

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ**

Алексеев В.Ф., Варфоломеев В.В., Пискун Г.А.

DOI: 10.12737/14801

Аннотация. Рассмотрены процессы и явления, возникающие при протекании электростатического разряда в газовой среде. Приводится описание с разбиением на зоны полученной вольтамперной характеристики разряда. Описывается поведение заряженных частиц в проводящем канале разряда.

Ключевые слова: электростатический разряд, искровой разряд, проводящий канал, вольтамперная характеристика разряда, физика плазмы, компьютерное моделирование.

При разработке современной радиоэлектронной аппаратуры возникает фундаментальная проблема защиты электронных средств от воздействия дестабилизирующих факторов, в частности электростатического разряда. Эту проблему затруднительно решить без изучения непосредственно процесса возникновения и развития самого электростатического разряда.

С целью изучения его процессов и явлений была создана и реализована с помощью компьютерных средств модель протекания разряда в газовой среде, основанная на описании процессов, происходящих в плазме – возникновении, перемещении и рекомбинации заряженных частиц. Ключевыми составляющими модели являются дифференциальные уравнения баланса для значений концентрации электронов, средней энергии электронов и массовой доли тяжёлых частиц – ионов и атомов в возбужденном состоянии, такая модель носит название жидкостной. Ниже приведены данные уравнения:

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \circ \bar{E}) - \bar{D}_e \circ \nabla n_e] = R_e, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(n_\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_\varepsilon(\mu_\varepsilon \circ \bar{E}) - \bar{D}_\varepsilon \circ \nabla n_\varepsilon] + \bar{E} \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial(w_k)}{\partial t} + \rho(\bar{u} \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot \bar{J}_k + R_k, \quad (3)$$

где n_e – концентрация электронов, t – время, μ_e, μ_ε – коэффициенты переноса энергии, \bar{E} – напряжённость электрического поля, \bar{D}_e – коэффициент диффузии электронов, R_e – количество свободных электронов, возникающих в результате ионизации, n_ε – средняя установившаяся энергия, \bar{D}_ε – коэффициент диффузии энергии, Γ_e – поток электронов, R_ε – энергия, теряемая в результате неупругих столкновений частиц, ρ – плотность вещества, w_k – массовая доля k -го вида частиц, \bar{u} – среднemasсовый вектор скорости среды, \bar{J}_k – вектор диффузного потока, R_k – выражение скорости для k -го вида частиц.

Реализована модель при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics – программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализация), позволяющая моделировать любые физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Предопределенные Multiphysics-шаблоны предназначены для решения многих распространенных типов задач. К данному пакету также существует набор дополнительных модулей для решения различных прикладных задач.

В нашем случае область моделирования представляет собой два дисковых электрода толщиной 1 мм и диаметром 100 мм, один из них является диэлектриком и имитирует заряженный предмет, другой металлический и имитирует вывод электронного компонента. Электроды разделены зазором шириной 2 мм, заполненным аргоном, к электродам приложена некоторая разность потенциалов.

Изучалась зависимость интенсивности протекания процессов разряда от напряжения между электродами. На основании полученных данных получена обобщенная вольтамперная характеристика электростатического разряда в газовой среде, она приведена на рисунке 1.

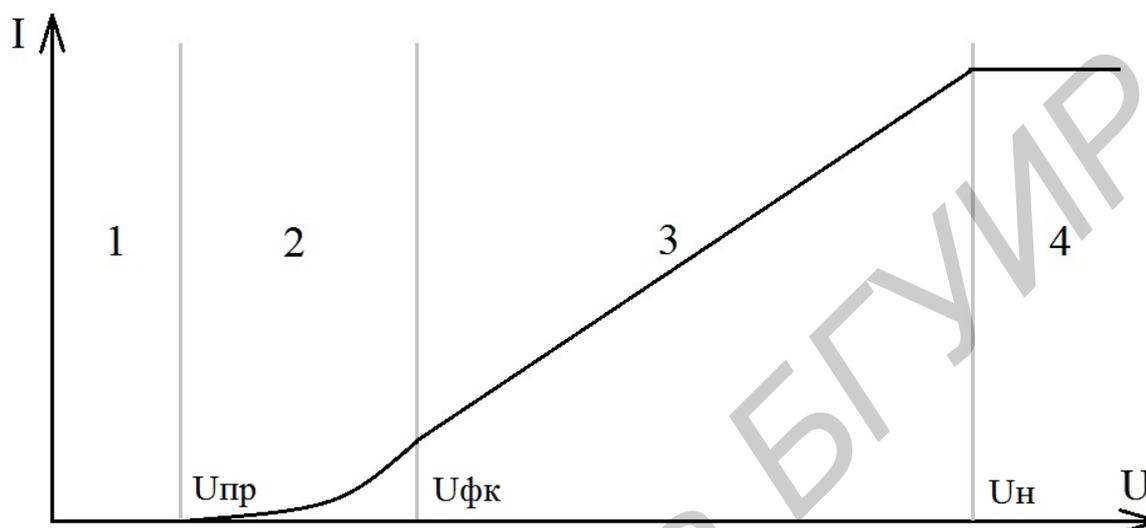


Рисунок 1 – Эквивалентная вольтамперная характеристика ЭСР: 1 – зона отсутствия пробоя; 2 – зона формирования проводящего канала; 3 – зона постоянного эквивалентного сопротивления среды; 4 – зона насыщения

Полученный график можно разделить на четыре четко выраженные зоны. При значениях напряжения, ниже определенного порога (напряжение пробоя – $U_{пр}$) электрического пробоя газовой среды не происходит, электростатический разряд не протекает. Далее следует область формирования проводящего канала – эквивалентное сопротивление среды велико, но уменьшается. За область формирования проводящего канала (при значениях напряжения выше напряжения формирования канала – $U_{фк}$) лежит область постоянного эквивалентного сопротивления среды, на этом участке характеристики для проводящего канала выполняется закон Ома. Затем, при достижении напряжения насыщения – $U_{н}$, наступает область насыщения – в этой области увеличение напряжения между электродами уже не приводит к росту тока разряда.

Что касается поведения заряженных частиц, в области первичного электрода наблюдается ярко выраженная область высокой концентрации свободных электронов. Отмечено, что в области первичного электрода основными носителями заряда являются электроны, а на удалении от первичного электрода – ионы. При увеличении приложенного к электродам напряжения наблюдается тенденция к расширению областей высокой концентрации заряженных частиц и атомов в возбуждённом состоянии, их отдалению от первичного электрода и расслоению на несколько областей; также наблюдается изменение в распределении электронов по энергиям в сторону возрастания средней энергии.

Список литературы

1. Ховатсон А.М., Введение в теорию газового разряда / А. М. Ховатсон. – М.: Атомиздат, 1980. – 182с.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Издательство МФТИ, 1997. – 320с.
3. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536с.
5. COMSOL Multiphysics User's Guide / COMSOL AB. – 2012. – 1292p.
6. Plasma Module User's Guide / COMSOL AB. – 2014. – 336p

Варфоломеев Владимир Валерьевич, магистрант факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

Научные руководители:

Алексеев Виктор Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

Пискун Геннадий Адамович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь