УДК 04.1

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В ПЛАЗМЕ

А.С.МУСТАФАЕВ, *д-р физ.-мат. наук*, *профессор*, *alexmustafaev@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», *Санкт-Петербург*, *Россия*
В.С.СУХОМЛИНОВ, *д-р физ.-мат. наук*, *доцент*, *prima-ivs@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный университет, *Россия*

При произвольной величине электрического поля методом плоского одностороннего зонда впервые измерена функция распределения ионов по энергиям и направлениям движения для He^+ в He и Ar^+ в Ar. Эксперимент выполнен в условиях, когда скорость иона, приобретаемая им на длине свободного пробега, равна и больше средней тепловой скорости атомов и когда доминирующим процессом в плазме является резонансная перезарядка. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в плазме самостоятельного газового разряда даже при умеренных полях, когда параметр $E/P \approx 10 \div 20$ В/(см·мм рт.ст.), функция распределения ионов может обладать заметной анизотропией и сильно отличаться от максвелловского распределения.

***Ключевые слова*:** функция распределения ионов, зондовая диагностика плазмы, метод плоского одностороннего зонда, анизотропная плазма, плазменные нанотехнологии, кинетическое уравнение Больцмана, амбиполярное поле, максвелловская функция распределения.

Введение. Функция распределения ионов (ФРИ) по скоростям представляет интерес по многим причинам, среди которых: вопросы изучения плазмохимических реакций, идущих с участием ионов; определение подвижности ионов в плазменном объекте; процессы нагрева нейтрального компонента плазмы и ряд других. Среди технических приложений отметим современные плазменные нанотехнологии, тонкую очистку ионами поверхности изделий, технологию создания рельефов на поверхности за счет избирательного травления при бомбардировке потоками ионов [4]. Особенности дрейфа ионов теоретически изучались в ряде работ [1, 5, 6, 17-19, 21, 23, 24, 26, 29, 32], но наиболее полно эти результаты представлены в [1, 17, 19, 21, 23, 24, 26, 29, 32]. В.И.Перель [17] приводит результаты расчета дрейфовой скорости ионов инертных газов в собственном газе, однако ФРИ в явном виде в работе не вычисляет. Б.М.Смирнов [19] также рассчитывает дрейфовую скорость ионов инертных газов в плазме собственного газа в приближении сильного поля, при этом автор полагает, что распределение атомов имеет вид дельта-функции. В монографии [1] при решении задачи о функции распределения ионов в собственном газе авторы пренебрегали рождением ионов, имеющих максвелловское распределение по скоростям в результате перезарядки, что может приводить к заметным ошибкам при расчете ФРИ по скоростям.

В работе В.А.Фока [21] рассчитано время, в течение которого ион, двигаясь в собственном газе (в пренебрежении всеми процессами, кроме перезарядки), имеет составляющую скорости вдоль направления электрического поля в интервале от v_{iz} до $v_{iz} + dv_{iz}$. Ясно, что это время с точностью до размерного коэффициента описывает ФРИ по проекции скорости на направление электрического поля. Однако получить из этих результатов саму функцию распределения по полной скорости затруднительно.

В работах А.Я.Эндера [23, 24] 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 к энер-

гии иона, приобретаемой на длине пробега, менее 0,05, использование данного подхода для расчета стационарной ФРИ затруднительно.

В работе [29] сравнивается аналитическое решение уравнения Больцмана для ионов в BGK-модели [26] и численное решение при постоянном сечении резонансной перезарядки. Показано, что при больших полях аналитическое решение дает неверную асимптотику для дрейфовой скорости иона.

Автор работы [32] развивает моментный метод решения уравнения Больцмана для заряженных частиц при различных потенциалах их взаимодействия с атомами.

В [35] приводится обзор методов решения уравнения Больцмана для заряженных частиц как для режимов близких к гидродинамическим, так и в противоположном случае. В последнем варианте излагаются основы моментного метода (и его модификации). Рассмотрены случаи как постоянных, так и переменных полей, в частности RF-разряд.

Что касается измерения ФРИ по скоростям в плазме самостоятельного разряда постоянного тока, то нам неизвестны такие работы, за исключением статьи С.Э.Фриша и Ю.М.Кагана [22], где при наблюдении вдоль оси разряда спектроскопически измерялся допплеровский сдвиг ионных линий в аргоне. По размеру сдвига сделано заключение о средней скорости ионов, которая в условиях экспериментов авторов оказалась порядка 10^4 см/с.

В ряде работ теоретически исследовались различные аспекты дрейфа ионов в плазме емкостного разряда низкого давления [27, 30, 36].

В работе [14] 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. Было установлено, что ФРИ ионов сильно отличается от максвелловской и зависит от двух параметров. Кроме того, в этой же работе впервые зондовым методом была измерена ФРИ ионов Hg^+ по энергиям в парах. Продемонстрировано согласие экспериментальных и расчетных данных.

Настоящая работа является первой частью исследования и посвящена экспериментальному определению ФРИ по скоростям зондовым методом в тлеющем разряде собственного газа в постоянном электрическом поле произвольной величины. При этом учтено, что медленные ионы возникают с атомной температурой в результате перезарядки, которая считается доминирующим процессом. Предполагалось, что скорость ионов перед столкновением значительно превышает скорость атомов.

Экспериментальное определение функции распределения ионов в плазме тлеющего газового разряда. ***Техника и методика эксперимента.*** Нами впервые проведены измерения ФРИ по энергиям методом плоского одностороннего зонда в положительном столбе тлеющего разряда в инертных газах He и Ar при давлениях 0,02-0,2 мм рт.ст. Разряд создавался в кварцевой трубке диаметром 30 мм и длиной 300 мм между плоским импрегнированным катодом косвенного накала диаметром 11 мм и молибденовым анодом диаметром 20 мм. Предварительная термическая подготовка прибора и безмасляная откачка обеспечили остаточное разрежение 10^{-8} мм рт.ст. в рабочем режиме.

