

УДК 533.9

Расчет характеристик дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от его температуры

Р.И. Голятина, С.А. Майоров

Газовый разряд при пониженной температуре атомов обладает рядом особенностей, которые могут проявляться в экспериментах с пылевой плазмой. Например, при криогенных температурах стенок газоразрядной трубки имеет место сильная анизотропия функции распределения ионов по скоростям, что в свою очередь может вызывать значительное изменение свойств пылевых структур. В работе выполнен анализ характеристик дрейфа ионов гелия в постоянном и однородном электрическом поле в зависимости от температуры атомов собственного газа.

PACS: 51.50.+v, 51.10.+y, 52.80.Dy, 52.25.Fi

Ключевые слова: дрейф, ионы, гелий, собственный газ, ион-атомные столкновения, коэффициент диффузии.

Введение

Криогенные разряды уже давно привлекают значительное внимание исследователей [1–6]. Тем не менее, в литературе практически отсутствуют данные о зависимостях от температуры газа для основных характеристик дрейфа ионов [7]. Но совершенно очевидно, что влияние температуры атомов на характеристики дрейфа ионов очень велико, а дрейф и диффузия ионов в электрическом поле (например, амбиполярная диффузия ионов из положительного столба тлеющего разряда) в значительной мере определяют характеристики разряда.

Часто полагается, что дрейф ионов в сильном поле описывается сдвинутой функцией распределения Максвелла:

$$f_0(v) = \left(\frac{m}{2\pi T_i}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m(v-W)^2}{2T_i}\right) \quad (1)$$

Это распределение имеет два параметра – среднюю скорость ионов W (скорость дрейфа) и температуру ионов T_i , которая определяет тепловой разброс скоростей ионов $V_T = (T_i/m)^{1/2}$. При этом температура ионов может отличаться от температуры атомов.

В случае сильных полей или низких темпера-

тур газа отклонение функции распределения ионов от максвелловской (в т.ч. и от сдвинутой максвелловской) может быть весьма значительным. Введение ионной температуры, отличающейся от температуры атомов, зачастую оказывается недостаточным для описания функции распределения ионов [8, 9]. Кроме того, средняя энергия хаотического движения ионов вдоль электрического поля и поперек него также могут сильно отличаться.

В этом случае имеет смысл введение двух различных температур ионов, а именно, вдоль поля

T_{\parallel} и поперек поля T_{\perp} . Тогда средняя энергия иона складывается из направленного и хаотического движения ионов с различной дисперсией по отношению к направлению дрейфа:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{2} m W^2 + \frac{1}{2} T_{\parallel} + T_{\perp} \quad (2)$$

Для учета влияния разогрева ионов при дрейфе в электрическом поле удобно ввести понятие эффективной ионной температуры,

$$T_{eff} = \frac{2}{3} \langle \epsilon \rangle = \frac{1}{3} m \langle v^2 \rangle, \quad (3)$$

которая складывается из теплового движения ионов и энергии направленного движения и вместе со скоростью дрейфа является усредненной (гидродинамической) характеристикой потока ионов. Именно эффективная температура ионов как мера их средней энергии определяет, например, ионный радиус Дебая. Отметим, что эффективная температура не является температурой в термодинамическом смысле, а имеет смысл некоего энергетического показателя. Ситуация аналогична введению энергетического коэффициента T_a

Голятина Русудан Игоревна, научн. сотрудн.
Майоров Сергей Алексеевич, вед. научн. сотрудн.
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел.: 8-(499)-135-02-47. E-mail: mayorov_sa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2012 г.

унсенда, для электронов, который равен температуре электронов только в случае максвелловского распределения электронов по энергии.

Целью данной работы является анализ характеристик дрейфа ионов гелия в постоянном и однородном электрическом поле в зависимости от температуры атомов собственного газа.

Модель и результаты расчета

Рассмотрим дрейф ионов гелия в собственном газе в однородном электрическом поле при плотности атомов $N = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (число Лошмидта) и приведенной напряженности электрического поля $E/N = 10, 30$ и 100 Тд (таунсенд, $1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2 = 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$). Результаты расчетов представлены в табл. 1–3 и на рис. 1–3. Расчеты выполнены для температур газа в диапазоне от 1 до 10000 К, который покрывает весь интересный для прак-

тики диапазон температур, а именно, от экспериментов с криогенными разрядами до экспериментов при повышенных и высоких температурах газа.

