## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



# <sup>(19)</sup> RU<sup>(11)</sup> 2 551 119<sup>(13)</sup> C1

(51) МПК *H01J 49/40* (2006.01)

RU 2551119

ດ

#### ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

# (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

<ul> <li>(21)(22) Заявка: 2013152892/07, 29.11.2013</li> <li>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 29.11.2013</li> </ul>	<ul> <li>(72) Автор(ы):</li> <li>Рябчиков Александр Ильич (RU),</li> <li>Сивин Денис Олегович (RU),</li> <li>Дектярев Сергей Валентинович (RU)</li> </ul>
Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 29.11.2013 (45) Опубликовано: 20.05.2015 Бюл. № 14	<ul> <li>(73) Патентообладатель(и):</li> <li>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего</li> </ul>
<ul> <li>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2266587C1, 20.12.2005. RU 2314594C1, 10.01.2008. RU 124434 U1, 20.01.2013. SU 1651327A, 23.05.1991. EP 1301196B1, 10.01.2007. US 2012025070A1, 02.02.2012</li> </ul>	профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)
Адрес для переписки: 634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30, ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности	

# (54) ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИОНОВ

# (57) Реферат:

(57) Изобретение относится к области спектрометрии заряженных частиц и может быть использовано для измерения зарядового и массового состава ионов плазмы. Времяпролетный спектрометр содержит вакуумную камеру (1), которой в последовательно расположены труба дрейфа (2) и детектор ионов (7), на входном и выходном торцах трубы дрейфа (2) установлены электроды (3, 4), прозрачные для ионов и электрически связанные с ней, перед входным электродом (3) размещен заземленный электрод (5), труба дрейфа (2) электрически соединена с импульсным источником ускоряющего напряжения (8). Между выходным электродом (4) трубы дрейфа (2) и детектором ионов (7) установлен дополнительный электрод (9), прозрачный для ионов, электрически подключенный к отрицательному выходу источника постоянного напряжения (10), второй выход которого подключен к вакуумной камере (1). Технический результат - повышение точности измерения зарядово-массового состава ионов плазмы, создаваемой любым источником плазмы и на любом расстоянии от него. 3 ил.



# с С 6 --~ S S 2

2

#### **RUSSIAN FEDERATION**



#### **2 551 119<sup>(13)</sup> C1** (11)

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

### FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

# (12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2013152892/07, 29.11.2013	(72) Inventor(s):
(24) Effective date for property rights: 29.11.2013	Ryabchikov Aleksandr Ilich (RU), Sivin Denis Olegovich (RU), Dektyarev Sergej Valentinovich (R
Priority: (22) Date of filing: <b>29.11.2013</b>	(73) Proprietor(s): Federalnoe gosudarstvennoe byud
(45) Date of publication: 20.05.2015 Bull. № 14	obrazovatelnoe uchrezhdenie vyss professionalnogo obrazovaniya "N
Mail address:	issledovatelskii Tomskii politekhn
634050, g. Tomsk, pr-kt Lenina, d. 30, FGBOU VPO NI TPU, otdel pravovoj okhrany rezultatov intellektualnoj deyatelnosti	universitet" (RU)

# (54) TIME-OF-FLIGHT ION SPECTROMETER

#### (57) Abstract:

# FIELD: physics.

SUBSTANCE: time-of-flight ion spectrometer contains a vacuum chamber (1) which has inside the series arranged a drift pipe (2) and an ion detector (7); at the inlet and outlet end faces of the drift pipe (2) electrodes (3, 4) are installed, which are transparent for ions and electrically connected with it, in front of the inlet electrode (3) the grounded electrode (5) is placed, the drift pipe (2) is electrically connected to an impulse source of the accelerating voltage (8). Between the output electrode (4) of the drift pipe (2) and the ion detector (7) the additional electrode (9), transparent for ions, electrically connected to a negative output of DC voltage source (10), the second output of which is connected to the vacuum chamber (1) is installed.

EFFECT: improvement of accuracy of measurement of charge and mass structure of plasma ions created by any plasma source at any distance from it. 3 dwg

vin Denis Olegovich (RU), ektyarev Sergej Valentinovich (RU)

#### oprietor(s):

deralnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe prazovatelnoe uchrezhdenie vysshego ofessionalnogo obrazovaniya "Natsionalnyj ledovatelskij Tomskij politekhnicheskij niversitet" (RU)



C

Изобретение относится к области спектрометрии заряженных частиц и может быть использовано для измерения зарядового и массового состава ионов плазмы.

