

## Физическая аппаратура и её элементы

УДК 621.384

### Диагностический комплекс для исследования параметров корпускулярных потоков из ионного источника

*А.Н. Долгов, В.Г. Марков, А.А. Окулов, Д.Е. Прохорович, А.Г. Садилкин, Д.И. Юрков*

*Предложены методы диагностики параметров корпускулярных потоков на входе в ионно-оптическую систему (на выходе из ионного источника) и проведена их экспериментальная апробация.*

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Sm

*Ключевые слова:* газонаполненная нейтронная трубка, ионный источник, метод задерживающего потенциала, функция распределения, вольт-амперная характеристика, трехэлектродный электростатический зонд.

#### Введение

Пучки ионов нашли широкое применение при решении самых разнообразных прикладных задач [1–5]. Формирование ионного пучка из корпускулярного потока, экстрагируемого из ионного источника, обеспечивается применением ионно-оптической системы, отвечающей целям решаемой задачи. Для эффективного решения поставленной задачи требуется осуществить согласование и оптимизацию рабочих характеристик как источника, так и ионно-оптической системы, что подразумевает совершение некоторого итерационного процесса методами физического и математического моделирования.

Целью представляемой работы явилась разработка и экспериментальная адаптация методов диагностики параметров корпускулярных потоков на выходе из ионного источника для определения начальных условий при проведении математического моделирования транспортировки пучка в ионно-оптической системе.

#### Экспериментальный стенд

В качестве источника ионов был использован источник пеннинговского типа с холодным катодом.

Долгов Александр Николаевич, вед. научн. сотр.  
 Марков Виктор Григорьевич, ведущий инженер.  
 Окулов Алексей Алексеевич, аспирант.  
 Прохорович Дмитрий Евгеньевич, ст. научн. сотр.  
 Садилкин Александр Геннадьевич, аспирант.  
 Юрков Дмитрий Игоревич, зам. гл. конструктора.  
 Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова.  
 Россия, 127055, Москва, ул. Суцневская, 22.  
 Тел.: (499) 400–19–48. E-mail: vniia4@vniia.ru.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2013 г.

© Долгов А.Н., Марков В.Г., Окулов А.А., Прохорович Д.Е., Садилкин А.Г., Юрков Д.И., 2013

дом. Источник размещался в вакуумной камере, которая могла быть откачана контролируемым образом до минимального давления  $10^{-5}$  Торр. Система напуска газа позволяет создавать и поддерживать рабочую среду разряда (дейтерий, аргон). Анод находится под положительным потенциалом относительно заземленного катода. Средства диагностики устанавливались в вакуумной камере на выходе ионного источника через шлюзовой ввод.

#### Измерение электронной температуры и ионной концентрации в плазме, эмитируемой ионным источником

Эксперимент заключался в измерении тока, протекающего через одиночный ленгмюровский зонд (в данном случае роль зонда выполняла плоская металлическая пластина) при подаче на него различных потенциалов смещения относительно заземленных стенок вакуумной камеры, т.е. в снятии зондовой вольт-амперной характеристики (ВАХ). Простота технических средств и эксперимента являются несомненными достоинствами зондового метода [6].

В ситуации, когда температура электронной компоненты плазмы значительно превосходит температуру ионов (обычная ситуация в стационарном электрическом разряде), отождествляя площадь токособирающей поверхности с геометрической поверхностью зонда, имеем для оценки ионной концентрации [7]:

$$n_i = \frac{4I_i}{eS} \sqrt{\frac{m_i}{3kT_e}}, \quad (1)$$

где  $I_i$  — ионный ток на зонд в режиме насыщения,  $m_i$  — масса иона,  $T_e$  — температура электронной компоненты,  $e$  и  $k$  — заряд электрона и постоянная Больцмана.

ная Больцмана,  $S$  — геометрическая площадь поверхности зонда.