Для расчетов использовалась модель ион атомных столкновений, реализованная методом Монте Карло [8–14]. В ней учитывались поляризационное взаимодействие ионов с атомами, резонансная передача заряда и короткодействующее отталкивание электронных оболочек (более подробное описание см. [8, 9]). Розыгрыш столкновений ионов совместно с интегрированием их уравнений движения позволяет вычислять все интегральные характеристики дрейфа ионов.

В табл. 1 представлены результаты расчетов для приведенной напряженности электрического поля $E/N = 10 \text{ Тд}$.

Таблица 1

Характеристики потока ионов гелия при их дрейфе в приведенном поле $E/N = 10 \text{ Тд}$

T , К	W , км/с	T_{eff} , К	$T_{ }$, К	T_{\perp} , К	$D_{ }$, см ² /с	D_{\perp} , см ² /с	$m.f.p.$, нм	$BS / (BS+Iso)$
1	0,5	74	172	24	0,054	0,036	28,1	0,057
3	0,5	75	173	26	0,057	0,038	28,3	0,059
10	0,48	80	175	32	0,065	0,046	28,9	0,068
30	0,44	88	168	48	0,080	0,065	30,4	0,095
100	0,37	141	200	111	0,140	0,127	35,3	0,178
300	0,27	322	357	305	0,260	0,252	44,5	0,312
1000	0,17	1010	1025	1003	0,541	0,541	57,5	0,454

Таблица 2

Характеристики потока ионов гелия при их дрейфе в приведенном поле $E/N = 30 \text{ Тд}$

T , К	W , км/с	T_{eff} , К	$T_{ }$, К	T_{\perp} , К	$D_{ }$, см ² /с	D_{\perp} , см ² /с	$m.f.p.$, нм	$BS / (BS+Iso)$
1	1,0	293	730	74	0,123	0,071	47,6	0,197
3	1,0	295	734	76	0,127	0,073	47,5	0,198
10	1,0	301	742	81	0,137	0,078	47,4	0,202
30	0,98	291	683	95	0,136	0,090	47,5	0,215
100	0,89	326	674	152	0,188	0,137	47,7	0,255
300	0,73	458	709	333	0,290	0,251	50,6	0,340
1000	0,51	1081	1213	1016	0,554	0,537	59,0	0,458

Таблица 3

**Характеристики потока ионов гелия при их дрейфе
в приведенном поле $E/N = 100 \text{ Td}$**

T , К	W , км/с	T_{eff} , К	T_{\parallel} , К	T_{\perp} , К	D_{\parallel} , см ² /с	D_{\perp} , см ² /с	$m.f.p.$ нм	$BS /$ ($BS+Iso$)
1	2,1	1131	2973	210	0,278	0,114	70,4	0,373
3	2,1	1145	3009	212	0,285	0,116	70,3	0,373
10	2,1	1174	3085	218	0,307	0,121	70,0	0,373
30	2,1	1082	2783	232	0,261	0,124	70,2	0,381
100	2,0	1140	2841	290	0,318	0,160	69,0	0,391
300	1,8	1214	2717	462	0,401	0,251	67,6	0,420
1000	1,5	1658	2745	1114	0,629	0,519	67,4	0,476

Отметим, что обычно приводятся экспериментальные и расчетные данные только для скорости дрейфа [7, 11–14], но для анализа свойств газового разряда необходимы и другие кинетические характеристики дрейфа ионов. В таблице последовательно приведены температура атомов газа, скорость дрейфа ионов, эффективная температура ионов, определяемая как две третьих средней энергии, поперечная, продольная температуры, коэффициенты диффузии вдоль и поперек направления поля, средняя длина свободного пробега ионов и доля столкновений с рассеянием назад по отношению к общему числу столкновений.

Соответственно, в табл. 2 и 3 собраны результаты для приведенной напряженности электрического поля $E/N = 30$ и 100 Td .

На рис. 1 приведены гидродинамические характеристики дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от его температуры. Три кривые на графике соответствуют различным приведенным напряженностям электрического поля: $E/N = 10, 30$ и 100 Td (соответственно, штрихованные, штрих-пунктирные и сплошные кривые).

