DOI 10.18454/PMI.2016.6.864

Геонаноматериалы

УДК 533.9.082

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ СОБСТВЕННОГО ГАЗА

А.С.МУСТАФАЕВ[1], В.С.СУХОМЛИНОВ[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Методом плоского одностороннего зонда впервые измерены первые семь коэффициентов разложения по полиномам Лежандра функции распределения ионов по энергиям и углам для He^+ в He и Ar^+ в Ar в условиях, когда скорость иона, приобретаемая им на длине пробега, соизмерима со средней тепловой скоростью атомов. При произвольной напряженности электрического поля в плазме найдено аналитическое решение кинетического уравнения Больцмана для ионов в собственном газе в условиях, когда доминирующим процессом является резонансная перезарядка. Учтена зависимость сечения резонансной перезарядки от относительной скорости. Показано, что вид функции распределения ионов по скоростям существенно отличается от максвелловского распределения и определяется не одним, а двумя параметрами. Результаты расчетных и экспериментальных данных, с учетом аппаратной функции метода измерений, находятся в хорошем соответствии.

Ключевые слова: функция распределения ионов, плоский зонд, резонансная перезарядка

***Как цитировать эту статью*:** Мустафаев А.С. Функция распределения ионов в плазме собственного газа / А.С.Мустафаев, В.С.Сухомлинов // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 864-868. DOI 10.18454/PMI.2016.6.864

Введение. Исследование функции распределения ионов (ФРИ) по скоростям представляет особый интерес для современных приложений: плазменные нанотехнологии, тонкая очистка ионами поверхности, технология избирательного травления и создания рельефов за счет бомбардировки ионами, наноэлектроника нового поколения (одноэлектронные транзисторы, спинтроники и др.) [12, 16]. В этой связи особую актуальность представляют экспериментальные методы определения ФРИ в разрядах различного типа и, в частности, в плазме самостоятельного разряда постоянного тока. Нам неизвестны работы, в которых в таком разряде экспериментально определялась бы ФРИ.

Что касается теоретических исследований, то, несмотря на большое количество работ, среди них трудно выделить такие, где рассчитывалась бы ФРИ по энергиям и направлениям движения в плазме самостоятельного разряда постоянного тока. Так, дрейф ионов теоретически изучался в ряде работ [1, 6-9]. В работе Б.М.Смирнова [7] рассчитывалась дрейфовая скорость ионов инертных газов в плазме собственного газа в приближении сильного поля, при этом полагалось, что распределение атомов по энергиям имеет вид дельта-функции. В.И.Перель [6] приводит результаты расчета дрейфовой скорости ионов инертных газов в собственном газе, однако автором не получено выражение для ФРИ. В работе [8] (в пренебрежении всеми процессами, кроме перезарядки) для интерпретации экспериментальных данных рассчитано время, в течение которого ион, двигаясь в собственном газе, имеет составляющую скорости вдоль направления электрического поля в интервале от v_{iz} до $v_{iz} + dv_{iz}$. Это время с точностью до размерного множителя описывает ФРИ по проекции скорости на направление электрического поля. Однако получить ФРИ по полной скорости из этих результатов трудно. В монографии [1] при решении задачи о ФРИ в собственном газе пренебрегается рождением ионов, имеющих максвелловское распределение по скоростям вследствие перезарядки. В результате при постоянном сечении перезарядки получен максвелловский вид ФРИ с температурой, которая определяется электрическим полем в плазме. Авторы статьи [15] при разработке аналитической теории расчета ФРИ считали, во-первых, распределение ионов в плоскости, ортогональной электрическому полю, максвелловским, во-вторых, сечение резонансной перезарядки не зависящим от энергии иона, что, как известно, приводит к существенному искажению ФРИ.

В работах [10, 11] развивается новый метод расчета матричных элементов интеграла столкновений, который применен к решению нестационарного уравнения Больцмана методом моментов для ионов в условиях, когда основной процесс – резонансная перезарядка. Тем не менее, в сильных полях, когда отношение тепловой энергии атома и энергии иона, приобретаемой на длине пробега менее 0,1, использование данного подхода для расчета стационарной ФРИ

DOI 10.18454/PMI.2016.6.864

сложно. В работе [14] сравнивается аналитическое решение уравнения Больцмана для ионов в BGK-модели [13] и численное решение при постоянном сечении резонансной перезарядки. Показано, что при больших полях аналитическое решение дает неверную асимптотику для дрейфовой скорости иона.

