

УДК 537.521

ДИФФУЗИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ
ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

М. А. АНТИНЯН, Г. Г. АРУТЮНЯН, Г. А. ГАЛЕЧЯН

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

(Поступила в редакцию 1 ноября 1982 г.)

Получено, что в разряде электроотрицательных газов радиальный поток отрицательных ионов в зависимости от относительной температуры электронов $\gamma = T_e/T_+$ может быть направлен к оси положительного столба, от оси к стенке разрядной трубки и отсутствует при $\gamma = \gamma_0$.

Особенностью диффузионных процессов заряженных частиц в плазме электроотрицательных газов является зависимость коэффициентов амбиполярной диффузии электронов (D_e^a), положительных и отрицательных ионов (D_+^a , D_-^a) от относительной концентрации $\alpha = n_-/n_e$ отрицательных ионов в плазме (n_- и n_e — концентрации отрицательных ионов и электронов) [1—4]. В работах [1, 3, 4] показано, что при увеличении α в кислородной плазме от 1 до 10 величина (D_e^a) возрастает более чем на порядок.

Относительная концентрация отрицательных ионов в плазме может изменяться в широких пределах. Так, в [1, 4—8] экспериментально получено, что в положительном столбе в зависимости от природы газа и условий поддержания разряда α может меняться от 1 до $5 \cdot 10^3$.

В работах [3, 4] рассматривается зависимость коэффициента амбиполярной диффузии отрицательных ионов в разрядной трубке от α , которая заключается в следующем. При $\alpha \lesssim 5$ электроны с положительными ионами совместно диффундируют от оси к стенке трубки, как и в электроположительном газе. Отрицательные ионы плазмы, обладая малой по сравнению с электронами энергией, не могут преодолеть радиальное самосогласованное поле и дрейфуют в противоположную сторону, т. е. к оси.

При изменении условий поддержания разряда, когда α возрастает, амбиполярное самосогласованное поле уменьшается. В результате когда α в положительном столбе становится больше α_0 — значения относительной концентрации отрицательных ионов, при котором поток n_- равен нулю:

$$\alpha_0 = \frac{\frac{1}{2}(\gamma - 1)\mu_e - \mu_+}{\mu_+}, \quad (1)$$

энергия отрицательных ионов становится достаточной для преодоления радиального поля. При этом диффузионный поток отрицательных ионов направлен от оси к стенке трубки, т. е. направление и величина диффузион-

ного потока отрицательных ионов в разряде зависят от α . Следует отметить, что в [1] получен ошибочный результат — поток отрицательных ионов является положительной величиной (т. е. не меняет своего направления) при изменении α от 10^{-3} до 10^5 .

В настоящей работе проводится рассмотрение зависимости диффузионных процессов отрицательных ионов от относительной температуры электронов в плазме $\gamma = \frac{T_e}{T_+} = \frac{T_e}{T_-} = \frac{T_e}{T_0}$. Приведем выражения для плотностей потоков электронов, положительных и отрицательных ионов в плазме:

$$\Gamma_e = -D_e \nabla n_e - n_e \mu_e E_r = -D_e \nabla n_e, \quad (2)$$

$$\Gamma_+ = -D_+ \nabla n_+ + n_+ \mu_+ E_r = -D_+ \nabla n_+, \quad (3)$$

$$\Gamma_- = -D_- \nabla n_- - n_- \mu_- E_r = -D_- \nabla n_-, \quad (4)$$

где μ с индексами — соответствующие коэффициенты подвижности.

Условие квазинейтральности есть

$$n_+ = n_e + n_-. \quad (5)$$

При совместной диффузии зарядов будет выполняться следующее условие:

$$\Gamma_+ = \Gamma_e + \Gamma_-. \quad (6)$$

Из (2)—(6) для амбиполярной диффузии отрицательных ионов можно получить выражение

$$D_-^a = \frac{(1-\gamma) \frac{\mu_-}{\mu_+} + 2(\alpha+1) \frac{\mu_-}{\mu_e}}{1 + \alpha \frac{\mu_-}{\mu_e} + (1+\alpha) \frac{\mu_+}{\mu_e}} D_+. \quad (7)$$

