feinvakuum-Bereich mindestens um drei Größenordnungen niedrigeren Druckes; d.h. es sind meist Turbomolekularpumpen notwendig
- Bereitstellung einer geeigneten Druckstufe zwischen Fein- und Hochvakuum
- Bereitstellung eines geeigneten Verfahrens und geeigneter Systemkomponenten bei den erschwerten Druckverhältnissen im Hochvakuum mit bekannten Problemen (z.B. Leck, Ausgasung, Temperaturdrift, etc.)
- Anfälligkeit bei Druckbereichsüberschreitung von einigen aktiven Hochvakuum-Systemkomponenten bzw. Partikel-Detektoren (wie z.B. Micro Channel Plates oder Sekundärelektronenvervielfacher, die ein Hochvakuum und einen großen Bauraum benötigen): Degradation, Ladungsüberschlaggefahr, verminderte Betriebszeit, usw.
- hohe Herstellungs-, Betriebs-, Personal- und Servicekosten.

Aus der US 8,953,145 B2 (entsprechend der DE 10 2008 041 592 A1) ist eine EUV-Lithographieanlage bekannt geworden, die ein Gehäuse aufweist, das einen Innenraum umschließt. Eine Vakuumerzeugungseinheit dient zur Erzeugung einer Restgasatmosphäre in dem Innenraum und ein Restgasanalysator dient zur Detektion mindestens eines kontaminierenden Stoffes in der Restgasatmosphäre. Der Restgasanalysator weist eine Speichereinrichtung zur Speicherung des kontaminierenden Stoffes auf. Bei der Speichereinrichtung kann es sich beispielsweise um eine Ionenfalle handeln.

Aufgabe der Erfindung

Es ist die Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung und eine EUV-Lithographieanlage mit einer solchen Vorrichtung bereitzustellen, die eine Untersuchung eines Gases sowohl mittels Massenspektrometrie als auch mittels Ionenmobilitäts-Spektrometrie in einer kompakten Bauweise ermöglichen.

Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung der eingangs genannten Art, welche ausgebildet ist, einen Druck entlang der Ionen-Transferstrecke zwischen einem ersten, niedrigeren Druckbereich und einem zweiten, höheren Druckbereich umzuschalten und bei der die Auswerteeinrichtung ausgebildet ist, in einem ersten Betriebsmodus anhand der Transportzeiten der Ionen bei dem Druck in dem ersten Druckbereich eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases durchzuführen und in einem zweiten Betriebsmodus anhand der Transportzeiten der Ionen bei dem Druck in dem zweiten Druckbereich eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases durchzuführen. Das Umschalten zwischen den beiden Druckbereichen kann durch eine Zuführung des Bremsgases zu der Ionen-Transferstrecke mit Hilfe der Zuführungseinrichtung bzw. eine Abführung des Bremsgases von der Ionen-Transferstrecke mit Hilfe einer geeigneten Einrichtung, z.B. einer Vakuum-Pumpe, erfolgen.

Erfindungsgemäß werden die komplementären Messmethoden der Massenspektrometrie und der Ionenmobilitäts-Spektroskopie in ein- und derselben Vorrichtung auf einem kompakten Bauraum kombiniert. Zu diesem Zweck ist die Vorrichtung ausgebildet, den Druck entlang der Ionen-Transferstrecke zwischen dem ersten und dem zweiten Druckbereich umzuschalten. Der erste, niedrigere Druckbereich ist so gewählt, dass praktisch keine Stöße stattfinden, d.h. der Stoßverlustterm ($\xi_c \cdot \vec{v}$) in Gleichung (1) kann vernachlässigt werden. In diesem Fall kann die Auswerteeinrichtung in dem

ersten Betriebsmodus anhand der Transportzeit(en) t der Ionen z.B. unter Verwendung der Gleichung (3.1) in bekannter Weise eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases durchführen, d.h. das Massenladungsverhältnis mz bestimmen. Der zweite, höhere Druckbereich ist so gewählt, dass der Stoßverlustterm ($\xi_c, \vec{v}$) in Gleichung (1) nicht vernachlässigt werden kann. In diesem Fall kann die Auswerteeinrichtung in dem zweiten Betriebsmodus anhand der Gleichungen (4) bzw. (5) bzw. der in dem oben zitierten Artikel von David P. Smith im Detail erläuterten Methode die Mobilität K_m der Ionen bestimmen, d.h. eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung der Ionen des zu untersuchenden Gases vornehmen.

Beide spektrometrischen Methoden haben die weiter oben beschriebenen Vorteile, die in der vorliegenden Vorrichtung kombiniert genutzt werden können. Für den Fall, dass das Bremsgas schnell zu- und abgeführt werden kann, kann schnell zwischen einer kollisionsfreien Messung in dem ersten Betriebsmodus und einer kollisionsbehafteten Messung in dem zweiten Betriebsmodus umgeschaltet werden. Insbesondere bei einer schnellen und alternierenden Messung, d.h. bei einer schnellen Umschaltung zwischen den beiden Betriebsmodi können in ein- und derselben Vorrichtung sowohl die Beweglichkeit der geladenen Partikel bzw. Ionen als auch die deren Massen zeitnah gemessen werden. Mit Hilfe der Vorrichtung können insbesondere Isomere, d.h. Partikel mit derselben Molekülmasse und demselben Massenladungsverhältnis aber mit unterschiedlicher Beweglichkeit, unterschieden werden.

Der Begriff der „Transportzeit“ wird in dieser Anmeldung unabhängig davon verwendet, ob die Vorrichtung in dem ersten Betriebsmodus oder in dem zweiten Betriebsmodus betrieben wird, d.h. insbesondere unabhängig davon, ob der Ionen-Transferstrecke ein Bremsgas zugeführt wurde oder nicht, d.h. unabhängig vom Partialdruck des Bremsgases.

Bei einer Ausführungsform gilt für einen maximalen Druck $p_{1\max}$ des ersten Druckbereichs und für einen minimalen Druck $p_{2\min}$ des zweiten Druckbereichs: $p_{2\min} / p_{1\max} > 100$, bevorzugt > 1000 . Um in dem ersten Betriebsmodus praktisch keine Stoßverluste und in dem zweiten Betriebsmodus ausreichend große Stoßverluste zu erzeugen, sollte der zweite Druckbereich typischerweise mindestens zwei Größenordnungen, idealerweise mindestens drei Größenordnungen über dem ersten Druckbereich liegen, d.h. die beiden Druckbereiche sollten ausreichend weit auseinanderliegen.

Bei dem ersten Druckbereich handelt es sich typischerweise um den Hochvakuumbereich. Beispielsweise kann der erste Druckbereich unter einem maximalen Druck von 10^{-4} mbar und bevorzugt über einem minimalen Druck von 10^{-5} mbar liegen. Der maximale Druck und der minimale Druck können aber auch größer oder kleiner als die hier angegebenen Werte sein. Unter dem Begriff „Hochvakuumbereich“ wird im Sinne dieser Anmeldung verstanden, dass praktisch keine Partikelstöße in der Vorrichtung bzw. entlang der Ionen-Transferstrecke stattfinden.

Bei dem zweiten Druckbereich handelt es sich typischerweise um den Mittel- oder Feinvakuumbereich, beispielsweise kann der zweite Druckbereich über einem minimalen Druck von 10^{-2} mbar und bevorzugt unter einem maximalen Druck von 10^0 mbar liegen. Der minimale Druck und insbesondere der maximale Druck können auch kleiner bzw. größer als die hier angegebenen Werte sein. Beispielsweise kann der maximale Druck auch bei 10^1 mbar oder darüber liegen. Der Druck in dem zweiten Druckbereich kann hauptsächlich durch den Partialdruck des Bremsgases bestimmt werden, das über die Zuführungseinrichtung der Ionen-Transferstrecke zugeführt wird. Bei dem Bremsgas kann es sich um ein leichtes Edelgas (z.B. um Helium), um ein leichtes Prozessgas (z.B. um Wasserstoff), um ein anderes geeignetes Gas (z.B. um Stickstoff) oder um ein Gasgemisch (z.B. um Luft) handeln.

In dem ersten Betriebsmodus liegt der (untere) Betriebsdruck, d.h. der Druck entlang der Ionen-Transferstrecke, bei einem vorgegebenen bzw. einstellbaren Wert innerhalb des ersten Druckbereichs. Im zweiten Betriebsmodus liegt der (obere) Betriebsdruck, d.h. der Druck entlang der Ionen-Transferstrecke, bei einem vorgegebenen bzw. einstellbaren Wert innerhalb des zweiten Druckbereichs. Der Betriebsdruck kann ggf. dauerhaft in dem ersten Druckbereich liegen, wenn mit der Vorrichtung nur eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases in dem ersten Betriebsmodus vorgenommen werden soll. Der Betriebsdruck kann ggf. auch dauerhaft in dem zweiten Druckbereich (Fein- oder Mittelvakuum) liegen, wenn mit der Vorrichtung nur eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung durchgeführt werden soll. In Abhängigkeit von der spezifizierten Massen- bzw. Isomeren-Auflösung können die Länge der kollisionsfreien oder kollisionsbehafteten Ionen-Transferstrecke und die Druckbereiche, d.h. der erste Druckbereich und der zweite Druckbereich, angepasst werden.

Die Detektion der geladenen Partikel bzw. Ionen kann direkt im Fein-, Mittel- oder Hochvakuumbereich mit Hilfe des Ionen-Detektors erfolgen. Ein geeigneter Ionen-Detektor muss somit gegenüber Druckbereichs-überschreitungen – d.h. auch für Drücke oberhalb des Feinvakuumbereichs – robust ausgelegt sein. Der Ionen-Detektor sollte zudem degradationsfrei arbeiten und benötigt einen Dynamikbereich in der Größenordnung von ca. 5-6 Dekaden, um in beiden Druckbereichen Ionen detektieren zu können.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Ionen-Transferstrecke in einer Messkammer gebildet, wobei die Zuführungseinrichtung zur Zuführung des Bremsgases zu der Messkammer bevorzugt mindestens ein insbesondere regelbares Ventil aufweist. Die Zuführungseinrichtung stellt das Bremsgas, z.B. ein Edelgas oder ein Gasgemisch (s.o.), mit dem notwendigen Partialdruck bereit, um in dem zweiten Betriebszustand in der Messkammer einen gewünschten Partialdruck des Bremsgases zu erzeugen.

Bei einer Weiterbildung dieser Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine erste Vakuum-Pumpe zum Abpumpen der Messkammer, wobei die erste Vakuum-Pumpe mit der Messkammer bevorzugt über mindestens ein insbesondere regelbares Ventil verbunden ist. Die Vakuum-Pumpe kann mit Hilfe des (regelbaren) Ventils die Messkammer evakuieren. Mit Hilfe der Zuführungseinrichtung bzw. über deren ebenfalls regelbares Ventil kann das Bremsgas der Messkammer zugeführt werden, um den gewünschten Druck in der Messkammer und somit entlang der Ionen-Transferstrecke einzustellen. Der Druck in der Messkammer kann auf diese Weise beispielsweise über einen vergleichsweise großen Bereich z.B. zwischen ca. 10^{-5} mbar und 10^0 mbar eingestellt werden. Mit Hilfe der Ventile, bei denen es sich um Absperr-, Durchlass- bzw. Regelventile handeln kann, ist ein schnelles Umschalten zwischen dem ersten Druckbereich und dem zweiten Druckbereich möglich. Es versteht sich, dass es sich bei den Ventilen der Zuführungseinrichtung und der Vakuum-Pumpe nicht zwingend um getrennte Bauteile handeln muss, vielmehr können diese in Form einer gemeinsamen Ventilanordnung realisiert sein.

