определение плотности плазмы в ВЧ емкостных разрядах по данным ионного тока на ленгмюровский зонд: эксперимент и численное моделирование

Д.Г. Волошин, Т.В. Рахимова, А.С. Ковалев, Ю.А. Манкелевич, А.Н. Васильева, О.В. Прошина

НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия, dvoloshin@mics.msu.su

Зондовые измерения являются одним из основных экспериментальных методов диагностики низкотемпературной плазмы. Вольт-амперную характеристику (ВАХ) зонда можно условно разделить на электронную и ионную части. Методика получения данных о концентрации плазмы из электронной части ВАХ зонда является хорошо известной. Однако измерение электронного тока на зонд сопряжено с рядом практических трудностей. Для определения концентрации плазмы необходима правильная ВЧ компенсация и фильтрация основной и высоких гармоник плазменных колебаний в токе зонда. Измерение ионной части ВАХ лишено перечисленных выше трудностей. Величина ионного тока на зонд много меньше величины электронного тока и требования к электрической цепи зонда существенно слабее. Ионная часть ВАХ зонда может быть измерена с большей точностью при различных параметрах разряда, однако существует трудность в последующей интерпретации полученных данных. В основном анализ выполняется на основе аналитических теорий без учета столкновений ионов. Возможные ошибки при их использовании возрастают с увеличением давления газа и повышением плотности плазмы. В результате задача разработки и применения относительно простого метода определения концентрации плазмы до сих пор остается нерешенной. Данная работа направлена на исследование корректных способов обработки ионной части ВАХ зонда с помощью экспериментальных методов и численного моделирования.

Были проведены экспериментальные измерения ВАХ цилиндрических зондов двух радиусов 50 и 250 мкм в емкостном разряде в аргоне, возбуждаемом на частоте 81 МГц. Параметры разряда варьировались в следующих диапазонах: давление газа 30 – 200 мТор, вложенная мощность 5 – 30 Вт, плотность плазмы 1010 – 1011 см-3. Одновременное использование двух зондов разного радиуса позволило нам проверить результаты орбитальной теории о пропорциональности ионного тока радиусу зонда.

Численная модель сбора ионного тока цилиндрическим зондом была построена на основе метода «Частиц в ячейке» с Монте-Карло столкновениями для описания движения ионов и Больцмановского отношения для концентрации электронов. Вычисления по данной модели занимают относительно мало времени и могут быть использованы для предварительного сбора данных по ВАХ для дальнейшей обработки экспериментальных данных в режиме реального времени.

Результаты аналитических бесстолкновительных теорий орбитального и радиального движения ионов сравнивались с результатами численного моделирования ионного тока на зонд. Два противоположных эффекта столкновений иона (увеличение тока вследствие разрушения орбитального движения и уменьшение тока вследствие столкновительной силы трения и «запутывания» иона) частично нейтрализуют друг друга в случае давления аргона 30 и 100 мТор, и бесстолкновительная теория орбитального движения может формально давать правильные значения плотности плазмы. Бесстолкновительные теории дают заниженное значение концентрации плазмы для давлений более 150 мТор.

Данная работа будет продолжена для случая различных инертных и молекулярных газов. Исследование было выполнено при поддержке грантов РФФИ 12-02-00536-а и ГК 11.519.11.1008.