

# ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ ОДНОРОДНОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

(Представлена академиком НАН РК М. М. Абдильдиным)

Проведены расчеты ФРЭЭ в смесях инертных газов из двухчленного уравнения Больцмана в зависимости от приведенного электрического поля  $E/N$  при различных концентрациях инертных газов. Показано, что ФРЭЭ зависит как от величины приведенного электрического поля, так и от концентраций бинарной смеси газа.

**Введение.** При изучении низкотемпературной плазмы особую важность приобретает адекватное описание поведение электронов. Поскольку электроны, имеющие малую массу по сравнению с атомами, легко ускоряются во внешнем электрическом поле и теряют лишь небольшую часть энергии при столкновении с нейтральными частицами, их температура может быть гораздо выше температуры нейтрального газа. Следовательно, именно распределением электронов определяется скорость ионизации – процесса, поддерживающего плазму.

Значение функции распределения электронов в точке  $\vec{r}$  пространства дает зависящую от времени плотность электронов, т.е. число электронов в единичном объеме  $d^3 r$ , скорости которых заключены в единичном элементе объема пространства скоростей.

Функция распределения электронов является решением кинетического уравнения Больцмана, имеющего следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} F(\vec{r}, \vec{v}) + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} F - \frac{e_0}{m} \vec{E} \cdot \nabla_{\vec{v}} F = \\ = \sum_k C_k^{el}(F) + \sum_{k,l} C_{k,l}^{ex}(F) + \sum_k C_k^{io}(F), \quad (1) \end{aligned}$$

где в правой части представлены интегралы столкновений, учитывающие упругие, различные неупругие и ионизационные столкновения.

Для интегродифференциального уравнения (1) не существует общих методов решения. Чтобы его решить, необходимо сделать некоторые предположения относительно свойств функции распределения и столкновений. Одно из предположений, которое обычно используют, состоит в том, что из-за очень большого числа столкновений анизотропия распределения электронов по скоростям, как правило, мала. Поэтому можно считать, что в любой точке пространства распределение по абсолютному значению скорости близко к сферически-симметричному. Это позволяет разложить ФРЭЭ в ряд по сферическим функциям, а быстрая сходимость ряда дает возможность ограничиться малым числом членов. Обычно используют двучленное разложение

$$F(\vec{v}) = F\left(u, \frac{\vec{v}}{v}\right) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m}{2}\right)^{3/2} \left[ f_0(u) + f_z(u) \frac{v_z}{v} \right], \quad (2)$$

где  $u = mv^2/2$  – кинетическая энергия электронов, скалярные  $f_0(r, z, u)$  – симметричная или изотропная часть функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ);  $f_z(r, z, u)$  –

асимметричная часть или направленная составляющая ФРЭЭ, позволяющая вычислить скорость дрейфа и другие кинетические характеристики электронов.

Мы рассмотрим стационарное распределение электронов в пространственно однородном случае для электрического поля, имеющего только одну компоненту  $E_z = E$ .

Подставляя разложение (2) в уравнение (1), получим систему уравнений на изотропную (3) и анизотропную части (4) ФРЭЭ:

$$e_0^2 E^2 \frac{\partial}{\partial u} \left[ \frac{u}{3K} \frac{\partial f_0}{\partial u} \right] + \frac{\partial}{\partial u} (Gf_0) = uHf_0 - S_0(f_0), \quad (3)$$

$$f_z = \frac{e_0 E_z}{K} \frac{\partial f_0}{\partial u}. \quad (4)$$

Здесь введены функции, зависящие от парциальных плотностей компонентов газовой смеси и процессов, определяемых упругими и неупругими процессами столкновения электронов с атомами смеси:

$$G(u) = N \sum_k 2\xi_k \frac{m}{M_k} u^2 Q_k^m(u), \quad (5)$$

$$H(u) = N \sum_{k,l} \xi_k Q_{k,l}^{ex}(u) + N \sum_k \xi_k Q_k^{io}(u), \quad (6)$$

$$K(u) = N \sum_k \xi_k Q_k^{io}(u) + H(u), \quad (7)$$

$$S_0(u) = N \sum_{k,l} \xi_k (u + u_{k,l}^{ex}) Q_{k,l}^{ex}(u + u_{k,l}^{ex}) f_0(u + u_{k,l}^{ex}) + \\ + N \sum_k 4\xi_k (2u + u_{k,l}^{io}) Q_{k,l}^{io}(2u + u_{k,l}^{io}) f_0(2u + u_{k,l}^{io}). \quad (8)$$

