

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Д.В. Граков, О.В. Обидина

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования тлеющего разряда постоянного тока. Исследуется зависимость параметров разряда от давления.

Ключевые слова: тлеющий разряд, плазма, моделирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый разряд - весьма распространенное в природе явление, которое широко применяется в современных технологиях. Его изучению и численному моделированию посвящены многочисленные исследования. Электрические разряды сильно различаются в зависимости от состава газа, давления, температуры, геометрии разрядного промежутка и электрических параметров питающего напряжения.

В данной работе рассматривается тлеющий разряд, который используется для модификации свойств и структуры материалов [1-4]. Отличительной особенностью тлеющего разряда является наличие прикатодной области, которая характеризуется большой величиной падения напряжения. Именно в этой области происходит самосогласованный процесс генерации свободных электронов, которые необходимы для поддержания разряда [5]. Вблизи катода свободные электроны разгоняются электрическим полем до значений энергии, достаточных для ионизации атомов и молекул электронным ударом. Возникающие ионы под действием поля движутся в направлении катода и достигая его, выбивают с поверхности новые электроны.

Итак, катодная область является важнейшей частью тлеющего разряда, где сосредоточены все процессы, ответственные за его существование. Здесь появляются первоначальные электроны, происходит их ускорение, возникают электронные лавины, генерирующие необходимое для питания остальной части разряда весьма значительное количество электронов. Здесь же образуются положительные ионы и фотоны, необходимые для поддержания процессов эмиссии. Материальная связь катодной области с остальными частями разряда ограничивается только тем, что некоторая часть электронов уходит отсюда в темное пространство и в положительный столб. Обратного потока материальный баланс не имеет: поступление положительных ионов в катодную область со стороны положительного столба отсутствует. Это дает право строить теорию катодной области так, чтобы не считаться с явлениями, происходящими в других областях разряда.

Модели, описывающие процессы в тлеющем разряде, весьма сложны и поэтому появляется необходимость использования профессиональных пакетов численного моделирования. Одним из таких математических пакетов является COMSOL Multiphysics, который предназначен для численного решения задач различных областей физики. Пакет основан на методе конечных элементов, с помощью которого производятся все вычисления.

2. МЕТОД КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования тлеющего разряда низкого давления использовался пакет COMSOL Multiphysics 4.3. Схема разряда, используемая для моделирования, приведена на рисунке 1. Разряд возникает в промежутке между анодом и катодом и поддерживается за счет эмиссии вторичных электронов на катоде.

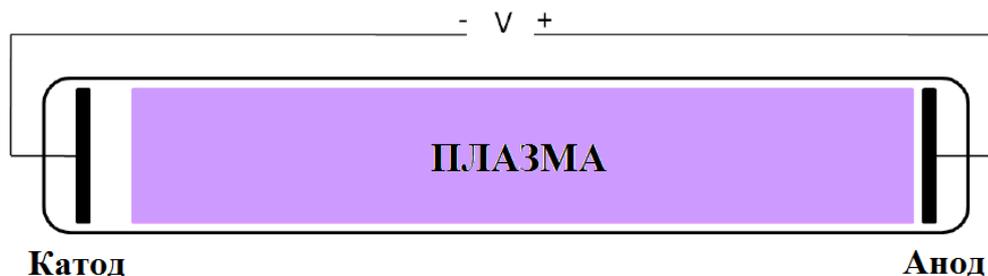


Рис. 1. Схема модели тлеющего разряда

Плотность электронов и плотность их средней энергии вычисляются путем решения пары уравнений дрейфовой диффузии для плотности электронов и средней энергии электронов [6].

Численный эксперимент выполнялся для среды, заполненной аргоном при давлении газа 3-10 Па и расстоянии между электродами 0,4 м. Электрический потенциал составлял 125 В, а температура газа 293 К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлено распределение плотности электронов вдоль центральной оси. С увеличением давления в разрядном промежутке плотность электронов возрастает.