Die Steuerung bzw. die Regelung der Ventile der Zuführungseinrichtung und der ersten Vakuum-Pumpe kann von der Auswerteeinrichtung oder von einer separaten Steuerungseinrichtung vorgenommen werden. In der Regel steuert die Auswerteeinrichtung alle Einheiten der Vorrichtung, liest den Ausgang bzw. die Ausgänge des Ionen-Detektors aus und wertet deren Zustand bzw. deren Ergebnisse aus.

In der Messkammer ist typischerweise die Extraktionseinrichtung, die Ionen-Transfereinrichtung und der Teil des Ionen-Detektors angeordnet, der zur Erfassung der Ionen dient und der zu diesem Zweck eine Messelektrodenanordnung mit mindestens einer Messelektrode aufweist. Die Ionen-Transferstrecke bildet in der Regel eine gerade Linie, die sich in der Ionen-Transfereinrichtung zwischen der Extraktionseinrichtung und dem Ionen-

Detektor erstreckt. Die Ionen-Transferstrecke kann aber auch z.B. eine kompakte, mäanderartige Form – mit geeignetem elektrischem Feldverlauf entlang der Ionen-Transferstrecke – aufweisen.

Die Ionen-Transfereinrichtung ist zwischen der Extraktionseinrichtung und dem Ionen-Detektor angeordnet. Im einfachsten Fall handelt es sich bei der Extraktionseinrichtung um eine Elektrode, die einen schnellen Extraktionspuls (z.B. $t_E < 100$ ns) erzeugt, welcher die Ionen aus der Ionenkammer in Richtung auf die Ionen-Transfereinrichtung beschleunigt. Die Ionen-Transfereinrichtung leitet die Ionen in Richtung auf den Ionen-Detektor bzw. in Richtung auf die Messelektrode(n) des Ionen-Detektors.

Bei einer weiteren Ausführungsform sind die Ionenkammer und die Messkammer in einem gemeinsamen Gehäuse gebildet, wobei die Ionenkammer bevorzugt über eine Blendenöffnung mit der Messkammer in Verbindung steht. In diesem Fall werden die Ionenkammer und die Messkammer in der Regel differentiell gepumpt, d.h. diesen sind autonome Pumpstufen bzw. Vakuum-Pumpen zugeordnet, die es ermöglichen, den Druck in der Messkammer und den Druck in der Ionenkammer im Wesentlichen unabhängig voneinander einzustellen.

Bei einer weiteren Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine zweite Vakuum-Pumpe zum Abpumpen der Ionenkammer, wobei die zweite Vakuum-Pumpe mit der Ionenkammer bevorzugt über mindestens ein insbesondere regelbares Ventil verbunden ist. Mit Hilfe der Vakuum-Pumpe bzw. des (regelbaren) Ventils kann in der Ionenkammer ein konstanter Druck, z.B. in der Größenordnung von ca. 10^{-2} mbar oder 10^{-1} mbar eingestellt werden, was günstig ist, um in der Ionenkammer das zu untersuchende Gas zu speichern. Der Druck in der Ionenkammer, der mit der zweiten Vakuum-Pumpe eingestellt wird, ist in der Regel größer als der Druck in der Messkammer, die mit der Ionenkammer verbunden ist. Es versteht sich, dass die erste und zweite

Vakuum-Pumpe nicht als zwei separate Bauteile ausgebildet sein müssen, sondern beispielsweise zwei unterschiedliche Anschlüsse einer gemeinsamen Vakuum-Pumpe bilden können.

Bei einer weiteren Ausführungsform umfasst die Vorrichtung einen Gas-Einlass zum Einlassen des zu untersuchenden Gases in die Ionenkammer, wobei der Gas-Einlass zum Einlassen des zu untersuchenden Gases bevorzugt mindestens ein insbesondere regelbares Ventil aufweist. Das zu untersuchende Gas bzw. die Partikel können über den Gas-Einlass aus einer Probenkammer entnommen werden, in der sich das zu untersuchende Gas befindet. Es ist möglich, dass das zu untersuchende Gas in der Probenkammer bereits im ionisierten Zustand vorliegt. Alternativ wird das zu untersuchende Gas im neutralen Zustand aus der Probenkammer entnommen und der Ionenkammer zugeführt, in der dieses ionisiert wird.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist in der Ionenkammer eine Ionenfalle zur Speicherung, Akkumulierung und/oder Filterung von Ionen des zu untersuchenden Gases angeordnet. Die in der Ionenfalle gespeicherten Ionen stellen eine räumlich gebündelte Partikel- bzw. Ionenquelle dar. Die gespeicherten Ionen können innerhalb einer vorgegebenen Akkumulationszeit gespeichert bzw. akkumuliert werden und zu einem gewünschten Zeitpunkt mit Hilfe der Extraktionseinrichtung aus der Ionenkammer in die Messkammer extrahiert werden. Insbesondere kann eine Extraktion von Ionen einer in der Ionenfalle gespeicherten Ionenpopulation mehrmals aufeinander folgend durchgeführt werden, wobei die Auswerteeinrichtung zwischen einer ersten Extraktion und einer nachfolgenden zweiten Extraktion von dem ersten Betriebszustand in den zweiten Betriebszustand (oder umgekehrt) umgeschaltet wird und auch die Druckbereiche entsprechend angepasst werden. Auf diese Weise kann an ein- und derselben Ionenpopulation sowohl eine massenspektrometrische Untersuchung als auch eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung durchgeführt werden.

Die Akkumulation der Ionen in der Ionenfalle erhöht die Nachweisgrenze bzw. verbessert das Signal-zu-Rausverhältnis bei der Messung. Mit Hilfe der Ionenfalle können die in die Ionenkammer zugeführten Ionen auch gezielt gefiltert werden, d.h. es werden nur Ionen mit bestimmten Massenladungsverhältnissen in der Ionenfalle gespeichert. Grundsätzlich ist auch eine in-situ-Analyse der gespeicherten Ionen in der Ionenfalle möglich, aufgrund des vergleichsweise großen Drucks in der Ionenkammer ist eine solche Analyse aber in der Regel nicht einfach durchzuführen.

Anders als bei der oben beschriebenen GC-MS Methode werden bei der hier beschriebenen Vorrichtung stets – d.h. während der (elektrischen) Separation oder Akkumulation der Ionen in der Ionenfalle, während des Transfers und während der Detektion – geladene Partikel bzw. Ionen mit oder ohne Bremsgaszufuhr beeinflusst. Die Art und der Druck des Bremsgases, die Fließrichtung des Bremsgases sowie die kinetische Energie der Ionen - über die Beschleunigungsspannung der Extraktionseinrichtung - sind frei wählbare bzw. optimierbare Parameter.

Bei einer weiteren Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine Ionisierungseinrichtung zur Ionisierung des zu untersuchenden Gases in der Ionenkammer, insbesondere in der Ionenfalle. Die Ionisierung des zu untersuchenden Gases in der Ionenkammer kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Beispielsweise kann die Ionisierungseinrichtung zur Elektronenstoßionisation dienen und z.B. als Elektronenkanone ausgebildet sein. Die Ionisierungseinrichtung kann insbesondere ausgebildet sein, das zu untersuchende Gas direkt in der Ionenfalle zu ionisieren. Eine solche Ionisierungseinrichtung ist aber nicht zwingend erforderlich, vielmehr kann das zu untersuchende Gas der Ionenkammer im ionisierten Zustand zugeführt werden, wie dies weiter unten beschrieben wird.

Bei einer weiteren Ausführungsform weist der Ionen-Detektor eine Messelektrodenanordnung, bevorzugt einen Faraday-Becher, zum Erfassen der Ionen und eine Detektionseinrichtung zur Detektion der von der Messelektrodenanordnung erfassten Ionen auf. Die Messelektrodenanordnung weist im einfachsten Fall eine einzelne Messelektrode auf, die als Faraday-Becher ausgebildet ist. Ein solcher Faraday-Becher ermöglicht es, dass alle die durch eine geeignete Eingangsblende eingesaugten Partikel bzw. Ionen praktisch rückstreuungsfrei von der Detektionseinrichtung aufgenommen werden. Die Detektionseinrichtung ist typischerweise als Detektions-Elektronik ausgebildet und kann z.B. zur Detektion der Ionen anhand eines Stroms ausgebildet sein, der von den an der Messelektrodenanordnung erfassten Ionen erzeugt wird. Alternativ kann die Detektionseinrichtung einen Ladungs-Verstärker zur Umwandlung eines von den Ionen erzeugten Ladungssignals in ein Spannungssignal und eine Verstärker-Einrichtung zur Verstärkung des Spannungssignals aufweisen. Die Messelektronik soll vorzugsweise eine schnelle und rauscharme Detektion der Ionen mit einer Dynamik von 5 bis 6 Dekaden bereitstellen.

Bei einer Weiterbildung weist die Messelektrodenanordnung eine zentrale Messelektrode auf, die von einer bevorzugt ringförmigen Hauptelektrode umgeben ist. Es hat sich als günstig erwiesen, mindestens zwei Messelektroden in der Messelektrodenanordnung vorzusehen, wobei eine erste Messelektrode bevorzugt eine zentrale Messelektrode (Fokuselektrode) bildet, die in der Regel einen vergleichsweise geringen Durchmesser aufweist und die hauptsächlich zur Erfassung von stark gekühlten Ionen in dem zweiten Druckbereich (z.B. zwischen 10^{-3} mbar und 10^{-2} mbar) dient. Eine zweite, in der Regel ringförmige Messelektrode dient hauptsächlich zur Erfassung von schwach gekühlten Ionen in dem ersten Druckbereich (z.B. bei einem Druck von ca. 10^{-5} mbar). Die zentrale Messelektrode und die ringförmige Messelektrode sind elektrisch isoliert und bilden gemeinsam einen Faraday-

Becher. Die zentrale Messelektrode ist hierbei typischerweise im Zentrum des Bodens des Faraday-Bechers angeordnet.

Bei einer weiteren Weiterbildung ist die ringförmige Hauptelektrode segmentiert und weist mindestens zwei Ringsegmente, bevorzugt vier Ringsegmente auf. Die Ringsegmente sind in Umfangsrichtung gleichmäßig verteilt und weisen typischerweise einen jeweils gleich großen Flächeninhalt auf. Die Segmentierung der ringförmigen Hauptelektrode z.B. in vier Quadranten ermöglicht eine richtungssensitive Aufzeichnung bzw. Messung des Ionenstrahls: Im Idealfall verteilt sich der Ionenstrahl gleichanteilig auf alle z.B. vier Segmente bzw. Quadranten. Die Detektionseinrichtung in Form der Detektionselektronik weist typischerweise eine Anzahl von Eingängen (und von Ausgängen) auf, die der Anzahl von elektrisch isolierten Messelektroden bzw. Messelektrodensegmenten entspricht. Im Falle der hier beschriebenen Messelektrodenanordnung mit der zentralen Messelektrode und der in vier Quadranten unterteilten Hauptelektrode weist die Detektionseinrichtung fünf Eingänge auf.

