



УДК 537.525

Р.К. Сафиуллин, Ш.Ф. Арасланов, Ф.Ш. Муллануров

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ И ДРЕЙФОВОЙ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В РАБОЧИХ СМЕСЯХ CO₂- И СО-ЛАЗЕРОВ

Энергетическое распределение свободных электронов является одной из важных характеристик низкотемпературной плазмы газового разряда. В неравновесных тлеющих разрядах функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) сильно отличается от максвелловской. Экспериментальное определение ФРЭЭ зондовым или СВЧ-методами сопряжено со значительными трудностями. Чаще всего энергетическое распределение электронов рассчитывается путем решения кинетического уравнения Больцмана [1,2]. В данной работе произведен расчет ФРЭЭ и ряда коэффициентов переноса для лазерных смесей газоразрядных CO₂-и СО-лазеров.

Уравнение Больцмана для электронов записывается в виде [3]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{3}(E/N)^2 \frac{d}{du} \left[\frac{uf}{\sum_k x_k Q_k^{el}(u)} \right] + \\ & + (kT/e) \frac{d}{du} \left\{ 2u \frac{df}{du} \sum_k x_k [u Q_k^{el}(u) \frac{m}{M_k} + 3B_k Q_k^{rot}(u)] \right\} + \\ & + \frac{d}{du} \left\{ 2uf(u) \sum_k x_k [u Q_k^{el}(u) \frac{m}{M_k} + 3B_k Q_k^{rot}(u)] \right\} + \\ & + \sum_{kms} x_k x_{km} [(u + u_s) f(u + u_s) Q_s^{in}(u + u_s) - uf(u) Q_s^{in}(u)] + \\ & + \sum_{kms} x_k x_{ks} (g_{km} / g_{ks}) [uf(u - u_s) Q_s^{in}(u) - \\ & - (u + u_s) f(u) Q_s^{in}(u + u_s)] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $f(u)$ - ФРЭЭ, $\xi_k = N_k/N$, $N = e N_e$, $\xi_{km} = N_{km}/N$; N_{km} - число молекул k -го сорта на m -м уровне внутренней энергии, N полное число атомов и молекул в единице объема; B_k , $Q_k^{el}(u)$, $Q_k^{rot}(u)$ постоянная вращения, транспортное сечение упругого рассеяния электронов на k -й молекуле и сечение возбуждения вращательных степеней свободы k -й молекулы, соответственно;

e - абсолютная величина заряда электрона; T - температура газа; u_s - энергия, теряемая электроном при столкновении с молекулой k -го сорта, при котором молекула переходит с m -го на s -й уровень внутренней энергии; g_{km} , g_{ks} - статистический вес уровней m и s , соответственно. Последние два члена в уравнении (1) описывают неупругие и сверхупругие столкновения электронов с молекулами.

На функцию $f(u)$ накладывается граничное условие $f(0) = 0$ и обычное условие нормировки:

$$\int_0^\infty u^{1/2} f(u) du = 1. \quad (2)$$

Методика вычисления ФРЭЭ изложена в работе [3]. После нахождения нормализованной ФРЭЭ определяются следующие интегральные характеристики плазмы: дрейфовая скорость электронов V_{dp} в электрическом поле, средняя энергия электронов ϵ , константы скоростей различных кинетических процессов. Они вычисляются по известным формулам:

$$V_{dp} = -\frac{E}{3N} (2e/m)^{1/2} \int_0^\infty u \frac{df}{du} \left[\sum_k x_k Q_k^{el}(u) \right]^{-1} du, \quad (3)$$

$$\epsilon = e\bar{u} = e \int_0^\infty u^{3/2} f(u) du, \quad (4)$$

$$\frac{D}{m} = \frac{E}{3NV_{dp}} (2e/m)^{1/2} \int_0^\infty uf(u) \left[\sum_k x_k Q_k^{el}(u) \right]^{-1} du \quad (5)$$

Ниже приведены рассчитанные зависимости дрейфовой скорости электронов W_e , их средней энергии ϵ и коэффициентов диффузии электронов D в зависимости от параметра E/N - приведенной напряженности электрического поля для лазерных смесей CO₂/N₂/He = 1/3/ n ($n = 0; 5; 10; 15; 20$) и CO/N₂/He = 1/6/ n ($n = 0; 5; 10; 15; 20$). Как известно, коэффициент диффузии D обратно пропорционален суммарной концентрации атомов и молекул N . На графиках приведены значения D , соответствующие концентрации $N = 10^{18}$ см⁻³.