Температура катода измерялась W-Re-микротермопарами и поддерживалась электронной системой стабилизации на уровне 1000-1500 К с точностью ±5 градусов. Стабильность эмиссионного тока катода и разрядного тока в процессе измерений при различных давлениях He и Ar контролировалась электронной системой стабилизации. Разрядный ток изменялся в диапазоне 0,05-0,5 А. Оценки толщины призондового слоя показали, что в условиях эксперимента выполняется ленгмюровское приближение бесстолкновительного слоя [34] и его толщина много меньше диаметра зонда.

Наибольшей экспериментальной сложностью при измерении ФРИ плоским зондом является необходимость одновременного вращения зонда и его перемещения вдоль оси раз-

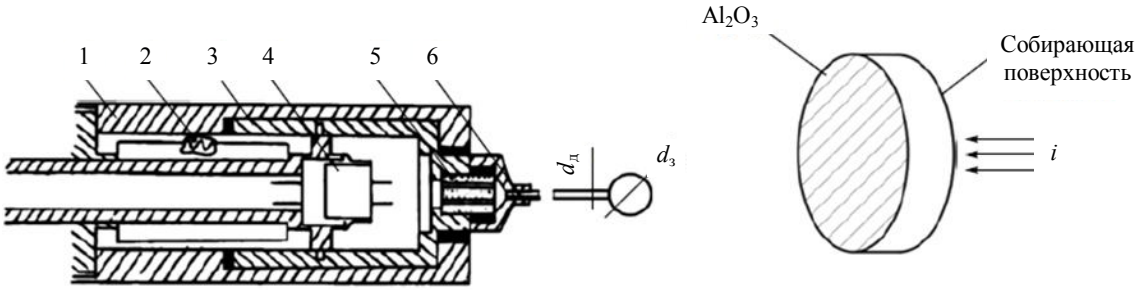


Рис.1. Чувствительный элемент зонда (*а*) и система изменения ориентации плоского зонда относительно оси разряда (*б*)

1 – неподвижный корпус; 2 – сильфонное соединение; 3 – поворотная втулка; 4 – металлокерамический токоввод; 5 – керамический изолятор; 6 – изоляция зонда; $d_д$ – диаметр держателя зонда; $d_з$ – диаметр зонда; i – электронный ток на зонд

ряда. 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. Зонд располагался на осевой линии разрядной трубки. К зонду приваривался токопровод из танталовой проволоки диаметром 0,1 мм. Токопровод и одна сторона зонда защищались специальным алундовым покрытием, отожженным в вакууме при температуре 1800 К. Зонд монтировался на трехкоординатной микрометрической системе перемещения (рис.1), 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". Контроль ориентации плоскости поверхности зонда осуществлялся оптическим окуляр-микрометром.

Для измерения лежандровых коэффициентов F_{ia}^{n} ФРИ регистрировались вторые производные зондового тока $I_U^{''}$, полученные радиотехническим методом двойной модуляции потенциала зонда. Экспериментальная установка и метод измерения второй производной зондового тока по потенциалу зонда детально описаны в статьях [7, 9]. Формировался модулирующий сигнал вида

$$u(t) = \Delta\varepsilon(1 + \cos\omega_1 t)\cos\omega_2 t. \qquad (1)$$

Аппаратная функция метода имеет вид [20]

$$A(z) = \frac{8}{\pi}\int_{\frac{|z|}{2\sqrt{2}}}^{1}\left[\frac{u^2 - \frac{z^2}{8}}{u}(1-u)\right]^{0.5} du \quad \text{при } |z| < 2\sqrt{2}; \qquad (2)$$

$$A(z) = 0 \quad \text{при } |z| > 2\sqrt{2},$$

где $z = \sqrt{2}(\varepsilon' - \varepsilon)/\Delta\varepsilon$; $\Delta\varepsilon$ – амплитуда дифференцирующего сигнала.

Учет аппаратных искажений, выбор оптимальных амплитуд дифференцирующего сигнала $\Delta\varepsilon$ и контроль линейности системы регистрации проводился по методике [11, 20]. Использовались значения $\Delta\varepsilon$ = 0,05; 0,1 и 0,2 В; $\omega_1 = 6\cdot10^3$ Гц; $\omega_2 = 6\cdot10^5$ Гц.

В области отрицательных потенциалов зонда величина $I_U^{''}$ определяется электронной составляющей зондового тока и пропорциональна функции распределения электронов по скоростям. Как известно [8, 31], электронный ток на плоский зонд практически не зависит

от положительного потенциала зонда. При этом ионы движутся в задерживающем поле и вторая производная тока ионов несет полную информацию функции их распределения. Ввиду этого $I_U^{''}$ в исследуемом диапазоне потенциалов 0-1 В в основном описывает распределение ионов. Особое внимание при регистрации $I_U^{''}$ уделялось поддержанию стабильности электронного тока разряда.

Для точной реконструкции ФРИ выполнен детальный анализ факторов, влияющих на результаты зондовых измерений [10]. Приняты меры для исключения искажений, возникающих при измерении ФРИ из-за конечной проводимости плазмы [2, 3, 25]. С этой целью в трубку на расстоянии 20 и 25 см от катода впаивались: плоский односторонний зонд в качестве опорного и сферический зонд диаметром 0,3 мм для контроля точности реконструкции изотропной компоненты ФРИ F_{ia}^0. В процессе измерений отсутствие искажающего влияния колебаний контролировалось путем регистрации $I_U^{''}$ при выключенном дифференцирующем сигнале. Учтены аппаратные искажения [8, 20], возможные влияния нестабильности электронного и ионного токов, размеров зонда [3, 16]. Особо тщательно контролировались загрязнения поверхности зонда [28, 37].