В крутой части ВАХ зонда зависимость тока на зонд дается выражением [8]:

$$\ln I_e = \text{const} + \frac{eU_M}{kT_e}, \quad (2)$$

где  $I_e$  — электронный ток на зонд. Таким образом, если в координатах  $(U_M, \ln I_e)$  экспериментальные точки удовлетворительным образом укладываются на прямую линию, то данное обстоятельство является свидетельством максвелловского распределения электронов по скоростям, и измерение тангенса угла наклона этой прямой даёт возможность оценки электронной температуры. В отличие от неподвижной плазмы, в плазменном потоке величина ионного тока может составлять заметную часть от регистрируемого тока на зонд и, следовательно, появляется возможность осуществить прямое измерение ионной концентрации в плазме [9].

Примеры типичных зарегистрированных ВАХ зонда (мишени) при различных давлениях рабочего газа (аргон) приведены на рис. 1. Как видно из представленных графиков, ионный и электронный токи достигают насыщения. Согласно методике обработки ВАХ [10], необходимо определить ионный ток насыщения, экстраполировать его зависимость от потенциала зонда (мишени) из области отрицательных потенциалов в переходную область (крутую часть ВАХ), а затем из полного тока на зонд в крутой части ВАХ выделить электронную составляющую. По зависимости выделенной электронной составляющей тока на зонд от его потенциала, исходя из экспоненциального характера зависимости, была определена электронная температура плазмы, проникающей за пределы ионного источника, которая составила величину

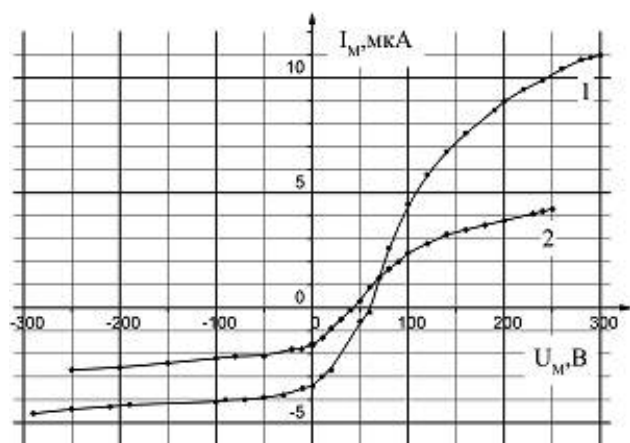


Рис. 1. Типичные ВАХ одиночного ленгмюровского зонда: 1 — давление аргона  $p = 5 \cdot 10^{-4}$  Торр; ток разряда  $I_p = 20$  мкА; напряжение горения разряда  $U_p = 1,7$  кВ; потенциал катода  $U_c = 4,5$  кВ; 2 —  $p = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Торр;  $I_p = 20$  мкА;  $U_p = 1,5$  кВ;  $U_c = 2$  кВ.

$T_e \approx 5$  эВ. Затем, используя соотношение (1), была дана оценка ионной концентрации плазмы, величина которой составила  $n_i \approx 10^8$  см<sup>-3</sup>.

### Исследование энергетического спектра частиц, эмитируемых из ионного источника

Исследование энергетического спектра ионного потока осуществлялось методом задерживающего потенциала с помощью трехэлектродного сетчатого зонда (рис. 2), размещаемого на выходе ионного источника вместо ленгмюровского зонда.

Зонд состоит из плоского коллектора  $K$  и двух сеток (сетчатых электродов)  $C_1$  и  $C_2$ . На сетку  $C_2$  подается значительный отрицательный потенциал относительно плазмы, достаточный для того, чтобы воспрепятствовать попаданию электронов из плазмы на коллектор. Ионы же, напротив, ускоряются, попадая внутрь зонда. Такой процесс называют разрывом плазмы. Между коллектором и сеткой  $C_2$  подается анализирующая (тормозящая ионы) разность потенциалов. До коллектора доходят лишь те ионы, энергии которых достаточно для преодоления анализирующей разности потенциалов. Меняя потенциал коллектора, можно измерить интегральную кривую задержки ионного потока, из которой дифференцированием определяется распределение ионов по энергиям. Точнее сказать, определяется распределение ионов по той компоненте кинетической энергии, которая обусловлена движением параллельно оси зонда.