Um den gesamten Ionenstrahl zu detektieren, kann die Detektionseinrichtung ausgebildet sein, alle Messelektroden zusammenzuschalten bzw. die Eingänge miteinander zu verbinden. Zur Detektion lediglich der schwach gekühlten Ionen können die Segmente der segmentierten Hauptelektrode zusammengeschaltet werden, während die zentrale Messelektrode die stark gekühlten Ionen gesondert aufzeichnet. Es ist ebenfalls möglich, dass eine oder mehrere der Segmente der Hauptelektrode und die zentrale Messelektrode beliebig kombiniert bzw. zusammengeschaltet werden, um die Drift- oder Flugeigenschaften der Ionen besonders zu analysieren. Beispielsweise können hierbei Drift- oder Flugeigenschaften von Isomeren gemessen und ausgewertet werden.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Auswerteeinrichtung ausgebildet, im zweiten Betriebsmodus anhand von unterschiedlichen Transportzeiten von Ionen mit gleichem Massenladungsverhältnis isomere Stoffe zu identifizieren. Wird das Massenladungsverhältnis von Ionen, die in der Ionenfalle gespeichert bzw. akkumuliert werden, in einem ersten Experiment bzw. in dem ersten Betriebszustand ohne Stoßprozesse bzw. ohne Bremsgas gewonnen und gegen die Transportzeiten in dem zweiten Betriebszustand aufgetragen, ergibt sich, dass monomere Stoffe eine einheitliche Transportzeit bzw. eine einheitliche Driftzeitspanne mit einem Verteilungsprofil aufweisen, das um eine einzige (mittlere) Transportzeit verteilt ist. Isomere Stoffe weisen dagegen mindestens zwei Driftzeitspannen mit entsprechenden Verteilungsprofilen auf, die um mindestens zwei (mittlere) Transportzeiten konzentriert sind. Daher können mit Hilfe der hier beschriebenen Vorrichtung isomere Stoffe voneinander unterschieden werden.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Lithographieanlage, insbesondere eine EUV-Lithographieanlage, umfassend: ein Gehäuse, das einen Innenraum umschließt, in dem mindestens ein optisches Element angeordnet ist, sowie mindestens eine Vorrichtung, die wie weiter oben beschrieben ausgebildet ist und die mit dem Innenraum in Verbindung steht, um der Ionenkammer das zu untersuchende, bevorzugt in dem Innenraum ionisierte Gas zuzuführen. In einem Innenraum einer Lithographieanlage, speziell einer EUV-Lithographieanlage, ist typischerweise ein geringer Anteil an Wasserstoff enthalten. Im Belichtungsbetrieb wird aufgrund der dort vorhandenen EUV-Strahlung ein Plasma und somit geladene Partikel bzw. Ionen erzeugt. Die Ionen, die in diesem Fall unmittelbar in dem Gehäuse der Lithographieanlage erzeugt werden, können in diesem Fall in der Regel direkt, d.h. im ionisierten Zustand, über den Gas-Einlass in die Ionenkammer der Vorrichtung eingebracht werden. In der Ionenkammer können die Ionen des zu untersuchenden Gases in der Ionenfalle gespeichert, akkumuliert und ggf. in-

situ nicht destruktiv analysiert werden, wie dies in der eingangs zitierten US 8,953,145 B2 beschrieben ist.

Wie dies weiter oben in Zusammenhang mit der Vorrichtung beschrieben wurde, können die Ionen mit Hilfe der Extraktionseinrichtung bzw. mit Hilfe eines schnellen Extraktionspulses aus der Ionenkammer extrahiert und der Messkammer zugeführt werden. Über die Ionen-Transfereinrichtung gelangen die Ionen zu dem Ionen-Detektor, wobei abhängig vom Betriebszustand der Vorrichtung eine massenspektrometrische Untersuchung oder eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung der Ionen vorgenommen werden kann. Der Druck in dem Innenraum einer EUV-Lithographieanlage kann beispielsweise in der Größenordnung von ca. 3×10^{-2} mbar bis 10^{-1} mbar liegen und wird im Wesentlichen durch den Wasserstoff-Partialdruck bestimmt. Der Druck in der Ionenkammer kann in der gleichen Größenordnung oder darunter, z.B. bei ca. 10^{-2} mbar, liegen.

Bei einer Ausführungsform ist die Zuführungseinrichtung ausgebildet, der Ionen-Transferstrecke als Bremsgas ein in dem Innenraum vorhandenes Gas, insbesondere Wasserstoff, zuzuführen. Wie weiter oben beschrieben wurde, wird im Betrieb der Vorrichtung in dem Innenraum des Gehäuses ein Wasserstoffplasma gebildet. Der in dem Innenraum des Gehäuses vorhandene Wasserstoff kann daher aus ein- und demselben Gehäuse bzw. derselben Probenkammer entnommen werden wie das zu untersuchende Gas. Der Wasserstoff kann zu diesem Zweck beispielsweise mit Hilfe eines steuerbaren Mikroventils aus dem Innenraum entnommen und der Messkammer zugeführt werden.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist in dem Innenraum eine Strömungsleiteinrichtung angeordnet, die dem Gas-Einlass der Vorrichtung das zu untersuchende Gas mit einer im Wesentlichen senkrecht zu einer Richtung der Ionen-Transferstrecke ausgerichteten Geschwindigkeit zuführt. Für die

Entnahme des ionisierten, zu untersuchenden Gases weist der Gas-Einlass typischerweise ein steuerbares Ventil, z.B. ein Piezo-Ventil, auf. Durch die Strömungsleiteinrichtung kann dafür gesorgt werden, dass die Ionen eine Vorzugsrichtung besitzen, die im Wesentlichen nur eine zur Einlassrichtung durch den Gas-Einlass senkrechte Geschwindigkeitskomponente $\vec{V}_M$ aufweist, die senkrecht zur Richtung der (in der Regel geradlinig verlaufenden) Ionen-Transferstrecke verläuft.

Für den (beispielhaften) Fall, dass die Richtung der Ionen-Transferstrecke bzw. die Einlassrichtung in X-Richtung verläuft, wird unter einer im Wesentlichen senkrecht zur Richtung der Ionen-Transferstrecke ausgerichteten Geschwindigkeit verstanden, dass für eine Geschwindigkeitskomponente des Gases in X-Richtung $V_{M,x}$ gilt: $V_{M,x} < V_{M,y}/10$. Hierbei wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass das Gas nur eine Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung aufweist. Im allgemeinen Fall ist die Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung $V_{M,y}$ durch den Betrag der vektoriellen Summe aus der Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung $V_{M,y}$ und der Geschwindigkeitskomponente in Z-Richtung $V_{M,z}$ zu ersetzen.

Bei der Strömungsleiteinrichtung kann es sich beispielsweise um ein Rohr oder dergleichen handeln, welches senkrecht zur Öffnung des Gas-Einlasses bzw. des Ventils des Gas-Einlasses ausgerichtet ist, so dass das in dem Innenraum enthaltene Gas im Wesentlichen senkrecht zur Öffnung des Gas-Einlasses an diesem vorbeiströmt und daher die gewünschte Geschwindigkeits-Komponente aufweist. Mit Hilfe der Strömungsleiteinrichtung kann erreicht werden, dass die Geschwindigkeitskomponente der Ionen in Richtung der Ionen-Transferstrecke nahezu Null ist, um möglichst lange Transportzeiten der Ionen zu erreichen und auf diese Weise das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen der Erfindung, anhand

der Figuren der Zeichnung, die erfindungswesentliche Einzelheiten zeigen, und aus den Ansprüchen. Die einzelnen Merkmale können je einzeln für sich oder zu mehreren in beliebiger Kombination bei einer Variante der Erfindung verwirklicht sein.

Zeichnung

Ausführungsbeispiele sind in der schematischen Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung erläutert. Es zeigt

- Fig. 1 schematisch eine Vorrichtung zur massenspektrometrischen und zur Ionenmobilitäts-spektrometrischen Untersuchung eines Gases, die eine Ionen-Transferstrecke aufweist, der ein Bremsgas zuführbar ist,
- Fig. 2 eine schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs der Ionen entlang der Ionen-Transferstrecke in Abhängigkeit vom Druck sowie eines ersten und zweiten Druckbereichs, in denen die Vorrichtung betrieben wird,
- Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Messelektrodenanordnung und einer Detektionseinrichtung eines Ionen-Detektors der Vorrichtung von Fig. 1,
- Fig. 4a,b schematische Darstellungen von Eingangs- und Ausgangssignalen der Detektionseinrichtung des Ionen-Detektors,
- Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Spektrums eines Gemischs aus einem monomeren Stoff und einem isomeren Stoff, sowie
- Fig. 6 eine Darstellung eines Details einer EUV-Lithographieanlage, die ein Gehäuse mit einem Innenraum und eine Vorrichtung zur

spektrometrischen Untersuchung eines in dem Innenraum befindlichen, zu untersuchenden Gases aufweist.

In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw. funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1 zeigt eine Vorrichtung 1 zur spektrometrischen Untersuchung eines Gases 2, das in einem Innenraum 3a einer Probenkammer 3 enthalten ist. Die Vorrichtung 1 umfasst ein Gehäuse 4, das eine Ionenkammer 5 und eine Messkammer 6 aufweist. Die Ionenkammer 5 steht mit der Messkammer 6 über eine Blendenöffnung 7 (Druckstufe) in Verbindung.

In der Ionenkammer 5 ist eine Ionenfalle 8 angeordnet. Die Ionenfalle 8 ist im gezeigten Beispiel in bekannter Weise in der Art einer Penning-Falle ausgebildet und weist eine Ringelektrode sowie zwei Deckelelektroden auf. Das von der Probenkammer 3 über einen Gas-Einlass 9 mit Hilfe eines Ventils 9a in die Ionenkammer 5 eingelassene Gas 2 wird mit Hilfe einer Ionisierungseinrichtung 10 unmittelbar in der Ionenfalle 8 ionisiert. Im gezeigten Beispiel handelt es sich bei der Ionisierungseinrichtung 10 um eine Elektronenkanone, die einen Elektronenstrahl erzeugt, der in Richtung auf das Zentrum der Ionenfalle 8 ausgerichtet ist. Durch den Elektronenstrahl wird das Gas 2 innerhalb der Ionenfalle 8 ionisiert, d.h. es werden Ionen 11 des zu untersuchenden Gases 2 innerhalb der Ionenfalle 8 gebildet. Die Ionen 11 werden auf bekannte Weise mit Hilfe von elektrischen bzw. magnetischen Feldern im Zentrum der Ionenfalle 8 konzentriert und somit räumlich gebündelt. Die Ionisierungseinrichtung 10 kann ggf. zusätzlich eine Steuerungseinrichtung aufweisen, welche die Ionenfalle 8 ansteuert, um die Ionen 11 zu speichern, zu akkumulieren, etc. Zusätzlich zur Speicherung bzw. zur Akkumulierung der Ionen 11 kann die Ionenfalle 8 auch zur Filterung der Ionen 11 des zu untersuchenden Gases 2 dienen: Beispielsweise können gezielt Ionen 11 mit

bestimmten Massenladungsverhältnissen angeregt werden, um diese aus der Ionenfalle 8 zu entfernen.

Die in der Ionenfalle 8 gespeicherten Ionen 11 können mit Hilfe einer Extraktionseinrichtung 12, die im gezeigten Beispiel in Form einer ringförmigen Elektrode ausgebildet ist, aus der Ionenkammer 5 extrahiert werden. Die Extraktionseinrichtung 12 ist im gezeigten Beispiel in der Messkammer 6 angeordnet. Durch die Vorgabe einer Beschleunigungsspannung, die an die Extraktionseinrichtung 12 in Form der Elektrode angelegt wird, kann die kinetische Energie der Ionen 11, die aus der Ionenkammer 5 extrahiert werden, eingestellt werden.