При низкой температуре атомов T_a величина разогрева ионов значительно превышает температуру атомов: $T_{eff} - T_a \gg T_a$, следовательно, относительная скорость ионов и атомов определяется только средней скоростью ионов. В этом случае частота столкновений и скорость дрейфа ионов не зависят от температуры атомов. При $T_a < 10 \text{ K}$ зависимость скорости дрейфа от напряженности поля близка к закону зависимости скорости дрейфа для сильного поля: $W \propto E^{1/2}$, а при $T_a > 100 \text{ K}$

– к закону зависимости скорости дрейфа в слабом поле: $W \propto E$.

Увеличение температуры газа $T_a > 100 \text{ K}$ вызывает падение скорости дрейфа из-за увеличения доли столкновений с рассеиванием назад, так как диффузионное сечение Q_m , сечение изотропного рассеяния Q_{iso} и рассеяния назад Q_{BS} связаны соотношением $Q_m = Q_{iso} + 2Q_{BS}$. Отметим интересную особенность: падение скорости дрейфа при увеличении температуры газа имеет место несмотря на увеличение средней длины свободного пробега.

Для каждой напряженности поля существует значение некоторой критической температуры газа $T_0 (E/N)$, которая определяет границу сильной неравновесности ионной подсистемы: $T_{eff} > 2T_a$. Из рис. 1, б находим, что для $E/N = 10, 30, 100 \text{ Td}$ критическая температура T_0 равна, соответственно, 60, 200, 700 К. Поэтому переход к криогенным температурам приводит, помимо многих других факторов, также и к переходу в состояние сильной неравновесности ионной подсистемы.

На рис. 2 представлены кинетические характеристики дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от его температуры.

На рис. 3 представлены зависимости от температуры атомов средней длины свободного пробега ионов.

С помощью представленных в таблицах значений продольной и поперечной температур ио-

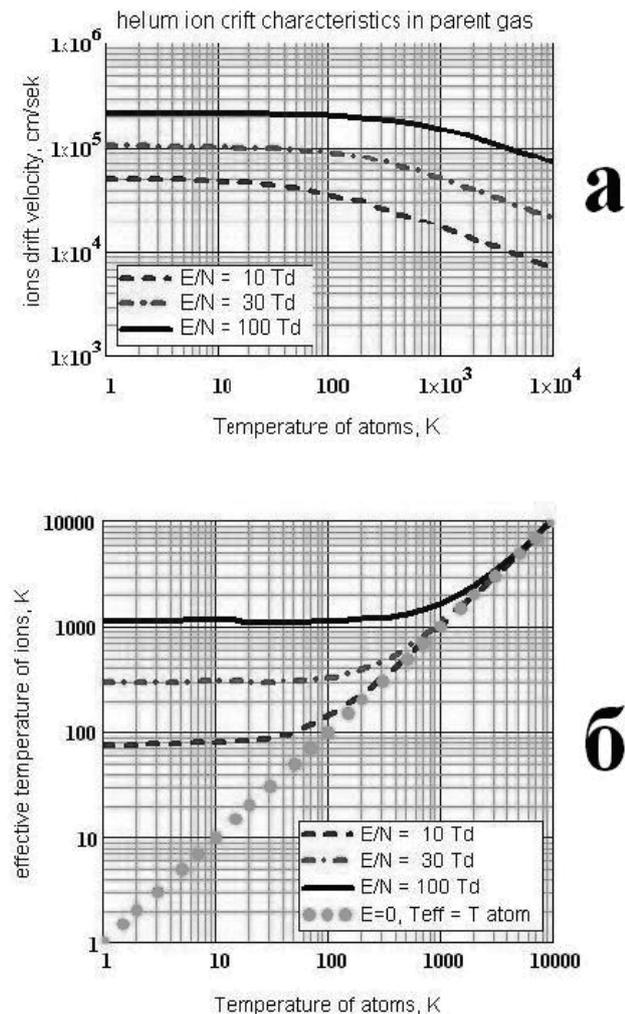


Рис. 1. Гидродинамические характеристики дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от его температуры: а) скорость дрейфа ионов; б) эффективная температура ионов; жирные точки соответствуют условию равновесия ионов с атомами:

$$T_{eff} = T_{atom}$$

нов может быть определена температура атомов, определяющая границу сильной неравновесности ионной подсистемы. Находим, что критическая температура атомов, при которой наступает сильная неравновесность распределения ионов по скоростям в направлении вдоль поля равна $T_0(E/N = 10, 30, 100 \text{ Td}) = 120, 400, 1500 \text{ K}$. Сильная неравновесность ионной подсистемы в направлении поперек поля наступает с температур атомов $T_0(E/N = 10, 30, 100 \text{ Td}) = 20, 60, 200 \text{ K}$. Таким образом, неравновесность поперечной температуры наступает при значительно более сильном охлаждении газа, и характерные значения перехода в сильной неравновесности приходится как раз на область криогенных разрядов. Отметим, что температура ионов в поперечном направлении часто полагается равной температуре атомов [7].