Принятые в эксперименте специальные меры по стабилизации всех критических параметров электрического разряда обеспечили надежную воспроизводимость результатов не хуже 0,5 %. Дополнительно контролировались спектры колебаний разрядного тока и напряжения в диапазоне частот до 300 МГц.

Предварительная градуировка измерительной системы [10] обеспечила не только относительные, но и абсолютные измерения величин $I_U^{''}$, что, в свою очередь, позволило надежно реконструировать угловые гармоники функции распределения ионов F_{ia}^n в абсолютной мере.

Потенциал пространства определялся по нулю второй производной зондового тока [28]. Концентрации электронов и ионов вычислялись интегрированием нулевых гармоник функций распределения электронов и ионов по энергии. Сравнение этих концентраций показало их совпадение в пределах 10 %, что, с учетом погрешности зондовых измерений, является удовлетворительным результатом.

Управление экспериментом обеспечивалось многоканальным измерительно-вычислительным комплексом на базе персонального компьютера [13]. Специализированное программное обеспечение и радиотехническая элементная база позволили проводить цифровую регистрацию данных, получаемых в стационарных и импульсных режимах, а также их комплексную обработку программными средствами в реальном масштабе времени.

Применение цифровой регистрации существенно увеличило точность и чувствительность метода диагностики, повысило достоверность результатов исследований.

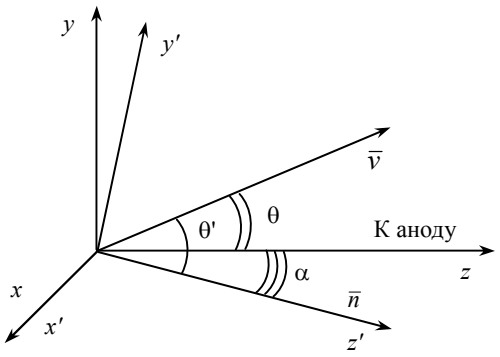


Рис.2. Геометрия задачи
$\bar{n}$ – нормаль к непроводящей поверхности зонда

Метод плоского одностороннего зонда для восстановления полной ФРИ по скоростям. Представленный метод является развитием традиционной методики ленгмюровских зондов [31]. Метод предназначен для диагностики аксиально-симметричной плазмы и позволяет реконструировать полную функцию распределения ионов и ее лежандровы компоненты. В такой плазме в сферической системе координат с полярной осью, направленной вдоль оси симметрии (рис.2), ФРИ по скоростям не зависит от азимутального угла:

$$F_{ia}(\bar{r},\bar{v}) = F_{ia}(\bar{r},\bar{V},\theta), \tag{3}$$

где $\bar{V} = |\bar{v}|$; θ – полярный угол.

Сила ионного тока, поступающего на зонд из плазмы, рассчитывается в предположении, что все ионы, преодолевшие потенциальный барьер зонда, поглощаются им и что отсутствует вторичная эмиссия с его поверхности:

$$I = qS\int v_n F_{ia}(\bar{v})d\bar{v} = \frac{2qS}{m^2}\int_0^{2\pi} d\phi' \int_{qU}^{\infty} \varepsilon d\varepsilon \int_0^{\theta'_{\max}} F_{ia}(\varepsilon,\theta',\phi')\cos\theta'\sin\theta' d\theta', \tag{4}$$

где v_n – нормальная к поверхности зонда составляющая вектора скорости электрона, $v_n = v\cos\theta' \geq v_{\min} = (2qU/m)^{1/2}$; m – масса иона; U – положительный относительно плазмы потенциал зонда; $\varepsilon = mv^2/2$; φ' и θ' – азимутальный и полярный углы вектора $\bar{v}$ в сферической системе координат, полярная ось которой совпадает с нормалью к непроводящей поверхности плоского зонда.

Дифференцируя (4) дважды по потенциалу U, получим

$$I''_U = \frac{q^3 S}{m^2}\left[\int_0^{2\pi} F_{ia}(qU,\theta'=0,\phi')d\phi' - \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{qU}^{\infty} \frac{\partial}{\partial(qU)} F_{ia}(\varepsilon,\theta'_{\max},\phi')d\varepsilon\right]. \tag{5}$$

Перейдем в (5) к лабораторной системе координат, в которой ФРИ имеет вид (3). Для этого воспользуемся соотношением, связывающим полярный угол лабораторной системы координат θ с углами θ' и φ' и углом α между полярными осями систем координат (рис.2):

$$\cos\theta = \cos\theta'\cos\alpha + \sin\theta'\sin\alpha\cos\phi'.$$

Тогда придем к выражению

$$I''_U(qU,\alpha) = \frac{2\pi q^3 S}{m^2}\left[F_{ia}(qU,\alpha) - \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} d\phi' \int_{qU}^{\infty} \frac{\partial}{\partial(qU)} F_{ia}(\varepsilon,\theta^*)d\varepsilon\right], \tag{6}$$

где $\cos\theta^* = \sqrt{\frac{qU}{\varepsilon}}\cos\alpha + \sqrt{1-\frac{qU}{\varepsilon}}\sin\alpha\cos\phi'$.

