

## ДИФФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

*Н.Л.Александров, А.М.Охримовский*

Диффузия электронов в слабоионизованном газе и плазме при их нагреве электрическим полем оказывается важной во многих областях физики, включая газовый разряд, физику атмосферы и электрон-атомных столкновений [1]. Цель данного сообщения — обратить внимание на возможность аномально быстрого диффузионного процесса для электронов в газе, который вызван совместным действием дрейфа электронов и объемных процессов образования и разрушения отрицательных ионов.

Известно, что объемные процессы с изменением сорта (и подвижности) носителей заряда, дрейфующих в среде в электрическом поле, при определенных условиях приводят к увеличению диффузионного расплывания облака заряженных частиц вдоль поля. Этот вопрос обсуждался применительно к полупроводниковой плазме (см., например, [2]) и движению ионов в газе [3-6]. Перенос электронов в газе с учетом этого эффекта изучался с работе [7], где рассматривались только нестабильные отрицательные ионы, плотность которых обычно мала по сравнению с плотностью стабильных ионов. Ниже, в отличие от [7], исследуется случай стабильных ионов, для которого эффект существенно больше.

В перечисленных выше работах показано, что дополнительная диффузия заряженных частиц описывается коэффициентом, который в случае двух сортов частиц равен

$$D^* = \frac{\nu_{12}\nu_{21}}{(\nu_{12} + \nu_{21})^3} (w_1 - w_2)^2, \quad (1)$$

где  $\nu_{12}$  и  $\nu_{21}$  — частоты соответствующих превращений,  $w_1$  и  $w_2$  — скорости дрейфа частиц первого и второго сорта. Этот эффект имеет место, если дрейфовый поток заряженных частиц велик по сравнению с диффузионным и для времени дрейфа в рассматриваемом промежутке выполняется условие

$$t \gg \nu_{12}^{-1}, \nu_{21}^{-1}, \quad (2)$$

т.е. за это время прямые и обратные процессы превращения частиц происходят многократно. Физически появление дополнительной диффузии объясняется тем, что заряд случайным образом переходит от более подвижных частиц к менее подвижным и наоборот. Если он долго находится на подвижных частицах, то опережает дрейф основного сгустка частиц, если "застревает" на малоподвижных, то отстает от этого сгустка. Все это приводит к расплыванию неоднородности незаряженных частиц в направлении дрейфа.

Рассмотрим эффект дополнительной диффузии для электронов, движущихся под действием поля в слабоионизованном воздухе и захватываемых молекулами с образованием стабильных отрицательных ионов, которые в свою очередь разрушаются в столкновениях, освобождая электроны. Сначала вычислим коэффициент  $D^*$  для воздуха при температуре газа  $T = 300$  К в электрическом поле  $3 \cdot 10^{-16} < E/N < 10^{-15}$  В · см<sup>2</sup>, где  $N$  — плотность нейтральных частиц. В этих условиях можно пренебречь лавинной ионизацией, а скорость трехчастичного прилипания электронов к молекулам  $O_2$



мала по сравнению со скоростью диссоциативного прилипания



Основным же каналом отрыва электронов от отрицательных ионов в воздухе с малой степенью возбуждения и диссоциации молекул является процесс [8]



Определим коэффициент  $D^*$  для электронов (и ионов  $O^-$ ) в предположении, что на рассматриваемых временах эти частицы участвуют только в процессах (4) и (5). Тогда в пренебрежении скоростью дрейфа ионов по сравнению со скоростью дрейфа электронов  $w_e$  получаем

$$ND^* = \frac{k_a k_d}{(k_a + k_d)^3} w_e^2, \quad (6)$$

где  $k_a$  и  $k_d$  — константы скорости процессов (4) и (5), умноженные соответственно на долю молекул  $O_2$  и  $N_2$  в газе. Таким образом, как и в случае обычной диффузии, здесь произведение  $ND^*$  является функцией от  $E/N$  и не зависит от  $N$  при фиксированном  $E/N$ . В настоящей работе вычислена величина  $ND^*$  в воздухе. При этом значении  $k_a$  и  $w_e$  взяты из расчета [9], а  $k_d$  — из эксперимента [8].

