Физика

УДК 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-7-15

В.С. Курбанисмаилов¹, С.А. Майоров², О.А. Омаров¹, Г.Б. Рагимханов¹, И.Г. Рамазанов¹

Характеристики дрейфа электронов в гелии с парами железа

¹ Дагестанский государственный университет; Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; vali_60@mail.ru;

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова; Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38; mayorov_sa@mail.ru

Методом Монте-Карло рассчитаны кинетические характеристики дрейфа электронов в гелии в присутствии паров железа при напряженности электрического поля $E/N=1-100$ Тд с учетом неупругих столкновений. Проанализировано влияние концентрации паров железа на скорость дрейфа, среднюю энергию электронов, коэффициенты диффузии и подвижности, рассчитан ионизационный коэффициент Таунсенда. Приведено сравнение функции распределения электронов с распределениями Максвелла и Дрюестейна. Показано, что незначительные добавки примесей атомов железа в гелий, начиная с долей процента, влияют на характеристики неупругих процессов, соответственно и на разряд.

Ключевые слова: дрейф электронов, упругие и неупругие столкновения, пары железа, коэффициенты диффузии и Таунсенда.

Введение

Самостоятельные объемные разряды в газах высокого давления, формирующиеся в условиях с предварительной ионизацией газа, находят широкое применение в самых различных областях науки и техники [1]. В частности, плазма высокого давления используется в качестве активной среды для накачки газовых лазеров. Однако однородная форма горения разряда ограничивается процессом контракции разряда [1, 2] и переход к сильнооточной стадии определяется неустойчивостями в прикатодной области. Развитию искрового канала со стороны катода предшествует взрыв микроострий катодной поверхности [1, 2], что, в свою очередь, приводит к появлению атомов примеси материала катода в области газового разряда.

В работах [3, 4] при исследовании оптического излучения объемного разряда в гелии атмосферного давления в спектре прикатодной плазмы обнаружены линии излучения паров атомов и ионов железа. Атом железа является одним из перспективных материалов для получения импульсной генерации на переходах с резонансного уровня на метастабильный [5–7].

Как известно [8–14], примеси металла могут существенно изменить динамику развития разряда, влияя на кинетику процессов как в приэлектродных областях, так и в объеме промежутка. Например, смесь инертного газа с большим потенциалом ионизации и небольшой добавкой тяжелого легкоионизируемого газа может радикально менять характеристики газового разряда. Ведь ионный состав в этом случае будет определяться легкоионизируемой добавкой, а движение тяжелых ионов в несобственном газе приво-

дит к формированию сверхзвукового ионного потока [9]. Диффузия и дрейф электронов в смесях газов также имеют существенные особенности, которые могут быть использованы в многочисленных приложениях газоразрядной плазмы.

В настоящей работе рассмотрен дрейф электронов в гелии с парами железа с целью изучения влияния концентрации (доли) железа на коэффициенты переноса электронов. Вычислительный эксперимент основан на рассмотрении ансамбля невзаимодействующих между собой электронов, движение которых определяется заданными полями и мгновенными столкновениями с атомами.

Модель столкновений основана на процедуре генерации случайных чисел – методе Монте-Карло. Реализация электрон-атомных столкновений методом Монте-Карло позволяет учитывать энергобаланс электронов на основе элементарных актов, в том числе и при неупругих столкновениях. Отметим, что на основе такого численного эксперимента фактически находится решение уравнения Больцмана, а не его двучленного приближения. В работе рассчитываются значения скорости дрейфа, средней энергии электронов, характеристической энергии Таунсенда и ионизационного коэффициента Таунсенда.

Постановка задачи и методика моделирования дрейфа электронов в газе с примесями легкоионизируемых компонент паров металла подробно описана в работе [15]. Для моделирования столкновений использовался алгоритм на основе метода Монте-Карло, разработанный для моделирования дрейфа ионов и электронов в газе [16, 17]. При анализе столкновений учитывались известные зависимости сечений столкновений от энергии [18–24], а результаты расчетов дрейфа электронов для инертных газов представлены в работе [25].

Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости скорости дрейфа электронов от E/N в чистом гелии, в парах железа и дрейф в гелии с 1%-, 10%- и 50%-ным содержанием атомов железа. Графики зависимостей скорости дрейфа показывают, что добавление в гелий паров железа вплоть до 10%-ной концентрации их атомов не приводит к заметному изменению скорости дрейфа. При высоких концентрациях паров материала электродов (более 10 %) происходит существенное увеличение скорости дрейфа электронов.

Таким образом, скорость дрейфа электронов при малых концентрациях железа определяется упругими столкновениями электронов с атомами гелия.

Добавление малых примесей железа в гелий не приводит к увеличению скорости дрейфа электронов, в отличие от случая, когда в аргон добавляются пары ртути [26], поскольку у гелия отсутствует эффект Рамзауэра.

На рис. 2 представлены зависимости приведенного ионизационного коэффициента Таунсенда, который определяется как отношение числа пар, рожденных на 1 см, к числовой плотности атомов от E/N .

Рис. 1. Зависимости скорости дрейфа электронов от E/N

Рис. 2. Зависимости ионизационного коэффициента Таунсенда от E/N

Результаты для ионизационного коэффициента Таунсенда рассчитаны в чистом гелии, в парах железа, а также с 0.1%-, 1%-, 2%-, 5%-, 10%- и 50%-ным содержанием атомов железа в гелии.

Эти графики показывают, что даже 0.1%-ная концентрация атомов железа при $4 Td < E/N < 60 Td$ полностью меняет зарядовый состав и значительно понижает значение

поля, при котором начинается ионизация газа. Причем малое увеличение концентрации паров железа в гелии приводит к резкому увеличению коэффициента Таунсенда.

На рис. 3 приведены зависимости характеристической энергии Таунсенда, которая определяется отношением коэффициента поперечной диффузии к подвижности $eD_{\perp} / \mu$ от E/N в чистом гелии, в парах железа и с 0.1%-, 1%-, 2%-, 5%-, 10%- и 50%-ным содержанием атомов примесей железа в газе (гелий). Увеличение процентного содержания атомов примесей железа в гелии приводит к уменьшению характеристической энергии Таунсенда. Отметим, что в экспериментах обычно измеряется именно характеристическая энергия Таунсенда, которая равна температуре только в случае распределения Максвелла, а в реальности характеристическая энергия Таунсенда может значительно отличаться от двух третей средней энергии электронов.

На рис. 4 приведены графики зависимости средней энергии электронов от приведенной напряженности электрического поля E/N . Здесь обозначения аналогичны предыдущему рисунку.

Рис. 3. Графики зависимостей характеристической энергии Таунсенда $eD_{\perp} / \mu$ от E/N

Рис. 4. Графики зависимостей средней энергии электронов от E/N

Результаты исследования (рис. 3, 4) позволяют оценить разницу между температурой и характеристической энергией Таунсенда и сделать следующие выводы:

1) малые примеси паров железа существенно влияют не только на зарядовый состав плазмы, но и на вид функции распределения электронов по энергиям и ее средние характеристики;

2) наблюдается значительное отклонение от широко используемого соотношения Нернста–Таунсенда–Эйнштейна (часто называемого соотношением Эйнштейна) между температурой и характеристической энергией Таунсенда $eD_{\perp} / \mu$, которая обычно и является определяемой в эксперименте величиной.

Результаты расчетов дают достаточно полную картину механизма влияния малых добавок паров железа на характеристики газового разряда. Наиболее интересным и важным с практической точки зрения фактом является сильное увеличение частоты ионизации при незначительной (порядка долей процента) добавке паров железа. Кроме того, следует отметить, что в этом случае преимущественно будут ионизоваться атомы железа, соответственно в разряде будут в основном представлены ионы железа. В частности, в плазме импульсных разрядов, где наблюдается интенсивное распыление материала вещества электрода, это может сильно повлиять как на кинетику разряда в прикатодной области, так и на динамику развития разряда в целом.