Диффузионный поток отрицательных ионов есть

$$\frac{\Gamma_-}{\Gamma_+} = \frac{(1-\gamma) \frac{\mu_-}{\mu_+} + 2(\alpha+1) \frac{\mu_-}{\mu_e}}{1 + \gamma + \alpha \frac{\mu_-}{\mu_e}} \frac{\alpha}{1 + \alpha}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлены кривые зависимости Γ_-/Γ_+ от γ при разных значениях относительной концентрации отрицательных ионов. Из рисунка следует, что при больших значениях γ отношение Γ_-/Γ_+ имеет отрицательный знак, т. е. поток направлен от стенки к оси трубки навстречу потоку электронов и положительных ионов. Однако при уменьшении γ , когда γ становится меньше γ_0 при определенном значении α , поток отрицательных ионов меняет свое направление, так как Γ_-/Γ_+ при этих условиях является уже положительной величиной, и устанавливается направление дрейфа n_- от оси к стенке трубки, совпадающее с потоком электронов и положительных ионов. При всех значениях α и γ поток положительных ионов Γ_+ не меняет своего знака, поэтому изменение знака Γ_-/Γ_+ относится только к потоку отрицательных ионов. На рис. 1 видно, что чем

больше величина α , тем при большем значении γ_0 поток отрицательных ионов меняет направление дрейфа. Так, при $\alpha = 500$ $\gamma_0 = 21$, при $\alpha = 100$ $\gamma_0 = 5$ при $\alpha = 30$ $\gamma_0 = 2,24$ и т. д.

Найдем выражение γ_0 из (8) при условии $\Gamma_-/\Gamma_+ = 0$:

$$\gamma_0 = 2(\alpha + 1) \frac{\mu_+}{\mu_-} + 1. \quad (9)$$

Полученные выводы подтверждаются результатами экспериментальных исследований, приведенными в [9]. В ней описаны масс-спектрометри-

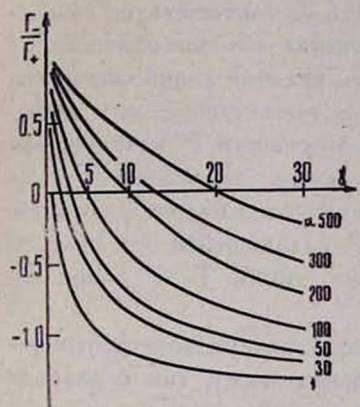


Рис. 1.

Рис. 1. График зависимости отношения Γ_-/Γ_+ от $\gamma = T_e/T_+$ при разных значениях $\alpha = n_-/n_e$.

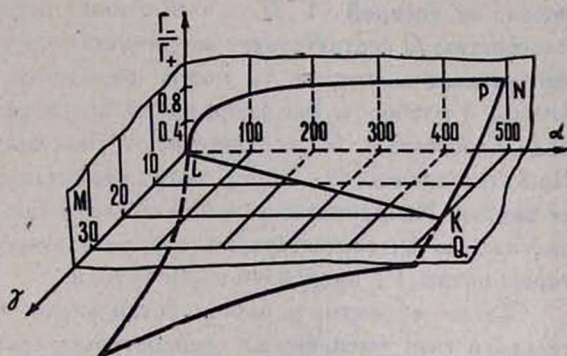


Рис. 2.

Рис. 2. График зависимости отношения Γ_-/Γ_+ потоков отрицательных и положительных ионов от относительной концентрации $\alpha = n_-/n_e$ отрицательных ионов и относительной электронной температуры $\gamma = T_e/T_+$.

ческие исследования потока положительных и отрицательных ионов в распадающейся плазме на стенку разрядной трубки диаметром 11 см в смеси криптон-кислород. Плазма создавалась импульсом ВЧ-поля, $f = 50$ МГц, длительность — 10 мкс, частота повторения — 50 Гц, давление смеси — 26 Па. Масс-анализ позволял изучать изменение во времени относительной концентрации ионов в плазме послесвечения. Основные ионы в плазме послесвечения, исключая поздние стадии, были O_2^+ , O^- . В начальной стадии распада, при $\alpha \simeq 1$, происходит амбиполярная диффузия электронов с положительными ионами к стенке. Причем сначала плазму покидают более энергетичные электроны, вследствие чего по мере распада происходит уменьшение средней энергии электронов, т. е. спад $\gamma = T_e/T_+$. Кроме того, в процессе распада осуществляется увеличение относительной концентрации отрицательных ионов. Масс-спектрометр на первоначальной стадии послесвечения детектирует только положительные ионы, так как поток отрицательных ионов направлен к оси. По истечении $\sim 3, 4$ мс от начала распада плазмы, после того, как T_e значительно уменьшается и становится $\sim 300^\circ$ К и α возрастает до величины порядка 100, масс-спектрометр детектирует всплеск импульса отрицательных ионов на стенку трубки, т. е. поток ионов при возникновении соответствующих условий в плазме изменяет направление дрейфа, после чего устанавливается ион-ионная диф-