Соотношение (6) представляет интегральное уравнение относительно искомой ФРИ. Для нахождения функции распределения представим $F_{ia}(\varepsilon,\theta)$ и $I''_U(qU,\alpha)$ в виде разложения в ряды по полиномам Лежандра [7, 33]. Отметим, что эти ряды сходятся абсолютно и равномерно, если функции F_{ia} и I''_U дважды дифференцируемы по углу:

$$F_{ia}(\varepsilon,\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} F_{ia}^n(\varepsilon)P^n(\cos\theta); \tag{7}$$

$$I''_U(qU,\alpha) = \frac{2\pi q^3 S}{m^2}\sum_{n=0}^{\infty} F^n(qU)P^n(\cos\alpha). \tag{8}$$

Рассмотрим восстановление полной ФРИ. После подстановки (7) и (8) в (6) получим для F_{ia}^n и F^n соотношение

$$F_{ia}^n(qU) = F^n(qU) + \int_{qU}^{\infty} F_{ia}^n(\varepsilon)\frac{\partial}{\partial(qU)}P^n\left(\sqrt{\frac{qU}{\varepsilon}}\right)d\varepsilon. \tag{9}$$

Здесь использована теорема сложения для полиномов Лежандра

$$P^n(\cos\theta^*) = P^n(\cos\alpha)P^n\left(\sqrt{\frac{qU}{\varepsilon}}\right) + 2\sum_{k=1}^{n}\frac{(n-k)!}{(n+k)!}P_k^n(\cos\alpha)P_k^n\left(\sqrt{\frac{qU}{\varepsilon}}\right)\cos k\phi' .$$

Выражение (9) является интегральным уравнением Вольтерра II рода. Используя его резольвенту, можно разрешить (9) относительно F_{ia}^n:

$$F_{ia}^n(qU) = F^n(qU) + \int_{qU}^{\infty} F^n(\varepsilon)R^n(qU,\varepsilon)d\varepsilon . \qquad (10)$$

Подстановка в (10) соотношения для лежандрова компонента

$$F_{ia}^n(qU) = \frac{(2n+1)m^2}{4\pi q^3 S}\int_{-1}^{1} I_U''(qU,x)P^n(x)dx$$

приводит к основной формуле метода (здесь $x = \cos\alpha$)

$$F_{ia}^n(qU) = \frac{(2n+1)m^2}{4\pi q^3 S}\int_{-1}^{1}\left[I_U''(qU,x) + \int_{qU}^{\infty} I_U''(\varepsilon,x)R^n(qU,\varepsilon)d\varepsilon\right]P^n(x)dx . \qquad (11)$$

В заключение приведем явный вид первых трех лежандровых компонентов:

$$F_{ia}^0(qU) = \frac{m^2}{4\pi q^3 S}\int_{-1}^{1} I_U''(qU,x)dx ;$$

$$F_{ia}^1(qU) = \frac{3m^2}{4\pi q^3 S}\int_{-1}^{1}\left[I_U''(qU,x) + \frac{1}{2qU}\int_{qU}^{\infty} I_U''(\varepsilon,x)d\varepsilon\right]x\,dx ;$$

$$F_{ia}^2(qU) = \frac{5m^2}{8\pi q^3 S}\int_{-1}^{1}\left[I_U''(qU,x) + \frac{3}{2(qU)^{3/2}}\int_{qU}^{\infty}\sqrt{\varepsilon}I_U''(\varepsilon,x)d\varepsilon\right](3x^2-1)dx .$$

Таким образом, метод плоского одностороннего зонда заключается в измерении значений $I_U''(qU, \alpha)$ при различных ориентациях зонда в плазме и последующем расчете по формулам (7) и (11) ФРИ и ее лежандровых компонентов F_{ia}^n. Метод не требует априорной информации о ФРИ – основная формула метода (11) верна при любой степени анизотропии плазмы. Способ оценки диапазона энергий ионов, в котором лежандровы компоненты функции распределения реконструируются с необходимой точностью, подробно описан в [13].

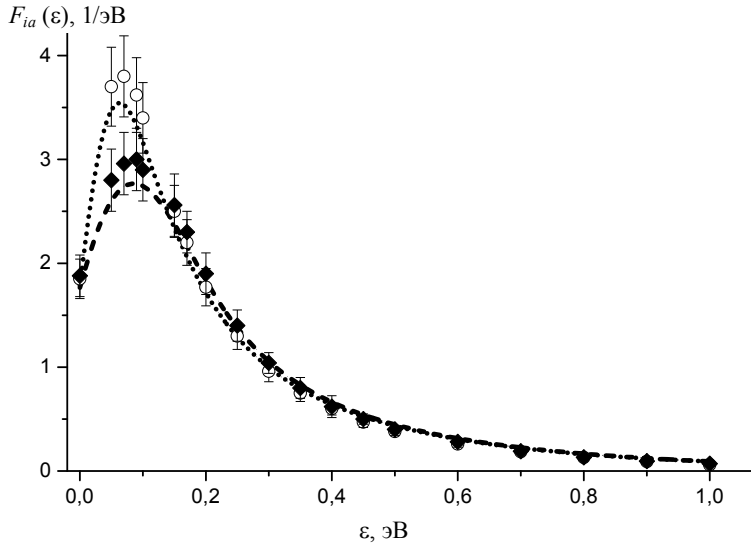
Представленный метод универсален и с успехом применялся: в плазме послесвечения [12], в пучковой плазме при исследовании функций распределения электронов по энергии и по импульсу [9] и при исследовании «удаленных» плазменных объектов [15].

