

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2648268

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Мустафаев Александр Сеит-Умерович (RU), Грабовский Артем Юрьевич (RU), Сухомлинов Владимир Сергеевич (RU), Мурильо Хиллер Оскар Габриэль (RU)*

Заявка № 2016149281

Приоритет изобретения 14 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 14 декабря 2036 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
H05H 1/24 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016149281, 14.12.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
14.12.2016

Дата регистрации:  
23.03.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.12.2016

(45) Опубликовано: 23.03.2018 Бюл. № 9

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,  
ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный  
университет", отдел интеллектуальной  
собственности и трансфера технологий (отдел  
ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):

Мустафаев Александр Сеит-Умерович (RU),  
Грабовский Артем Юрьевич (RU),  
Сухомлинов Владимир Сергеевич (RU),  
Мурильо Хиллер Оскар Габриэль (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский горный  
университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: SU 416617 A1, 25.02.1974. SU  
1525587 A1, 30.11.1989. RU 2503158 C1,  
27.12.2013. KZ 25593 A4, 15.03.2012. US  
4862032 A, 29.08.1989. EP 2521158 A1,  
07.11.2012.

## (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

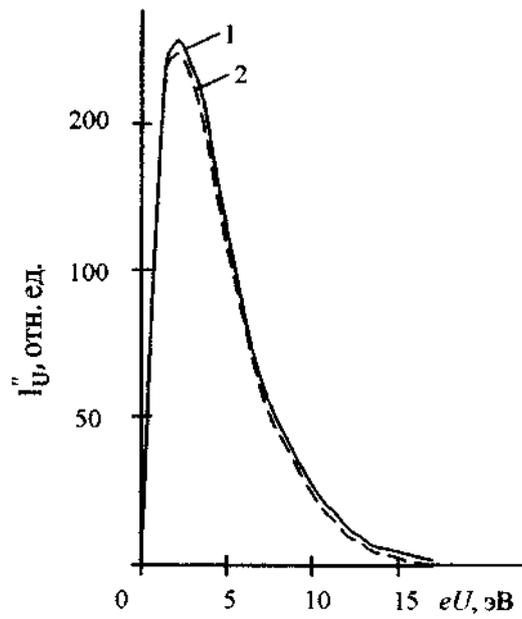
(57) Реферат:

Изобретение относится к области диагностики плазмы и может быть использовано для исследований неравновесной анизотропной плазмы непосредственно в рабочих условиях широкого круга газоразрядных устройств: лазеров, плазмотронов, источников света, мощных стабилизаторов тока и напряжения, ключевых элементов, инверторов. Технический результат - определение набора параметров нейтральной (локальная температура) и электронной (транспортное сечение электрон-атомных столкновений и конвективная скорость) компонент плазмы. В исследуемом плазменном объекте регистрируют вторую производную ВАХ цилиндрического зонда, путем совместного

использования экспериментальных данных и решения кинетического уравнения Больцмана реконструируют энергетические зависимости лежандровых компонент ФРЭС  $f_0$ ,  $f_1$  и  $f_2$  и интеграла электрон-атомных столкновений  $S_1$  одновременно осуществляют точное измерение давления газа  $p$  и напряженности электрического поля  $E_z$ . Способ обеспечивает определение температуры  $T_a$  нейтральной компоненты плазмы и параметров электронной компоненты - транспортного сечения электрон-атомных столкновений  $\sigma'_{ea}$  и конвективной скорости электронов  $\langle v \rangle_{\text{конв}}$ . 5 ил.

RU 2 648 268 C1

RU 2 648 268 C1



Фиг. 1

R U 2 6 4 8 2 6 8 C 1

R U 2 6 4 8 2 6 8 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*H05H 1/24 (2006.01)*

(21)(22) Application: **2016149281, 14.12.2016**

(24) Effective date for property rights:  
**14.12.2016**

Registration date:  
**23.03.2018**

Priority:

(22) Date of filing: **14.12.2016**

(45) Date of publication: **23.03.2018** Bull. № 9

Mail address:

**199106, Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, 2, FGBOU  
VO "Sankt-Peterburgskij gornyj universitet", otdel  
intelektualnoj sobstvennosti i transfera tekhnologij  
(otdel IS i TT)**

(72) Inventor(s):

**Mustafaev Aleksandr Seit-Umerovich (RU),  
Grabovskij Artem Yurevich (RU),  
Sukhomlinov Vladimir Sergeevich (RU),  
Murilo Khiller Oskar Gabriel (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij gornyj  
universitet" (RU)**

(54) **METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF THE NEUTRAL AND ELECTRONIC COMPONENTS OF THE NON-EQUILIBRIUM PLASMA**

(57) Abstract:

FIELD: chemistry.