Имеет место неожиданный и нетривиальный факт: хотя сечения с перезарядкой и являются наибольшими, столкновения с рассеиванием назад составляют лишь 10–50 процентов от общего числа столкновений (в связи с этим см. [11], где сделана попытка аппроксимации столкновений в виде суммы столкновений с изотропным рассеиванием и рассеиванием назад). В работе [10] этот

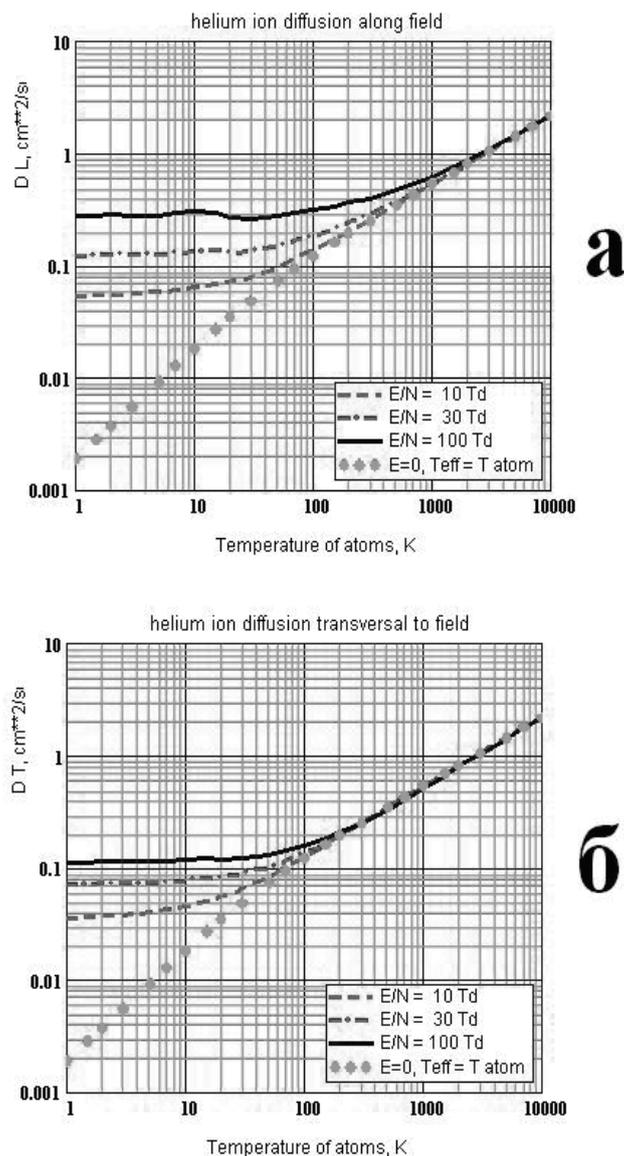


Рис. 2. Кинетические характеристики дрейфа ионов гелия в собственном газе в зависимости от его температуры: а) коэффициент диффузии ионов в направлении вдоль поля; б) коэффициент диффузии ионов в направлении поперек поля; жирными точками отмечены зависимости коэффициента диффузии при отсутствии поля.

вопрос рассмотрен более подробно, и сделаны расчеты для всех благородных газов.