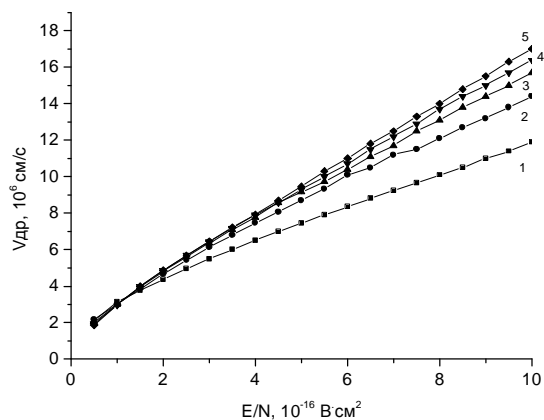


Рис.1. Дрейфовая скорость электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно).

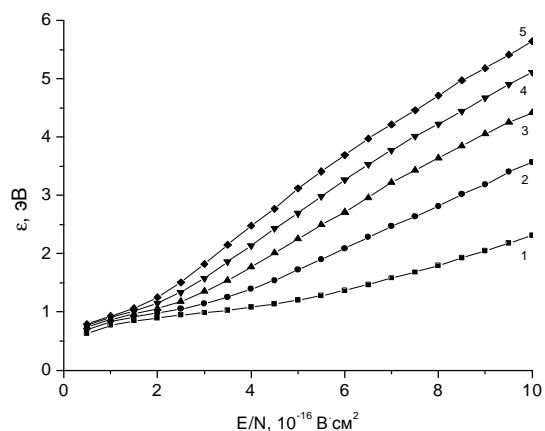


Рис.4. Средняя энергия электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

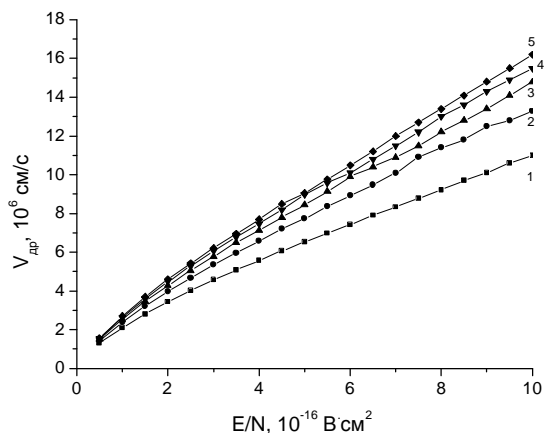


Рис.2. Дрейфовая скорость электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

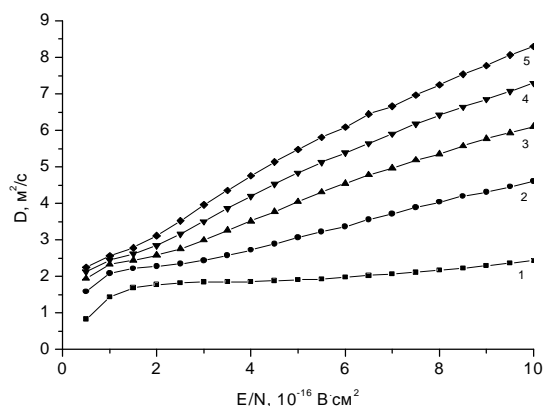


Рис.5. Коэффициент диффузии электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

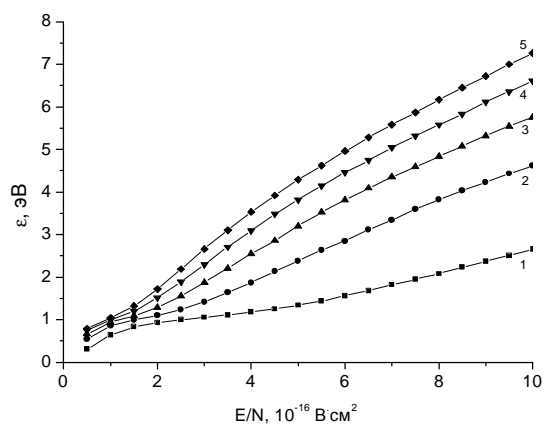


Рис.3. Средняя энергия электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

