Моделирование высокочастотного емкостного разряда (локальное и нелокальное приближение)

Бадриев И.Б.,Желтухин В.С., 1Чебакова В.Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет  
 им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия, [vzheltukhin@gmail.com](mailto:vzheltukhin@gmail.com)  
1[Казанский (Приволжский) федеральный университет](http://kpfu.ru/" \t "_blank), г. Казань, Россия,  
 [vchebakova@mail.ru](mailto:vchebakova@mail.ru)

Для получения плазмы используются различные типы разрядов, в их числе большое место занимают высокочастотные разряды и, в частности, высокочастотные емкостные (ВЧЕ) разряды. В ВЧЕ-установках наиболее часто в качестве плазмообразующего газа используется аргон.Целью данной работы является создание самосогласованных математических моделей неравновесной низкотемпературной плазмы ВЧЕ-разряда в аргоне в широком диапазоне давлений, позволяющих рассчитывать структуру и внутренние параметры ВЧЕ-разрядов для управления параметрами ВЧЕ-разряда при решении целевых задач. Представленные в работе модели описывают емкостной ВЧ-разряд в аргоне между двумя плоско-параллельными электродами, один из которых заземлен, а другой соединен с ВЧЕ-генератором. Рассматриваются различные подходы при моделировании ВЧЕ-разряда в зависимости от диапазона давлений. Представленная в работе модель ВЧЕ-разряда при пониженных давлениях включает в себя уравнения баланса для электронного газа, метастабильных атомов, атомарных ионов, уравнение Пуассона для потенциала электрического поля, уравнение баланса электронной энергии, а также стационарное уравнение теплопроводности атомно-ионного газа по усредненным параметрам. Приведенная самосогласованная модель ВЧЕ- разряда при повышенных давления содержит в себе уравнения баланса для электронного газа, метастабильных атомов, молекулярных и атомарных ионов, кинетические уравнения для концентраций димера аргона и нейтральных атомов, уравнение Пуассона для потенциала электрического поля, а также стационарное уравнение теплопроводности атомно-ионного газа с граничными условиями теплообмена, рассчитываемое по усредненным параметрам. теплообмена. Коэффициенты скоростей процессов при электронном ударе рассчитывались с помощью уравнения Больцмана с учетом электрон-электронных столкновений. При решении уравнения Больцмана использовалась программа BOLSIG[1]. Для решения рассматриваемой задачи предложен численный алгоритм, основанный на конечномерной аппроксимации задачи с помощью разностных схем с последующим применением для ее реализации итерационного процесса. Неявная разностная схема построена интегро-интерполяционным методом с применением метода направленных разностей. Линеаризация системы проведена по методу типа Зейделя, при этом численный алгоритм основан на сносе нелинейности во всех коэффициентах на нижний слой. Нелинейные квадратичные слагаемые в правой части были линеаризованы с помощью схемы Ньютона. Плотности потоков для ионного и электронного газа рассчитаны по модифицированному методу Гуммеля. Приведены результаты расчетов при разных давлениях, и дан их сравнительный анализ с данными других авторов, в частности с данными натурных экспериментов.

Работа поддержана РФФИ (проекты 16-31-00378, 15-41-02672).

Литература

1. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models, Plasma Sources Sci. Techn. Vol. 14 (2005), 722-733. http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/14/4/011