

УДК 537.525

Сафиуллин Р.К. – доктор физико-математических наук, профессорE-mail: rksaf@mail.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Зайнашева Г.Н. – кандидат физико-математических наук, доцентE-mail: Guzel_zn@mail.ru**Казанский государственный энергетический университет**

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Расчеты энергетического распределения и средней энергии свободных электронов в плазме тлеющего разряда

Аннотация

Энергетическое распределение свободных электронов – очень важная характеристика газоразрядной плазмы. Известно, что энергетическое распределение свободных электронов в плазме тлеющего разряда сильно отличается от максвелловского. Функция распределения свободных электронов по энергии (ФРЭЭ) определяется или в ходе очень трудоемких экспериментов или может быть получена в результате численного решения уравнения Больцмана для электронов с помощью современных компьютеров. Знание ФРЭЭ позволяет оценивать такие важные характеристики газоразрядной плазмы как средняя энергия электронов, дрейфовая скорость, коэффициенты диффузии электронов, константы скоростей различных кинетических процессов, обусловленных столкновениями электронов с атомами и молекулами.

В данной работе представлен эффективный метод расчета ФРЭЭ в тлеющем разряде для газовых смесей, содержащих в качестве компонент CO_2 , CO , N_2 , O_2 , H_2 , He , Ar . Рассчитаны ФРЭЭ и зависимости средней энергии электронов и других величин для лазерных смесей CO_2 -и CO -лазеров, а также для чистых O_2 , CO , CO_2 и воздуха в широком диапазоне параметра E/N (E – напряженность электрического поля, N – суммарная концентрация атомов и молекул). В большинстве случаев получено хорошее или удовлетворительное согласие рассчитанных характеристик с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: тлеющий разряд, функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), средняя энергия электронов.

Уравнение Больцмана для свободных электронов в плазме тлеющего разряда

К важнейшим характеристикам тлеющего разряда относятся такие характеристики, как частоты ионизации, рекомбинации, прилипания электронов к молекулам, скорости дрейфа в электрическом поле, коэффициенты диффузии, доли энергии электрического поля, идущие в различные степени свободы молекул. Благодаря работам по определению сечений элементарных процессов столкновений электронов с молекулами и разработке методов расчета функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) стало возможным находить искомые величины численно. Исследованиям ФРЭЭ было посвящено большое число работ.

Энергетическое распределение свободных электронов является одной из важных характеристик низкотемпературной плазмы газового разряда. В неравновесных разрядах (например, в тлеющем разряде) функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) сильно отличается от максвелловской. Как известно, экспериментальное определение ФРЭЭ зондовым или СВЧ-методами связано со значительными техническими трудностями. Поэтому чаще всего энергетическое распределение электронов рассчитывают путем решения кинетического уравнения Больцмана [1-6]. В данной работе произведен численный расчет ФРЭЭ и средней энергии электронов для лазерных смесей газоразрядных CO_2 -и CO -лазеров и других газов.

При выводе кинетического уравнения для ФРЭЭ принимается, что: 1) объемная плотность электронов n_e , положительных и отрицательных ионов n_p и n_n много меньше плотности нейтральных частиц, так что можно пренебречь электрон-ионными и

электрон-электронными столкновениями; 2) энергия кулоновского взаимодействия электронов много меньше их кинетической энергии: $e^2 n_e^{1/3} \ll kT_e$ (e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов); 3) выполняется условие невырожденности плазмы: $kT_e \gg \hbar^2 n_e^{2/3} / m$ (\hbar – постоянная Планка, m – масса электрона). Поле считается однородным, стационарное решение ищется в виде разложения по полиномам Лежандра $P_j(\cos\theta)$, где θ – угол между направлением электрического поля E и скоростью электрона v : Обычно ограничиваются двумя членами в разложении ФРЭЭ по полиномам Лежандра.

В данной работе уравнение Больцмана для свободных электронов было использовано нами в виде, описанном ранее в работах [3-6]. Там же была изложена методика вычисления ФРЭЭ. После нахождения ФРЭЭ определяются следующие интегральные характеристики плазмы: дрейфовая скорость электронов $V_{др}$ в электрическом поле, средняя энергия электронов ε , константы скоростей различных кинетических процессов. Они вычисляются по известным формулам [3-6]. На рис. 1-7 представлены некоторые результаты расчетов.

Результаты расчетов ФРЭЭ и средней энергии свободных электронов

На рис. 1 представлены рассчитанные ФРЭЭ для лазерной смеси $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/7/12$ при различных значениях параметра E/N и $T = 300$ К, $T_v(\text{CO}_2) = T_v(\text{N}_2) = 1500$ К. Здесь T – температура газовой смеси, $T_v(\text{CO}_2)$ – колебательная температура антисимметричной колебательной моды CO_2 , $T_v(\text{N}_2)$ – колебательная температура азота.