$G(u)$  – член, описывающий потери энергии в упругих столкновениях;  $S_0(u)$  – член, описывающий появление электрона с энергией  $u$  в результате столкновения электрона с более высокой энергией  $u + u_k$  в неупругом процессе (возбуждение или ионизация);  $Q_{k,l}^{ex}(u)$  – сечение возбуждения атома сорта  $k$  из основного состояния в возбужденной  $l$ -е состояние электроном с кинетической энергией  $u$ ;  $Q_k^{io}(u)$  – сечение ионизации атома сорта  $k$  из основного состояния;  $Q_k^m(u)$  – моментное (диффузионное) сечение столкновения электрона с атомом сорта  $k$ ;  $\xi_k = N_k / N$  –

парциальная концентрация газа сорта  $k$  ( $\text{Ar}, \text{Ne}, \text{He}$ );  $N = \sum_k N_k$  – полная плотность газа.

Из системы уравнений (3, 4) и (5-8) видно, что в однородном электрическом поле как изотропная, так и анизотропная части ФРЭЭ зависят от приведенного электрического поля и от парциальных концентраций смеси газов  $\xi_k = N_k / N$ .

**Результаты.** В работе рассматриваются пространственно однородные разряды в смесях инертных газов ( $\text{Ar}, \text{He}, \text{Ne}$ ). Эти газы существенно отличаются по массе ( $M_{\text{Ar}} = 40 M_p$ ,  $M_{\text{Ne}} = 20 M_p$ ,  $M_{\text{He}} = 4 M_p$ , где  $M_p$  – масса протона), потенциалам ионизации ( $I_{\text{Ar}} = 15.6 \text{ eV}$ ,  $I_{\text{Ne}} = 21.56 \text{ eV}$ ,  $I_{\text{He}} = 24.6 \text{ eV}$ ) и структуре электронных состояний. Это различие определяет различие ФРЭЭ в разрядах с различными концентрациями инертных газов при заданном значении приведенного электрического поля  $E/N$ . Спектроскопические данные и структура энергетических состояний для инертных газов взяты от [7] и на рис. 1–3 представлены сечения взаимодействия электронов с аргоном, неоном и гелием. На рис. 1 приведены сечения рассеяния в аргоне. Процессы потери энергии разбиты на следующие группы: запрещенные состояния, 13 уровней (11,2 эВ), запрещенные состояния, 2 уровня (12,9 эВ), разрешенные состояния (11,7 эВ) и ионизация (15,7 эВ).