In der Messkammer 6 ist ein Ionen-Detektor 13 angeordnet, der zur Detektion der aus der Ionenkammer 5 extrahierten Ionen 11 dient. Die Ionen 11 werden dem Ionen-Detektor 13 mit Hilfe einer Ionen-Transfereinrichtung 14 (Ionen-Optik) entlang einer im Wesentlichen geradlinigen Trajektorie 15 ausgehend von der Extraktionseinrichtung 12 bzw. vom Zentrum der Ionenfalle 8 zugeführt. Ein Abschnitt dieser Trajektorie 15, der sich von der Extraktionseinrichtung 12 über die Ionen-Transfereinrichtung 14 bis zu dem Ionen-Detektor 13, genauer gesagt bis zu einer Elektrodenanordnung 22 (s.u.) des Ionen-Detektors 13 erstreckt, bildet eine Ionen-Transferstrecke L_m . In einem Abschnitt der Ionen-Transferstrecke L_m innerhalb der Ionen-Transfereinrichtung 14 herrscht ein elektrisches Feld mit einer elektrischen Feldstärke $\vec{E}_m$. Das elektrische Feld kann auch dynamische Komponenten – z.B. zur radialen Fokussierung der Ionen – aufweisen.

Die Vorrichtung 1 weist auch eine Zuführungseinrichtung 16 zur Zuführung eines Bremsgasen 17 zu der Messkammer 6 und somit zu der Ionen-Transferstrecke L_m auf. Das Bremsgas 17 wird zu diesem Zweck einem Innenraum 18a eines Bremsgasreservoirs 18 entnommen. Für die Entnahme des Bremsgasen 17 aus dem Bremsgasreservoir 18 weist die

Zuführungseinrichtung 16 ein Ventil 16a auf. Bei dem Bremsgas 17 kann es sich um ein leichtes Edelgas (z.B. um Helium), um ein leichtes Prozessgas (z.B. um Wasserstoff), um ein anderes geeignetes Gas (z.B. um Stickstoff) oder um ein Gasgemisch (z.B. um Luft) handeln.

Die Ionenkammer 5 und die Messkammer 6 werden differentiell gepumpt und stehen nur über die Blendenöffnung 7 miteinander in Verbindung. Ein Druck p_i in der Ionenkammer 5 und ein Druck p_M in der Messkammer 6 können daher im Wesentlichen unabhängig voneinander eingestellt werden. In der Regel ist der Druck p_i in der Ionenkammer 5 größer als der Druck p_M in der Messkammer 6.

Die Vorrichtung 1 umfasst auch eine erste Vakuum-Pumpe 19 zum Abpumpen der Messkammer 6, die mit der Messkammer 6 über ein Ventil 19a verbunden ist, sowie eine zweite Vakuum-Pumpe 20 zum Abpumpen der Ionenkammer 5, die mit der Ionenkammer 5 über ein Ventil 20a verbunden ist. Bei dem Ventil 9a des Gas-Einlasses 9, dem Ventil 16a der Zuführungseinrichtung 16 sowie bei den Ventilen 19a, 20a der ersten bzw. der zweiten Vakuum-Pumpen 19, 20 handelt es sich um steuer- oder ggf. regelbare Ventile, die zumindest zwischen zwei Betriebszuständen umschaltbar sind, die zur Absperrung bzw. zum Durchlass von Gas durch einen jeweiligen Strömungsquerschnitt ausgebildet sind.

Mit Hilfe der zweiten Vakuum-Pumpe 20 bzw. des entsprechenden Ventils 20a kann ein Druck p_i in der Ionenkammer 5 eingestellt und auf einen in der Regel konstanten Wert geregelt werden, der beispielsweise in der Größenordnung von ca. 10^{-2} mbar oder darunter liegt. Die Messkammer 6 wird mit Hilfe der ersten Vakuum-Pumpe 19 bzw. des zugehörigen Ventils 19a evakuiert, d.h. mit Hilfe der ersten Vakuum-Pumpe 19 kann der Druck p_M in der Messkammer 6 gesenkt werden. Mit Hilfe der Zuführungseinrichtung 16 bzw. des entsprechenden Ventils 16a kann der Messkammer 6 das Bremsgas 17 zugeführt werden, was den Druck p_M in der Messkammer 6 erhöht. Der Druck

p_M in der Messkammer 6 kann mit Hilfe der Zuführungseinrichtung 16 und mit Hilfe der ersten Vakuum-Pumpe 19 in einem großen Wertebereich zwischen ca. 10^{-5} mbar und ca. 10^0 mbar eingestellt werden. Der Druck p_M in der Messkammer 6 wird hierbei im Wesentlichen durch den Partialdruck des Bremsgases 17 in der Messkammer 6 bestimmt.

Die Vorrichtung 1 weist auch eine Auswerteeinrichtung 21 („Measurement Process Unit“) auf, welche unter anderem dazu dient, alle wesentlichen Funktionen der Vorrichtung 1 zu steuern: Die Auswerteeinrichtung 21 dient beispielsweise dazu, das Ventil 9a des Gas-Einlasses 9, das Ventil 16a der Zuführungseinrichtung 16, das Ventil 19a der ersten Vakuum-Pumpe 19 und das Ventil 20a der zweiten Vakuum-Pumpe 20 anzusteuern. Zusätzlich steuert die Auswerteeinrichtung 21 die Ionisierungseinrichtung 10 bzw. die Ionenfalle 8, die Extraktionseinrichtung 12 und die Ionen-Transfereinrichtung 14 (zur Einstellung der elektrischen Feldstärke $\overrightarrow{E_m}$) an. Die Auswerteeinrichtung 21 kann in Form einer geeigneten Hard- und/oder Software realisiert sein. Bei der Auswerteeinrichtung 21 kann es sich beispielsweise um eine Elektronik handeln, die zur digitalen Verarbeitung von Signalen ausgebildet ist. Die Auswerteeinrichtung 21 kann über eine Digitalschnittstelle oder dergleichen mit einem Messcomputer in signaltechnischer Verbindung stehen.

Die Auswerteeinrichtung 21 dient auch zur Bestimmung von Transportzeiten t_m beim Transport der Ionen 11 von der Extraktionseinrichtung 12 zu dem Ionen-Detektor 13 entlang der Ionen-Transferstrecke L_m . Die Auswerteeinrichtung 21 ermöglicht es, anhand der Transportzeiten t_m wahlweise eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases 2 oder eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases 2 vorzunehmen. Um dies zu ermöglichen, ist es erforderlich, den Druck p_M in der Messkammer 6 und somit entlang der Ionen-Transferstrecke L_m zwischen einem ersten, niedrigeren Druckbereich Δp_1 zweiten, höheren Druckbereich Δp_2 umzuschalten (vgl. **Fig. 2**).

Der erste, niedrigere Druckbereich Δp_1 ist so gewählt, dass praktisch keine Stöße der Ionen 11 stattfinden, d.h. der Stoßverlustterm ($\xi_c \cdot \vec{v}$) in der oben angegebenen Gleichung (1) kann vernachlässigt werden. Der zweite, höhere Druckbereich Δp_2 ist so gewählt, dass der Stoßverlustterm ($\xi_c \cdot \vec{v}$) in Gleichung (1) nicht vernachlässigt werden kann. Daher kann die Auswerteeinrichtung 21 in einem ersten Betriebsmodus MS, bei dem der Druck p_M in der Messkammer 6 in dem ersten Druckbereich Δp_1 liegt, unter Verwendung der Gleichung (3.1) anhand der Transportzeit(en) t_m der Ionen 11 eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases 2 durchführen, d.h. die Massenladungsverhältnisse mz der Ionen 11 bestimmen. Entsprechend kann die Auswerteeinrichtung 21 in einem zweiten Betriebsmodus IMS, in dem der Druck p_M in dem zweiten Druckbereich Δp_2 liegt, anhand der Gleichungen (4) bzw. (5) bzw. anhand der in dem oben zitierten Artikel von David P. Smith im Detail erläuterten Methode anhand der Transportzeit(en) t_m der Ionen 11 die Mobilität K_m der Ionen bestimmen, d.h. eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung der Ionen 11 des zu untersuchenden Gases 2 vornehmen.

Im vorliegenden Fall, bei dem das Bremsgas 17 schnell der Messkammer 6 zu- und wieder aus der Messkammer 6 abgeführt werden kann, kann schnell zwischen einer kollisionsfreien Messung in dem ersten Betriebsmodus MS und einer kollisionsbehafteten Messung in dem zweiten Betriebsmodus IMS umgeschaltet werden. Bei einer alternierenden Messung, d.h. bei einer schnellen Umschaltung zwischen den beiden Betriebsmodi MS, IMS können in der Vorrichtung 1 daher sowohl die Beweglichkeit bzw. die Mobilität K_m der Ionen 11 als auch deren Massenladungsverhältnisse mz zeitnah gemessen werden.

Der erste Druckbereich Δp_1 liegt in dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel in einem Intervall zwischen einem minimalen Druck $p_{1\min}$ von 10^{-5} mbar und einem maximalen Druck $p_{2\max}$ von 10^{-4} mbar („Working Pressure“ WP1, WP2 in Fig.

2). Der zweite Druckbereich Δp_2 liegt im gezeigten Beispiel zwischen einem minimalen Druck $p_{2\min}$ von ca. 3×10^{-2} mbar und einem maximalen Druck $p_{2\max}$ von 10^0 mbar („Working Pressure“ WP3, WP4 in Fig. 2). Es versteht sich, dass die beiden Druckbereiche Δp_1 , Δp_2 nicht zwingend den angegebenen Wertebereichen entsprechen müssen, sondern an die jeweilige Anwendung angepasst werden können. Es ist jedoch günstig, wenn die beiden Druckbereiche Δp_1 , Δp_2 ausreichend weit voneinander separiert sind, d.h. wenn für den maximalen Druck $p_{1\max}$ des ersten Druckbereichs Δp_1 und für den minimalen Druck $p_{2\min}$ des zweiten Druckbereichs Δp_2 gilt: $p_{2\min} / p_{1\max} > 100$, bevorzugt > 1000 .

Wie in Fig. 2 zu erkennen ist, wird durch die Separation des zweiten Druckbereichs Δp_2 von dem ersten Druckbereich Δp_1 um drei Größenordnungen erreicht, dass die Geschwindigkeiten v der Ionen 11 von Werten von ungefähr 2×10^4 m/s in dem ersten Druckbereich Δp_1 auf Werte von ungefähr $0,2 \times 10^4$ m/s in dem zweiten Druckbereich Δp_2 abfallen. Die Ionen 11 weisen somit in dem zweiten Druckbereich Δp_2 durch das Vorhandensein des Bremsgases 17 eine mittlere Geschwindigkeit v auf, die um etwa eine Größenordnung kleiner ist als die Geschwindigkeit v in dem ersten Druckbereich Δp_1 .

Der (Betriebs-)Druck p_M in der Messkammer 6 bzw. der Arbeitspunkt kann innerhalb des jeweiligen ersten bzw. zweiten Druckbereichs Δp_1 , Δp_2 beliebig eingestellt werden. Der Druck p_M bzw. der Arbeitspunkt in der Messkammer 6 in dem ersten und in dem zweiten Betriebsmodus MS, IMS sowie die Länge der kollisionsfreien oder kollisionsbehafteten Ionen-Transferstrecke L_m können an die jeweilige Anwendung, insbesondere an die spezifizierte Massen- bzw. Isomeren-Auflösung (s.u.) angepasst werden.