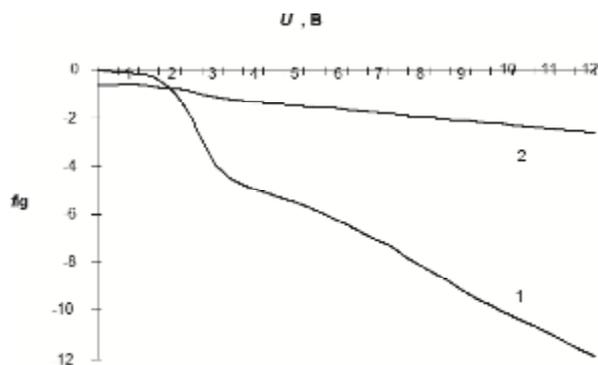


Рис. 1. ФРЭЭ для смеси $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/7/12$: 1 – $E/N = 1 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, 2 – $E/N = 7 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$

При $E/N = 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ ясно наблюдается характерный излом ФРЭЭ. Следует подчеркнуть, что больцмановское распределение по колебательным уровням азота при расчете энергетического распределения электронов было взято нами здесь для простоты. Расчеты проведены с учетом девозбуждения колебательных уровней азота и углекислого газа.

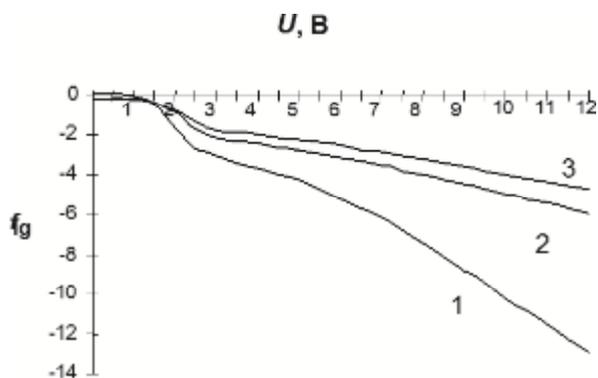


Рис. 2. ФРЭЭ для смеси $\text{CO}/\text{N}_2 = 1/6$. 14:
1 – $E/N = 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, 2 – $E/N = 4.5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$, 3 – $E/N = 6 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$

На рис. 2 представлены рассчитанные ФРЭЭ для смеси $\text{CO}/\text{N}_2 = 1/6.14$ при $E/N = 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ (кривая 1), $E/N = 4,5 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ (кривая 2) и $E/N = 6 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ (кривая 3). При этом полагалось $T = 90 \text{ К}$, $T_v(\text{CO}) = T_v(\text{N}_2) = 1500 \text{ К}$.

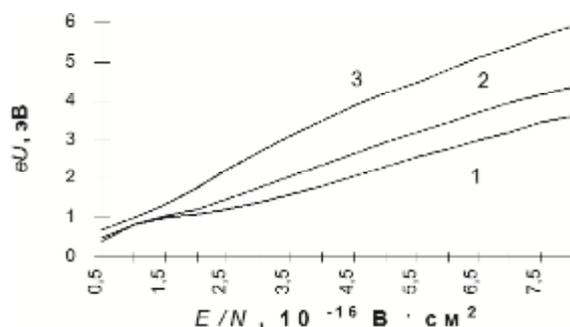


Рис. 3. Зависимости средней энергии электронов от приведенной напряженности электрического поля E/N :
1 – $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/2/3$, 2 – $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/1/3$, 3 – $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/1/8$

На рис. 3 представлены кривые зависимостей от параметра E/N средней энергии электронов для смесей $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/2/3$ (кривая 1), $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/1/3$ (кривая 2) и $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/1/8$ (кривая 3). Очевидно, что с увеличением содержания молекулярного компонента в смеси средняя энергия электронов уменьшается; это объясняется увеличением энергозатрат от электронов в колебательные и электронные степени свободы молекул. На рис. 4 приведены аналогичные кривые для смесей $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/10/10$, $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/7/12$ и $\text{CO}_2/\text{N}_2 = 1/1$ (кривые 1, 2, 3, соответственно).