В работе [4] аналитически решена задача об определении ФРИ в собственном газе в сильном поле. Сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными по скоростям дрейфа в сильных полях показало их хорошее совпадение. Кроме того, в этой же работе впервые зондовым методом измерена ФРИ ионов Hg^+ по энергиям в парах Hg. Продемонстрировано согласие экспериментальных и расчетных данных.

Метод определения функции распределения ионов в газоразрядной плазме. В настоящей работе предложен новый экспериментальный метод определения функции распределения ионов по энергиям и направлениям движения при произвольной напряженности электрического поля в плазме. Основное условие, ограничивающее область применимости метода, – малость толщины призондового слоя Дебая по сравнению с размерами плоского зонда. В методе используется часть зондовой характеристики, соответствующая положительному потенциалу зонда относительно потенциала плазмы.

Наибольшей экспериментальной сложностью при измерении ФРИ плоским зондом является необходимость одновременного его вращения и перемещения вдоль оси разряда. Для решения указанной задачи в плазму через боковую границу вводился вращающийся плоский односторонний зонд из танталовой фольги толщиной 30 мкм в виде круга диаметром 0,5 или 0,8 мм. К зонду приваривался токопровод из танталовой проволоки диаметром 0,1 мм. Зонд располагался на осевой линии разрядной трубки и монтировался на трехкоординатной микрометрической дистанционной системе перемещения, которая с помощью сильфонного соединения обеспечивала его пространственную установку с точностью ±0,01 мм и ориентацию относительно оси симметрии разряда в диапазоне углов (0-180°) с дискретным шагом 5° и точностью не хуже ±10".

Для измерения лежандровых коэффициентов F_{ia}^n ФРИ регистрировались вторые производные зондового тока I_U'', полученные радиотехническим методом двойной модуляции потенциала зонда [5]. Впервые методом плоского одностороннего зонда [2, 3] восстановлена полная функция распределения ионов по энергии и ее семь коэффициентов разложения в ряд по полиномам Лежандра $P_n(\cos(\theta))$, где θ – угол между направлением скорости и вектором напряженности электрического поля в плазме для He^+ в He и Ar^+ в Ar.

Развита аналитическая теория для описания ФРИ в собственном газе при условии, что основным процессом с участием ионов в плазме является резонансная перезарядка. При этом напряженность электрического поля в плазме может быть произвольной, а сечение перезарядки считается зависящим от относительной скорости иона и атома. ФРИ f_i находится в виде аналитического решения уравнения Больцмана:

$$\vec{v}_i \vec{\nabla}_r(f_i) + \frac{e\vec{E}}{m}\vec{\nabla}_v(f) = S_i(\vec{v}_i), \tag{1}$$

где $\vec{v}_i$ – скорость иона; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля; m – масса иона;

$$S_i(\vec{v}_i) = n_a\{f_a(\vec{v}_i)\int\sigma(v_r)v_r f_{in}(\vec{v}_i')d\vec{v}_i' - f_{in}(\vec{v}_i)\int\sigma(v_r)v_r f_a(\vec{v}_a')d\vec{v}_a'\};$$

$f_a(\vec{v}_i)$ – максвелловская функция распределения атомов по скоростям; $\sigma(v_r)$ – сечение перезарядки; v_r – модуль относительной скорости иона и атома.

Полученное аналитическое решение уравнения (1) отличается от максвелловской функции и зависит от двух параметров, один из которых определяет наиболее вероятную скорость ионов, которая близка к тепловой, другой – среднюю скорость ионов, которая зависит от напряженности электрического поля в плазме:

$$f_i(\chi,\mu) = \frac{F(\chi,\mu)}{2\pi\int_0^\infty\int_{-1}^1 F(\chi,\mu)d\mu d\chi}. \tag{2}$$