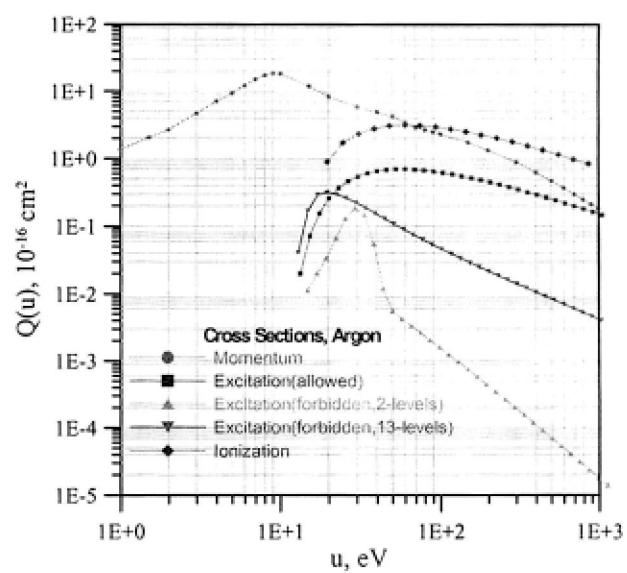


Рис. 1. Сечения столкновения электронов с аргоном

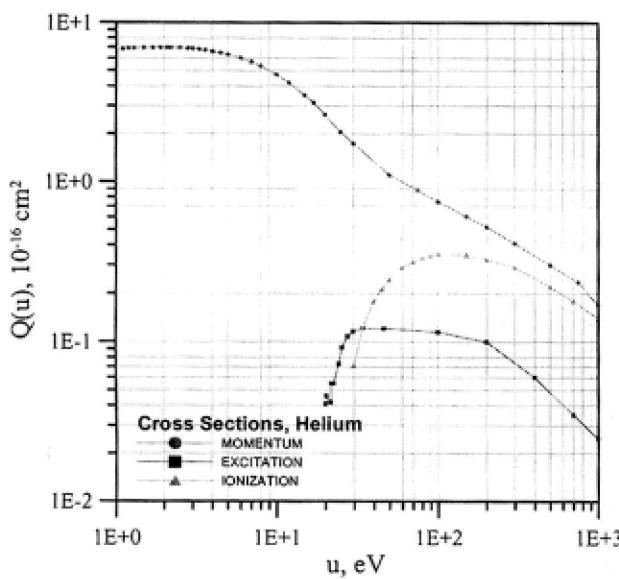


Рис. 2. Сечения столкновения электронов с гелием

Основная особенность сечения рассеяния в гелии – относительно малые значения сечений ионизации и возбуждения электронных состояний и достаточно высокие значения моментного сечения при низких энергиях электронов (рис. 2).

Из рис. 1–3 видно, что из трех инертных газов (Ar, He, Ne) наибольшее сечение ионизации и наименьший порог ионизации имеет аргон. Гелий имеет наименьшее сечение ионизации и наибольший порог ионизации. Этот факт важен для определения парциального состава ионов в разрядах в смеси благородных газов. Моментные сечения этих газов также значительно различаются, что определяет их скорость дрейфа и среднюю

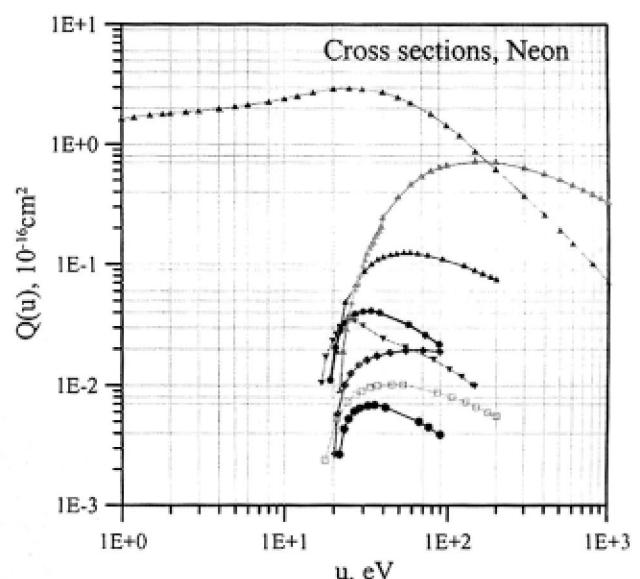


Рис. 3. Сечения столкновения электронов с неоном

кинетическую энергию электронов («температуру») в разрядах, особенно при низких значениях приведенного электрического поля.

Изотропная часть функции распределения электронов  $f_0(r, z, u)$  будет определяться из двухчленного уравнения Больцмана в постоянном электрическом поле  $E$  в смеси газов с плотностями  $N_k$  ( $k = \text{Ar}, \text{Ne}, \text{He}$ ). На рис. 4 и 5 приведены ФРЭ в чистых инертных газах при  $E/p = 4 \text{ В/см/торр}$  и  $E/p = 20 \text{ В/см/торр}$ .

Показано, что электроны в аргоне имеют меньшую энергию, чем в гелии и неоне из-за наличия атомных состояний с более низким

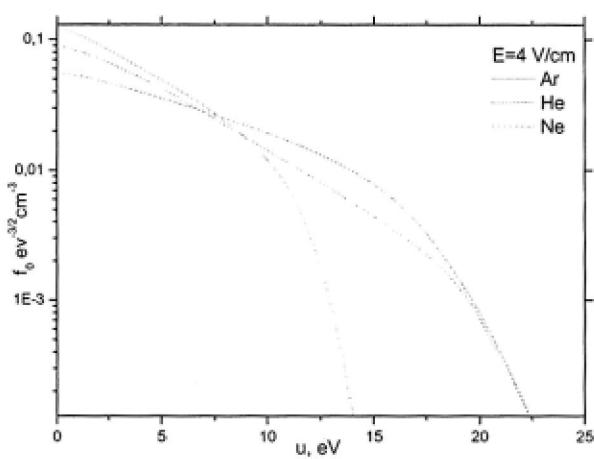


Рис. 4. Функция распределения электронов по энергии в зависимости от сорта газа  $k = \text{Ar}, \text{He}, \text{Ne}$ .  
Приведенное электрическое поле  $E = 4 \text{ В/см}$