SUBSTANCE: invention relates to the field of plasma diagnostics and can be used for studies of nonequilibrium anisotropic plasma directly under the operating conditions of a wide range of gas discharge devices: lasers, plasma torches, light sources, powerful current and voltage stabilizers, key elements, inverters. In the investigated plasma object, the second derivative of the CVC of a cylindrical probe is recorded, by sharing the experimental data and solving the Boltzmann kinetic equation, the energy dependences of Legendre components of the FRES  $f_0, f_1$  and  $f_2$  and the electron-atom collision integral  $S_1$  at the same time

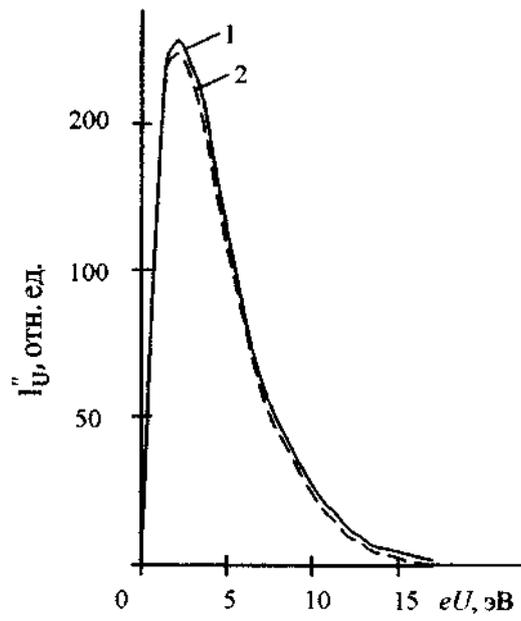
perform an accurate measurement of the gas pressure  $p$  and the electric field strength  $E_z$ . Method provides a determination of the temperature  $T_a$  of the neutral plasma component and the parameters of the electron component - the transport cross section of electron-atom collisions  $\sigma_{ea}^t$  and the convective electron velocity  $\langle v \rangle_{con}$ .

EFFECT: technical result is the determination of the set of parameters of the neutral (local temperature) and electron (electron-atom transport cross-section and convective velocity) plasma component.

1 cl, 5 dwg

RU 2 648 268 C1

RU 2 648 268 C1



Фиг. 1

RU 2648268 C1

RU 2648268 C1

Изобретение относится к области диагностики плазмы и может быть использовано для исследований неравновесной анизотропной плазмы непосредственно в рабочих условиях широкого круга газоразрядных устройств: лазеров, плазмотронов, источников света, мощных стабилизаторов тока и напряжения, ключевых элементов, инверторов, и др.

Известен ионный денситометр для измерения плотности газа или пара в газоразрядных приборах (авторское свидетельство SU №457909, опубл. 25.01.1975 г.), в основе работы которого лежит явление резонансной перезарядки, происходящей в пространстве, заполненном исследуемым газом, между коллектором, находящийся под замедляющим ионы потенциалом, и дополнительным электродом, находящимся под ускоряющим ионы потенциалом.

Способ определения плотности газа состоит в одновременном измерении тока ионов на коллектор  $J_k$  и на дополнительный электрод  $J_d$ . Концентрация нейтральных атомов (плотность газа) интегрально определяется по формуле

$$N_a = \frac{1}{QL} \ln \left( \frac{J_k + J_d}{J_k} \right),$$

где L - расстояние между коллектором и дополнительным электродом, см; Q - сечение перезарядки, см<sup>2</sup>.

Недостатками являются невозможность определения локальной концентрации и температуры нейтральной компоненты плазмы (атомов), транспортного сечения электрон-атомных столкновений, конвективной скорости электронов, а также зависимость размеров межэлектродного промежутка от давления газа.

Известен способ определения пространственного распределения параметров плазмы (заявка RU 92005122, опубл. 27.02.1995 г.), основанный на измерении спектрального распределения интенсивности излучения в фиксированных интервалах спектра, не содержащих резонансных линий. При этом записывают контуры спектральных линий, на которые накладывают теоретический спектр, рассчитанный из системы уравнений, включающей уравнение переноса излучения для неоднородного объема, выражение для коэффициента поглощения с учетом линий и непрерывного фона, уравнений кинетики заселения уровней в приближении блока возбужденных состояний и ряд дополнительных соотношений.

