

УДК 533.933

В.Л. ДЕМКИН, С.В. МЕЛЬНИЧУК, А.В. БОРИСОВ, С.С. БАРДИН

РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ He–N₂-ПЛАЗМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА¹

Ключевые слова: импульсный высоковольтный разряд, моделирование столкновительных процессов, функция распределения электронов.

В электрических полях, достигающих десятков киловольт на сантиметр, эффективным методом расчета функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) является метод Монте-Карло [1, 2]. Для применения данного метода необходимо знать пространственно-временное распределение электрического поля и сечения элементарных процессов с участием электронов. Как правило, в подобных расчетах используется приближение однородного электрического поля или поля с линейной зависимостью от расстояния до катода [1, 3]. В малом межэлектродном зазоре высоковольтного импульсного разряда [4–6], из-за временной и пространственной динамики заряженных компонент плазмы, распределение электрического поля может значительно изменяться как в зависимости от давлений компонент смеси газов, так и с течением времени [7].

В работе [8] проведены детальные исследования распределения электрического поля $E(x, t)$ в He–N₂-плазме высоковольтного импульсного разряда при средних давлениях. Показано, что распределение электрического поля $E(x, t)$, где x – расстояние от катода, t – время, обладает ярко выраженной пространственно-временной структурой, характерной для импульсного тлеющего разряда.

На основании экспериментальных данных о пространственно-временной зависимости электрического поля в ускоряющем зазоре [8], методом Монте-Карло [1, 2] проведены расчеты ФРЭЭ He–N₂-плазмы в межэлектродном пространстве высоковольтного импульсного разряда. Расчеты проводились для условий разряда, соответствующих измерениям электрического поля [8]: ширина межэлектродного зазора $d = 1$ мм, давление гелия 9 Торр, давление азота 0,5 Торр.

Для расчета ФРЭЭ и ее пространственно-временной зависимости $f(\epsilon, x, t)$ в He–N₂-плазме, наряду со столкновительными процессами электронов с гелием [2], были дополнительно включены процессы, связанные с наличием молекулярного азота. На основании данных работы [9] о сечениях взаимодействия электронов с молекулярным азотом были выбраны реакции, оказывающие наиболее существенное влияние на формирование ФРЭЭ. Столкновительная модель включает 46 плазмохимических реакций, куда вошли 28 реакций электронов с участием гелия (упругий удар, ионизация, возбуждение с $n = 2, 3, 4, 5$ синглетных и триплетных состояний гелия, трехчастичная рекомбинация) и 18 реакций с участием молекулярного азота (упругий удар, ионизация, возбуждение первых четырех колебательных состояний, возбуждение первых 11 электронных состояний, диссоциация, диссоциативная ионизация, диссоциативная рекомбинация).

На рис. 1 представлены результаты расчета ФРЭЭ, сформировавшейся возле сетчатого анода в различные моменты времени. Для статистического накопления использовалось разбиение интервала энергий с шагом 60 эВ. Моменту $t_1 = 0,3$ мкс соответствует однородное электрическое поле с напряженностью $E_1 = 17$ кВ/см. Момент $t_2 = 0,5$ мкс

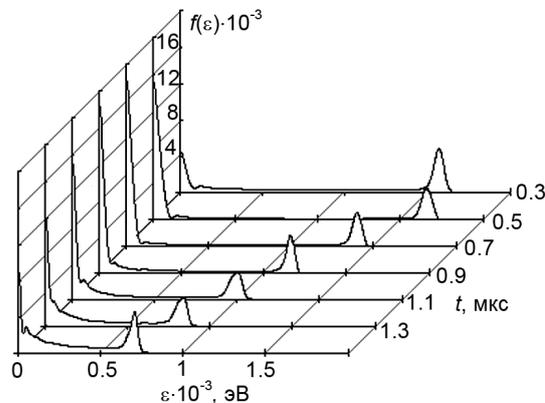


Рис. 1. Временные характеристики ФРЭЭ $f(\epsilon)$ возле сетчатого анода

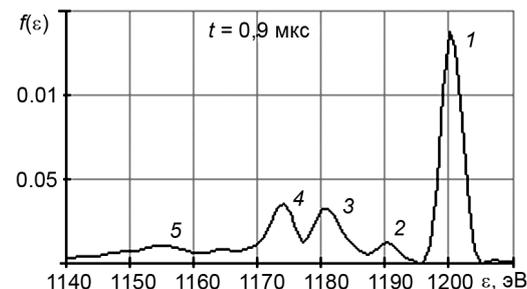


Рис. 2. ФРЭЭ первичных электронов для $t = 0,9$ мкс

соответствует максимальному полю в области катода со значением $E_2 = 39$ кВ/см. К моменту времени $t_7 = 1,5$ мкс электрическое поле опять приближается к однородному со значением $E_7 = 7$ кВ/см.