DOI *10.18454/PMI.2016.6.864*

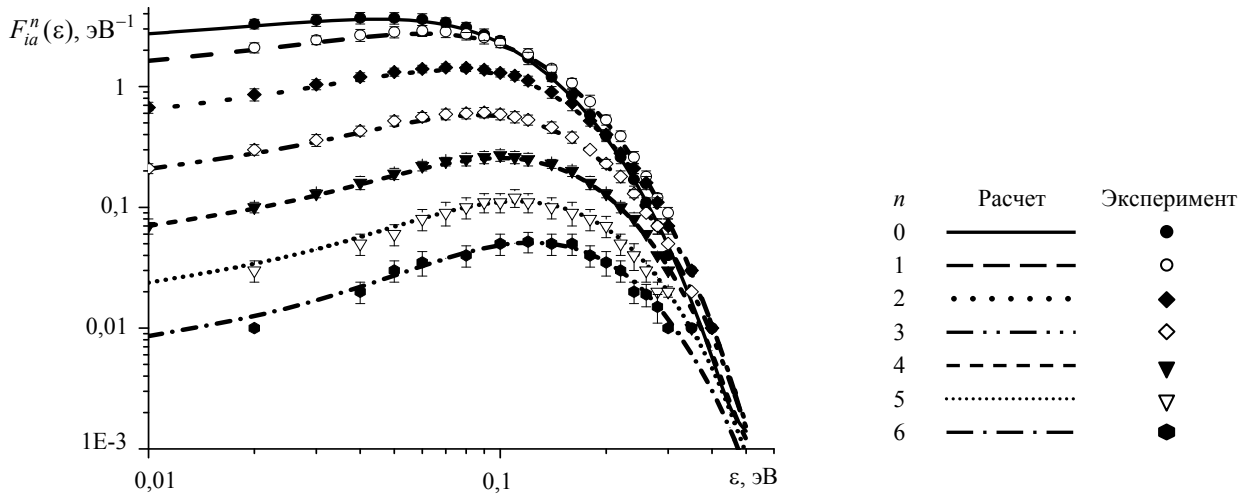


Рис.1. Энергетическая зависимость первых семи коэффициентов разложения ФРИ n Ar^+ в Ar по полиномам Лежандра для значения дифференцирующего сигнала Δε = 0,05 В; T = 450 K; E/P = 9 В/(см·мм рт. ст.); P = 0,2 мм рт. ст.

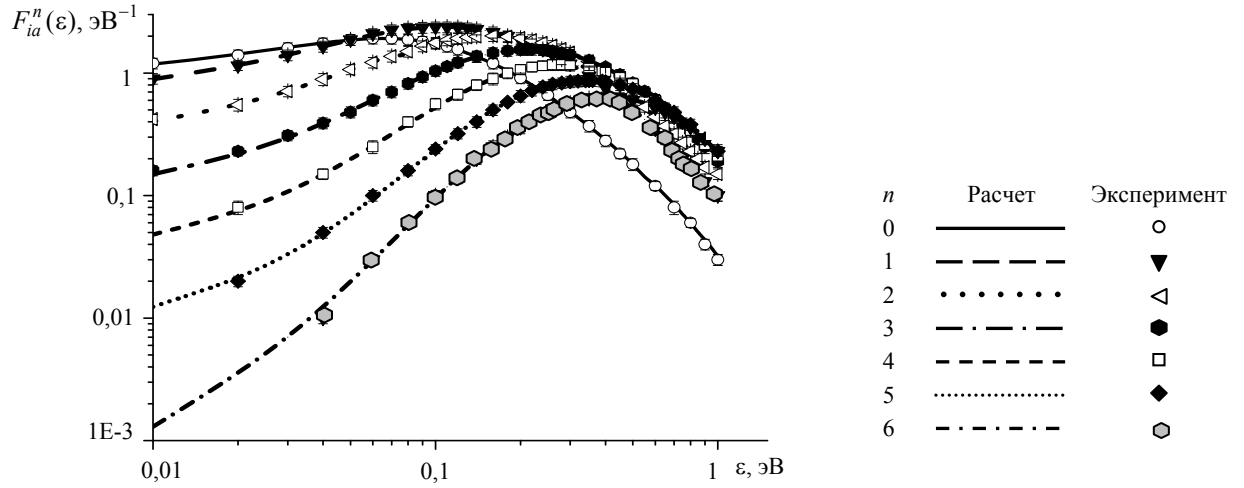


Рис.2. Энергетическая зависимость первых семи коэффициентов разложения ФРИ n He^+ в He по полиномам Лежандра для значения дифференцирующего сигнала Δε = 0,05 В; T = 600 K; E/P = 20 В/(см·мм рт. ст.); P = 0,2 мм рт. ст.

При $\mu \geq 0$

$$F(\chi,\mu) = \exp\left[-x^2(1-\mu^2) - 2\varepsilon_0\eta(x,\mu)\right]x^2\int_0^{\infty}\exp\left[-y^2 - 2\varepsilon_0\eta_1(x,y,\mu)\right]\overline{\varphi}(y,x,\mu)dy +$$

$$+\exp\left[-x^2(1-\mu^2) - 2\varepsilon_0\eta(x,\mu)\right]x^2\int_0^{x\mu}\exp\left[-y^2 + 2\varepsilon_0\eta_1(x,y,\mu)\right]\overline{\varphi}(y,x,\mu)dy;$$

при $\mu < 0$

$$F(\chi,\mu) = \exp\left[-x^2(1-\mu^2) - 2\varepsilon_0(x)\eta(x,\mu)\right]x^2\int_{-x\mu}^{\infty}\exp\left[-y^2 - 2\varepsilon_0(x)\eta_1(x,y,\mu)\right]\overline{\varphi}(y,x,\mu)dy,$$

