УДК 537.538

В.Л.ФЕДОРОВ, А.П.МЕЗЕНЦЕВ,
А.С.МУСТАФАЕВ
Санкт-Петербургский государственный
горный институт (технический университет)

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПО СКОРОСТЯМ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Решено кинетическое уравнение для ионов при движении в собственном газе. Показано, что распределение ионов по скоростям существенно отличается от равновесного (максвелловского). Зондовым методом исследована функция распределения ионов по скоростям в низкотемпературной плазме гелия.

Kinetic equation for motion of ions in their own gas has been solved. The ion velocities distribution is shown to differ considerably from the equilibrium (Maxwellian) distribution. The probe technique was used to study the ion velocities distribution function in low-temperature helium plasma.

Функция распределения ионов по скоростям представляет интерес по многим причинам, среди которых следующие: вопросы изучения плазмохимических реакций, идущих с участием ионов; определение подвижности ионов в плазменном объекте; процессы нагрева нейтрального компонента плазмы и др. Среди технических применений, стимулирующих интерес к изучению функции распределения ионов, отметим обработку ионами поверхности изделий, предпринимаемую с целью тонкой ее очистки, а также технологии создания рельефов на поверхности изделий за счет избирательного травления (распыления) при бомбардировке потоками ионов. В настоящей работе приводятся результаты расчетов и экспериментального определения функции распределения ионов в гелиевой плазме зондовым методом.

Распределение ионов по скоростям при движении в собственном газе. Механизмы взаимодействия ионов с остальными компонентами низкотемпературной плазмы в настоящее время достаточно хорошо изучены [2]. Установлено, что доминирующим процессом столкновения при движении иона в собственном газе является резонансная перезарядка, при которой во время столкновения ион за счет туннельного эффекта передает атому свой заряд, но не импульс и не энергию. Таким образом, движение иона в собственном газе носит эстафетный характер (эффект Сены [4]).

Имея в виду основной механизм взаимодействия ионов с нейтральными атомами, рассмотрим установившееся распределение по скоростям при следующих предположениях:1) атомы газа движутся в соответствии с законом Максвелла; 2) движение ионов происходит в собственном газе при низком давлении последнего; 3) доминирующим процессом, определяющим распределение ионов по скоростям, является резонансная перезарядка. В стационарной и однородной плазме при сделанных предположениях уравнение Больцмана имеет вид

$$\frac{e\vec{E}}{m}\vec{\nabla}_v n_i f_i(\vec{v}_i) = S_i(\vec{v}_i),$$

где e, m – заряд и масса иона; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля; $\vec{v}_i, n_i(\vec{r}_i)$ – скорость и концентрация ионов соответственно; $f_i(\vec{v}_i)$ – функция распределения ионов по скоростям; $S_i(\vec{v}_i)$ – интеграл столкновений.

Учитывая, что возникший в результате перезарядки ион имеет скорость атома, с которым произошло столкновение, определим интеграл столкновений:

$$S_i(\vec{v}_i) = n_a f_a(\vec{v}_i) k_{ai} - n_i f_i(\vec{v}_i) k_{ia},$$

где f_a – функция распределения атомов по скоростям; n_a, n_i – концентрации атомов и ионов соответственно; k_{ai}, k_{ia} – соответственно средние числа столкновений атома с ионом и иона с атомом, приводящие к перезарядке в единицу времени,

$$k_{ai} = n_i \int_{\vec{v}} \sigma(v_r) v_r f_i(\vec{v}_i) d\vec{v}_i;$$

$$k_{ia} = n_a \int_{\vec{v}} \sigma(v_r) v_r f_a(\vec{v}_a) d\vec{v}_a;$$

$\sigma(v_r)$ – сечение перезарядки; v_r – модуль относительной скорости иона и атома.

