УДК 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-2-14-18

В.С. Курбанисмаилов¹, С.А. Майоров^{2,3,4}, Г.Б. Рагимханов¹, З.Р. Халикова²

Характеристики дрейфа металлических ионов в гелии во внешнем электрическом поле

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

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН; Россия, 125412, Москва, ул. Вавилова, 13; mayorov_sa@mail.ru

³ Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13

⁴ Институт теоретической и экспериментальной физики, Казахский национальный университет Аль-Фараби; Казахстан, 050040, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

Приведены результаты расчетов методом Монте-Карло характеристик дрейфа ионов металлов (Li, Fe, Cu, W, Hg) в постоянном и однородном электрическом поле при $1 < E/N < 1000$ Тд в гелии. Рассчитаны скорость дрейфа, средняя кинетическая энергия, коэффициенты продольной и поперечной диффузии, длина свободного пробега. Выполнен анализ функции распределения ионов железа по скорости вдоль и поперек направления поля при дрейфе в гелии при различных напряженностях электрического поля.

Ключевые слова: дрейф ионов, электрическое поле, благородные газы, пары металла.

Кинетические характеристики металлических ионов в собственных парах и инертных газах представляют большой интерес, поскольку в современных технологиях часто используют плазменные процессы, при которых в активной зоне имеются пары металлов. Хорошо известно, что иногда даже очень малые примеси (миллионные доли) способны радикально менять свойства разряда [1–4]. Поэтому исследования кинетических характеристик ионов в газах и их смесях ведутся давно, и на сегодняшний день накоплен достаточный объем экспериментальных и теоретических результатов, представленных в ряде книг и обзоров [5–10].

Данная статья является продолжением ранее опубликованной работы [1]. Здесь мы приводим результаты расчетов характеристик дрейфа ионов металлов (Li, Fe, Cu, W, Hg) в гелии в постоянном и однородном электрическом поле при $1 < E/N < 1000$ Тд ($1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^{-2} = 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^{-2}$).

Расчеты характеристик дрейфа ионов в инертном газе выполнены методом Монте-Карло. Для моделирования ион-атомных столкновений при движении иона в однородном электрическом поле проводилось интегрирование уравнений движения ионов по схеме Рунге–Кутты второго порядка точности. Алгоритм моделирования ион-атомного столкновения подробно описан в работе [1].

Рассмотрим характеристики дрейфа ионов металла в гелии. На рис. 1 представлены результаты расчета функции распределения ионов железа по скорости вдоль (рис. 1 а) поля и поперек (рис. 1 б) поля в гелии для четырех значений напряженности

поля E/N : 10, 50, 100 и 300 Тд. Эти зависимости характеризуют различные режимы дрейфа: случай слабого поля (отклонение от равновесного распределения невелико, когда скорость дрейфа ионов мала по сравнению с тепловой скоростью атомов), умеренного – отклонение от равновесного распределения значительно (скорость дрейфа сравнима с тепловой скоростью атомов), и сильного – отклонение от равновесного значительно и отличается от него качественно (когда скорость дрейфа ионов во много раз больше скорости атомов).

Рис. 1. Функции распределения ионов железа по скорости вдоль направления поля (а) и поперек направления поля (б) при дрейфе в гелии при 300 К и плотности атомов $2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для различных значений напряженностей электрического поля

Как видно из рис. 1, при высоких значениях E/N вследствие нагрева ионов электрическим полем возникает анизотропия в распределении ионов металла по скоростям по направлению электрического поля (см. рис. 1).

Следует отметить, что реальная функция распределения ионов по проекциям скоростей имеет существенные отличия от соответствующих максвелловских распределений. Причем имеет место отличие не только в хвостах функций распределения, но и в центральной части. Отсюда следует, что функция распределения ионов по скоростям при их дрейфе в газе не может быть описана гауссовой кривой.

На рисунках 2–5 приведены характерные зависимости скорости дрейфа, эффективной температуры, поперечной и продольной температур, коэффициента диффузии вдоль и поперек направления поля, а также средней длины свободного пробега для ионов лития, железа, меди, вольфрама и ртути при их дрейфе в постоянном и однородном электрическом поле в зависимости от E/N в гелии при 300 К и плотности атомов $2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Анализ выполненных в работе расчетов показывает, что возможно формирование ионного потока, при котором скорость направленного движения значительно превышает скорость теплового хаотического движения даже при достаточно высокой приведенной напряженности электрического поля.