Из приведенных данных следует, что газо-

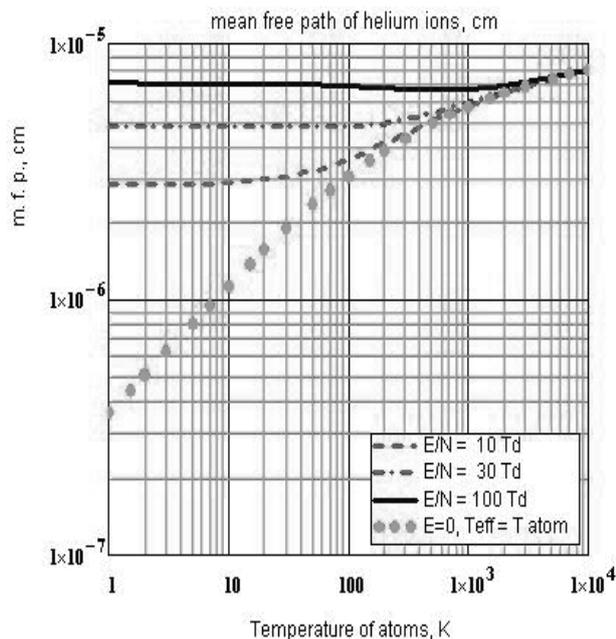


Рис. 3. Длина свободного пробега ионов в зависимости от температуры атомов.

динамические параметры (скорость дрейфа и эффективная температура) ионного потока для напряженностей поля 30 и 100 Тд меняются незначительно. Несколько сильнее они меняются при более низких значениях приведенного поля. Скорость дрейфа падает с увеличением температуры газа, эффективная температура ионов растет.

Коэффициенты диффузии ионов в продольном и поперечном к полю направлениях растут с увеличением температуры, причем при низких температурах имеется очень сильная анизотропия – продольная диффузия значительно превышает поперечную диффузию. Соответствующая разница имеется между продольной и поперечной температурами. Отметим, что для диффузии электронов в газе поперечная диффузия обычно превышает продольную в силу специфики электрон-атомных столкновений. Анализ характеристик столкновений показывает, что длина свободного пробега очень слабо зависит от температуры газа при сильном поле, а доля столкновений с рассеянием назад велика и при низкой температуре.

Заключение

Результаты проведенных расчетов могут использоваться при анализе и планировании экспериментов с пылевой плазмой в условиях криогенного разряда, при рассмотрении разряда в смеси

тяжелого и легкого газов [15, 16]. Дрейф и диффузия ионов при сверхнизких температурах газа играет важную роль при рассмотрении ультрахолодной плазмы [17, 18].

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 «Поддержка научных исследований, проводимых коллективами научно-образовательных центров по научному направлению «Физика, астрономия» в области Физика плазмы.

Литература

1. Goldan D. Paul and Goldstein L. // Phys. Rev. 1965. V. 138, P. A39
2. Фуголь И.Я., Самоваров В.Н., Старков М.Т. // ЖЭТФ. 1971. Т. 60» № 5. С. 1637
3. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Раковец А.А. Криогенные разряды. –М: Наука, 1988.
4. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Зимнухов В.С. и др. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. № 3. С. 493
5. Антипов С.Н., Асиновский Э.И., Кириллин А.В. и др. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. № 4. С. 948
6. Sekine W., Ishihara O. and Rosenberg M. // J. Plasma Fusion Res. SERIES. 2009. V. 8. P. 290
7. Мак-Даниэль И., Мэсон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. –М: Мир, 1976.
8. Майоров С.А. // Краткие сообщения по физике, ФИАН. 2007. № 7. С. 44
9. Майоров С.А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 869
10. Майоров С.А., Цытович В.Н. // Краткие сообщения по физике, ФИАН. 2012. № 3. С. 14
11. Piscitelli. D., Phelps A.V., Urquijo J. et al. // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. P. 046408
12. Robertson S., and Sternovsky Z. // Phys. Rev. E. 2003. V. 67. P. 046405
13. Zhong-Ling Dai, and You-Nian Wang // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. P. 036403
14. Longo S. and Diomede P. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 26. P. 177
15. Ramazanov T.S., Daniyarov T.T., Maiorov S.A., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2010. V. 50. P. 42
16. Антипов С.Н., Васильев М.М., Майоров С.А. и др. // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. № 3. С. 554
17. Killian T. C. // Science. 2007. V. 316. P. 705
18. Бронин. С.Я., Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В. и др. // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. № 4. С. 822

Calculation of characteristics of helium ion drift in the proper gas depending on temperature

R.I. Golyatina and S.A. Mayorov

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: mayorov_sa@mail.ru

In this work, the calculation of characteristics of helium ion drift in the proper gas depending on temperature has been made at a spatially homogeneous electric field

PACS: 51.50.+v, 51.10.+y, 52.80.Dy, 52.25.Fi

Keywords: drift, ions, helium, proper gas, ion-atom collisions, diffusion coefficient.

Bibliography – 18 references

Received November 20, 2012