фузия на стенку трубки. В работе [9] также получено, что в начальной стадии послесвечения, в процессе диффузии положительных ионов с электронами, постоянная распада больше, чем при ион-ионной диффузии. Это обстоятельство также указывает на то, что поток отрицательных ионов на стенку возникает на поздних стадиях распада, когда температура электронов уменьшается и α возрастает.

Отношения D_-/D_+ и Γ_-/Γ_+ являются функцией двух переменных γ и α . На рис. 2 приведен трехмерный график Γ_-/Γ_+ от γ и α , построенный согласно формуле (7) для кислорода (значения коэффициентов подвижности и диффузии взяты из [2]). Плоскость Q соответствует поверхности, на которой $\Gamma_-/\Gamma_+ = 0$. Линия пересечения LK поверхности P с плоскостью Q соответствует координатам α_0 и γ_0 . По этой линии, задавая конкретным значением γ_0 , можно определить соответствующее ему значение α_0 , и наоборот. Все координаты на части поверхности P , находящейся над плоскостью Q , соответствуют положительным значениям Γ_-/Γ_+ . При этих значениях Γ_-/Γ_+ поток отрицательных ионов направлен к стенке трубки. Координаты на части поверхности P , находящейся под нулевой плоскостью Q , соответствуют отрицательным значениям Γ_-/Γ_+ , при которых поток Γ_- направлен к оси трубки.

Таким образом, в работе установлено, что в плазме электроотрицательного газа уменьшение температуры электронов также, как в разряде электроположительного газа, приводит к уменьшению величины поперечного самосогласованного амбиполярного поля, однако в электроотрицательном газе это вызывает качественное изменение процессов дрейфа p_- в положительном столбе; а именно, изменение направления потока отрицательных ионов на обратное.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tompson J. B.* Proc. Phys. Soc., 73, 818 (1959).
2. *Sabadil H.* Beitr. Plasmaphys., 13, 235 (1973).
3. *Arutunian G. G., Galechian G. A.* J. Phys., 40, C7—205 (1979).
4. *Галечян Г. А.* Химия плазмы. Под ред. Б. М. Смирнова, Атомиздат, М., 1979, вып. VII, с. 218.
5. *Максимов А. И., Соколов В. Ф.* ЖТФ, 44, 9198 (1974).
6. *Абрамов В. Л., Светцов В. И.* Физика плазмы, 4, 1141 (1978).
7. *Spenser—Smith T. L.* Phys. Mag., 19, 866 (1935).
8. *Зайцев В. В., Заверевская Е. Ю., Климов В. Д.* ЖТФ, 7, 1541 (1978).
9. *Smith D., Dean A. G., Adams N. G.* J. Phys., D. Appl. Phys., 7, 1944 (1974).

ՐԱՅԱՍՍԱԿԱՆ ԻՈՆՆԵՐԻ ԴԻՖՈԴԻԱՆ ԳԱՋԱՅԻՆ ՊԱՐՊՄԱՆ ՊԼԱԶՄԱՅՈՒՄ

Մ. Ա. ԱՆՏԻՆՅԱՆ, Գ. Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ. Ա. ԳԱԼԵՉՅԱՆ

Աշխատանքում ստացված է, որ էլեկտրաբացասական գազերի պարպման մեջ բացասական իոնների հոսքը կախված էլեկտրոնների հարաբերական $\gamma = T_e/T_+$ շերտաստիճանից կարող է ուղղված լինել և դեպի դրական սյան առանցքը և առանցքից դեպի պարպման խողովակի պատերը, և հավասար է զրոյի, երբ $\gamma = \gamma_0$ ։

THE DIFFUSION OF NEGATIVE IONS IN THE GAS DISCHARGE PLASMA

M. A. ANTINYAN, G. G. ARUTYUNYAN, G. A. GALECHYAN

It was obtained, that in the discharge of electronegative gases the radial flow of negative ions could be directed to the positive column axis and from this axis to the discharge tube wall depending on the relative temperature $\gamma = T_e / T_+$ of electrons. When $\gamma = \gamma_0$, the flow is equal to zero.