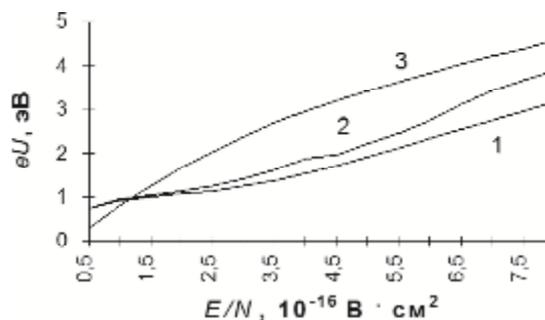


Рис. 4. Зависимости средней энергии электронов от приведенной напряженности электрического поля E/N в смесях:
1 – $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/10/10$, 2 – $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/7/12$, 3 – $\text{CO}_2/\text{N}_2 = 1/1$

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчета средней энергии электронов в O_2 , CO , CO_2 и в воздухе, при изменении E/N в интервале $(1 - 400) \cdot 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$. На рис. 2.7 показаны результаты расчета средней энергии электронов в смеси $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$.

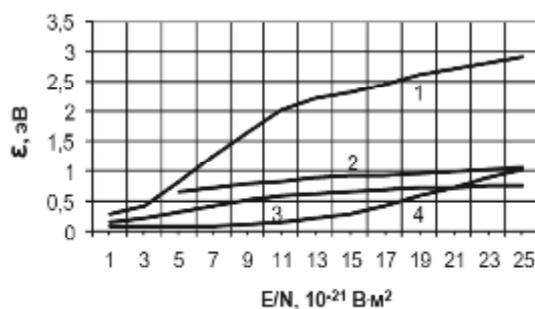


Рис. 5. Средняя энергия электронов: 1 – O_2 , 2 – воздух, 3 – CO , 4 – CO_2

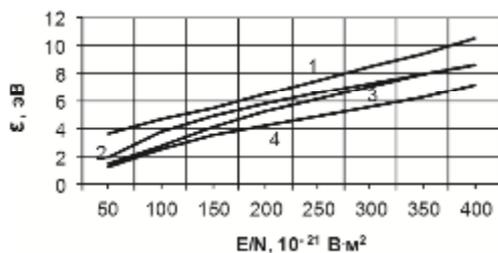


Рис. 6. Средняя энергия электронов: 1 – O₂, 2 – CO₂, 3 – воздух, 4 – СО

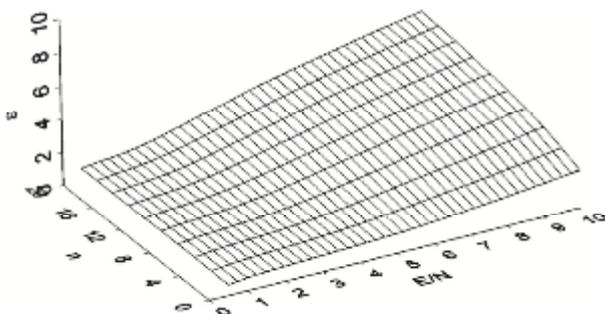


Рис. 7. Средняя энергия электронов (эВ) в смеси CO/N₂/He = 1/6/n

На рис. 7 параметр E/N измеряется в единицах ($10^{-20} \text{В}\cdot\text{м}^2$)

В заключение на рис. 8 и 9 приведены результаты расчетов дрейфовой скорости электронов в чистом кислороде и окиси углерода.

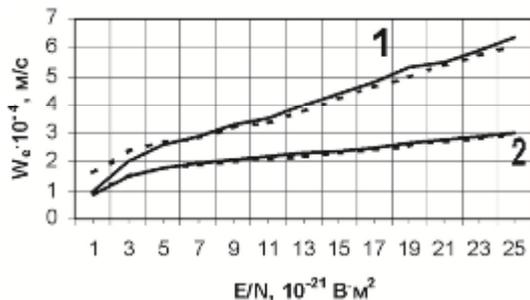


Рис. 8. Дрейфовая скорость электронов в кислороде (1) и окиси углерода (2).
Сплошные линии – расчет, пунктирные – эксперимент [8]

На рис. 8 представлены результаты для O₂ (кривая 1) и СО (кривая 2) при изменении E/N в интервале $(1-25) \cdot 10^{-21} \text{В}\cdot\text{м}^2$. Пунктирные линии соответствуют результатам экспериментов, полученным в работе [360]. Наблюдается хорошее согласие расчетов с экспериментом для E/N в интервале $(5-25) \cdot 10^{-21} \text{В}\cdot\text{м}^2$.

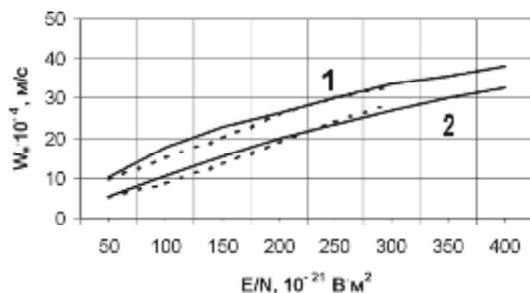


Рис. 9. Дрейфовая скорость электронов в кислороде (1) и окиси углерода (2).
Сплошные линии – расчет, пунктирные – эксперимент [8]

На рис. 9 приведены данные по дрейфовой скорости для этих же газов, но при более высоких значениях параметра E/N , изменяющегося в интервале $(50-400) \cdot 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$. Очевидно, что расчетные данные отличаются от экспериментальных не более чем на 10 %.