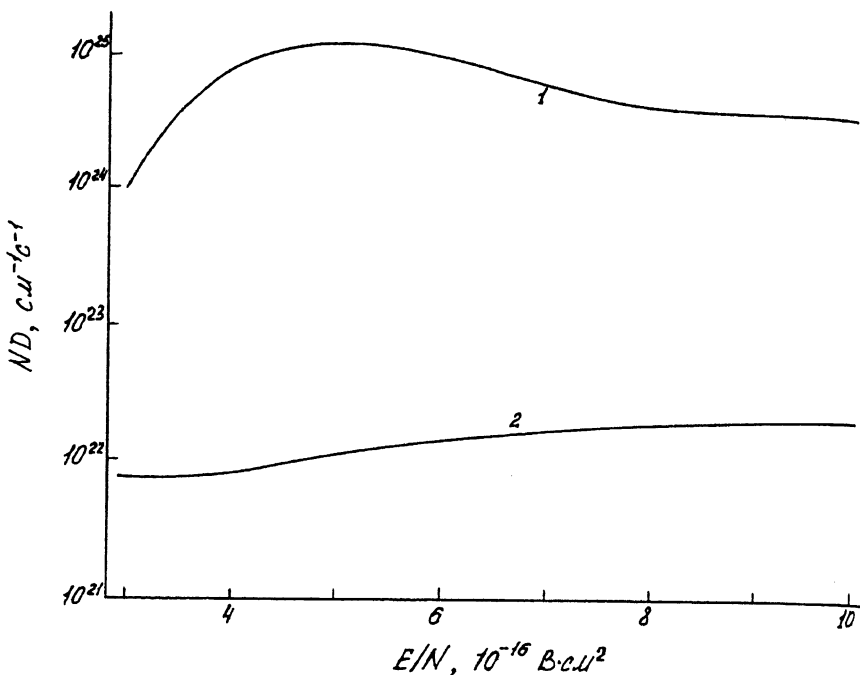


Рис. 1. Зависимость  $ND$  от  $E/N$ : 1 —  $ND^*$ , 2 —  $ND_L$ .

Полученные значения  $ND^*$  приведены на рис. 1. Там же для сравнения представлен коэффициент обычной продольной диффузии электронов в воздухе  $D_L$ , вычисленный в [10]. Из-за резко растущей функции  $k_a(E/N)$  величина  $ND^*$  не монотонно зависит от  $E/N$ , проходя через максимум, равный  $4w_e^2/27k_d$ , при отношении плотностей ионов и электронов  $n_1/n_e = k_a/k_d \approx 1/2$ . (Эти соотношения получаются, если пренебречь зависимостью  $k_d$  и  $w_e$  от  $E/N$  по сравнению с резко растущей функцией  $k_a(E/N)$ .) Отличие  $ND^*$  от  $ND_L$  велико и в максимуме достигает более трех порядков.

Покажем, что аналогичный эффект может наблюдаться в воздухе и при  $E/N < 3 \cdot 10^{-16}$  В · см<sup>2</sup>, где основным каналом гибели электронов в газе с достаточно малой степенью ионизации является процесс (3). В обычных условиях разрушение ионов  $O_2^-$  мало, но при нагреве газа скорость реакции, обратной (3), заметно увеличивается. Учитывая эти два процесса, получаем вместо (6)

$$ND^* = \frac{k_a N k_d}{(k_a N + k_d)^3} w_e^2, \quad (7)$$

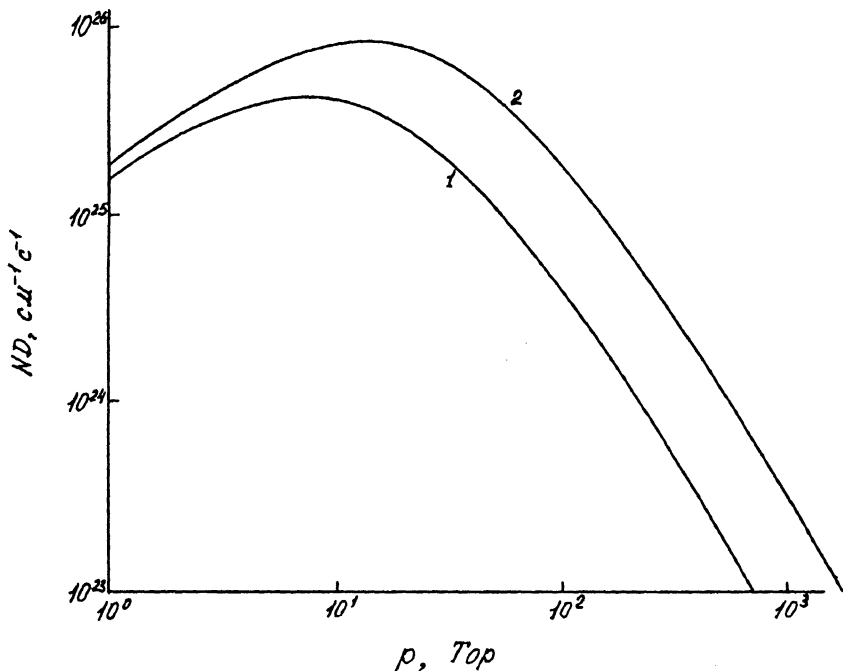


Рис. 2. Зависимость  $ND^*$  от  $p$ : 1 —  $E/N = 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ ; 2 —  $2 \cdot 10^{-16}$ .