Недостатками аналога являются невозможность определения локальной температуры атомов плазмы, транспортного сечения электрон-атомных столкновений и конвективной скорости электронов.

Известен способ зондовой диагностики плазмы и устройство для его осуществления (патент RU 2503158, опубл. 27.12.2013 г.), включающий установку зонда в плазму, приложение к зонду дискретных ступенчатых импульсов напряжения, регистрацию вольтамперной характеристики (ВАХ), измерение потенциала плазмы. Напряжение каждой последующей ступени в импульсе задают большим по сравнению с предыдущей, ступени формируют с временными интервалами между ними, во время которых потенциал на зонде уравнивают равным потенциалу пространства плазмы. При этом длительность каждой ступени и интервалы времени между ними уравнивают не менее времени восстановления квазинейтральности плазмы.

Недостатками аналога являются: невозможность определения локальной концентрации и температуры атомов плазмы, транспортного сечения электрон-атомных столкновений и конвективной скорости электронов.

Известен способ определения параметров низкотемпературной плазмы (авторское свидетельство SU №1545766, опубл. 22.10.1989 г.), принятый за прототип, заключающийся в измерении функции распределения электронов по скоростям (ФРЭС) по второй производной ВАХ плоского двойного зонда, помещенного в плазму, отличающийся тем, что с целью определения локальной концентрации атомов плазмы одновременно с ФРЭС измеряют напряженность электрического поля и находят концентрацию атомов по формуле

$$N_a = \frac{E_z}{\sigma_{ea}'} \left( \frac{1}{f_1} \frac{\partial f_0}{\partial U} \right) \quad (1)$$

где  $N_a$  - концентрация атомов, см<sup>-3</sup>;

$E_z$  - напряженность электрического поля, В/см;

$\sigma_{ea}^t$  - транспортное сечение упругих электрон-атомных столкновений, см<sup>2</sup>;

$f_0$  - изотропная часть ФРЭС;

$f_1$  - анизотропная часть ФРЭС;

$U$  - задерживающий потенциал зонда относительно плазмы, В.

Недостатками являются: невозможность определения локальной температуры атомов плазмы, транспортного сечения электрон-атомных столкновений и конвективной скорости электронов, техническая сложность изготовления плоских зондов.

Техническим результатом является определение набора параметров нейтральной (локальная температура) и электронной (транспортное сечение электрон-атомных столкновений и конвективная скорость) компонент плазмы.

Технический результат достигается тем, что измерения второй производной осуществляют цилиндрическим зондом при двух ориентациях относительно оси разряда, а энергетические зависимости лежандровых компонент функции распределения и интеграла электрон-атомных столкновений реконструируют путем совместного использования измеренных значений второй производной и кинетического уравнения Больцмана.

Способ определения параметров нейтральной и электронной компонент неравновесной плазмы поясняется следующими фигурами: фиг. 1 - вторые производные

ВАХ цилиндрического зонда  $I_U''$  (относительные единицы), зарегистрированные в

плазме положительного столба гелиевого тлеющего разряда при  $P_{He}=1$  торр,  $J=0,5$  А и двух ориентациях зонда относительно оси разряда: 1 - перпендикулярно (угол между нормалью к поверхности зонда и осью симметрии плазмы  $\theta=0^\circ$ ); 2 - параллельно ( $\theta=90^\circ$ );

фиг. 2 - энергетические зависимости лежандровых компонент ФРЭС  $f_0, f_1$  и  $f_2$ , восстановленные в плазме положительного столба гелиевого тлеющего разряда (относительные единицы) при  $P_{He}=1$  торр,  $J=0,5$  А;

фиг. 3 - энергетическая зависимость лежандрова компонента интеграла электрон-атомных столкновений  $S_1$ , восстановленная в плазме положительного столба гелиевого тлеющего разряда при  $P_{He}=1$  торр,  $J=0,5$  А;

фиг. 4 - транспортное сечение упругого рассеяния электронов  $\sigma_{ea}^I$  на атомах гелия.

Точки - экспериментальные результаты, полученные предлагаемым способом; 1 - данные К. Kumar; 2 - расчет Sinfailam A.L., Nesbet R.K. матричным вариационным методом; 3 - расчет Burke P.G., Cooper J.W. методом сильной связи;

фиг. 5 - энергетическая зависимость конвективной скорости электронов, определенная при  $P_{He}=0,5$  торр; 1, 2, 3 - расчет по формуле (3) для разрядных токов 0,1; 0,25 и 0,5 А соответственно; 4 - расчет по формуле (4).

