

(¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

²Институт общей физики РАН, Москва, Россия)

О ДРЕЙФЕ ЭЛЕКТРОНОВ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНОМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Аннотация. В работе приведены результаты расчетов характеристик дрейфа электронов в постоянном пространственно неоднородном периодическом электрическом поле. Показано, что в типичных условиях экспериментов с газоразрядной плазмой при пониженном давлении газа влияние неоднородностей поля на скорость дрейфа и среднюю энергию электронов незначительно. Но интенсивности процессов возбуждения, ионизации, пространственное распределение плазмы сильно зависят как от величины неоднородностей (дисперсии), так и от характера изменения поля. Показано, что неоднородность электрического поля в поло-жительном столбе газового разряда приводит к максвеллизации функции распределения электронов по энергии.

Ключевые слова: дрейф электронов, газовый разряд.

Тірек сөздер: электрондардың дрейфі, газтекес разряд.

Keywords: electron drift, gas discharge.

При рассмотрении различных задач, связанных с дрейфом электронов в газоразрядной плазме, часто полагается, что скорость дрейфа и все характеристики дрейфа в каждой точке пространства (средняя энергия, коэффициенты диффузии, ионизационный и энергетический коэффициенты Таунсенда) зависят только от напряженности электрического поля и плотности газа (или от приведенного поля E/N) в данной точке. Однако многие явления в физике газоразрядной плазмы обусловлены эффектом нелокальности, когда характеристики электронной компоненты в данной точке зависят от параметров электронного газа в других точках [1, 2].

В настоящей работе рассмотрен дрейф электронов в электрическом поле, которое представляет собой периодические возмущения степенного характера:

$$E(x) = E_0 \{x/L\}^n / (n+1), \quad (1)$$

Здесь L – период, $\{x\}$ – дробная часть числа x , $\{x\} = x - [x]$, $[x]$ – целая часть числа x .

При дрейфе электроны приобретают энергию за счет джоулева нагрева $Q_{EW} = eEW$, e – заряд электрона, E – напряженность электрического поля, W – скорость дрейфа. Приобретаемая энергия теряется в упругих столкновениях с атомами, затрачивается на

возбуждение атомных уровней и ионизацию: $Q_{EW} = Q_{ea} + Q_{ex} + Q_{ion}$. При ионизации электронным ударом налетающий на атом электрон теряет энергию, равную сумме энергии ионизации и кинетической энергии второго электрона. После акта ионизации его энергия полагается равной: $\varepsilon_1' = \varepsilon_1 - I - \varepsilon_2'$. Положим, что энергия первого электрона с равной вероятностью принимает все возможные значения, а энергия второго электрона определяется из закона сохранения энергии:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1' &= (\varepsilon_1 - I)R, \\ \varepsilon_2' &= (\varepsilon_1 - I)(1 - R),\end{aligned}\quad (2)$$

где $0 < R < 1$ – случайное число.

Рассмотрим дрейф электронов в неоне, для которого была выполнена детальная табуляция различных дрейфовых характеристик [3]. При значениях приведенной напряженности электрического поля $E/N > 0,1$ Тд средняя кинетическая энергия электрона значительно превышает энергию (температуру) атомов, а при $E/N < 2$ Тд дрейф электрона в неоне определяется только упругими столкновениями с атомами.

Расчеты под номерами 1–12 в таблице №1 упорядочены по мере возрастания пространственной неоднородности периодического поля. В таблице 1 приведены результаты расчетов методом Монте-Карло [1] характеристик дрейфа электрона в неоне при температуре 298 К, приведенной средней напряженности электрического поля $E/N = 10$ Тд : скорость дрейфа W , средняя энергия $\langle \varepsilon \rangle$, доля энергоклада, пошедшая на возбуждение $100\% Q_{ex} / Q_{EW}$ и ионизацию, $100\% Q_{ion} / Q_{EW}$. В качестве меры неоднородности приведена дисперсия δ^2 , нормированная на величину среднего поля:

$$\delta^2 = \frac{\int_{\Omega} E^2(x) \langle E^2(x) \rangle - \langle E(x) \rangle^2 \Omega \langle E^2(x) \rangle}{\Omega \langle E^2(x) \rangle} \quad (3)$$

Все расчеты, кроме №4, выполнены для неоднородности поля степенного характера (1). В расчете №4 постоянное поле имело синусоидальное возмущение (1) с амплитудой, равной средне-му полю: $\alpha = 1$. Вычислялись самые различные характеристики дрейфа. За ось x выбрано направление дрейфа, т.е. при отрицательном среднем поле скорость дрейфа положительна. Для демонстрации влияния характера и величины пространственных неоднородностей периодического поля, в таблице приведены лишь