Экспериментальные данные восстановления полной ФРИ по энергиям и направлениям движения. При реконструкции функции распределения ионов по формуле (11) использовалась аппаратная функция (2) с размерами дифференцирующего сигнала $\Delta\varepsilon$ = 0,05; 0,1 и 0,2 В. На рис.3 для сравнения приведены измеренные функции распределения ионов He^+ в He при давлении 0,2 мм рт.ст. и температуре нейтралов T_a = 600 K. Здесь же приведены результаты расчетов [14] с учетом аппаратной функции. Видно, что приближение сильного поля занижает функцию распределения в области максимума и, наоборот, завышает при более высоких энергиях. Эти расхождения, видимо, вызваны тем, что в рассматривае-

мом случае отношение средней тепловой энергии атомов к энергии иона, приобретаемой на длине пробега относительно процесса перезарядки, $\varepsilon_0 \approx 0{,}124$ и приближение сильного поля $(\sqrt{\varepsilon_0} << 1)$, строго говоря, не применимо. Аналогично, на рис.4 приведены подобные данные, но для ионов Ar^+ в Ar. При этом для Ar^+ в Ar параметр $\varepsilon_0 \approx 0{,}689$, функция распределения является менее анизотропной и более низкоэнергетичной, чем в случае ионов He^+ в He на рис.3. Видно, что расхождение расчетов по теории сильного поля [14] с экспериментальными данными еще более значительно.

Из вышеприведенных экспериментальных данных следует, что ФРИ в условиях измерений далека от максвелловской с температурой поля и (как и полученная в [14] в условиях сильного поля) имеет максимум при значении энергии ионов порядка средней тепловой энергии атомов.

С применением описанной зондовой методики нами были измерены энергетические зависимости первых семи коэффициентов разложения ФРИ по полиномам Лежандра для ионов He^+ в He и Ar^+ в Ar соответственно. Полученные данные свидетельствуют о сильной анизотропии ФРИ в условиях измерений. Обсуждение этих экспериментальных данных и возможность реконструкции полной функции распределения по энергиям и направлениям движения мы проведем во второй части работы при сравнении результатов экспериментов с разработанной нами теорией.



Приближение сильного поля: •••••• Δε = 0,05 В; ------- Δε = 0,1 В
Зондовые измерения: ○ – Δε = 0,05 В; ◆ – Δε = 0,1 В

Рис.3. Сравнение функций распределения ионов He^+ в He в приближении сильного поля [19] с экспериментальными данными, полученными нами зондовым методом (T_a = 600 K; E/P_0 = 20 В/(см·мм рт.ст.); P = 0,2 мм рт.ст.; ε_0 = 0,124) при различных значениях дифференцирующего сигнала Δε

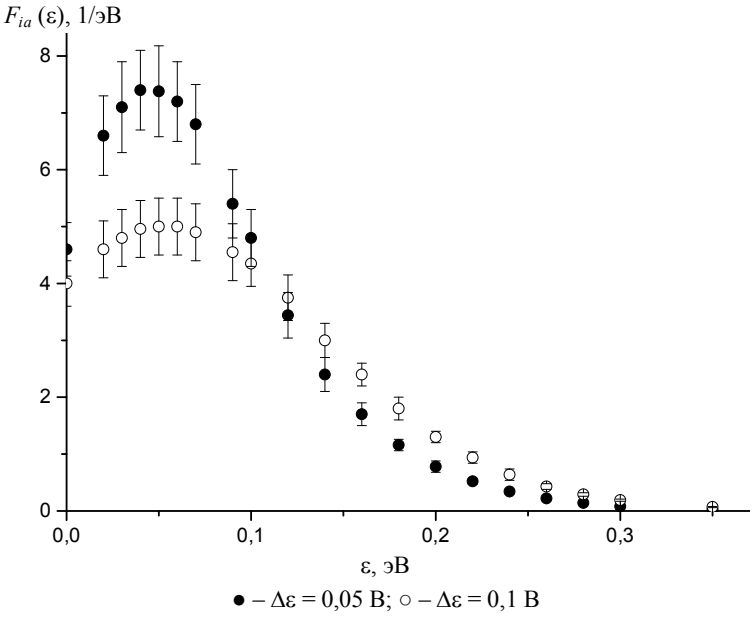


Рис.4. Функции распределения ионов Ar^+ в Ar, полученные нами зондовым методом (T_a = 450 K; E/P_0 = 9 В/(см·мм рт.ст.); P = 0,2 мм рт.ст.; ε_0 = 0,689), при различных значениях дифференцирующего сигнала Δε

Заключение. Таким образом, в работе предложен новый метод определения функции распределения ионов по энергиям и направлениям движения. Экспериментально рассмотрены условия, когда доминирующим процессом в плазме является резонансная перезарядка. Основное условие, ограничивающее область применимости метода, – малость толщины призондового слоя Дебая по сравнению с размерами зонда.

Впервые методом плоского одностороннего зонда измерена функция распределения ионов по энергии для He^+ в He и Ar^+ в Ar. Измерения выполнены при отношении длины пробега иона к характерному размеру плоского зонда равном 0,7 и 2.

Необходимы дальнейшие исследования диапазона энергий ионов, в котором реконструкция ФРИ может осуществляться с хорошей точностью, и зависимости этого диапазона энергий от параметра ε_0.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. *Демидов В.И.* Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы / В.И.Демидов, Н.Б.Колоколов, А.А.Кудрявцев. М.: Энергоатомиздат, 1996. 237 с.

3. *Иванов Ю.А.* Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии / Ю.А.Иванов, Ю.А.Лебедев, Л.С.Полак. М.: Наука, 1981. 144 с.

4. *Иванов Ю.А.* Энергетическое распределение электронов в низкотемпературной плазме/ Ю.А.Иванов, Л.С.Полак; Под ред. Б.М.Смирнова // Химия плазмы. М.: Атомиздат. 1975. Вып.2. С.161-198.