Способ осуществляется следующим образом. Цилиндрический зонд, изготовленный из молибденовой проволоки диаметром 0,07 мм и длиной 1 мм, помещают в исследуемую плазму и при двух ориентациях относительно оси разряда регистрируют значения

второй производной ВАХ зонда  $I_U''$ . На фиг. 1 приведены вторые производные  $I_U''$ ,

зарегистрированные в плазме положительного столба гелиевого тлеющего разряда при  $P_{He}=1$  тор,  $J=0,5$  А,  $1-\theta=0^\circ$ ;  $2-\theta=90^\circ$ .

Далее ФРЭС и интеграл электрон-атомных столкновений представляют в виде разложения в ряды по полиномам Лежандра и реконструируют четные компоненты ФРЭС  $f_0$  и  $f_2$ . Путем решения кинетического уравнения Больцмана (2) восстанавливают анизотропную часть ФРЭС  $f_1$ .

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{v} \left( \frac{\partial f_0}{\partial z} + \frac{2}{5} \frac{\partial f_2}{\partial z} \right) - \frac{eE}{m} \left[ \frac{\partial f_0}{\partial v} + \frac{2}{5v^3} \frac{\partial}{\partial v} (v^3 f_2) \right] + v_{ea}' f_1 = 0, \quad (2)$$

На фиг. 2 представлены энергетические зависимости  $f_0$ ,  $f_1$  и  $f_2$ , восстановленные в плазме положительного столба гелиевого тлеющего разряда при  $P_{He}=1$  торр,  $J=0,5$  А.

Далее восстанавливают энергетическую зависимость компонента  $S_1$  интеграла электрон-атомных столкновений (фиг. 3) и определяют локальную температуру  $T_a$

атомов плазмы, транспортное сечение электрон-атомных столкновений  $\sigma_{ea}^I$  и конвективную скорость электронов  $\langle v \rangle_{\text{конв}}$ .

Способ поясняется следующими примерами. В результате осуществления способа была проведена диагностика локальных параметров нейтральной и электронной компонент неравновесной плазмы. Известно, что аддитивный вклад упругого рассеяния электронов на атомах в  $S_1$  в приближении неподвижных атомов равен:

$$S_1^y = N_a \sigma_{ea}^I \mathbf{v} f_1.$$

Из этой формулы была определена величина транспортного сечения  $\sigma_{ea}^I$  и его энергетическая зависимость (фиг. 4), т.к. значения  $S_1$ ,  $f_1$ ,  $N_a$  известны, а вклад других процессов взаимодействия электронов в  $S_1$  мал.

Измерение давления газа  $p$  и напряженности электрического поля  $E_z$  позволяет определить локальную температуру атомов, связанную с их концентрацией и давлением формулой

$$p = N_a k T_a,$$

откуда, проведя замену переменной  $v$  на  $U$ , получают с учетом формулы (1)

$$T_a = \frac{\sigma_{ea}^t P}{k E_z} \left( f_1 / \frac{\partial f_0}{\partial U} \right),$$

5 Таким образом была определена локальная температура атомов гелия на оси разряда при давлении 1 торр и разрядном токе 0,5 А, она оказалась равной  $T_a = (574 \pm 45)$  К. Полученный результат хорошо согласуется с данными измерения  $T_a$  оптическими методами.

10 Относительное измерение  $f_0$  и  $f_1$  позволяет определить конвективную скорость электронов  $\langle v \rangle_{\text{конв}}$ , усредненную по угловым координатам:

$$\langle v \rangle_{\text{конв}} = \frac{1}{3} \frac{v f_1}{f_0}. \quad (3)$$

15 Если рассеяние электронов по импульсу происходит в основном при упругом взаимодействии с атомами, то компоненты  $f_0$  и  $f_1$  оказываются связанными между собой простой зависимостью:

$$f_1 = \frac{e E_z}{m v_{ea}^t} \frac{\partial f_0}{\partial v}.$$

20 В этих условиях конвективную скорость определяют по значениям  $f_0$  и измеренным  $E_z$ :

$$\langle v \rangle_{\text{конв}} = \frac{1}{3} \frac{e E_z}{m v_{ea}^t} v \frac{d(\ln f_0)}{dv}. \quad (4)$$

25 Определенные по соотношениям (3) и (4) значения конвективной скорости электронов приведены на фиг. 5.