Сетка  $C_1$  необходима для экранирования плазмы от потенциала сетки  $C_2$ . Потенциал сетки  $C_2$  отрицателен по отношению к потенциалу коллек-

### Плазменный

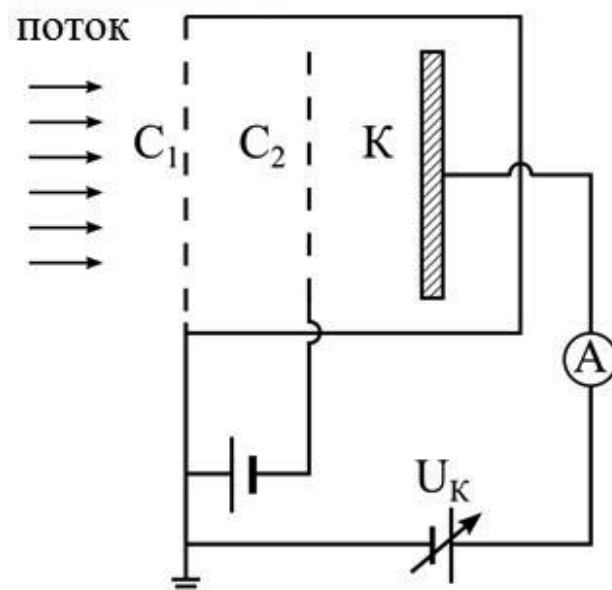


Рис. 2. Схема трехэлектродного электростатического зонда:  $C_1$  и  $C_2$  — сетчатые электроды,  $K$  — коллектор ионов.

тора и поэтому является тормозящим для вторичных электронов, появляющихся на поверхности коллектора за счет воздействия анализируемого корпускулярного потока. Для того чтобы возмущения, вносимые зондом в окружающую плазму, не менялись при изменении потенциалов электродов внутри зонда, размер ячеек первой сетки был выбран меньшим дебаевского радиуса плазмы [11]. Размер ячеек второй сетки выбран из условия разрыва плазмы с отсечением электронной компоненты [12]. Разность потенциалов между первой и второй сетками выбрана из условия того, что указанная величина, помноженная на заряд электрона, должна быть значительно больше средней тепловой энергии электронов [13].

На рис. 3 представлены экспериментальные ВАХ коллектора трехэлектродного зонда при различных значениях потенциала сетки  $C_2$ . Вид полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что потенциал второй сетки  $U_{C_2} = -60$  В является достаточным для разрыва плазмы. Поведение ВАХ на левом крутом участке (кривые б и в на рис. 3) может, вероятно, быть обусловлено влиянием потока электронов из плазмы и вторичных электронов с сеток, а также частичным переключением разрядного тока ионного источника на электроды анализирующего зонда. При дальнейшем увеличении потенциала коллектора достигается ток насыщения вторичными электронами с сеток и плазменными электронами из области разряда и, следовательно, указанные факторы не могут влиять на формирование правой крутой части ВАХ, находящейся в диапазоне от 1,5 до 2,0 кВ. Поэтому с достаточным основанием можно полагать, что правая крутая часть ВАХ является интегральной тормозной характеристикой ионной компоненты корпускулярного потока.

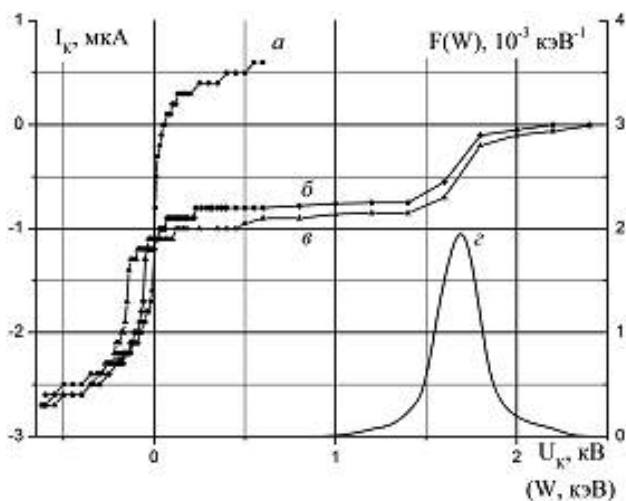


Рис. 3. ВАХ коллектора при потенциалах анода  $U_a = 2,4$  кВ и второй сетки: (а) —  $U_{C_2} = 0$ ; (б) —  $U_{C_2} = -60$  В; (в) —  $U_{C_2} = -150$  В; (з) — функция распределения ионов по направленным кинетическим энергиям.