Сечение перезарядки будем считать постоянным, что приближенно выполняется. Так, например, в интересующем нас диапазоне энергий 0,1-0,3 эВ для гелия сечение перезарядки изменяется от $3{,}7 \cdot 10^{-15}$ до $3{,}5 \cdot 10^{-15}$ см^2, т.е. менее чем на 6 % [2].

Рассмотрим такие условия движения ионов, когда скорость, приобретаемая ими на средней длине свободного пробега, существенно больше средней скорости атомов: $kT_a << \dfrac{eE}{\sigma n_a}$. В этом случае можно полагать, что относительная скорость ион-атом определяется только скоростью иона. Последняя имеет только одну составляющую вдоль направления $\vec{E}$. Допустим далее, что частота межатомных столкновений в единице объема плазмы значительно больше частоты ион-атомных столкновений, т.е. $\langle v_a \rangle n_a \sigma_{\text{упр}} >> \langle v_i \rangle n_i \sigma$, что позволяет использовать для атомов равновесное распределение Максвелла, но накладывает ограничение на степень ионизации. При сделанных предположениях и с учетом поведения функции распределения для $\vec{v}_i \to \infty$ решение кинетического уравнения Больцмана имеет вид

$$f_i(\vec{v}_i) = A e^{-\beta(v_i^2) + (\beta - \alpha) v_{iz}^2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\beta - \alpha} v_{iz}),$$

где A – нормировочный множитель; v_i – модуль скорости иона; v_{iz} – проекция скорости иона на направление напряженности электрического поля; $2\alpha = \dfrac{m}{eE_z} n_a \sigma$; $\beta = \dfrac{m}{2kT_a}$, $\beta >> \alpha$.

Интегрируя по угловым координатам, получаем функцию распределения ионов по модулю скорости:

$$f_i(|\vec{v}|) = B v_i e^{-\alpha v_i^2} Ds(x = \sqrt{\beta - \alpha} v_i),$$

где B – нормировочная постоянная; $Ds(x) = e^{-x^2} \int_0^x e^{t^2} dt$ – интеграл Досона [5].

Видно, что распределение ионов по модулю скорости (далее – распределение Досона) существенно отличается от известного равновесного распределения Максвелла.

На рис.1 приведены графики распределений Максвелла и Досона. Можно заметить, что для распределения Досона число частиц в области больших и малых энергий значительно больше, чем для равновесного распределения.

Измерения функции распределения ионов по скоростям проводились в разрядной трубке круглого сечения диаметром 3 см. Для измерений использовался плоский односторонний зонд, выполненный из молибдена в виде диска диаметром 0,6 мм. Зонд располагался на осевой линии разрядной трубки. Нормаль к коллекторной поверхности зонда ориентировалась по оси разрядной трубки. Разрядная трубка заполнялась спек-

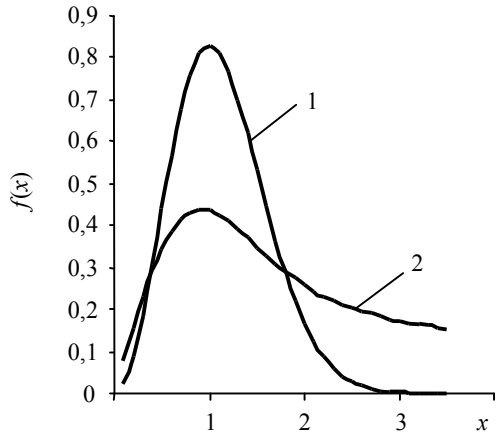

Рис.1. Функции распределения Максвелла (1) и Досона (2)
$x = \nu_i / \nu_{\text{нв}}$, $\nu_{\text{нв}}$ – наиболее вероятная скорость иона

трально-чистым гелием при давлении 0,5 Тор. Сила разрядного тока составляла 0,2 А. Измерение второй производной зондового тока по потенциалу зонда проводилось на установке, аналогичной описанной в работе [3].