Известен времяпролетный спектрометр [S.P.Gorbunov, V.P.Krasov, I.A.Krinberg, V.L.Paperny. Source of metal ions with a variable velocity./6th International Conference on

- <sup>5</sup> Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 23-28 September 2002, Tomsk, Russia, p.67-70], состоящий из последовательно расположенных в вакуумной камере источника плазмы, ускоряющего промежутка, трубы дрейфа и коллектора ионов. Выходная диафрагма источника плазмы является узлом ввода плазменного потока в спектрометр. Ускоряющий промежуток образован между выходной диафрагмой
- источника плазмы и входом трубы дрейфа, для чего к выходной диафрагме источника плазмы подсоединен высоковольтный вывод импульсного источника ускоряющего напряжения положительной полярности. Труба дрейфа подключена к заземленному выводу источника напряжения. При подаче короткого по длительности импульса ускоряющего напряжения положительной полярности на выходную диафрагму
- 15 источника плазмы из него извлекаются и ускоряются ионы. Сформированный ионный пучок, при своем движении в трубе дрейфа, разделяется на отдельные сгустки в соответствии с зарядовым, массовым и энергетическим составом ионов. По времени прихода на коллектор ионов определяется массовый и зарядовый состав пучка. Доля каждого вида ионов в общем пучке определяется по соотношению площадей пиков 20 осциллограммы тока с коллектора.
  - Недостатком указанного спектрометра является то, что извлечение ионов происходит непосредственно из источника, который находится под ускоряющим потенциалом. Данный спектрометр не позволяет измерять зарядово-массовый состав ионов в свободной плазме или движущемся направленно потоке плазмы на любом расстоянии от источника.
  - Известен также времяпролетный спектрометр ионов плазмы [RU патент №2266587, 10.06.2011], содержащий вакуумную камеру, в которой последовательно расположены труба дрейфа и детектор ионов, детектируемая плазма контактирует с входом трубы дрейфа. В состав спектрометра также входит импульсный источник ускоряющего
- 30 напряжения, выполненный с отрицательной полярностью, его высоковольтный вывод электрически соединен с трубой дрейфа, другой вывод соединен с заземленным корпусом вакуумной камеры. На входном и выходном торцах трубы дрейфа установлены электроды, прозрачные для ионов и электрически связанные с трубой дрейфа. Перед входным торцом трубы дрейфа установлен дополнительный заземленный электрод.
- 35 Недостатком данного спектрометра является то, что при подаче отрицательного импульса ускоряющего напряжения на трубу дрейфа одновременно с ускорением ионов в зазоре между заземленным электродом и трубой дрейфа происходит ускорение электронов из плазмы между трубой дрейфа и детектором. Ускорение электронов в зазоре подчиняется законам формирования потоков частиц в плазмонаполненных
- 40 системах. Это означает, что в энергетическом спектре электронов будут присутствовать электроны с энергией от тепловой до максимальной соответствующей ускоряющему напряжению на трубе дрейфа. Как видно из осциллограммы тока детектора на Фиг.2, наличие электронного тока приводит к смещению нулевой линии и вносит неопределенность в точность определения соотношения ионов с различным зарядовым
- 45 состоянием в плазме.

25

Задачей изобретения является создание времяпролетного спектрометра ионов с более высокой разрешающей способностью.

Технический результат, достигаемый изобретением, заключается в возможности

# RU 2 551 119 C1

более точного измерения зарядово-массового состава ионов плазмы, создаваемой любым источником плазмы и на любом расстоянии от него.

Указанный технический результат достигается тем, что времяпролетный спектрометр ионов, как и прототип, содержит вакуумную камеру, в которой последовательно

- <sup>5</sup> расположены труба дрейфа и детектор ионов, на входном и выходном торцах трубы дрейфа установлены электроды, прозрачные для ионов и электрически связанные с ней, перед входным электродом размещен заземленный электрод, труба дрейфа электрически соединена с импульсным источником ускоряющего напряжения, в отличие от прототипа, между выходным электродом трубы дрейфа и детектором ионов
- и установлен дополнительный электрод, прозрачный для ионов, электрически подключенный к отрицательному выходу источника постоянного напряжения, второй выход которого подключен к вакуумной камере.

Плазма, зарядовый и массовый состав которой требуется измерить данным спектрометром ионов, может быть создана любым способом, включая вакуумно-

*15* дуговой разряд, ВЧ и СВЧ разряды, различные газовые источники плазмы, лазерное излучение.

Изобретение поясняется иллюстрациями, на которых: фиг.1 - принципиальная схема времяпролетного спектрометра ионов, фиг.2 - осциллограмма спектра ионов титана для прототипа, фиг.3 - осциллограмма спектра ионов титана, полученная с дополнительным сеточным электродом.