На рис. 5 приведены зависимости функции распределения электронов от энергии при различной процентной доле атомов железа в гелии: в чистом гелии, в парах железа и в гелии с 0.1%-, 1%-, 2%-, 5%-, 10%- и 50%-ным содержанием железа. Для всех расчетов $E/N = 15 \text{ Td}$ с указанием значение средней кинетической энергии электронов $K = \langle \varepsilon \rangle$.

На рис. 6 приведены функции распределения электронов по энергии при 1%-ной доле железа в гелий-железной смеси при $E/N = 15 \text{ Td}$, для сравнения приведены также распределения Максвелла и Дривестейна со средней энергией, равной энергии из рас-

чета Монте-Карло, а также трубопроводное распределение (модель неограниченного стока).

Как видно из рис. 6, реальная функция распределения электронов по энергиям существенно отличается от обычно используемых распределений Максвелла и Дрювстейна. Анализ функций распределения электронов по энергии показывает, что эти функции не могут быть описаны какой-либо однопараметрической функцией с эффективной температурой, определяемой соотношением $K = \langle \varepsilon \rangle = 1.5T_{eff}$.

У реальной функции распределения можно выделить несколько характерных энергетических диапазонов, распределение в которых определяется доминированием или конкуренцией различных процессов, которые подробно описаны в работе [15].

Рис. 5. Функции распределения электронов по энергии для $E/N = 20$ Td при различных долях железа

Рис. 6. Функции распределения электронов по энергии в смеси с 1%-ном содержанием железа при $E/N = 15$ Td

Представляет интерес вопрос о максимальной энергетической эффективности поддержания разряда. Как показывают расчеты, при $E/N = 20 \text{ Td}$ наибольшая доля энергии на ионизацию затрачивается электроном при 1%-ной концентрации атомов железа, а при $E/N = 30 \text{ Td}$ максимум доли затрат на ионизацию достигается при 2%-ной концентрации железа.

Таким образом, разряд в гелии с парами железа обладает особенностями, которые могут быть полезны при поиске новых и более эффективных источников излучения, а возможность значительно влиять на параметры разряда с помощью выбора состава смеси и ее процентного соотношения представляется чрезвычайно интересной.

Заключение

Представлены новые расчетные данные о характеристиках дрейфа электронов в гелии в присутствии паров железа, которые могут быть полезны в различных приложениях газоразрядной плазмы. Приведенные результаты расчетов позволяют проследить за влиянием процентного состава атомов Fe в гелии на характеристики дрейфа электронов в постоянном и однородном электрическом поле с напряженностями в интервале от 1 до 100 Td.

Изменение характеристик разряда при малых добавках легкоионизируемой примеси может быть использовано при поиске новых активных сред для различных плазменных технологий в микроэлектронике, обработке материалов, нанесении тонких пленок, создании источников света, плазменных панелях, медицине [27, 28].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-08-00075а.

Литература

1. Осипов В.В. Самостоятельный объемный разряд // УФН. – 2000. – Т. 170. – С. 225.
2. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
3. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Али Рафид А.А. Импульсный объемный разряд в гелии при высоких перенапряжениях // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 154–161.
4. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М. Сильноточный диффузный разряд в гелии // Прикладная физика. – 2015. – № 2. – С. 63–68.
5. Дивин В.Д., Исаков В.К. Исследование импульсной генерации в парах железа // Квантовая электроника. – 1984. – № 5. – С. 11.
6. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould K. Efficient Pulsed Gas Discharge Laser // IEEE JQE-2. – 1966. – С. 474.
7. Петраш Г.Г. Импульсные газоразрядные лазеры // УФН. – 1971. – Т. 105. – С. 654.
8. Майоров С.А. О сверхзвуковом потоке ионов в легком газе // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2007. – № 7. – С. 44.
9. Майоров С.А. Расчет характеристик дрейфа электрона в неоне при постоянном электрическом поле // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2009. – № 10. – С. 15.
10. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N. and Dosbo-laev A.N. Investigation of plasma-dust structures in He-Ar gas mixture // Physics of Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 093701.