5. *Каган Ю.М.* О движении положительных ионов в собственном газе / Ю.М.Каган, В.И.Перель // Доклады Академии наук СССР. 1954. Т.98. С.575-581.

6. *Каган Ю.М.* О теории зондов Лэнгмюра / Ю.М.Каган, В.И.Перель // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1955. Т.29. С.411-450.

7. *Лапшин В.Ф.* Метод плоского одностороннего зонда для диагностики анизотропной плазмы / В.Ф.Лапшин, А.С.Мустафаев // Журнал технической физики. 1989. Т.59. № 2. С.35-45.

8. *Лебедев Ю.А.* Электрические зонды в плазме пониженного давления (http:// plasma. karelia. ru›pub / fntp / Lebedev.pdf).

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

10. *Мустафаев А.С.* Зондовая диагностика анизотропной функции распределения электронов в плазме / А.С.Мустафаев, А.Ю.Грабовский // Теплофизика высоких температур. 2012. Т 50. № 6. С.841-850.

11. *Мустафаев А.С.* Зондовые измерения электронной функции распределения в неравновесной плазме / А.С.Мустафаев, А.П.Мезенцев, В.Я.Симонов // Журнал технической физики. 1984. Т.54. С.2153-2161.

12. *Мустафаев А.С.* Пучковая неустойчивость плазмы послесвечения инертных газов // Журнал технической физики. 2004. Т.74. № 9. С.120-121.

13. *Мустафаев А.С.* Функция распределения электронов в анизотропной плазме / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2013. 135 с.

14. *Мустафаев А.С.* Экспериментальное и теоретическое определение сильно анизотропной функции распределения ионов 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.45-55.

15. *Мустафаев А.С.* Электронно-поляризационное исследование фукции распределения электронов в анизотропной плазме / А.С.Мустафаев, И.Б.Мовчан, А.П.Мезенцев // Журнал технической физики. 2000. Т.70. № 11. С.24-30.

16. *Овсянников А.А.* Диагностика низкотемпературной плазмы / А.А.Овсянников, В.А.Энгельшт, Ю.А.Лебедев. Новосибирск: Наука, 1994. 483 с.

17. *Перель В.И.* Вычисление скорости дрейфа ионов в собственном газе // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1957. Т.32. С.526-534.

18. *Сена Л.А.* Столкновения электронов и ионов с атомами газа // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1946. Т.16. С.734-741.

19. *Смирнов Б.М.* Подвижность ионов в собственном газе // Журнал технической физики. 1966. Т.36. С.75-103.

20. Сравнение на основе аппаратных функций различных зондовых методов измерения энергетического распределения электронов в плазме / Л.М.Волкова, В.И.Демидов, Н.Б.Колоколов, Е.А.Кралькина // Теплофизика высоких температур. 1984. Т.22. № 4. С.757-766.

21. *Фок В.А.* О движении ионов в плазме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1948. Т.18. С.134-145.

22. *Фриш С.Э.* Спектроскопическое изучение движения ионов в плазме / С.Э.Фриш, Ю.М.Каган // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1947. Т.17. С.577-582.

23. *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.

24. *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.

25. *Berger E.* The determination of electron energy distributions in discharges with secondary plasma parts / E.Berger, A.Heisen // J. Phys.D: Appl. Phys. 1975. Vol.8. P.629-634.

26. *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 and M.Krook // Phys. Rev. 1954. Vol.94. P.511-518.

27. Comparison of measurements and particle-in-cell simulations of ion energy distribution functions in a capacitively coupled radio-frequency discharge/ D.O'Connell, A.R.Zorat, A.R.Ellingboe, M.M.Turner // Physics of Plasmas. 2007. Vol.14. P.103510-103517.

28. *Demidov V.A.* Probe measurements of electron-energy distributions in plasmas: what can we measure and how can we achieve reliable results? / V.A.Demidov, V.I.Godyak // J.Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol.44. P.233001-233009.

29. *Else D.* On the reliability of the Bhatnagar–Gross–Krook collision model in weakly ionized plasmas / D.Else, R.Kompaneets and S.V.Vladimirov // Physics of Plasmas. 2009. Vol.16. P.62106-62118.

30. *Israel D.* Charge exchange collisions and the ion velocity distribition at the electrode of low pressure capacitive RFdischarges / D.Israel, K.-U.Riemann, L.Tsendin // Journal of Applied Physics. 2006. Vol.99. P.093303-093308.

31. *Langmuir I.* The Theory of Collectors in Gaseous Discharges / I.Langmuir, H.M.Mott-Smith // Phys. Rev. 1926. Vol.28. P.723-727.

32. *Larry A.Viehland.* Gaseous lon mobility in electric fields of arbitrary strength / A.Viehland Larry, E.A.Mason // Annals of Physics. 1975. Vol.91. P.499-506.

33. *Mustafaev A.S.* Probe Method for Investigation of Anisotropic EVDF. Electron Kinetics and Applications of Glow Discharges. [ed.] L.Tsendin, U.Kortshagen. N.Y.–London: Plenum Press: NATO Int. Sci. Session. 1998. Vol.367. P.531-534.

34. *Phelps A.V.* Cross Sections and Swarm Coefficients for Nitrogen Ions and Neutrals in N_2 and Argon Ions and Neutrals in Ar for Energies from 0,1 eV to 10 keV // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1991. Vol.20. P.557-561.

35. Recent advances in the application of Boltzmann equation and fluid equation methods to charged particle transport in non-equilibrium plasmas / R.D.White, R.E.Robson, S.Dujko, P.Nicoletopoulos, B Li // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol.42. P.194001-194007.