Die Detektion der Ionen 11 im Fein-, Mittel- oder Hochvakuumbereich, d.h. im gezeigten Beispiel in einem Intervall zwischen ca. 10^{-5} mbar und ca. 10^0 mbar,

erfolgt mit Hilfe des Ionen-Detektors 13. Ein geeigneter Ionen-Detektor 13 sollte gegenüber Druckbereichsüberschreitungen – d.h. auch für Drücke oberhalb des Feinvakuumbereichs – robust ausgelegt sein. Der Ionen-Detektor 13 sollte zudem degradationsfrei arbeiten und benötigt einen Dynamikbereich in der Größenordnung von ca. 5-6 Dekaden, um in beiden Druckbereichen Δp_1 , Δp_2 die Ionen 11 detektieren zu können.

Ein solcher Ionen-Detektor 13, der eine Messelektrodenanordnung 22 zum Erfassen der Ionen 11 und eine Detektionseinrichtung 25 zur Detektion der von der Messelektrodenanordnung 22 erfassten Ionen 11 aufweist, ist in Fig. 1 sowie in **Fig. 3** dargestellt. Die Messelektrodenanordnung 22 bildet im einfachsten Fall einen Faraday-Becher zur idealerweise rückstreuungsfreien Erfassung der Ionen 11. Bei dem in Fig. 3 gezeigten Beispiel weist die Messelektrodenanordnung 22 eine zentrale Messelektrode 23 (Fokuselektrode) auf, die von einer ringförmigen Hauptelektrode 24 umgeben ist. Die zentrale Messelektrode 23 ist im Zentrum des Bodens des Faraday-Bechers angeordnet und wird von einem ringförmigen Bodenbereich der Hauptelektrode 24 umgeben.

Die zentrale Messelektrode 23 weist einen vergleichsweise geringen Durchmesser auf und dient hauptsächlich zur Erfassung von stark gekühlten Ionen 11 in dem zweiten Druckbereich Δp_2 (z.B. zwischen 10^{-1} mbar und 10^{-0} mbar). Die ringförmige Hauptelektrode 24, die den Großteil des Faraday-Bechers bildet, dient hauptsächlich zur Erfassung von schwach gekühlten Ionen 11 in dem ersten Druckbereich Δp_1 (z.B. bei einem Druck von ca. 10^{-5} mbar). Die zentrale Messelektrode 23 und die ringförmige Messelektrode 24 sind elektrisch isoliert und bilden gemeinsam den Faraday-Becher.

Wie in Fig. 3 ebenfalls zu erkennen ist, ist die ringförmige Hauptelektrode 24 segmentiert und weist im gezeigten Beispiel vier Ringsegmente 24a-d (Quadranten) auf. Die vier Ringsegmente 24a-d sind in Umfangsrichtung

gleichmäßig verteilt und weisen einen jeweils gleich großen Flächeninhalt auf. Es versteht sich, dass die ringförmige Hauptelektrode 24 auch in weniger oder in mehr Ringsegmente unterteilt sein kann. Die Segmentierung der ringförmigen Hauptelektrode 24 in vier Quadranten 24a-d ermöglicht eine richtungssensitive Aufzeichnung bzw. Messung der Ionen 11, die sich im Wesentlichen entlang der geradlinigen Trajektorie 15 bewegen. Im Idealfall verteilen sich die erfassten Ionen 11 gleichanteilig auf alle vier Quadranten 24a-d.

Die Detektionseinrichtung 25 in Form einer Detektionselektronik weist im gezeigten Beispiel fünf Eingänge auf, die zur elektrischen Kontaktierung der zentralen Messelektrode 23 sowie der vier Quadranten 24a-d der Hauptelektrode 24 der Messelektrodenanordnung 22 dienen, die in Fig. 3 auf der rechten Seite in einer Draufsicht dargestellt ist. Um den gesamten Ionenstrahl bzw. alle extrahierten Ionen 11 zu detektieren, kann die Detektionseinrichtung 25 alle elektrisch isolierten Messelektroden 23, 24a-d zusammenschalten und die fünf Eingänge miteinander verbinden. Zur Detektion lediglich der schwach gekühlten Ionen 11 können die Quadranten 24a-d der segmentierten Hauptelektrode 24 zusammengeschaltet werden, während die zentrale Messelektrode 23 die stark gekühlten Ionen 11 gesondert aufzeichnet. Es ist ebenfalls möglich, dass eine oder mehrere der Quadranten 24a-d der Hauptelektrode 24 und die zentrale Messelektrode 23 beliebig kombiniert bzw. zusammengeschaltet werden, um die Drift- oder Flugeigenschaften der Ionen 11 besonders zu analysieren. Beispielsweise können hierbei Drift- oder Flugeigenschaften von Isomeren (s.u.) gemessen und ausgewertet werden.

Fig. 4a,b zeigen beispielhaft jeweils in einem oberen Teilbereich ein Ionensignal in Form eines induzierten Stroms $I_{\text{ION}}(t)$ am Eingang der Detektionseinrichtung 25, der von den an der Messelektrodenanordnung 22 erfassten Ionen 11 erzeugt wird, sowie in einem unteren Teilbereich ein Spannungssignal $U(t)$ am Ausgang der Detektionseinrichtung 25. Die Detektionseinrichtung 25 kann beispielsweise einen Ladungs-Verstärker zur

Umwandlung eines von den erfassten Ionen 11 erzeugten Ladungssignals in ein Spannungssignal sowie eine Verstärker-Einrichtung zur Verstärkung des Spannungssignals aufweisen; die Messelektronik der Detektionseinrichtung 25 soll vorzugsweise eine schnelle und rauscharme Detektion der Ionen 11 mit einer Dynamik von 5 bis 6 Dekaden bereitstellen.

Das Ionensignal $I_{\text{ION}}(t)$ am Eingang der Detektionseinrichtung 25 und das Spannungssignal $U(t)$ am Ausgang der Detektionseinrichtung 25 sind in Fig. 4a,b über fünf Größenordnungen dargestellt. Die in Fig. 4a,b dargestellte Zeitachse stimmt mit der Transportzeit t_m überein, d.h. der Zeitpunkt $t_m = 0 \mu\text{s}$ entspricht dem Zeitpunkt, an dem die Extraktionseinrichtung 12 mit einem kurzen Spannungspuls mit einer Zeitdauer in der Größenordnung von ca. $t_E < 100 \text{ ns}$ aktiviert wird, um die Ionen 11 aus der Ionenkammer 5 zu extrahieren.

In Fig. 4a sowie in Fig. 4b - in einem Zeitintervall von $0 \mu\text{s}$ bis ca. $200 \mu\text{s}$ - sind das Ionensignal $I_{\text{ION}}(t)$ und das Spannungssignal $U(t)$ beispielhaft für einen Druck p_M von 10^{-4} mbar im ersten Druckbereich Δp_1 mit Ionenmassen zwischen 10 und 1000 und einer Partikelanzahl N_z / Elementarladung von 1×10^2 , 5×10^3 , 1×10^3 , 1×10^1 und 1×10^4 dargestellt. Die Beschleunigungsspannung der Extraktionseinrichtung 12 lag im dargestellten Beispiel bei 50 V und die Ionen-Transferstrecke L_m wies eine Länge von 50 cm auf.

Fig. 4a zeigt ein Detail der Darstellung von Fig. 4b mit höherer Zeitauflösung in einem Zeitintervall der Transportzeit t_m zwischen $49 \mu\text{s}$ und $53 \mu\text{s}$. Wie in Fig. 4a zu erkennen ist, treffen in diesem Zeitintervall zwei Ionen 11 mit ähnlichen Massen bzw. ähnlichen Massenladungsverhältnissen mz auf die Messelektrodenanordnung 22 auf. Die Zeitspanne zwischen dem Aufprall der beiden Ionen 11 stellt bei dem hier beschriebenen ersten Betriebsmodus MS, d.h. ohne Stöße mit dem Bremsgas 17, ein Maß für den Massenunterschied zwischen den beiden auftreffenden Ionen 11 dar, da wie weiter oben beschrieben wurde die Transportzeit t_m , d.h. die Zeitspanne zwischen dem

Erzeugen des Extraktionspulses der Extraktionseinrichtung 12 und dem Aufprall bzw. dem Erfassen der Ionen 11 an der Messelektrodenanordnung 22, in dem ersten Betriebszustand MS ein Maß für das Massenladungsverhältnis mz der Ionen 11 darstellt.

Wird genügend Bremsgas 17 in die Messkammer 6 eingelassen, ergeben sich jedoch deutlich längere Transportzeiten t_m , wie dies in Fig. 4b in einem Zeitintervall zwischen $t_m = 200 \mu s$ und ca. $1200 \mu s$ für einen Druck p_M in der Messkammer 6 von ca. 6×10^{-2} mbar und einer elektrischen Beschleunigungsfeldstärke E_m mit einem Betrag von ca. $600 V/m$ dargestellt ist. Die Polarität des elektrischen Feldes bzw. der Beschleunigungsfeldstärke E_m hängt vom Vorzeichen der Ionenladung ab und wird so gewählt, dass die Ionen 11 in der Ionen-Transporteinrichtung 14 abgebremst werden. Die Transportzeiten t_m stellen in diesem Fall gemäß der weiter oben angegebenen Gleichung (4) ein Maß für die Mobilität K_m der Ionen 11 dar und ermöglichen es, mit Hilfe der Vorrichtung 1 in dem zweiten Betriebszustand IMS eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases 2 durchzuführen. Die in Fig. 4b gezeigten Ionensignale $I_{ION}(t)$ bzw. Spannungssignale $U(t)$ in den beiden Betriebszuständen MS, IMS wurden bei gleicher Partikelpopulation in der Ionenfalle 8 aufgenommen.

Die Auswerteeinrichtung 21 kann auch dazu dienen, die Anzahl der von der Detektionseinrichtung 25 detektierten Ionen 11 in den beiden Betriebszuständen MS, IMS zu bestimmen. Eine quantitative Analyse setzt jedoch voraus, dass die Auflösung bzw. die Dauer der Transportzeiten t_m groß genug ist. Die Auflösung nimmt mit zunehmender Länge der Ionen-Transportstrecke L_m zu.

Die Auswerteeinrichtung 21 kann weiterhin dazu dienen, im zweiten Betriebsmodus IMS anhand von unterschiedlichen Transportzeiten t_{2a} , t_{2b} von Ionen 11 mit gleichem Massenladungsverhältnis mz_2 isomere Stoffe 27 zu

identifizieren, wie dies anhand eines in **Fig. 5** dargestellten, beispielhaften Spektrums eines Gemischs aus einem monomeren Stoff 26 und einem isomeren Stoff 27 dargestellt ist. Bei dem in Fig. 5 dargestellten Spektrum ist auf der Abszisse das Massenladungsverhältnis mz aufgetragen, das sich in dem ersten Betriebszustand MS ohne Stoßprozesse bzw. ohne das Vorhandensein des Bremsgases 17 in der Messkammer 6 ergibt. Auf der Ordinate sind die Transportzeiten t_m in dem zweiten Betriebszustand IMS für das jeweilige Massenladungsverhältnis mz aufgetragen.