некоторые из них: скорость дрейфа $W = \int_0^{\Gamma} u f(\varepsilon) d\varepsilon$, средняя энергия электронов

$\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{\Gamma} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon$ и процентные доли энергоклада, расходуемые электроном на воз-

буждение $Q_{excitation} / Q_{EW}$ и ионизацию Q_{ion} / Q_{EW} . Величина Q_{ion} / Q_{EW} является ионизационным коэффициентом Таунсенда, нормированным на потенциал ионизации и соответствует доле ионизационных потерь в энергокладе. Приведенные в таблице данные дают достаточно полную картину о качественных характеристиках дрейфа электронов в электрическом поле.

На рисунке 1 представлены распределения электронов по кинетической энергии из расчета № 1 таблицы (однородное поле). Для сравнения, приведены также распределения Максвелла и Дрювестейна с такой же средней энергией электронов, и функция распределения электронов по трубопроводной модели. Видно, что ни распределение Максвелла, ни Дрювестейна не дают сколь-

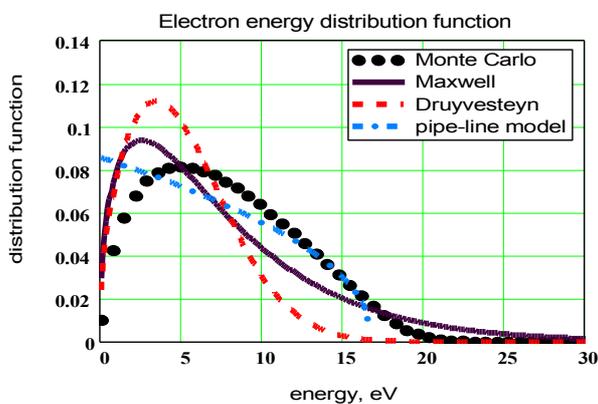


Рисунок 1 – Функция распределения электронов

по энергии при дрейфе в однородном электрическом поле ($E/N = 13.5$ Тд, неон). Жирные точки – результат моделирования методом Монте Карло, для сравнения

также приведены ФРЭЭ Максвелла (сплошная кривая), Дрювестейна (штрихованная кривая) и трубопроводное распределение (штрих-пунктирная кривая)

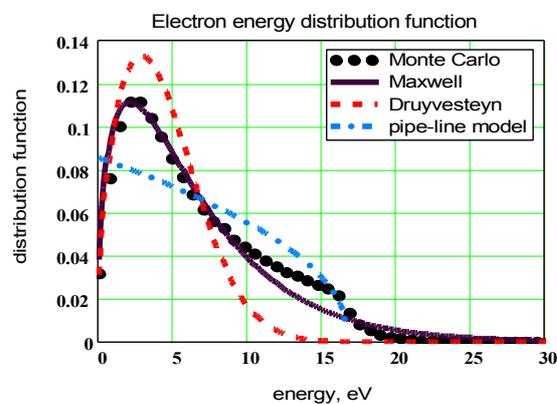


Рисунок 2 – Функция распределения электронов

по энергии при дрейфе в однородном электрическом поле ($E/N = 13.5$ Тд, неон). Жирные точки – результат моделирования методом Монте Карло, для сравнения также приведены ФРЭЭ Максвелла (сплошная кривая), Дрювестейна (штрихованная кривая) и трубопроводное распределение (штрих-пунктирная кривая)

нибудь даже качественного согласия с результатами расчета. Пожалуй, наилучшее совпадение между расчетом и теорией дает трубопроводное приближение, но область его применимости весьма ограничена. Следует также отметить, что помимо хорошо известного факта сильного влияния неупругих процессов возбуждения и ионизации на хвост функции распределения, имеется весьма значительное влияние неупругих процессов на функцию распределение электронов в области субтепловых энергий. Распределение электронов в области $\varepsilon \ll T_e$ сильно отличается от распределений Максвелла и Дрювестейна, что связано с наличием у электрона при его рождении довольно значительной кинетической энергии. При акте возбуждения электрон имеет энергию $\langle \varepsilon - E_1 \rangle = 2 \text{ эВ}$, а при акте ионизации – $\langle \varepsilon - I \rangle / 2 = 2 \text{ эВ}$.

На рисунке 2 представлены результаты расчета 11 из таблицы: дрейф происходит в направлении возрастания модуля поля при высокой его неоднородности ($n = 5$). Как и на рисунка 1, приведены также распределения Максвелла и Дрювестейна с такой же средней энергией электронов, и функция распределения электронов по трубопроводной модели.