где  $k_a$  и  $k_d$  — константы скорости процесса (3) и обратной реакции. Результаты расчета  $ND^*$  для воздуха при  $T = 700 \text{ К}$  приведены на рис. 2. При этом значения  $k_a$  взяты из [11] с поправкой на увеличение  $T$  по аналогии с [12], а  $k_d$  — из расчета [12]. Величина  $w_e$  определялась, как и ранее. Поскольку в рассматриваемом случае  $k_a$  и  $k_d$  слабо зависят от  $E/N$ , то  $ND^*$  также мало меняется с ростом  $E/N$ . В то же время имеется сильная зависимость  $ND^*$  от  $N$  или давления газа  $p$  (при фиксированном  $E/N$ ) с максимумом при  $N \approx k_d/2k_a$ , что соответствует, как и ранее,  $n_1/n_e = 1/2$ . Абсолютное значение  $ND^*$  также достигает величины, превышающей  $ND_L$  более чем на три порядка, поскольку в этих условиях  $ND_L \approx 7 \cdot 10^{21} (\text{см} \cdot \text{с})^{-1}$  [10].

Таким образом, в легко достижимых и практически важных условиях дополнительная продольная диффузия электронов (и отрицательных ионов), вызванная быстрым образованием и разрушением ионов, оказывается большой. Она может быть измерена в экспериментах методами электронных сгустков [1], и при соответствующей обработке из нее

можно получить данные по скорости элементарных процессов. Ее влияние на процессы в слабоионизованном газе и плазме может быть достаточно велико при давлениях вплоть до атмосферного, когда обычной диффузией пренебрегается. Следует заметить, что рассматриваемый в настоящей работе эффект не есть какой-то новый механизм диффузии и он заведомо содержится в правильно записанной обычной системе уравнений баланса плотности электронов и ионов. В этом смысле его можно назвать псевдодиффузией. Однако его необходимо учитывать в случае, когда модель кинетики заряженных частиц сильно упрощена (например, рассматриваются только электроны). Поэтому этот эффект может оказаться важным при моделировании сложных газоразрядных процессов, в котором допускаются такого рода упрощения.

Работа частично поддержана грантом № 94-02-04675 Российского фонда фундаментальных исследований и грантом № J1A100 Международного научного фонда и правительства России.

#### Список литературы

- [1] *Хаксли Л., Кромптон Р.* Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977. 672 с.
- [2] *Матуленис А., Стариков Е.* // Диффузия горячих электронов / Под ред. Я.Пожежа. Вильнюс: Мокслас. С. 35-96.
- [3] *Gatland I.R.* // Case Studies Atom. Phys. 1974. V. 4. N 6. P. 369-437.
- [4] *Iinuma K., Takebe M.* // Can. J. Chem. 1992. V. 70. N 6. P. 1604-1611.
- [5] *Iinuma K., Sasaki N., Takebe M.* // J. Chem. Phys. 1993. V. 99. N 9. P. 6907-6914.
- [6] *Iinuma K., Hamano T., Takebe M.* // J. Chem. Phys. 1994. V. 101. N 4. P. 2949-2952.
- [7] *Александров Н.Л., Напартович А.П.* // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 9. С. 1101-1105.
- [8] *Rayment S.W., Moruzzi J.L.* // Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1978. V. 26. N 2. P. 321-326.
- [9] *Александров Н.Л., Высикайло Ф.И., Исламов Р.Ш. и др.* // ТВТ. 1981. Т. 19. № 3. С. 485-490.
- [10] *Александров Н.Л., Кончаков А.М.* // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 1. С. 185-191.
- [11] *Александров Н.Л., Высикайло Ф.И., Исламов Р.Ш. и др.* // ТВТ. 1981. Т. 19. № 1. С. 22-27.
- [12] *Александров Н.Л.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 7. С. 1411-1416.

Московский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
1 июня 1995 г.