20

Времяпролетный спектрометр установлен в вакуумной камере 1 и состоит из трубы дрейфа 2, выполненной из металла, вход и выход которой закрыты электродами 3 и 4, прозрачным для ионов, например металлическими сетками, электрически связанными с трубой дрейфа 2. Перед входом в трубу дрейфа 2 вблизи входного электрода 3

- 25 установлен заземленный электрод 5, прозрачный для ионов, например металлическая сетка. Входной электрод 3, установленный на входе трубы дрейфа 2, и заземленный электрод 5 образуют ускоряющий промежуток и могут иметь форму плоскости или форму, выпуклую наружу от трубы дрейфа 2. Выпуклая форма обеспечивает фокусировку формируемого ионного пучка. Напротив выходного электрода 4,
- 30 расположенного на выходе трубы дрейфа 2, с вакуумным зазором установлен детектор 7 заряженных частиц. Детектор 7 электрически связан с системой измерения тока заряженных частиц. Импульсный источник ускоряющего напряжения отрицательной полярности, являющийся генератором импульсных напряжений 8, подключен высоковольтным выводом к трубе дрейфа 2. Второй вывод генератора 8 заземлен на
- 35 камеру 1 и электрически соединен с заземленным электродом 5. В зазоре между выходным электродом 4 и детектором 7 установлен дополнительный сеточный электрод 9, прозрачный для ионов. К сеточному электроду 9 подключен источник отрицательного постоянного напряжения 10, второй вывод которого подключен к вакуумной камере 1.
- 40 Рассмотрим работу устройства на примере формирования металлической плазмы вакуумно-дуговым испарителем, работающим в непрерывном режиме. Металлическая плазма поступает из источника в вакуумную камеру 1, заполняя ее объем. Анализируемая плазма двигается вдоль оси трубы дрейфа 2 и контактирует с входом трубы дрейфа 2. От генератора импульсных напряжений 8 отрицательной полярности
- 45 подают импульс напряжения амплитудой U и длительностью τ между трубой дрейфа
   2 и вакуумной камерой 1.

При появлении потенциала смещения на трубе дрейфа 2 между плазмой 6 и входным электродом 3 возникает разность потенциалов. Появление разности потенциалов между

входным электродом 3 и плазмой 6 приводит к разделению зарядов в плазме и ускорению ионов из плазмы к входному электроду 3, а электронов в обратном направлении. Ускоренные ионы проходят входной электрод 3 и попадают в эквипотенциальное пространство трубы дрейфа 2. В трубе дрейфа 2 заряд ионного

- <sup>5</sup> пучка нейтрализуется электронами присутствующей в трубе плазмы. Ионы пучка дрейфуют в трубе дрейфа 2 со скоростями, определяемыми энергией ионов и их массой. Наличие дополнительного сеточного электрода 9 с постоянным отрицательным потенциалом между выходным электродом 4 и детектором 7 обеспечивает очистку зазора от плазменных электронов, что исключает влияние электронного тока в зазоре
- на измерения тока ионов различной зарядности. Длительность импульса высоковольтного смещения с генератора импульсных напряжений 8 выбирают из следующих условий. Минимальная длительность импульса смещения определяется процессами формирования ускоряющего промежутка между электродами 3 и 5 или между входным электродом 3 и плазмой 6 (при отсутствии в
- 15 конструкции заземленного электрода 5). Вначале, при подаче потенциала смещения от генератора импульсных напряжений 8 на трубу дрейфа 2, ускоряющий промежуток формируется за счет смещения электронов плазмы. Этот процесс по времени не превышает нескольких наносекунд. Концентрация ионов по всему сформированному промежутку будет одинаковой и будет соответствовать исходной концентрации плазмы.
- 20 При этом ионы, находящиеся на различном расстоянии от входного электрода 3, ускоряясь в промежутке, получат разную энергию. По мере ускорения ионов будет происходить перераспределение концентрации ионов по ускоряющему промежутку. Стабилизация эмиссионной границы произойдет либо когда ширина ускоряющего промежутка станет равной величине, определяемой законом трех вторых, либо если
- 25 эмиссионная граница плазмы подойдет к заземленному электроду 5. В зависимости от параметров плазмы и величины ускоряющего напряжения время стабилизации эмиссионной границы может достигать от нескольких десятков до нескольких сотен наносекунд. Длительность импульса генератора импульсных напряжений 8 целесообразно выбирать такой, чтобы она превышала время стабилизации эмиссионной
- 30 границы т<sub>с</sub>. Принципиально важным условием для выбора длительности импульса ускоряющего напряжения является условие дрейфа всех ускоренных ионов анализируемой плазмы, включая самые быстрые, имеющие наибольшее соотношение Z/M<sub>i</sub>, в течение действия ускоряющего напряжения, внутри трубы дрейфа. Это означает,
- что ускоренные ионы не попадут в тормозящее их электрическое поле между электродом
   4, установленным на выходе трубы дрейфа 2, и детектором 7. Максимальная энергия ионов Е, входящих в трубу дрейфа, определяется их зарядом и ускоряющим напряжением

E = ZeU , (1)

40

45

где Z - зарядность ионов;

е - заряд электрона;

U - ускоряющее напряжение.