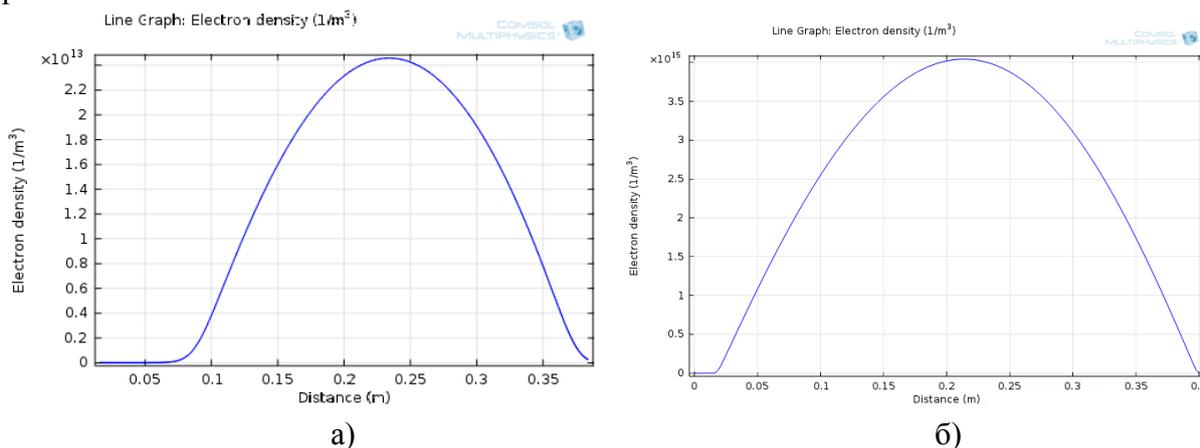


Рис. 2. Плотность электронов вдоль центральной оси: а – давление газа 3 Па; б – давление газа 10 Па

Рисунок 3 представляет распределение электронной температуры вдоль центральной оси тлеющего разряда. Температура газа у самого катода выше, чем в соседних зонах тлеющего разряда. При этом положительные ионы, которые бомбардируют катод, вырывают из катода не только электроны, но и нейтральные атомы металла, тем самым

распыляя катод. С увеличением давления область с наибольшей температурой сужается.

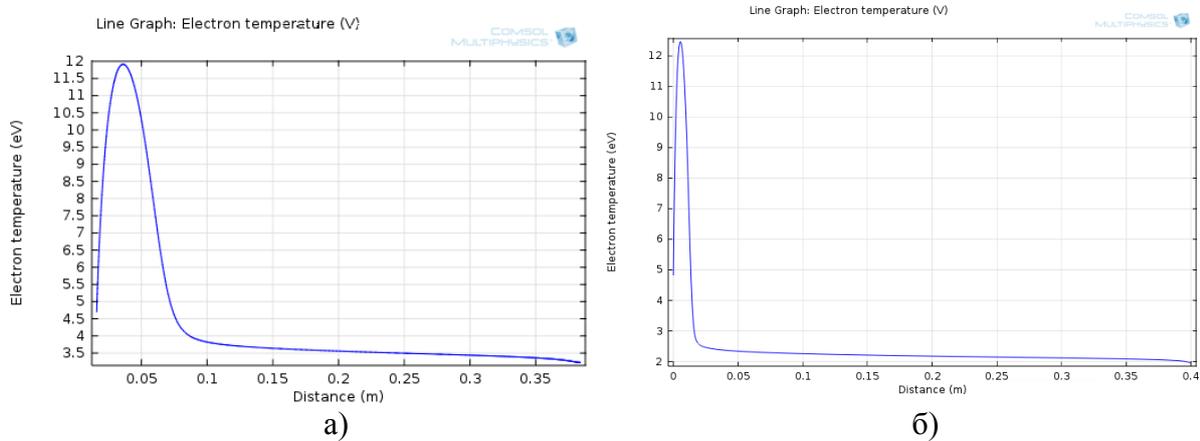


Рис. 3. Электронная температура вдоль продольной оси положительного столба: а – давление газа 3 Па; б – давление газа 10 Па

На рисунке 4 представлено распределение потенциала в тлеющем разряде. При удалении от анода потенциал почти не изменяется в области тлеющего свечения и резко падает близ катода в области кружка темного пространства. Это явление называется катодное падение потенциала. Как видно из рисунка 4 ширина катодного падения потенциала уменьшается с увеличением давления.

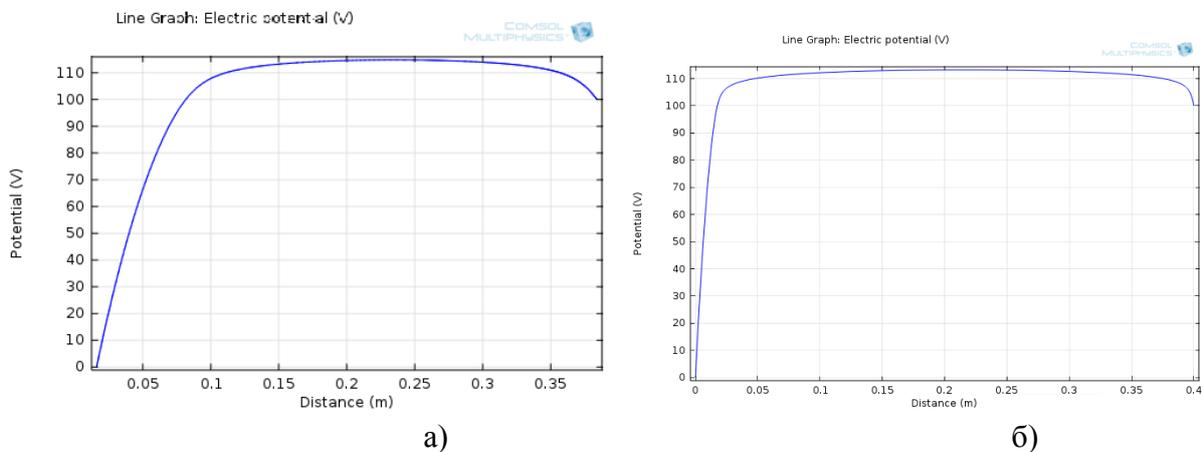


Рис. 4. Распределение потенциала в тлеющем разряде: а – давление газа 3 Па; б – давление газа 10 Па