Для анализа процессов, приводящих к формированию $f(\epsilon, x, t)$, на рис. 2 и 3 приведены ФРЭЭ первичных и вторичных электронов для момента $t = 0,9$ мкс, соответствующего переходному режиму от максимального поля к однородному. Статистическое накопление проводилось в интервалах энергий по 3 и 6 эВ для первичных и вторичных электронов соответственно.

Как видно из рис. 2, первичные электроны находятся в области энергий $\sim eU$ и формируют группу электронов пуч-

¹ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ № 8.4859.2011.

ка. Наибольший максимум 1 соответствует электронам, которые прошли межэлектродный зазор без неупругих столкновений. Максимумы, отмеченные цифрами 2–4, формируются электронами, испытавшими одно столкновение по каналам возбуждения электронных состояний и ионизации He и N₂. Область 5 содержит первичные электроны, которые испытали неупругие столкновения более одного раза. В области энергий $\epsilon < 1100$ эВ первичные электроны отсутствуют.

В ФРЭЭ, представленной на рис. 3, можно выделить две области. Плато представленного энергетического спектра 1 формируется вторичными электронами, «родившимися» в различных участках межэлектродного зазора. Двигаясь к аноду, эти электроны испытывают в среднем не больше одного столкновения, исключая упругий удар. Область 2 ФРЭЭ формируется электронами, появившимися в результате ионизации вблизи сетчатого анода, и электронами, потерявшими свою энергию в результате столкновений.

Аналогичной структурой обладают ФРЭЭ всех срезов по времени, представленных на рис. 1.

Таким образом, при данных условиях разряда ФРЭЭ на выходе из межэлектродного зазора имеет вид, характерный для всех моментов времени: область первичных пучковых электронов с энергией $\sim eU$, широкую область быстрых и область медленных вторичных электронов.

Покидая межэлектродный зазор через сетчатый анод, электроны образуют плазму факела высоковольтного импульсного разряда. Полученная ФРЭЭ на выходе из межэлектродного зазора дает возможность анализировать плазмохимический состав факела и достигать заданных свойств его для различных применений.

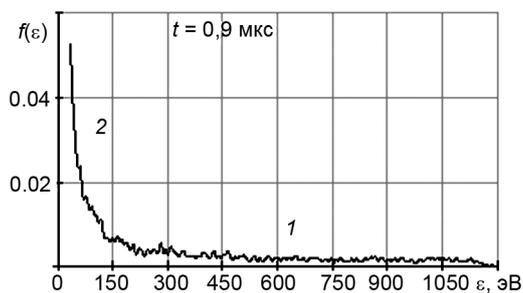


Рис. 3. ФРЭЭ вторичных электронов для $t = 0,9$ мкс

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеуф J. P. and Мароде E. A. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1982. — V. 15. — P. 2169–2187.
2. Демкин В. П., Королев Б. В., Мельничук С. В. // Физика плазмы. — 1995. — Т. 21. — № 1. — С. 81–84.
3. Абрамов А. А., Машенко А. И., Сэм М. Ф. и др. // ЖТФ. — 1997. — Т. 67. — № 2. — С. 17–19.
4. Бохан П. А., Сорокин А. Р. // ЖТФ. — 1985. — Т. 55. — № 1. — С. 88–95.
5. Клименко К. А., Королев Ю. Д. // ЖТФ. — 1990. — Т. 60. — Вып. 9. — С. 138–142.
6. Демкин В. П., Королев Б. В., Мельничук С. В. // Изв. вузов. Физика. — 1995. — Т. 38. — № 1. — С. 26–33.
7. Осипов В. В., Лисенков В. В. // ЖТФ. — 2000. — Т. 70. — Вып. 10. — С. 27–33.
8. Демкин В. П., Мельничук С. В., Борисов А. В. и др. // Изв. вузов. Физика. — 2012. — Т. 55. — № 10. — С. 106–111.
9. Tabata T. et al. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. — 2006. — V. 92. — P. 375–406.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: demkin@ido.tsu.ru; osbereg@yandex.ru

Поступило в редакцию 07.11.12,
после доработки — 04.04.13.

Демкин Владимир Петрович, д.ф.-м.н., профессор каф. общей и экспериментальной физики;
Мельничук Сергей Васильевич, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;
Борисов Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;
Бардин Станислав Сергеевич, аспирант, инженер Центра информационных сетей управления информатизации ТГУ.