Процедура восстановления функции распределения ионов по направленным энергиям подробно изложена в работе [14]. Применяя результаты указанной работы к измерениям с помощью трехэлектродного зонда (тормозящая разность потенциалов прикладывается между коллектором и заземленным электродом, съем сигнала в токовом режиме производится с коллектора), получим функцию распределения ионов по направленным кинетическим энергиям (кривая з на рис. 3). Отметим, что средняя энергия ионов оказалась заметно меньше величины  $eU_a$ .

### Определение плотности тока и угла расходимости пучка, эмитируемого из ионного источника

Для измерения интегрального тока ионов, испускаемого источником пеннинговского типа, и изучения радиального распределения плотности тока (т.е. в плоскости поперечного сечения ионного потока) была использована сборка параллельных цилиндров Фарадея, перекрывающих практически полностью поперечное сечение ионного потока. С целью подавления влияния вторичной электронной эмиссии цилиндры Фарадея помещались во внешний заземленный экран, а также минимизировался телесный угол, под которым наблюдается входное отверстие с собирающего торца цилиндра. Поскольку кроме ионной компоненты в потоке присутствует и электронная компонента, измерение тока ионной компоненты возможно только в режиме насыщения ионного тока. Поэтому цилиндры Фарадея находились под специально подобранным, достаточно высоким отрицательным потенциалом смещения относительно экрана. На рис. 4 и 5 представлены результаты измерений полного тока ионов, покидающих разрядную область источника, и типичные

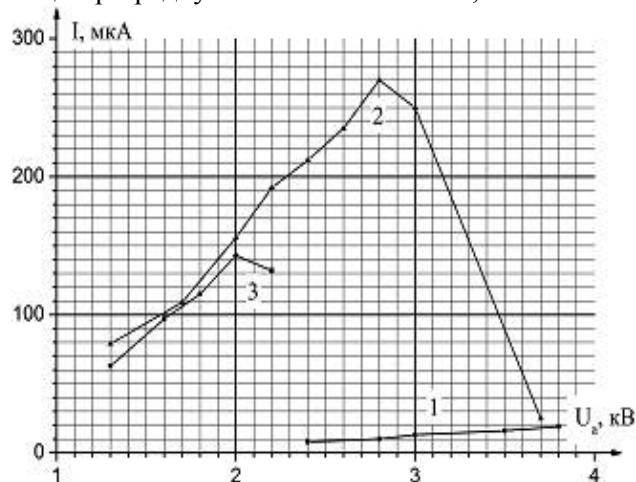


Рис. 4. Зависимость силы ионного тока  $I$ , регистрируемого на выходе источника пеннинговского типа в осевом направлении от потенциала анода  $U_a$ : 1 — давление аргона  $p = 5,2 \cdot 10^{-4}$  Торр; 2 —  $p = 6,4 \cdot 10^{-4}$  Торр; 3 —  $p = 7,0 \cdot 10^{-4}$  Торр.