Следует отметить, что при увеличении напряженности электрического поля с одновременным увеличением скорости дрейфа (рис. 2а) происходит увеличение дисперсии функции распределения (рис. 1), т. е. увеличиваются значения продольной и поперечной температур ионов (рис. 3).

Так как имеется большая разница между продольной и поперечной температурами ионов $T_{\parallel}$ и $T_{\perp}$ (см. рис. 3), то сильно различаются коэффициенты диффузии вдоль и поперек поля (см. рис. 4).

Рис. 2. Характерные зависимости скорость дрейфа (а) и эффективная температура (б) ионов железа, лития, меди, вольфрама и ртути при их дрейфе в постоянном и однородном электрическом поле в гелии при 300 К и плотности атомов $2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Рис. 3. Продольная (а) и поперечная (б) температуры ионов лития, железа, меди, вольфрама и ртути при их дрейфе в постоянном и однородном электрическом поле в гелии при 300 К и плотности атомов $2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Рис. 4. Коэффициенты диффузии ионов железа, лития, меди, вольфрама и ртути вдоль (а) и поперек (б) направления поля при их дрейфе в постоянном и однородном электрическом поле в гелии при температуре 300 К и плотности атомов $2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Рис. 5. Средняя длина свободного пробега ионов в однородном электрическом поле в гелии при температуре 300 К и плотности атомов $2,68 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Следует отметить, что при полях выше 50 Td средняя длина пробега для более тяжелого иона выше, чем для более легких, однако при низких полях мы имеем обратную картину (см. рис. 5).

Заключение

В работе приведены результаты расчетов методом Монте-Карло характеристик дрейфа иона металла в гелии. Полученные результаты могут иметь практическое применение.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ: № 19-08-00333, № 19-08-00611.

Литература

1. *Maierov S.A.* Ion drift in a gas in an external electric field // *Plasma Physics Reports*. – 2009. – Vol. 35. – P. 802.
2. *Golyatina R.I. and Maierov S.A.* Approximation of the characteristics of ion drift in parent gas // *Plasma Physics Reports*. – 2017. – Vol. 43, № 1. – P. 75–82.
3. *Kurbanismailov V.S., Maierov S.A., Omarov O.A., and Ragimkhanov G.B.* // *Journal Technical Physics*. – 2019. – V. 89, № 3. – P. 388–391.

4. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Рамазанов И.Г. Характеристики дрейфа электронов в гелии с парами железа // Вестник ДГУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 7–15.
5. Мак-Даниэль И., Мэсон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. – М.: Мир, 1976.
6. Ellis H.W. Transport properties of gaseous ions over a wide energy range // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1976. – Vol. 7, № 3. – P. 177–210.
7. Viehland L.A., Johnsen R., Gray B.R. and Wright T.G. Transport coefficients of He^+ ions in helium // The Journal of chemical physics. – 2016. – Vol. 144. – P. 074306.
8. Viehland L.A. et al. Transport Properties of Gaseous Ions over a Wide Energy Range, IV // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1995. – Vol. 60. – P. 37–95.
9. Golyatina R.I., Maiorov S.A. and Ragimkhanov G.B. Alkali ions mobility in parent vapor // Physical Sciences and Technology. – 2018. – Vol. 5, № 2. – P. 83–89.
10. Golyatina R.I., Maiorov S.A. Ion drift in parent gas for cesium, rubidium, and mercury // Physical Sciences and Technology. – 2018. – Vol. 3, № 2. – P. 12–19.

Поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

UDC 537.521

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-2-14-18

Characteristics of the drift of metallic ions in helium in an external electric field

V.S. Kurbanismailov¹, S.A. Mayorov^{2,3,4}, G.B. Ragimkhanov¹, Z.R. Khalikova²

¹ Dagestan State University; Russia, 367001, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a; Vali_60@mail.ru

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

³ Unified Institute for High Temperatures of RAS; Russia, 125412, Izhorskaya st., 13

⁴ Institute of Theoretical and Experimental Physics, Al-Farabi Kazakh National University; Kazakhstan, 050040, al-Farabi Avenue, 71

The results of Monte-Carlo calculations in the characteristics of the drift of metal ions (Li, Fe, Cu, W, Hg) in a constant and uniform electric field at $1 < E / N < 1000$ Td in helium are presented. The drift velocity, the average kinetic energy, the longitudinal and transverse diffusion coefficients, and the mean free path are calculated. The distribution function of iron ions and the velocity along and across the field direction with drift in helium at various electric field strengths has been analyzed.

Keywords: *ion drift, electric field, noble gases, metal vapors.*

Received 17 April, 2019