Список библиографических ссылок

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. Известия вузов. Проблемы энергетики, 1999, № 7-8. – С. 61-68.
4. Сафиуллин Р.К. Расчет констант скоростей ионизации и диссоциативного прилипания электронов к молекулам в газоразрядной плазме // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2001, № 7-8. – С. 55-63.
5. Сафиуллин Р.К., Арасланов Ш.Ф., Муллаууров Ф.Ш. Расчет коэффициентов диффузии и дрейфовой скорости электронов в рабочих смесях CO_2 - и CO -лазеров // Известия КГАСУ, 2005, № 1 (3). – С. 152-154.
6. Сафиуллин Р.К. Расчет дрейфовой скорости электронов в умеренных и сильных электрических полях // Известия вузов (Проблемы энергетики), 2000, № 11-12. – С. 49-53.
7. Сафиуллин Р.К. Расчет энергетического распределения и коэффициентов переноса электронов в рабочих смесях CO_2 - и CO -лазеров. Труды VI Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2005». – СПб., 2005. – С. 84-88.
8. Сафиуллин Р.К. Математическое моделирование процессов в низкотемпературной плазме тлеющего разряда применительно к CO_2 и CO -лазерам // Автореф. докт. дисс. на соиск. степени докт. физ.-мат. наук. – Казань, 2006. – 35 с.

Safiullin R.K. – doctor of physical mathematical sciences, professor

E-mail: rksaf@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Zainasheva G.N. – candidate of physical mathematical sciences, associate professor

E-mail: Guzel_zn@mail.ru

Kazan State University of Power Energy

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

Calculations of energy distribution and mean energy of free electrons in glow discharge plasma

Resume

Electron energy distribution function (EEDF) is a very important property of gas discharge plasma. It is well known that in glow discharges EEDF strongly differs from the Maxwellian one and so it must be calculated numerically by solution of Boltzmann equation for free electrons of plasma or measured in the very laborious experiments. Knowledge of EEDF allows one to evaluate important characteristics of gas discharge plasma such as a mean energy of electrons, electron drift velocity, diffusion coefficients and the rates of various kinetic processes due to electron-molecule collisions.

In this paper the effective method for EEDF calculation is described for the gas mixtures containing CO_2 , CO , N_2 , O_2 , H_2 , He and Ar species. Then the EEDF and mean electron energies for gas mixtures of CO_2 and CO lasers were calculated as well as for pure O_2 , CO and CO_2 gases and for air. The calculations were carried out for a wide range of the parameter E/N (E the electric field strength, N the total particle density of atoms and molecules). In most cases the calculated quantities turned out to be in a good or in a satisfactory agreement with the available experimental values.

Keywords: glow discharge, electron energy distribution function (EEDF), mean electron energy.

Reference list

1. Smith K., Thomson R. Computer modeling of gas lasers. – M.: Publishers Mir, 1981. – 512 p.
2. Gordietz B.F., Osipov A.I., Shelepin L.A. Kinetic processes in gases and molecular lasers. – M.: Publishers Nauka, 1980. – 512 p.
3. Araslanov Sh.F., Safiullin R.K. Energetic distribution of electrons in glow discharge plasma // *Izvestiya vuzov. Problemy Energetiki*, 1999, № 7-8. – P. 61-68.
4. Safiullin R.K. Calculation of rates of ionization and electron dissociative attachment to molecules in gas discharge plasma // *Izvestiya vuzov. Problemy Energetiki*, 2001, № 7-8. – P. 55-63.
5. Safiullin R.K., Araslanov Sh.F., Mullanurov F.Sh. Calculations of electron diffusion coefficients and electron drift velocities in laser mixtures of CO₂ and CO Lasers. // *Izvestija KGASU*, 2005, № 1 (3). – P. 152-154.
6. Safiullin R.K. Calculation of electron drift velocity in moderate and strong electric fields. // *Izvestija vuzov Problemy Energetiki*, 2000, № 11-12. – P. 49-53.
7. Safiullin R.K. Calculation of free electrons energy distribution in laser mixtures of CO₂ and CO. Lasers. Papers of VI International scientific conference «Computer Modeling 2005». – SPb., 2005. – P. 84-88.
8. Safiullin R.K. Mathematical modeling of the processes in low temperature glow discharge plasma in application for CO₂ and CO Lasers // The master's thesis author's abstract of a Doct. Phys.-Math. Sci. – Kazan, 2006. – 35 p.