36. Reconstruction of ion energy distribution function in a capacitive RF discharge / W.C.Chen, X.M.Zhu, S.Zhang, Y.K.Pu // Applied Physics Letters. 2009. Vol.94. P.211503-211509.

37. *Swift J.D.* Electrical Probes for Plasma Diagnostics / J.D.Swift, M.J.R.Schwar // London: Iliffe Books. 1970. P.172-178.

REFERENCES

1. *Golant V.E.*, *Zilinskiy A.P.*, *Saharov S.A.* Osnovi fiziki plasmi (*Fundamentals of Plasma Physics*). Moscow: Atomizdat, 1977, p.150.

2. *Demidov V.I.*, *Kolokolov N.B.*, *Kudryavcev A.A.* Zondovie metodi issledovania nizkotemperaturnoi plasmi (*Low-temperature plasma probe methods*). Moskow: Energoatomizdat, 1996, p.237.

3. *Ivanov Yu.A.*, *Lebedev Yu.A.*, *Polak L.S.* Metodi kontaktnoi diagnostiki v neravnovesnoi plasmohimii (*Methods of contact diagnostics of nonequilibrium plasma chemistry*). Moskow: Nauka, 1981, p.144.

4. *Ivanov Yu.A.*, *Polak L.C.* Energeticheskoe raspredelenie electronov v nizkotemperaturnoi plasma (*The energy distribution of electrons in low-temperature plasma*). Chimiya plasmy. Moscow: Atomizdat, 1975. Iss.2, p.161-198.

5. *Kagan Yu.M.*, *Perel V.I.* O dvizenii polozitelnich ionov v sobstvennom gaze (*On the motion of positive ions in their own gas*). Docladi Academii Nauk USSR. 1954. Vol.98, p.575-581.

6. *Kagan Yu.M.*, *Perel V.I.* O teorii zondov Lengmyura (*On the theory of Langmuir probes*). Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1955. Vol.29, p.411-450.

7. *Lapshin V.F.*, *Mustafaev A.S.* Metod ploskogo odnostoronnego zonda dlya diagnostiki anizotropnoi plasmi (*Flat one-sided probe method for the diagnosis of anisotropic plasma*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1989. Vol.59. N 2, p.35-45.

8. *Lebedev Yu.A.* Elektricheskie zondi v plasme ponizennogo davlenia (*Electric probes in low-pressure plasma*) (http://plasma.karelia.ru›pub/fntp/Lebedev.pdf).

9. *Mustafaev A.S.* Dinamika electronnih puchkov v plasme (*The dynamics of electron beams in plasma*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2001. Vol.71, p.111-121.

10. *Mustafaev A.S.*, *Grabovskiy A.Yu.* Zondovaya diagnostika anizotropnoi funkcii raspredelenia elektronov v plasme (*Probe diagnostics of the anisotropic electron distribution function in plasma*). Teplofizika vysokikh temperatur. 2012. Vol.50. № 6, p.841-850.

11. *Mustafaev A.S.*, *Mezensev A.P.*, *Simonov V.Ya.* Zondovie izmerenia elektronnoi funkcii raspredelenia v neravnovesnoi plasme (*Probe measurements of the electron distribution function in nonequilibrium plasma*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1984. Vol.54, p.2153-2161.

12. *Mustafaev A.S.* Puchkovaya neustoichivost plasmi poslesvechenia inertnih gazov (*Beam instability of afterglow plasma of inert gases*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2014. Vol.74. N 9, p.120-121.

13. *Mustafaev A.S.* Funkcia raspredelenia elektronov v anizotropnoi plasme (*The electron distribution function in the anisotropic plasma*). Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet «Gornyi». St Petersburg. 2013, p.135.

14. *Mustafaev A.S., Sukhomlinov V.S., Ainov M.A.* Eksperimentalnoe i teoreticheskoe opredelenie silno anizotropnoi funkcii raspredeleniya ionov po skorostyam v plasme sobstvennogo gaza pri bolshih polyah (*Experimental and theoretical determination of the strongly anisotropic distribution function of ion velocity in plasma of their own gas under high fields*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2015. Vol.85. Iss.12, p.45-55.

15. *Mustafaev A.S., Movchan I.B., Mezencev A.P.* Electronno-polyarizacionnoe issledovanie funkcii raspredelenia elektronov v anizotropnoi plasme (*Electronic polarization study of the electron distribution function in anisotropic plasma*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2000. Vol.70. N 11, p.24-30.

16. *Ovsyannikov A.A., Engelsht V.A., Lebedev Yu.A.* Diagnostika nizkotemperaturnoi plasmi (*Diagnosis of low-temperature plasma*). Novosibirsk: Nauka, 1994, p.483.

17. *Perel V.I.* Vichislenie skorosti dreifa ionov v sobstvennom gaze (*Calculation of the ion drift velocity in a gas*). Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1957. Vol.32, p.526-534.

18. *Sena L.A.* Stolknoveniya electronov i ionov s atomami gaza (*Collisions of electrons and ions with gas atoms*). Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1946. Vol.16, p.734-741.

19. *Smirnov B.M.* Podviznost ionov v sobstvennom gaze (*The mobility of ions in a gas*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1966. Vol.36, p.75-103.

20. *Volkova L.M., Demidov V.I., Kolokolov N.B., Kralkina E.A.* Sravnenie na osnove apparatnih funkcii razlichnih zondovih metodov izmerenia energeticheskogo raspredelenia elektronov v plasme (*A comparison based on the hardware functions of various probe methods for measuring energy electron distribution in plasma*). Teplofizika vysokikh temperatur. 1984. Vol.22. N 4, p.757-766.

21. *Fok V.A.* O dvizenii ionov v plasma (*On the motion of ions in plasma*). Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1948. Vol.18, p.134-145.