где $\eta(x,\mu) = \int_0^{x\mu}\left\{\left[y^2 + x^2(1-\mu^2)\right]^{0,5} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}\exp\left[-\sqrt{y^2 + x^2(1-\mu^2)}\right]\left[1 + 0,5\left[y^2 + x^2(1-\mu^2)\right]^{1,25}\right]\right\}dy;$

$$x = \sqrt{\beta}v_i;\ \ \mu = \cos\theta;\ \ \ \varepsilon_0(x) = \frac{mn_a\sigma(x)}{2eE\beta};$$

$$\eta_1(x,y,\mu) = \int_0^{y}\left\{\left[z^2 + x^2(1-\mu^2)\right]^{0,5} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}\exp\left[-\sqrt{z^2 + x^2(1-\mu^2)}\right]\left[1 + 0,5\left[z^2 + x^2(1-\mu^2)\right]^{1,25}\right]\right\}dz;$$

$$\overline{\varphi}(x,y,\mu) = \frac{\sqrt{y^2 + x^2(1-\mu^2) + \beta\overline{V_i}^2}}{\sqrt{\beta}};\ \ \ \beta = \frac{m}{2kT_a}.$$

DOI *10.18454/PMI.2016.6.864*

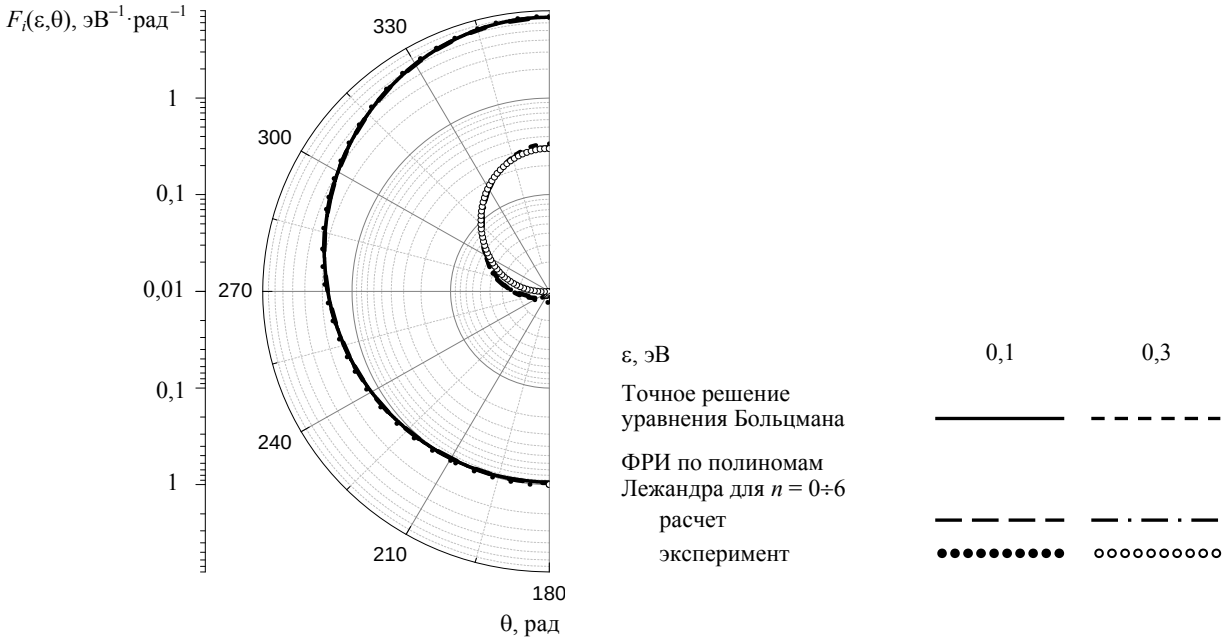


Рис.3. Угловая зависимость ФРИ для условий рис.1 при различной энергии иона ε

Теория надежно описывает большой массив известных экспериментальных данных по скоростям дрейфа и приведенным подвижностям атомарных и молекулярных ионов в плазме собственного газа и данные численных расчетов по методу Монте-Карло средней энергии ионов.

Сравнение с экспериментом. Проведено сравнение измеренных и рассчитанных по разработанной теории полной функции распределения ионов и первых семи коэффициентов Лежандра для Ar^+ в Ar (рис.1) и He^+ в He (рис.2), которое показало их хорошее соответствие.