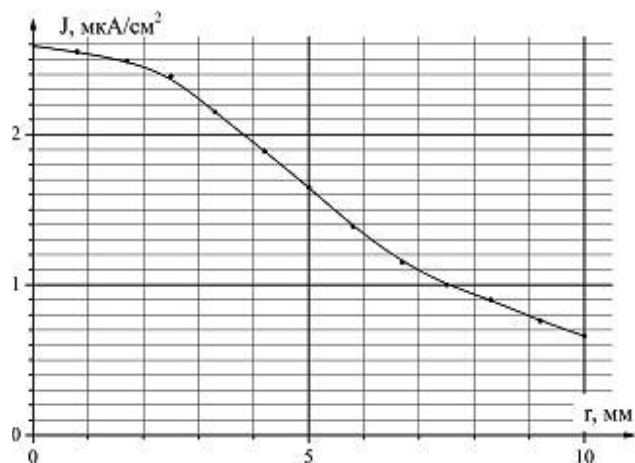


Рис. 5. Распределение плотности ионного тока  $J$  в поперечном сечении ионного потока ( $r$  – расстояние от оси симметрии ионного источника); давление аргона  $p = 2 \cdot 10^{-4}$  Торр; потенциал анода  $U_a = 2,6$  кВ; расстояние от выхода ионного источника до сечения, в котором регистрируется распределение, составляет  $L = 60$  мм; диаметр выходного отверстия в ускоряющей линзе источника  $d = 8$  мм; диаметр поперечного сечения ионного потока, регистрируемого сборкой цилиндров Фарадея диаметром  $D \approx 20$  мм.

результаты измерения пространственного распределения плотности тока эмитируемых ионов, соответственно. По результатам измерения пространственного распределения плотности ионного тока осуществлена оценка величины телесного угла, в пределах которого распространяется поток ионов, и определен угол расходимости потока, составившего величину  $\varphi \approx 10$  угл. град.

### Заключение

Для исследования параметров корпускулярного потока, испускаемого источником ионов типа Пеннинга, применён диагностический комплекс, включающий одиночный зонд Ленгмюра, трёхэлектродный сетчатый электростатический зонд, сборку цилиндров Фарадея. Применение указанных диагностических средств позволило зарегистрировать следующие параметры корпускулярных потоков на выходе из ионного источника: электронную температуру проникающей за пределы ионного источника плазмы и концентрацию ионов в ней, распределение ионов по на-

правленным кинетическим энергиям, полный ток эмитируемых ионов и распределение его плотности в поперечном сечении ионного потока, угол расходимости ионного потока. В качестве целей дальнейших исследований, по-видимому, должны стать обработка методики измерения потенциала проникающей плазмы и измерение эмиттанса корпускулярного потока, экстрагируемого из ионного источника.

### Литература

1. Клебанов Ю.Д., Григорьев С.Н. Физические основы применения концентрированных потоков энергии в технологии обработки материалов. Серия: Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Издательство МГТУ «Станкин». 2005.
2. Shulov V.A., Remnev G.E., Nochovnaya N.A., Ryabchikov A.I. // Surface and Coating Technology. 1997. No. 99. P. 74.
3. Hand book of microscopy for nanotechnology. — Boston: Kluwer Academic Publishers. 2005.
4. Голубев А.А., Минцев В.Б. // Атомная энергия. 2012. № 2. С. 124.
5. Кирьянов Г.И. Генераторы быстрых нейтронов. — М.: Энергоатомиздат. 1990.
6. Визгалов И.В. Методы генерации и диагностики плазмы. Лабораторный практикум. — Москва. МИФИ. 2008.
7. Лебедев Ю.А. Введение в зондовую диагностику плазмы пониженного давления. — М.: МИФИ, 2003.
8. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. — М.: МИФИ, 1997.
9. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат. 1969.
10. Еришов А. П. Метод электрических зондов Ленгмюра. Описание задачи спецпрактикума. — М.: Физический факультет МГУ. 2007.
11. Доброхотов Е.И., Москалев И.Н. // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 1048.
12. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Часть 1. — Новосибирск: НГУ. 1999.
13. Бульгинский Д.Г., Галактионов Б.В., Долматова К.А., Овсянников В.А. // ЖТФ. 1963. Т. 33. № 2. С. 183.
14. Марков В.Г., Прохорович Д.Е., Садилкин А.Г., Щитов Н.Н. // Успехи прикладной физики. 2013. № 1. С. 22.

---

**Diagnostic complex for research of corpuscular stream parameters  
from an ion source**

*A.N. Dolgov, V.G. Markov, A.A. Okulov, D.E. Prokhorovich, A. G. Sadilkin, and D.I. Yurkov*

All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA),  
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia  
E-mail: vnii4@vniia.ru

***Diagnostic methods of corpuscular stream parameters on inlet to the ion-optical system (on outlet of an ion source) were proposed and experimentally tested.***

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Sm

*Keywords:* gas-filled neutron tube, ion source, a method of retarding potential, the distribution function, current-voltage characteristic, three electrode electrostatic probe.

Bibliography — 14 references

*Received November 10, 2013*