11. *Ramazanov T.S., Daniyarov T.T., Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolaev A.N., Zhankarashev E.B.* Ion Heating in Dusty Plasma of Noble Gas Mixtures // Contributions to Plasma Physics- 2010. – Vol. 50. – P. 42.
12. *Антипов С.Н., Васильев М.М., Майоров С.А., Петров О.Ф., Фортон В.Е.* Плазменно-пылевые структуры в He-Kr тлеющем разряде постоянного тока // ЖЭТФ. – 2011. – Т. 139, вып. 2. – С. 554.
13. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю., Павлов С.И., Новиков Л.А., Майоров С.А.* Управление ионным увлечением в пылевой плазме // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 100, вып. 11. – С. 801.
14. *Антипов С.Н., Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Майоров С.А., Марковец В.В., Петров О.Ф., Фортон В.Е.* Заряд и структуры пылевых частиц в газовом разряде при криогенных температурах // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133, вып. 4. – С. 948.
15. *Голятина Р.И., Майоров С.А.* Расчет характеристик переноса электронов в смеси гелия с ксеноном // Прикладная физика. – 2014. – № 4. – Р. 5.
16. *Цендин Л.Д.* Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, вып. 2. – С. 139.
17. *Майоров С.А.* О дрейфе ионов в газе во внешнем электрическом поле // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35, № 9. – С. 3.
18. *Мак-Даниэль И.* Процессы столкновений в ионизованных газах. – М.: Мир, 1967.
19. *Хаксли Л., Кромптон Р.* Диффузия и дрейф электронов в газах. – М.: Мир, 1977.
20. *Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982.
21. *Голятина Р.И., Майоров С.А.* Характеристики дрейфа электрона в постоянном электрическом поле для инертных газов // Прикладная физика. – 2011. – № 5. – С. 22–27.
22. *Смирнов Ю.М.* Возбуждение FeI и FeII в электрон-атомных столкновениях // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 11. – С. 1019–1024.
23. *Philip L. Bartlett and Andris T. Stelbovics.* Calculation of electron-impact total-ionization cross sections // PHYSICAL REVIEW A. – 2002. – Vol. 66. – P. 012707.
24. <http://www.ioffe.ru/ES/Elastic/>.
25. *Dutton J.* A survey of electron swarm data // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1975. – Vol. 4. – P. 577.
26. *Golyatina R.I., Maiorov S.A.* // Plasma Physics Reports. – 2018. – № 4.
27. *Elford M.T.* The Momentum Transfer Cross Section for Electrons in Mercury Vapour from 0.1 to 5 eV // Aust. J. Phys. – 1980. – Vol. 33. – P. 251
28. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев МХ.* Особенности спектров излучения самостоятельного объемного разряда в гелии // Вестник ДГУ. Вып. 1: Естественные науки. – 2002. – Вып. 1. – С. 24–29.

Поступила в редакцию 14 сентября 2017 г.

UDC 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-7-15

Electron drift characteristics in helium with iron vapors

***V.S. Kurbanishmailov¹, S.A. Mayorov², O.A. Omarov¹, G.B. Ragimkhanov¹,
I.G. Ramazanov¹***

¹ Dagestan State University; Russia, 367001, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a; vali_60@mail.ru;

² Institute of General Physics. A.M. Prokhorov; Russia, 119991, Moscow, Vavilov st., 38; mayorov_sa@mail.ru

The kinetic characteristics of the drift of electrons in helium in the presence of iron vapors at an electric field strength $E/N = 1\text{--}100$ Td with allowance for inelastic collisions are calculated by the Monte Carlo method. The effect of iron vapor concentration on the drift velocity, average electron energy, diffusion and mobility coefficients, and the Townsend ionization coefficient are calculated. A comparison is made between the electron distribution function and the Maxwell and Druestein distributions. It was shown that small additions of iron impurities into the helium atoms ranging from fractions of a percent, affect the characteristics of the inelastic processes, and to discharge, respectively.

Keywords: *electron drift, elastic and inelastic collisions, iron pairs, diffusion coefficients and Townsend.*

Received 14 September, 2017