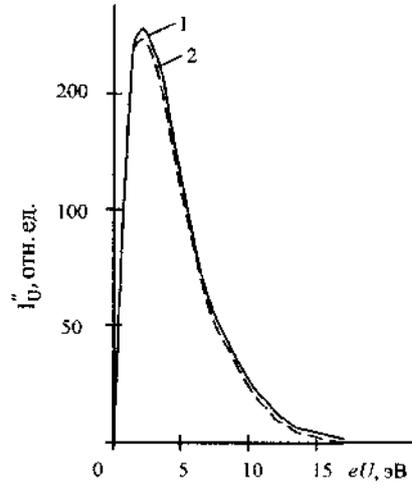
30 Таким образом, способ обеспечивает определение локальной температуры  $T_a$  нейтральной компоненты плазмы и параметров электронной компоненты - транспортного сечения электрон-атомных столкновений  $\sigma_{ea}^t$  и конвективной скорости электронов  $\langle v \rangle_{\text{конв}}$ .

35 (57) Формула изобретения

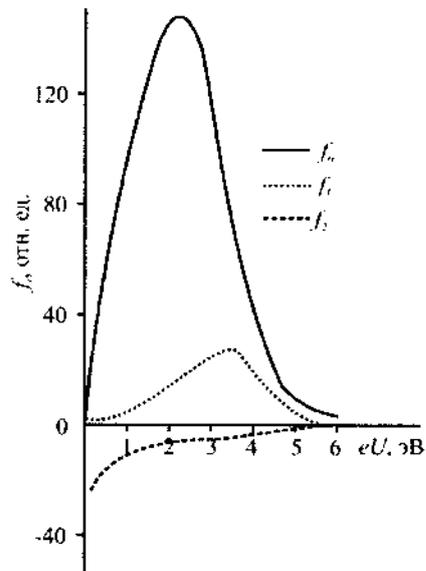
Способ определения параметров нейтральной и электронной компонент неравновесной плазмы, включающий измерение функции распределения электронов по скоростям по второй производной зондовой вольтамперной характеристики, отличающийся тем, что измерения осуществляют цилиндрическим зондом при двух ориентациях относительно оси разряда, а энергетические зависимости лежандровых компонент функции распределения и интеграла электрон-атомных столкновений реконструируют путем совместного использования значений второй производной и кинетического уравнения Больцмана.

45

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ**

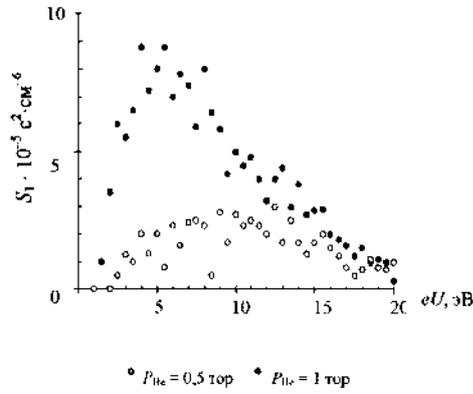


Фиг. 1

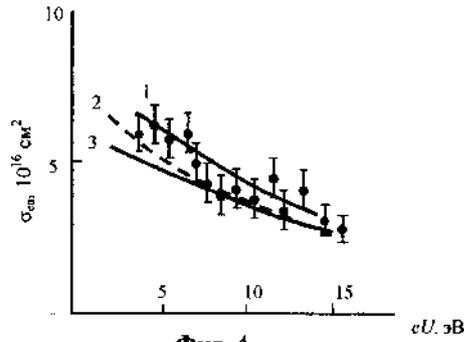


Фиг. 2

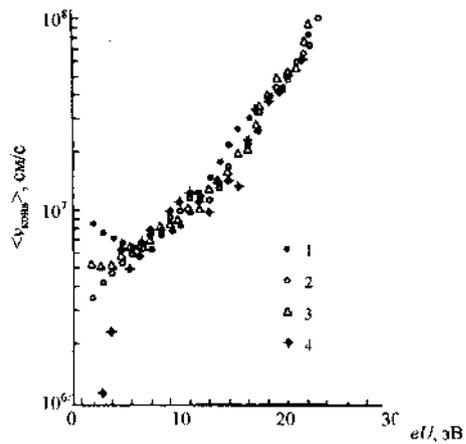
**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ**



**Фиг. 3**



**Фиг. 4**



**Фиг. 5**