Видно, что влияние неоднородности фактически привело к максвеллизации распределения в области энергий электрона $\varepsilon \ll 2 \langle \varepsilon \rangle$.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов, в которых дрейф происходит в направлении возрастания модуля поля при различных значениях показателя степени неоднородности. Этот рисунок демонстрирует влияние степени неоднородности поля на ФРЭЭ.

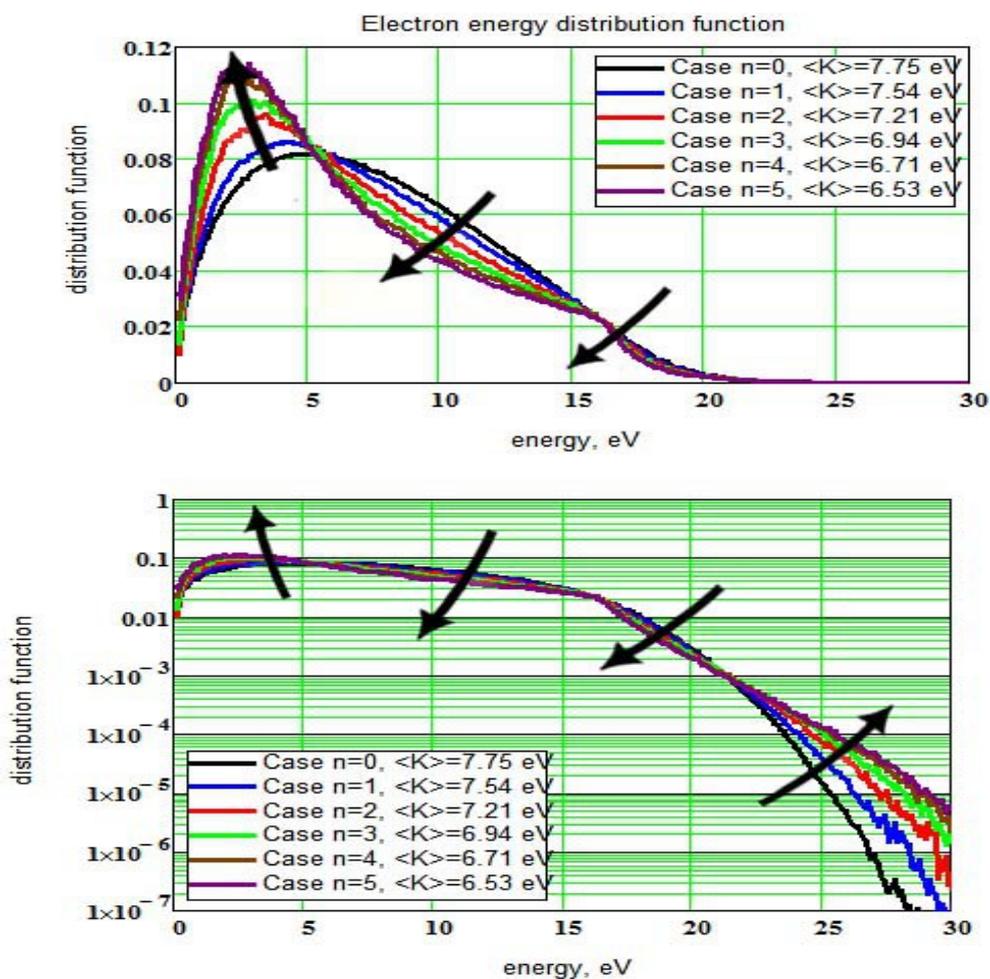


Рисунок 3 – Функции распределения электронов по энергии при дрейфе в периодическом электрическом поле ($E/N = 10$ Тд, неон, период поля 4 см, напряженность поля 4 В/см).

Разные кривые соответствуют различным значениям показателя степени неоднородности поля.

Стрелки указывают направление изменения функций при увеличении флуктуаций поля

Характеристики дрейфа электронов в неоне при температуре 298 К, приведенной средней напряженности электрического поля $E/N = 10$ Тд

Neon, 298K, $E_1=16$ eV, $I=20.5$ eV, $E/N=10$ Td, $E=4$ V/cm, $L=4$ cm							
№	$eE_0 / e $ V/cm	n	δ^2	W, km/s	$\langle \varepsilon \rangle$, eV	Q_{ex} / Q_{EW} , %	Q_{ion} / Q_{EW} , %
1	4	0	0	19.7	7.75	79.3	1.7
2	4	1	1/3	19.4	7.54	78.6	2.8
3	-4	1	1/3	-19.3	7.58	79.4	2.4
4	4	-	1/2	18.8	7.29	78.2	3.4
5	4	2	9/5	18.7	7.21	77.9	4.3
6	-4	2	9/5	-18.8	7.31	79.1	3.5
7	4	3	16/7	18.3	6.94	77.1	5.8
8	-4	3	16/7	-18.4	7.08	79.2	4.3
9	4	4	25/9	17.9	6.71	76.6	6.9
10	-4	4	25/9	-17.8	6.89	78.9	5.0
11	4	5	36/11	17.5	6.53	76.3	7.8
12	-4	5	36/11	-17.6	6.73	78.4	6.0