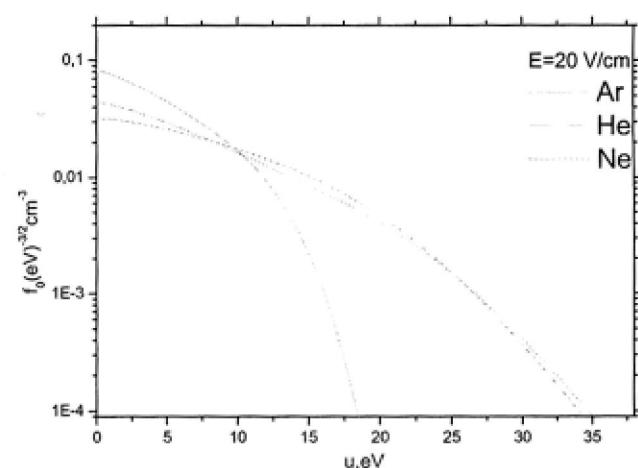


Рис. 5. Функция распределения электронов по энергии в зависимости от сорта газа  $k = \text{Ar}, \text{He}, \text{Ne}$ .  
Приведенное электрическое поле  $E = 20 \text{ В/см}$

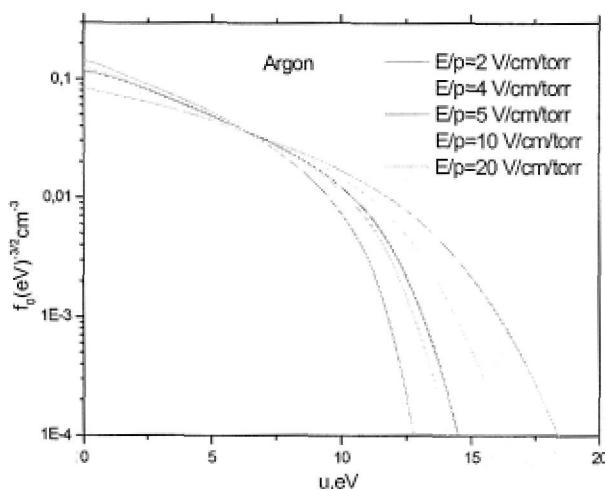


Рис. 6. Функция распределения электронов в аргоне по энергии в зависимости от электрического поля

порогом энергии. На рис. 6 и 7 приведены ФРЭЭ в аргоне и гелии в зависимости от приведенного электрического поля. Из результатов видно, что ФРЭЭ существенно зависит от приведенного электрического поля.

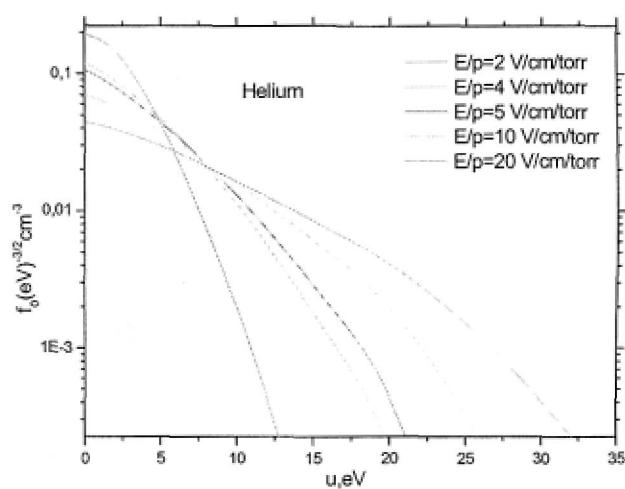


Рис. 7. Функция распределения электронов в гелии по энергии в зависимости от электрического поля

На рис. 8 и 9 приведены функция распределения электронов по энергии в смеси Ar+Ne и Ar+He для различных значений концентрации атомов аргона  $\xi_{Ar}$ . Приведенное электрическое поле  $E/p = 4$  В/см/торр.