Bei dem monomeren Stoff 26, der ein Massenladungsverhältnis mz_1 aufweist, ergibt sich eine einheitliche Driftzeitspanne mit einem Verteilungsprofil $\Phi_1(t_m)$, das um eine einzige (mittlere) Transportzeit t_1 verteilt ist. Bei einem isomeren Stoff 27, der ein Massenladungsverhältnis mz_2 aufweist, sind dagegen im gezeigten Beispiel zwei Driftzeitspannen mit entsprechenden Verteilungsprofilen $\Phi_{2a}(t_m)$, $\Phi_{2b}(t_m)$ vorhanden, die um zwei (mittlere) Transportzeiten t_{2a} , t_{2b} konzentriert sind. Mit Hilfe der weiter oben beschriebenen Vorrichtung 1 können daher isomere Stoffe 27 identifiziert und von monomeren Stoffen 26 unterschieden werden. Insbesondere können hierbei Partikel bzw. Ionen 11 mit derselben Molekülmasse und demselben Massenladungsverhältnis mz_2 , aber mit unterschiedlicher Beweglichkeit, voneinander unterschieden werden.

Die in Fig. 1 gezeigte Vorrichtung 1 kann zur spektrometrischen Untersuchung von Gasen 2 bei unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden. **Fig. 6** zeigt stark schematisiert ein Detail einer EUV-Lithographieanlage 30, die zur Abbildung einer Struktur auf einer Maske auf eine lichtempfindliche Schicht auf einem Wafer dient. In Fig. 6 ist von der EUV-Lithographieanlage 30 lediglich eine Gehäuse 3 dargestellt, das einen Innenraum 3a umschließt, in dem beispielhaft ein einzelnes optisches Element 31 angeordnet ist, das als Spiegel ausgebildet ist. Das optische Element 31 in Form des Spiegels dient zur Reflexion von EUV-Strahlung 32, die einen nicht näher dargestellten

Strahlengang die EUV-Lithographieanlage 30 durchläuft. In dem Innenraum 3a herrscht im Betrieb der EUV-Lithographieanlage 30 ein Druck p_{EUV} , der in der Größenordnung von ca. 1 mbar liegt, außerhalb des Gehäuses 3 herrscht Atmosphärendruck. Der Innenraum 3a weist eine Restgasatmosphäre auf, die als Bestandteil u.a. molekularen Wasserstoff H_2 enthält. Aufgrund der hohen Leistung der EUV-Strahlung 32 wird der Wasserstoff H_2 angeregt und bildet ein Wasserstoff-Plasma, das auch andere Bestandteile der Restgasatmosphäre ionisiert.

Bei dem in Fig. 6 gezeigten Beispiel ist die Vorrichtung 1, genauer gesagt das Gehäuse 4 der Vorrichtung 1, an die Außenseite des Gehäuses 3 der EUV-Lithographieanlage 30 angeflanscht, um den Gas-Einlass 9 über ein Piezo-Ventil 9a mit dem Innenraum 3a zu verbinden. Das zu untersuchende Gas 2 in dem Innenraum 3a ist aufgrund des Wasserstoff-Plasmas bereits ionisiert und kann daher in ionisiertem Zustand in die Ionenkammer 5 der Vorrichtung 1 eingebracht und in der Ionenfalle 8 gespeichert werden. Auf das Vorsehen einer Ionisierungseinrichtung in der Ionenkammer 5 kann in diesem Fall verzichtet werden.

Bei der in Fig. 6 beschriebenen Vorrichtung 1 wird der (molekulare) Wasserstoff H_2 , der ebenfalls in dem Innenraum 3a des Gehäuses 3 der EUV-Lithographieanlage 30 enthalten ist, als Bremsgas 17 genutzt. Zu diesem Zweck weist das Gehäuse 3 der EUV-Lithographieanlage 30 einen Gasanschluss auf, der mit der Zuführungseinrichtung 16 der Vorrichtung 1 in Verbindung steht, um den molekularen Wasserstoff H_2 aus dem Innenraum 3a der Messkammer 6 der Vorrichtung 1 zuzuführen. Der Wasserstoff H_2 wird hierbei an einer Position aus dem Gehäuse 4 entnommen, an dem kein bzw. nur ein schwaches Wasserstoff-Plasma vorhanden ist. Auf diese Weise kann auf das Vorsehen eines eigenen Gasreservoirs für das Bremsgas 17 verzichtet werden.

Wie in Fig. 6 ebenfalls zu erkennen ist, ist in dem Innenraum 3a des Gehäuses 3 der EUV-Lithographieanlage 30 eine stark schematisiert dargestellte Strömungsleiteinrichtung 33 angeordnet, die dem Gas-Einlass 9 das zu untersuchende Gas 2 mit einer im Wesentlichen senkrecht zu einer Richtung X der Ionen-Transferstrecke L_m ausgerichteten Geschwindigkeit $\vec{V}_M$ zuführt. Die Richtung X der Ionen-Transferstrecke L_m stimmt hierbei mit einer Einlassrichtung des Gas-Einlasses 9 überein. Bei der Strömungsleiteinrichtung 33 kann es sich beispielsweise um ein Rohr oder dergleichen handeln, welches quer zur Öffnung des Gas-Einlasses 9 bzw. des Ventils 9a des Gas-Einlasses 9 ausgerichtet ist, so dass das in dem Innenraum 3a enthaltene Gas 2 im Wesentlichen quer zur Öffnung des Gas-Einlasses 9 an diesem vorbeiströmt und daher im Wesentlichen nur die gewünschte Geschwindigkeits-Komponente $\vec{V}_M$ senkrecht zur Richtung X der Ionen-Transferstrecke L_m aufweist. Im gezeigten Beispiel gilt: $V_{M,x} < V_{M,y}/10$. Hierbei wurde zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass das Gas 2 keine Geschwindigkeitskomponente in Z-Richtung aufweist. Im allgemeinen Fall ist die Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung $V_{M,y}$ durch die Resultierende aus der Geschwindigkeitskomponente in Y-Richtung $V_{M,y}$ und der Geschwindigkeitskomponente in Z-Richtung $V_{M,z}$ zu ersetzen. Mit Hilfe der Strömungsleiteinrichtung 33 kann erreicht werden, dass die Geschwindigkeitskomponente der Ionen 11 in Richtung der Ionen-Transferstrecke L_m nahezu Null ist, um möglichst lange Transportzeiten t_m der Ionen 11 zu erreichen und auf diese Weise das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Messung zu verbessern.

Die in Fig. 6 dargestellte Vorrichtung 1 kann analog zu der in Fig. 1 dargestellten Vorrichtung 1 dazu verwendet werden, wahlweise eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases 2 oder eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases 2 durchzuführen. Da die Vorrichtung 1 kompakt ist und wenig Bauraum benötigt, kann diese an unterschiedlichen Stellen der EUV-Lithographieanlage 30 angeordnet werden,

um eine Restgasanalyse durchzuführen. Insbesondere können auch mehrere Vorrichtungen 1 dazu verwendet werden, an unterschiedlichen Orten der EUV-Lithographieanlage 30 jeweils eine Restgasanalyse durchzuführen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zur spektrometrischen Untersuchung eines Gases (2), umfassend:
 - eine Extraktionseinrichtung (12) zur Extraktion von Ionen (11) des zu untersuchenden Gases (2) aus einer Ionenkammer (5),
 - einen Ionen-Detektor (13) zur Detektion der Ionen (11),
 - eine Ionen-Transfereinrichtung (14) zum Transfer der Ionen (11) von der Extraktionseinrichtung (12) zu dem Ionen-Detektor (13) entlang einer Ionen-Transferstrecke (L_m),
 - eine Zuführungseinrichtung (16) zur Zuführung eines Bremsgases (17) zu der Ionen-Transferstrecke (L_m), sowie
 - eine Auswerteeinrichtung (21) zur Bestimmung von Transportzeiten (t_m) beim Transport der Ionen (11) von der Extraktionseinrichtung (12) zu dem Ionen-Detektor (13) entlang der Ionen-Transferstrecke (L_m)dadurch gekennzeichnet
dass die Vorrichtung (1) ausgebildet ist, einen Druck (p_M) entlang der Ionen-Transferstrecke (L_m) zwischen einem ersten, niedrigeren Druckbereich (Δp_1) und einem zweiten, höheren Druckbereich (Δp_2) umzuschalten, und dass die Auswerteeinrichtung (21) ausgebildet ist, in einem ersten Betriebszustand (MS) anhand der Transportzeiten (t_m) der Ionen (11) bei dem Druck (p_M) in dem ersten Druckbereich (Δp_1) eine massenspektrometrische Untersuchung des Gases (2) durchzuführen und in einem zweiten Betriebszustand (IMS) anhand der Transportzeiten (t_m) der Ionen (11) bei dem Druck (p_M) in dem zweiten Druckbereich (Δp_2) eine Ionenmobilitäts-spektrometrische Untersuchung des Gases (2) durchzuführen.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher für einen maximalen Druck $p_{1\max}$ des ersten Druckbereichs (Δp_1) und einen minimalen Druck $p_{2\min}$ des zweiten Druckbereichs (Δp_2) gilt: $p_{2\min} / p_{1\max} > 100$, bevorzugt > 1000 .

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, bei welcher der erste Druckbereich (Δp_1) unter einem maximalen Druck ($p_{1\max}$) von 10^{-4} mbar und bevorzugt über einem minimalen Druck ($p_{1\min}$) von 10^{-5} mbar liegt.
4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der zweite Druckbereich (Δp_2) über einem minimalen Druck ($p_{2\min}$) von 10^{-2} mbar und bevorzugt unter einem maximalen Druck ($p_{2\max}$) von 10^0 mbar liegt.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Ionen-Transferstrecke (L_m) in einer Messkammer (6) gebildet ist, wobei die Zuführungseinrichtung (16) zur Zuführung des Bremsgases (17) zu der Messkammer (5) bevorzugt mindestens ein insbesondere regelbares Ventil (16a) aufweist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, weiter umfassend: eine erste Vakuum-Pumpe (19) zum Abpumpen der Messkammer (6), wobei die erste Vakuum-Pumpe (19) mit der Messkammer (6) bevorzugt über mindestens ein insbesondere regelbares Ventil (19a) verbunden ist.
7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 5 oder 6, bei der die Ionenkammer (5) und die Messkammer (6) in einem gemeinsamen Gehäuse (4) gebildet sind, wobei die Ionenkammer (5) bevorzugt über eine Blendenöffnung (7) mit der Messkammer (6) in Verbindung steht.
8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter umfassend: eine zweite Vakuum-Pumpe (20) zum Abpumpen der Ionenkammer (5), wobei die zweite Vakuum-Pumpe (20) mit der Ionenkammer (5) bevorzugt über mindestens ein insbesondere regelbares Ventil (20a) verbunden ist.

9. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter umfassend:
einen Gas-Einlass (9) zum Einlassen des zu untersuchenden Gases (2) in die Ionenkammer (5), wobei der Gas-Einlass (9) zum Einlassen des zu untersuchenden Gases (2) bevorzugt mindestens ein insbesondere regelbares Ventil (9a) aufweist.
10. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der in der Ionenkammer (5) eine Ionenfalle (8) zur Speicherung, Akkumulierung und/oder Filterung von Ionen (11) des zu untersuchenden Gases (2) angeordnet ist.
11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter umfassend:
eine Ionisierungseinrichtung (10) zur Ionisierung des zu untersuchenden Gases (2) in der Ionenkammer (5), insbesondere in der Ionenfalle (8).
12. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher der Ionen-Detektor (13) eine Messelektrodenanordnung (22), bevorzugt einen Faraday-Becher, zum Erfassen der Ionen (11) und eine Detektionseinrichtung (25) zur Detektion der von der Messelektrodenanordnung (22) erfassten Ionen (11) aufweist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, bei welcher die Messelektrodenanordnung (22) eine zentrale Messelektrode (23) aufweist, die von einer bevorzugt ringförmigen Hauptelektrode (24) umgeben ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, bei welcher die ringförmige Hauptelektrode (24) segmentiert ist und mindestens zwei Ringsegmente, bevorzugt vier Ringsegmente (24a-d), aufweist.
15. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welcher die Auswerteeinrichtung (21) ausgebildet ist, in dem zweiten Betriebsmodus

(IMS) anhand von unterschiedlichen Transferzeiten (t_{2a} , t_{2b}) von Ionen (11) mit gleichem Massenladungsverhältnis (mz_2) isomere Stoffe (27) zu identifizieren.