Наибольшая скорость дрейфа будет у ионов с наибольшим соотношением Z/M<sub>i</sub> - наибольшее соотношение массы ионов к зарядности для ионов анализируемой плазмы. Время дрейфа этих ионов  $\tau_{\rm дp}$  определяется выражением

$$\tau_{\partial p} = \ell_{r.g.} \sqrt{\frac{M_i}{2 ZeU}} , (2)$$

где  $\ell_{r,\pi}$  - длина трубы дрейфа;

M<sub>i</sub> - масса иона.

Таким образом, длительность импульса ускоряющего напряжения  $\tau_y$  выбирают из условия:

 $\tau_y < \tau_{дp}, (3)$ 

5

то есть, что ионы с наибольшим соотношением Z/M<sub>i</sub> придут на детектор 7 после окончания импульса ускоряющего напряжения и будут зарегистрированы детектором 7.

Амплитуда постоянного отрицательного напряжения на сеточном электроде 9 и расстояние между сеточными электродами 4, 9 и детектором 7 выбираются из условия полной очистки плазмы от электронов. Другими словами, ширина зазоров между электродами должна быть меньше или равна ширине слоя S разделения зарядов в плазме, определяемого из выражения:

$$I^{5} \qquad S = \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_{D_{e}} \left(\frac{2V_{0}}{T_{e}}\right)^{\frac{3}{4}}, (4)$$

где  $\lambda_{De}$  - Дебаевский радиус экранирования,

Т<sub>е</sub> -температура электронов,

V<sub>o</sub> - потенциал электрода, а Дебаевский радиус экранирования определяется из выражения:

$$\lambda_{D_e} = \left(\frac{\varepsilon_0 T_e}{en_s}\right)^{\frac{1}{2}}, (5)$$

25

где  $\epsilon_{o}$  - диэлектрическая проницаемость вакуума;

Т<sub>е</sub> - температура электронов;

е - заряд электрона;

n<sub>s</sub> - концентрация плазмы.

30

Ионы на детектор 7 приходят в разное время, что фиксируется, например, осциллографом. В дальнейшем по осциллограмме определяют массовый и зарядовый состав ионов и процентное соотношение отдельных компонент ионов в плазме.

Пример исполнения времяпролетного спектрометра.

Вакуумно-дуговой испаритель работает с катодом из титана. Концентрация плазмы

- <sup>35</sup> 6 вблизи входного электрода 3 составляла (1·10<sup>9</sup>-10<sup>10</sup>) ион/см<sup>3</sup>. Труба дрейфа 2 диаметром 100 мм имела длину 600 мм. Зазор между выходным электродом 4 и дополнительным сеточным электродом 9, а также зазор между электродом 9 и детектором 7 был выбран равным 5 мм. Постоянное отрицательное напряжение от источника напряжения 10 на сеточном электроде 9 амплитудой 450 В обеспечило полную 40
- <sup>40</sup> очистку зазоров от электронов при концентрации плазмы 10<sup>10</sup> ион/см<sup>3</sup>. В случае, когда концентрация плазмы уменьшается по мере удаления времяпролетного спектрометра от источника плазмы, концентрация плазмы в зазоре между выходным электродом 4 и детектором 7 существенно меньше, чем концентрация плазмы между электродами 3
- 45 и 5. В этих условиях амплитуда постоянного напряжения на дополнительном электроде 9 может быть снижена до уровня, определяемого из формул (4) и (5). Ионы титана с зарядностью i<sup>+</sup>, i<sup>+2</sup> и i<sup>+3</sup> хорошо разделяются при длительности импульса 500 нс и ускоряющем отрицательном потенциале с генератора импульсных напряжений 8

# RU 2 551 119 C1

амплитудой 1000 В. Осциллограмма тока с детектора, полученная с дополнительным сеточным электродом 9, представлена на фиг. 3. Сравнение осциллограмм фиг. 2. и фиг. 3. показывает существенное улучшение разрешающей способности спектрометра.

5

# Формула изобретения

Времяпролетный спектрометр ионов плазмы, содержащий вакуумную камеру, в которой последовательно расположены труба дрейфа и детектор ионов, на входном и выходном торцах трубы дрейфа установлены электроды, прозрачные для ионов и электрически связанные с ней, перед входным электродом размещен заземленный

Электрод, труба дрейфа электрически соединена с импульсным источником ускоряющего напряжения, отличающийся тем, что между выходным электродом трубы дрейфа и детектором ионов установлен дополнительный электрод, прозрачный для ионов, электрически подключенный к отрицательному выходу источника постоянного напряжения, второй выход которого подключен к вакуумной камере.

Стр.: 8

15

20

25

30

35

40

45



Фиг. 3