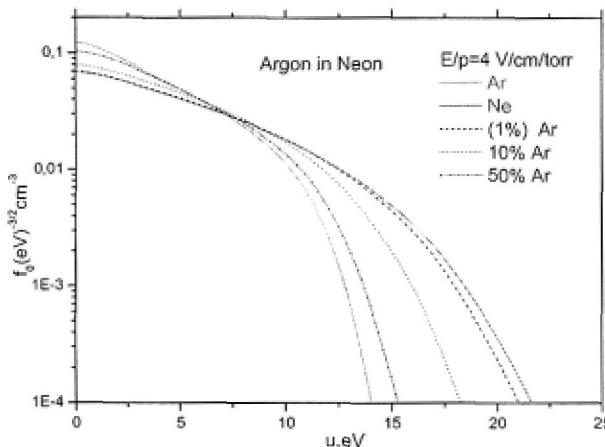


Рис. 8. Функция распределения электронов по энергии в смеси аргона и неона для различных значений концентрации атомов аргона  $\xi_{Ar}$

Из представленных результатов видно, что ФРЭЭ в зависимости от концентраций смеси аргона с гелием существенно зависит от приведенного электрического поля. Добавление даже малой примеси аргона к гелию при высоких значениях приведенного электрического поля приводит к существенному обеднению функции распределения электронов при энергиях выше порогов возбуждения электронных состояний аргона. Это обеднение высокоэнергетической части ФРЭЭ в

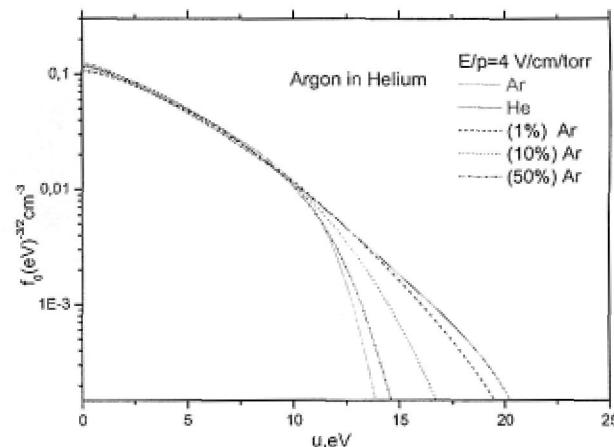


Рис. 9. Функция распределения электронов по энергии в смеси аргона и гелия для различных значений концентрации атомов аргона  $\xi_{Ar}$

смеси Ar+Ne или Ar+He приводит к тому, что в разряде образуются преимущественно ионы аргона (газа, имеющего более низкий потенциал ионизации).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fortov V.E. et al. Dusty plasma // Physics-Uspekhi. 47, 495 (2004).
2. Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A. Physics and applications of complex plasmas. London: Imperial College, 2005.

3. *Osamu Ishihara.* Complex plasma: dusts in plasma. Topical Review // J. Phys. D: Appl. phys. 40, R121–R147(2007).
4. *Allen J.E.* Phys. Scripta. 45 497 (1992);
5. *Goree J.* Plasma Sources Sci. Technol. 3 400 (1994).
6. *Lampe M., Goswami R., Sternovsky Z., Robertson S., Gavrishchaka V., Ganguli G., Joyce G.* // Phys. plasmas. 10, 1500 (2003).
7. *Morgan W.L., Bouef J.P., Pitchford L.* Siglo data base, CPAT and kinema software//(<http://www.csn.net/siglo>), 1998.

### Резюме

Инертті газдар қоспасында Больцман теңдеуінің екімүшелік жықтауы арқылы ЭЭТФ-сының келтірілген электр өрісінен тәуелділігі бойынша инертті газдардың

әртүрлі концентрациясында есептеулер жүргізілді. ЭЭТФ-сының келтірілген электр өрісінің шамасынан да, газдардың бинарлық қоспасының концентрациясынан да тәуелді болатыны көрсетілді.

### Summary

On the basis of Boltzman equation the EEDF from two member approach in mixtures of inert gases depending on resulted electric field E/N are calculated at various concentration of inert gases. It is shown that EEDF depend from the resulted electric field and concentration of a binary mixture of gas.

КазНУ им. аль-Фараби,  
г. Алматы

Поступила 19.10.2009г.