На рис.2 представлена регистрограмма второй производной зондового тока по потенциалу зонда I_U''. В области отрицательных потенциалов зонда зависимость, как известно, определяется электронной составляющей зондового тока и пропорциональна функции распределения электронов по скоростям [1]. В области положительных потенциалов зависимость определяется как ионной, так и электронной составляющей зондового тока. В этой области можно выделить три участка: первый – (0-0,7) В – наблюдается минимум, расположенный при +0,3 В; второй – (0,7-4) В – вторая производная практически постоянна и мало отличается от нулевого значения; третий – (>4 В) – I_U'' монотонно растет.

Так как при измерениях использовался плоский зонд, для которого при положительных потенциалах зонда вторая производная для электронной составляющей зондового тока должна равняться нулю, то первый участок можно, по-видимому, связать с распределением по скоростям ионов гелия [Там же]. Для второго участка величины второй производной как ионной составляющей, так и электронной практически равны нулю. На третьем участке в призондовом слое или на поверхности зонда идут вторичные процессы, что вызывает монотонный рост второй производной.

Если исходить из предположения, что при положительном потенциале зонда в диапазоне потенциалов (0-0,75) В вторая производная зондового тока по потенциалу зонда определяется только током ионов, то становится возможным как определение распределения ионов по скоростям, так и сравнение экспериментальных концентраций ионов и электронов за счет обработки соответствующих участков зависимости I_U''.

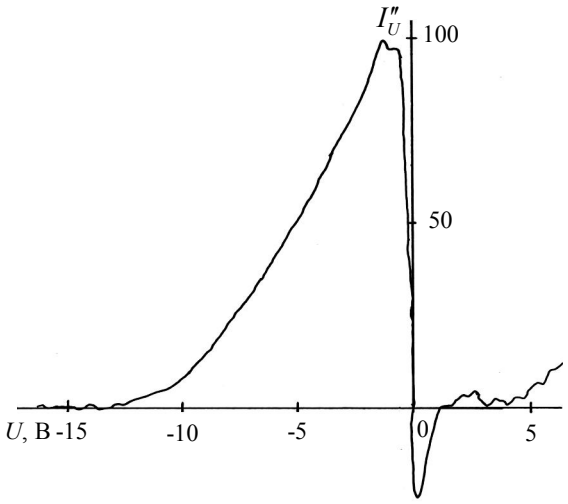

Рис.2. Вторая производная зондового тока I_U'' в плазме положительного столба гелиевого разряда низкого давления при токе разряда I_p = 0,2 *А*, p_{He} = 0,5 Тор

Как известно, в положительном столбе электрического разряда концентрации электронов и ионов практически равны, и поэтому сравнение концентраций, полученных при обработке экспериментальной кривой I_U'', является одним из критериев достоверности приведенной выше интерпретации. В выполненных исследованиях различие в концентрациях не превышало 10 %, что, с учетом погрешности зондовых измерений, является удовлетворительным результатом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Демидов В.И.* Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы / В.И.Демидов, Н.Б.Колоколов, А.А.Кудрявцев. М.: Энергоатомиздат, 1996. 229 с.

2. *Мак-Даниель И.* Подвижность и диффузия ионов в газах / И.Мак-Даниель, Э.Мезон. М.: Мир, 1976. 422 с.

3. *Мезенцев А.П.* Измерение интеграла электрон-атомных столкновений в низкотемпературной гелевой плазме / А.П.Мезенцев, Ю.Л.Степанов, В.Л.Федоров // ЖТФ. 1997. Т.67. № 4. С.19-24.

4. *Сена Л.А.* Явление эстафетного переноса электрических зарядов в газах. Открытие № 352 от 14.07.1968.

5. *Lohmander B.* Table of the function $y = e^{-x^2}\int_0^x e^{t^2} dt$ / B.Lohmander, S.Rittster // Kungl. Fysiorg. Sollsk. Lund. Forh. 1958. 28. P.45-52.