Основное падение потенциала происходит вблизи катода. Оно обеспечивает ускорение ионов, приходящих из межэлектродного промежутка и вызывающих вторичную электронную эмиссию из катода.

На рисунке 5 представлены плотности электронного и ионного токов, а также суммарная плотность тока. Величина ионного тока сильно возрастает в области катодного падения потенциала. Ионная бомбардировка катода приводит к выбиванию электронов из него. Электронная плотность возрастает в области катодного падения потенциала. Обусловлено это высокой электронной температурой, приводящей к образова-

нию новых электронов, которые вносят вклад в общую электронную плотность. После прохождения электронами области катодного падения потенциала наблюдается дальнейшее возрастание электронной плотности из-за образования новых электронов посредством электронной ударной ионизации.

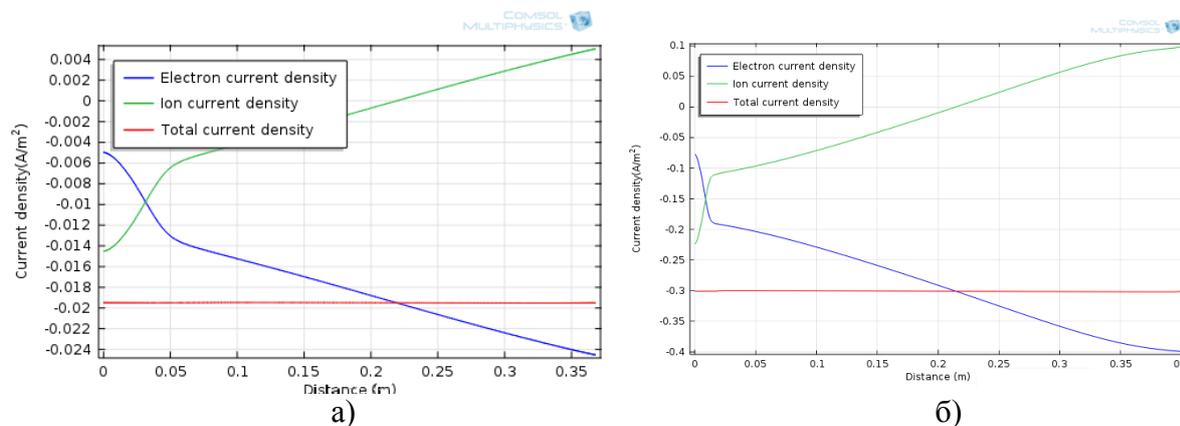


Рис. 5. Плотности токов вдоль центральной оси: а – давление газа 3 Па; б – давление газа 10 Па

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена математическая модель тлеющего разряда, позволяющая описать основные закономерности распределения плазмы. Проанализировано влияние давления в рабочем газе на основные параметры тлеющего разряда.

Литература

1. *Tereshko, I.V.* Formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation / *I.V. Tereshko, V.V. Abidzina, I.E. Elkin et al.* // *Surface and Coatings Technology*. V. 201, 2007. - P. 8552-8556.
2. *Shamiankou, U., Abidzina, V., Belaya, M.* Structure changes and improvement of operating properties of high-speed and tool steels irradiated in glow-discharge plasma // *Materials, Environment, Technology: Conference Proceedings*. – Riga. –2013. – P.49-54.
3. *Обидина, О. В.* Модификация структуры и свойств металлических материалов под действием плазмы тлеющего разряда: автореф. ... канд. физ.-мат. наук. – Барнаул: 2013. – 23 с.
4. *Шеменков В.М., Короткевич А.Ф.*, Пат. РБ № 14716 ВУ, U C 21 D 1/78, 2011.
5. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. –М.: «Наука», 1971. – 543 с.
6. *Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C.* Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models // *Plasma Sources Science and Technology*. vol. 14, 2005. – P. 722–733.

Граков Дмитрий Владимирович

Студент электротехнического факультета
Белорусско-Российский университет, г. Могилев
Тел.: +375(44) 7264516
E-mail: qgruza25@yandex.by

Обидина Ольга Васильевна

Доцент кафедры «Электропривод и АПУ», канд. физ.-матем. наук
Белорусско-Российский университет, г. Могилев
Тел.: +375(29) 6466821
E-mail: obidina@tut.by