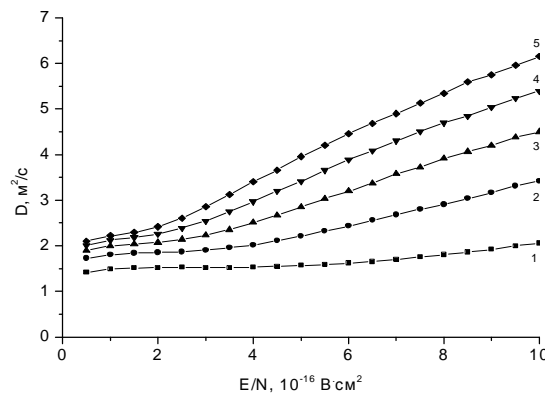


Рис. 6. Коэффициент диффузии электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$. (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

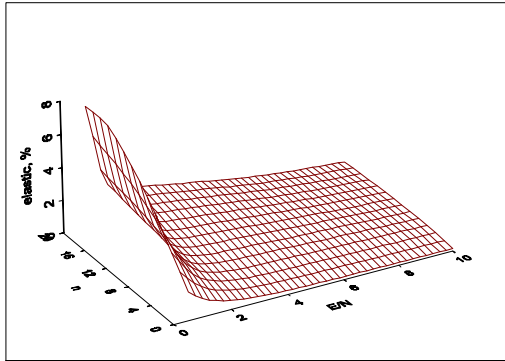


Рис. 7. Энерговклад в поступательно-вращательные степени свободы атомов и молекул.
Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (E/N в 10^{-16} В·см²)

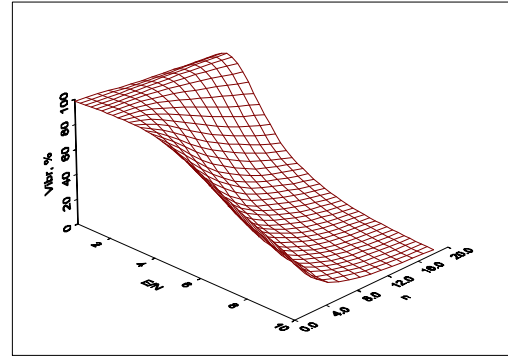


Рис. 8. Энерговклад в колебательные степени свободы молекул.
Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (E/N в 10^{-16} В·см²)

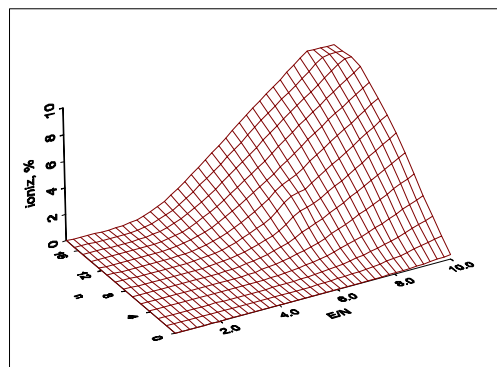


Рис. 9. Энерговклад в ионизацию атомов и молекул.
Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (E/N в 10^{-16} В·см²)

Как видно из приведенных графиков, увеличение содержания гелия в лазерных смесях CO_2 - и CO -лазеров приводит к заметному увеличению дрейфовой скорости, средней энергии и коэффициентов диффузии свободных электронов. Это обусловлено уменьшением энергетических потерь свободных электронов на возбуждение вращательных и, главным образом, колебательных степеней свободы молекул CO_2 и N_2 по мере увеличения процентного содержания гелия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981. - 516 с.
2. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980. - 512 с.
3. Арасланов Ш.Ф., Сафиуллин Р.К. Проблемы энергетики // Известия вузов, 1999, № 7-8. - С. 61-68.