22. *Frish S.E., Kagan Yu.M.* Spektroskopicheskoe izuchenie dvizeniya ionov v plasme (*Spectroscopic study of ion motion in plasma*). Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1947. Vol.17, p.577-582.

23. *Ender A.Ya., Ender I.A.* Kinetika ionov v neitralnom gaze pri rezkom vkluchenii elektricheskogo polya. Ch.I. CEM-model (*Kinetics of ions in a neutral gas under a sudden occurrence of the electric field. Part 1. CEM-model*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2010. Vol.80. Iss.2, p.8-17.

24. *Ender A.Ya., Ender I.A.* Kinetika ionov v neitralnom gaze pri rezkom vkluchenii elektricheskogo polya. Ch.II. CEM-model (*Kinetics of ions in a neutral gas under a sudden occurrence of the electric field. Part 2. CEM-model*). Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2010. Vol.80. Iss.2, p.18-28.

25. *Berger E., Heisen A.* The determination of electron energy distributions in discharges with secondary plasma parts. J. Phys.D: Appl. Phys. 1975. Vol.8, p.629-634.

26. *Bhatnagar P.L., Gross E.P. and Krook M.* A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems. Phys. Rev. 1954. Vol.94, p. 511-518.

27. *O'Connell D., Zorat A.R., Ellingboe A.R., Turner M.M.* Comparison of measurements and particle-in-cell simulations of ion energy distribution functions in a capacitively coupled radio-frequency discharge. Physics of Plasmas. 2007. Vol.14, p.103510-103517.

28. *Demidov V.A., Godyak V.I.* Probe measurements of electron-energy distributions in plasmas: what can we measure and how can we achieve reliable results? J.Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol.44, p.233001-233009.

29. *Else D., Kompaneets R., Vladimirov S.V.* On the reliability of the Bhatnagar–Gross–Krook collision model in weakly ionized plasmas. Physics of Plasmas. 2009. Vol.16, p.62106-62118.

30. *Israel D., Riemann K.-U., Tsendin L.* Charge exchange collisions and the ion velocity distribition at the electrode of low pressure capacitive RF discharges. Journal of Applied Physics. 2006. Vol.99, p.093303-093308.

31. *Langmuir I., Mott-Smith H.M.* The Theory of Collectors in Gaseous Discharges. Phys. Rev. 1926. Vol.28, p.723-727.

32. *Larry A.Viehland, Mason E.A.* Gaseous Ion mobility in electric fields of arbitrary strength. Annals of Physics. 1975. Vol.91, p.499-506.

33. *Mustafaev A.S.* Probe Method for Investigation of Anisotropic EVDF. Electron Kinetics and Applications of Glow Discharges. [ed.] L.Tsendin, U.Kortshagen. N.Y.–London: Plenum Press: NATO Int. Sci. Session, 1998. Vol.367, p.531-534.

34. *Phelps A.V.* Cross Sections and Swarm Coefficients for Nitrogen Ions and Neutrals in N_2 and Argon Ions and Neutrals in Ar for Energies from 0,1 eV to 10 keV. Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1991. Vol.20, p.557-561.

35. *White R.D., Robson R.E., Dujko S., Nicoletopoulos P., Li B.* Recent advances in the application of Boltzmann equation and fluid equation methods to charged particle transport in non-equilibrium plasmas. Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol.42, p.194001-194007.

36. *Chen W.C., Zhu X.M., Zhang S., Pu Y.K.* Reconstruction of ion energy distribution function in a capacitive RF discharge. Applied Physics Letters. 2009. Vol.94, p.211503-211509.

37. *Swift J.D., Schwar M.J.R.* Electrical Probes for Plasma Diagnostics. London: Iliffe Books. 1970. P.172-178.

ION VELOCITY DISTRIBUTION FUNCTION IN ARBITRARY ELECTRIC FIELD PLASMA

A.S.MUSTAFAEV, *Dr. of Physics & Mathematics*, *Professor*, *alexmustafaev@yandex.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*
V.S.SUKHOMLINOV, *Dr. of Physics & Mathematics*, *Associate Professor*, *prima-ivs@mail.ru*
St Petersburg State University, *Russia*

Experimental investigations of the ion velocity distribution function (IVDF) are of great importance to various kinds of application: plasma nanotechnology, surface treatment, nanoelectronics, etching processes et al. In this paper, we propose a new probe method for diagnostics of anisotropic IVDF. The possibilities of the method have been demonstrated in arbitrary electric field plasma under conditions when an ion acquires a velocity on its mean free path comparable with the average thermal velocity of atoms. The energy and angular dependency of seven IVDF Legendre components for He^+ in He and Ar^+ in Ar have been measured and polar diagrams of the ion motion have been plotted.

In order to verify the reliability and accuracy of the method the analytic solution of the kinetic Boltzmann equation for ions in plasma of their own gas has been found. Conditions under which resonant charge exchange is the dominant process and the ambipolar field is arbitrary have been considered.

For the ambipolar field the dependence of resonant charge cross-section on the relative velocity has been taken into account. It is shown that the form of the IVDF is significantly different from the Maxwellian distribution and defined by two parameters.

The results of theoretical and experimental data taking into account the instrumental function of the probe method are in good agreement. Calculations of the drift velocity of Hg^+ ions in Hg, He^+ in He, Ar^+ in Ar, and mobility of N_2^+ in N_2 are well matched with known experimental data in wide range of electric field values.

***Key words*:** ion velocity distribution function, probe plasma diagnostics, one-sided probe method, anisotropic plasmas, plasma nanotechnology, kinetic Boltzmann equation, ambipolar field, Maxwellian distribution function.