16. Lithographieanlage, insbesondere EUV-Lithographieanlage (30), umfassend:
ein Gehäuse (3), das einen Innenraum (3a) umschließt, in dem mindestens ein optisches Element (31) angeordnet ist, sowie
mindestens eine Vorrichtung (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, die mit dem Innenraum (3a) in Verbindung steht, um der Ionenkammer (5) das zu untersuchende, bevorzugt in dem Innenraum (3a) ionisierte Gas (2) zuzuführen.
17. Lithographieanlage nach Anspruch 16, bei welcher die Zuführungseinrichtung (16) ausgebildet ist, der Ionen-Transferstrecke (L_m) als Bremsgas (17) ein in dem Innenraum (3a) vorhandenes Gas (3), insbesondere Wasserstoff, zuzuführen.
18. Lithographieanlage nach Anspruch 16 oder 17, bei welcher in dem Innenraum (3a) eine Strömungsleiteinrichtung (33) angeordnet ist, die ausgebildet ist, dem Gas-Einlass (9) das zu untersuchende Gas (3) mit einer im Wesentlichen senkrecht zu einer Richtung (X) der Ionen-Transferstrecke (L_m) ausgerichteten Geschwindigkeit (v) zuzuführen.

1 / 3

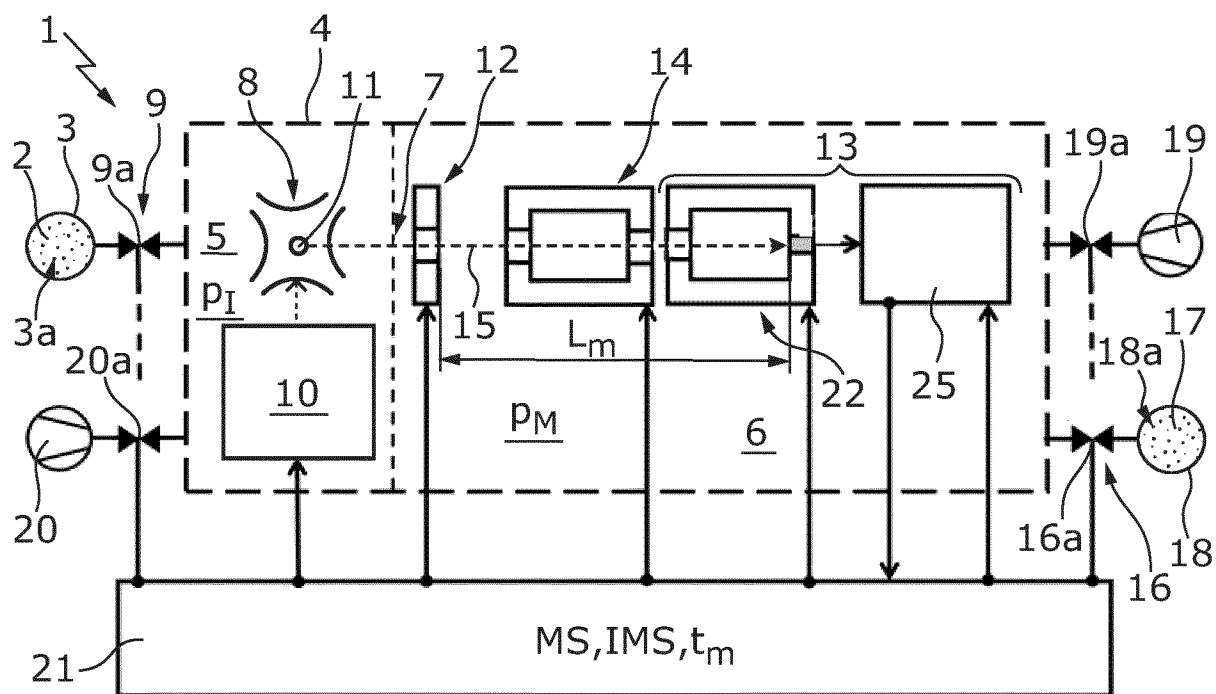


Fig. 1

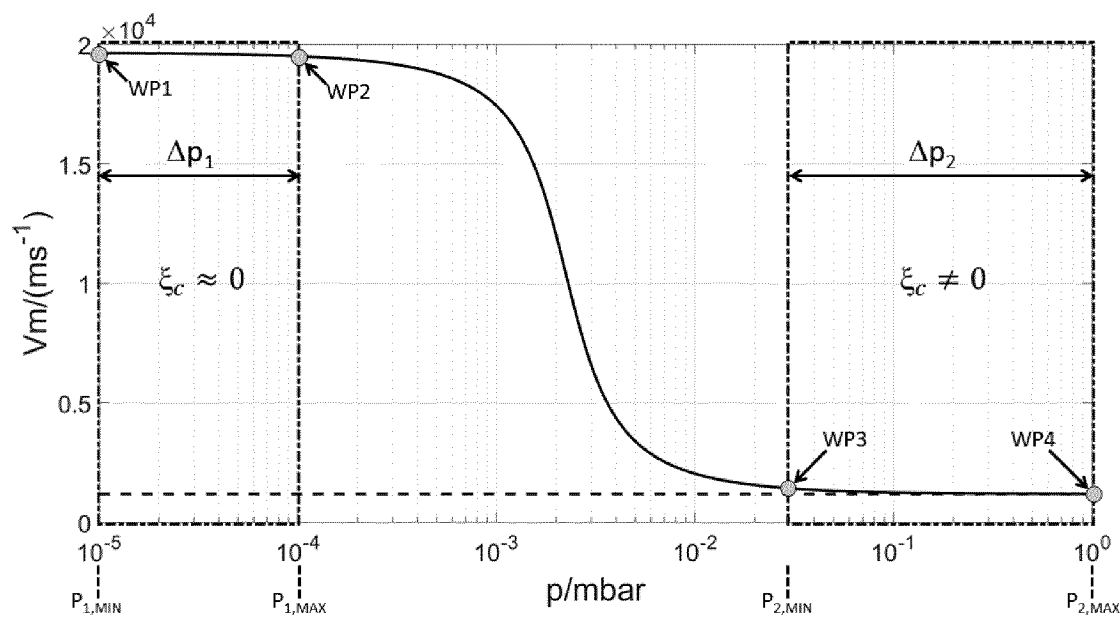
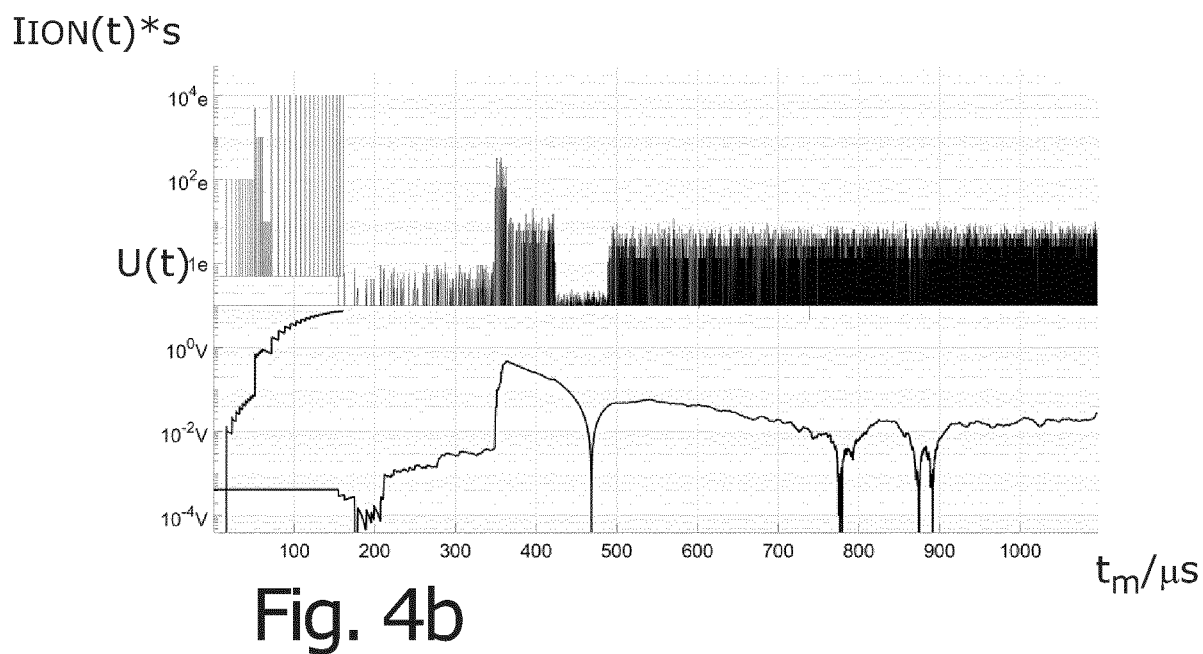
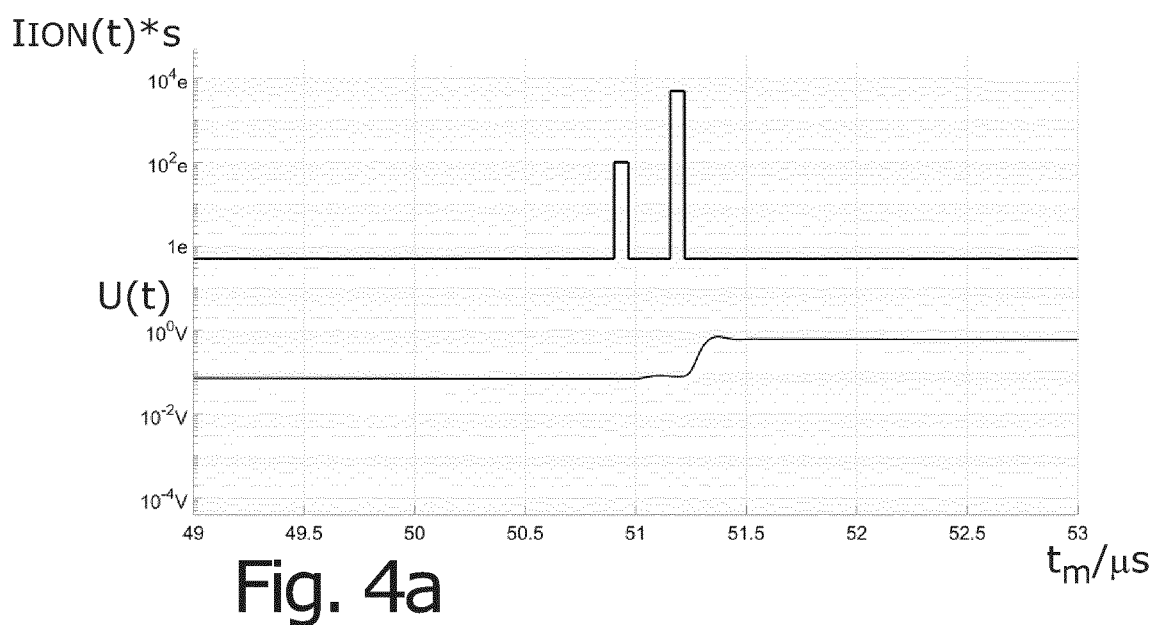
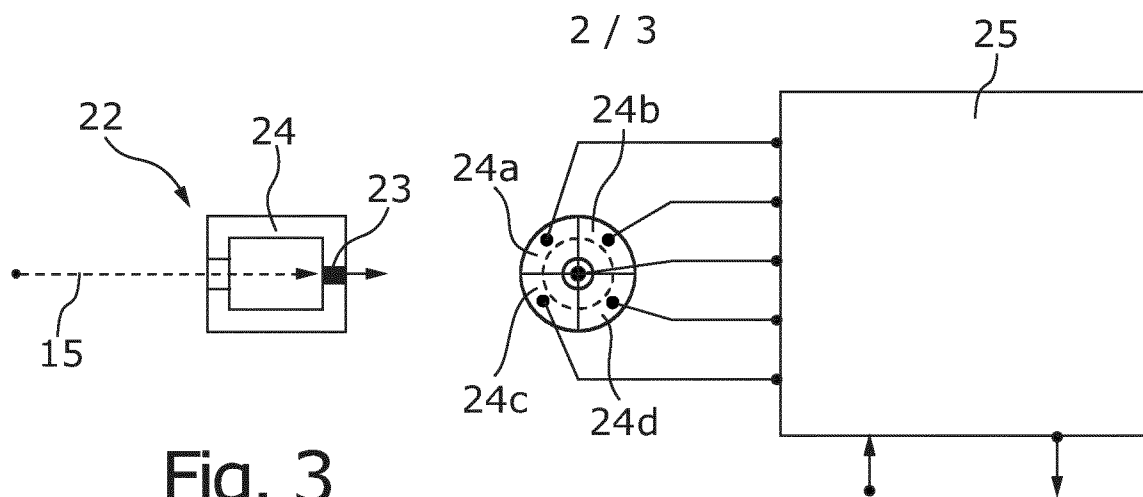