Продемонстрирована возможность восстановления полной ФРИ из измерения разработанным зондовым методом первых семи коэффициентов разложения ФРИ в ряд по полиномам Лежандра (рис.3). При этом диапазон энергий ионов, в котором это восстановление осуществляется с известной точностью, определяется отношением тепловой энергии атомов к энергии, приобретаемой ионом на длине свободного пробега, и растет с его увеличением.

Заключение. В работе при произвольном значении напряженности электрического поля в плазме впервые методом плоского одностороннего зонда измерены первые семь коэффициентов разложения по полиномам Лежандра функции распределения ионов не только по энергиям, но и по углам. Эксперимент выполнен для He^+ в He и Ar^+ в Ar в условиях, когда скорость иона, приобретаемая им на длине пробега, близка к средней тепловой скорости атомов. Аналитически решено кинетическое уравнение Больцмана для ионов в собственном газе в условиях, когда доминирующим процессом является резонансная перезарядка. Учтена зависимость сечения резонансной перезарядки от относительной скорости. Показано, что вид функции распределения ионов по скоростям существенно отличается от максвелловского распределения и определяется не одним, а двумя параметрами, один из которых характеризует наиболее вероятную скорость ионов, которая близка к тепловой, другой – среднюю скорость ионов, которая зависит от напряженности электрического поля в плазме. Результаты расчетных и экспериментальных данных находятся в хорошем соответствии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голант В.Е.* Основы физики плазмы / В.Е.Голант, А.П.Жилинский, С.А.Сахаров. М.: Атомиздат, 1977. 150 с.

2. *Лапшин В.Ф.* Метод плоского одностороннего зонда для диагностики анизотропной плазмы / В.Ф.Лапшин, А.С.Мустафаев // Журнал технической физики. 1989. Т. 59. С. 35-45.

3. *Мустафаев А.С.* Динамика электронных пучков в плазме // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. С. 111-121.

4. *Мустафаев А.С.* Функция распределения ионов при произвольном электрическом поле в плазме / А.С.Мустафаев, В.С.Сухомлинов // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 29-39.

5. *Мустафаев А.С.* Экспериментальное и теоретическое определение сильно анизотропной функции распределения по скоростям в плазме собственного газа при больших полях / А.С.Мустафаев, В.С.Сухомлинов, М.А.Аинов // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 12. С. 45-48.

6. *Перель В.И.* Вычисление скорости дрейфа ионов в собственном газе // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1957. Т. 32. С. 526-533.

7. *Смирнов Б.М.* Подвижность ионов в собственном газе // Журнал технической физики. 1966. Т. 36. № 10. С. 1864-1871.

8. *Фок В.А.* О движении ионов в плазме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1948. Т. 18. С. 1048-1055.

9. *Фриш С.Э.* Спектроскопическое изучение движения ионов в плазме / С.Э.Фриш, Ю.М.Каган // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1947. Т. 17. С. 577-584.

10. *Эндер А.Я.* Кинетика ионов в нейтральном газе при резком включении электрического поля. Ч. 1. СЕМ-модель / А.Я.Эндер, И.А.Эндер // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 8-17.

11. *Эндер А.Я.* Кинетика ионов в нейтральном газе при резком включении электрического поля. Ч. 2. Различные модели взаимодействия / А.Я.Эндер, И.А.Эндер // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 18-28.

12. *Abe H.* Developments of Plasma Etching Technology for Fabricating Semiconductor Devices / H.Abe, M.Yoneda, N.Fujiwara // Jpn. J. Appl. Phys. 2008. Vol. 47. P. 1435-1438.

13. *Bhatnagar P.L.* A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems / P.L.Bhatnagar, E.P.Gross, M.Krook // Phys. Rev. 1954. Vol. 94. P. 511-518.

14. *Else D.* On the reliability of the Bhatnagar-Gross-Krook collision model in weakly ionized plasmas / D.Else, R.Kompaneets, S.V.Vladimirov // Physics of Plasmas. 2009. Vol. 16. P. 062106-062118.

15. Ion distribution function in a plasma with uniform electric field / M.Lampe, T.B.Röcker, G.Joyce, S.K.Zhdanov, A.V.Ivlev, G.E.Morfill // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 113703-113709.

16. *Lieberman M.A*. 7th ICPR and 63th GEC. 2010. Paris. France // Bull. of the APS. 2010. Vol. 55. N 7. P. 105-107.

***Авторы*: А.С.Мустафаев,** *д-р физ.-мат. наук*, *профессор*, *alexmustafaev@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*). **В.С.Сухомлинов,** *д-р физ.-мат. наук*, *доцент*, *prima-ivs@mail.ru* (*Санкт-Петербургский государственный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 06.10.2016.