Проведено сравнение функций распределения электронов по энергии с распределениями Макс-велла, Дрювестейна, а также с приближением неограниченного стока (трубопроводная модель) [2]. Из анализа результатов расчетов следует, что:

– даже значительные пространственные флуктуации поля не приводят к большому изменению средних характеристик дрейфа скорости дрейфа и средней энергии;

– наибольшее влияние увеличение дисперсии поля оказывает на скорость ионизации, имеет место значительное увеличение частоты ионизации и доли энергии, идущей на ионизацию;

– пространственная неоднородность поля может приводить к максвеллизации электронов в условиях тлеющего таунсендовского разряда, что составляет предмет давно известного и широко обсуждаемого парадокса Ленгмюра [2].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Голятина Р.И., Майоров С.А. // Прикладная физика. – 2011. – № 5. – С. 22.
- 2 Цендин Л. // УФН. – 2010. – № 4. – С. 948..

- 3 Maiorov S.A. // Brief rep. on phys.LPI. – 2009. – N 37. – С. 12-17.
4 Maiorov S.A., Golyatina R.I., Kodanova S.K., Ramazanov T.S. // Brief rep. on phys. LPI. – 2012. – № 39. – С. 67-73

REFERENCES

- 1 Golyatina R.I., Maiorov S.A., *Applied Physics*, **2011**, 5, 22. (in Russ.).
2 Cendin L., *UFN*, **2010**, 133, 948. (in Russ.).
3 Maiorov S. A., *Brief rep.on phys.LPI*, **2009**, 37,12-17. (in Eng.).
4 Maiorov S. A., Golyatina R. I., Kodanova S. K., Ramazanov T. S., *Brief rep.on phys.LPI*, **2012**,39, 67-73 (in Eng.).

Резюме

T. S. Ramazanov¹, S. K. Kodanova¹, N. X. Bastykova¹, S. A. Maiorov²

(¹ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы,
²РАФ Жалпы физика институты, Мәскеу, Ресей)

ГАЗРАЗЯДТЫ ПЛАЗМАНЫҢ КЕҢІСТІКТІК БІРТЕКТІ ЕМЕС ПЕРИОДТЫ

ЭЛЕКТР ӨРІСІНДЕ ЭЛЕКТРОНДАРДЫҢ ДРЕЙФІ ТУРАЛЫ

Тұрақты кеңістіктік біртекті емес электр өрісінде электрондардың дрейфтік қасиеттері зерттелді. Аз қысымда газразрядты плазмадағы эксперимент шарттарына біртекті емес өрістің дрейфтік жылдамдығына және орташа электрон энергиясына әсері аз. Бірақ қозу және иондалу процестеріне, кеңістіктік плазманың таралуына өрістің біртекті еместілігі және өзгеруі тәуелді. Газ разрядтың оң бағанында электр өрісінің біртекті еместігі электрондардың энергия бойынша таралу функциясын Максвелл таралуына әкелетіндігі көрсетілді.

Тірек сөздер: электрондардың дрейфі, газтекес разряд.

Summary

T. S. Ramazanov¹, S. K. Kodanova¹, N. Kh. Bastykova¹, S. A. Maiorov²

(¹ IETP, Kazakh National University al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan,
² General Physics Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia~

IN A SPATIALLY INHOMOGENEOUS PERIODIC ELECTRIC FIELD

The paper presents the results of calculations of the characteristics of electron drift in a constant periodic spatially inhomogeneous electric field. It has been shown, that in typical experiments with gas plasma at a reduced gas pressure the influence of field inhomogeneities on the drift velocity and the average energy of the electrons is negligible. But the intensity of the excitation, ionization, and spatial distribution of plasma are strongly dependent both on the value of inhomogeneity (dispersion) and the nature of the changes in the field. It has been shown, that inhomogeneity of the electric field in the positive column of a gas discharge results in a Maxwellian distribution of electron energies. The paper presents the results of calculations of the characteristics of electron drift in a constant periodic spatially inhomogeneous electric field.

Keywords: electron drift, gas discharge.

Поступила 15.10.2013г.