Fig. 2



3 / 3

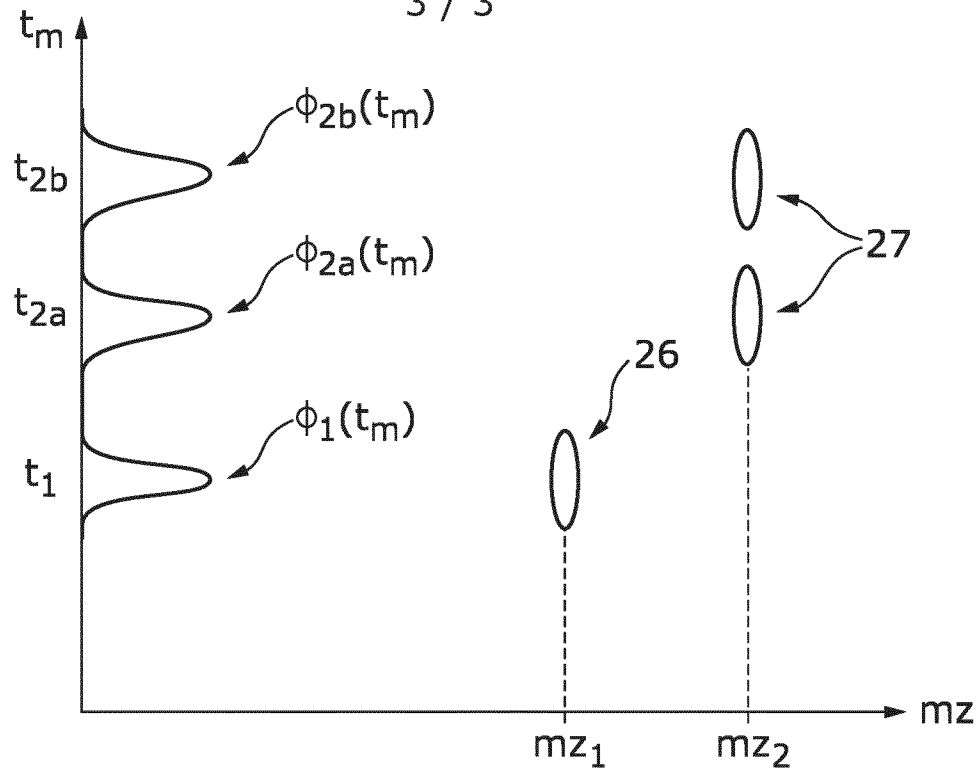


Fig. 5

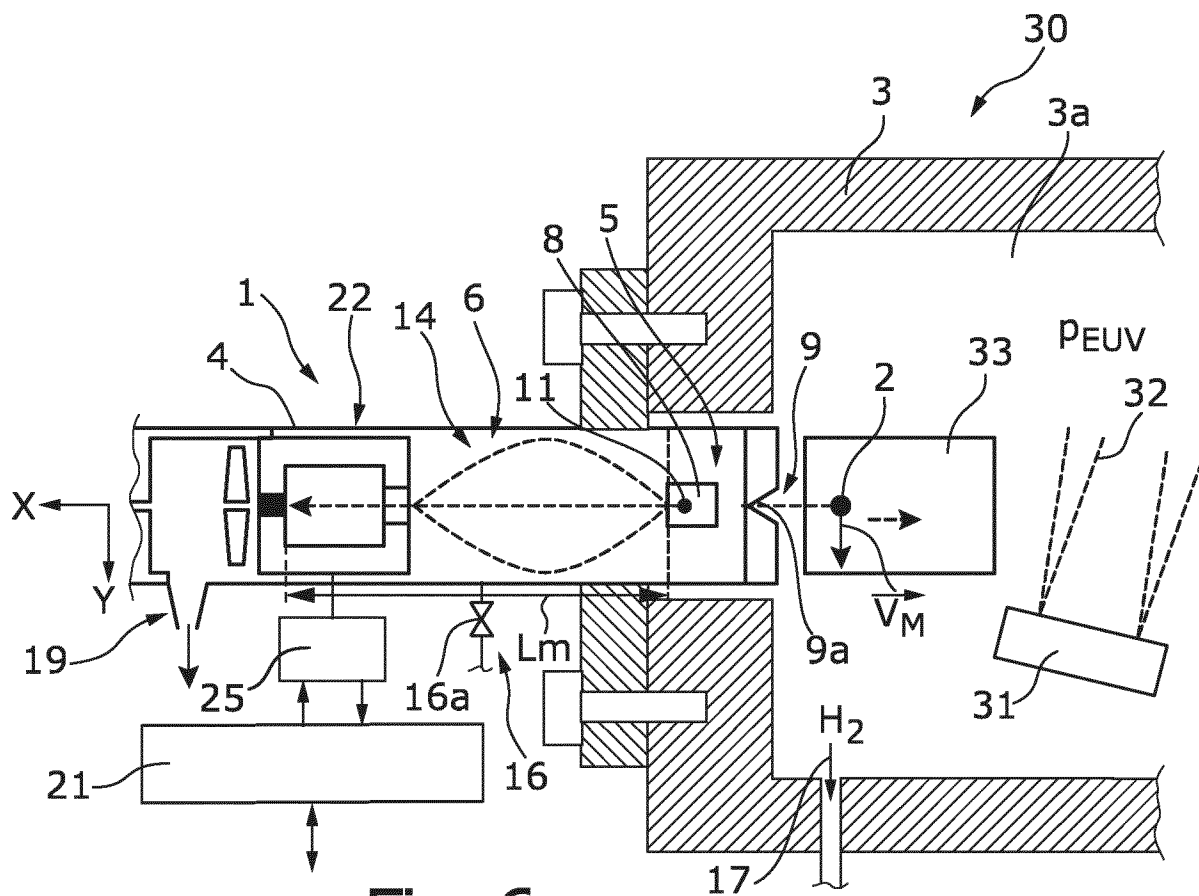


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2022/057761

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>H01J 49/40</i> (2006.01)i; <i>G01N 27/623</i> (2021.01)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) H01J; G01N Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2008068515 A2 (MICROMASS LTD [GB]; GREEN MARTIN [GB]; WILDGOOSE JASON LEE [GB]) 12 June 2008 (2008-06-12) abstract figures 3, 4 page 7, line 30 - page 8, line 2 page 19, line 23 - page 20, line 31 page 24, line 1 - page 29, line 12	1-18
A	WO 2008071967 A2 (MICROMASS LTD [GB]; GILES KEVIN [GB] ET AL.) 19 June 2008 (2008-06-19) abstract figures 1, 2 page 29, line 33 - page 32, line 13	1-18
☐ 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 20 July 2022		Date of mailing of the international search report 28 July 2022
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Dietsche, Rainer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2022/057761

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2008068515	A2	12 June 2008	CA	2670871	A1	12 June 2008
				EP	2089895	A2	19 August 2009
				JP	5198464	B2	15 May 2013
				JP	2010511985	A	15 April 2010
				US	2014158878	A1	12 June 2014
				US	2015170896	A1	18 June 2015
				WO	2008068515	A2	12 June 2008
WO	2008071967	A2	19 June 2008	CA	2672525	A1	19 June 2008
				EP	2092548	A2	26 August 2009
				EP	2747124	A1	25 June 2014
				GB	2451149	A	21 January 2009
				JP	5198467	B2	15 May 2013
				JP	2010512633	A	22 April 2010
				US	2010032561	A1	11 February 2010
				US	2013234016	A1	12 September 2013
				US	2014145074	A1	29 May 2014
				WO	2008071967	A2	19 June 2008

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H01J49/40 G01N27/623 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H01J G01N		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2008/068515 A2 (MICROMASS LTD [GB]; GREEN MARTIN [GB]; WILDGOOSE JASON LEE [GB]) 12. Juni 2008 (2008-06-12) Zusammenfassung Abbildungen 3, 4 Seite 7, Zeile 30 – Seite 8, Zeile 2 Seite 19, Zeile 23 – Seite 20, Zeile 31 Seite 24, Zeile 1 – Seite 29, Zeile 12 -----	1-18
A	WO 2008/071967 A2 (MICROMASS LTD [GB]; GILES KEVIN [GB] ET AL.) 19. Juni 2008 (2008-06-19) Zusammenfassung Abbildungen 1, 2 Seite 29, Zeile 33 – Seite 32, Zeile 13 -----	1-18
☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
20. Juli 2022		28/07/2022
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Dietsche, Rainer

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2022/057761

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2008068515 A2	12-06-2008	CA 2670871 A1	12-06-2008
		EP 2089895 A2	19-08-2009
		JP 5198464 B2	15-05-2013
		JP 2010511985 A	15-04-2010
		US 2014158878 A1	12-06-2014
		US 2015170896 A1	18-06-2015
		WO 2008068515 A2	12-06-2008

WO 2008071967 A2	19-06-2008	CA 2672525 A1	19-06-2008
		EP 2092548 A2	26-08-2009
		EP 2747124 A1	25-06-2014
		GB 2451149 A	21-01-2009
		JP 5198467 B2	15-05-2013
		JP 2010512633 A	22-04-2010
		US 2010032561 A1	11-02-2010
		US 2013234016 A1	12-09-2013
		US 2014145074 A1	29-05-2014
WO 2008071967 A2	19-06-2008		
