

0.1. *Варшавчик Л.А., Старовойтов Е.А., Бочарников В.А., Галицын Д.Д. Модель расчета электрических полей в газовом ВЧ разряде, обеспечивающая непрерывность тока*

Емкостной высокочастотный разряд низкого давления имеет множество приложений в современных технологиях: травление и осаждение пленок в микроэлектронике, стерилизация и шлифовка поверхностей, модификация материалов, чистка диагностических зеркал в термоядерных установках. Численное моделирование позволяет определить оптимальную конфигурацию и параметры разряда, тем самым сокращая время и затраты на проведение экспериментов.

Стандартный подход для такого рода задач состоит в моделировании движения частиц методом Монте-Карло, при этом тестовые частицы считаются независимыми, а их влияние друг на друга учитывается через расчет создаваемых ими локальных электрических полей, дающих вклад в уравнения движения.

Расчет локальных электрических полей основан на уравнении Пуассона, пространственный заряд определяет распределение электрического потенциала. При этом обычно граничные условия ставятся в форме Дирихле: заземленный электрод имеет нулевой потенциал, а на втором электроде потенциал равен разрядному напряжению. Такая постановка делает задачу удобной для расчета (уравнение Пуассона превращается в симметричную матрицу уравнений), однако не гарантирует непрерывности тока на электродах, что является нефизичным и при больших частотах (на которых существенный вклад начинает вносить ток смещения, определяемый скоростью изменения поля) приводит к значительному отклонению результатов от экспериментальных.

Для решения данной проблемы модель была модернизирована: к уравнению Пуассона и фиксированным потенциалам на электродах добавлены два дополнительных граничных условия. При этом разрядный ток является параметром задачи (задается по гармоническому закону), а напряжение рассчитывается при решении системы. Такая постановка задачи обеспечивает равенство нулю суммы зарядов на электродах и объемного заряда в плазме в любой момент времени, что эквивалентно условию непрерывности тока на электродах.

Для реализации этого подхода нашей группой разработан код КИТе. Помимо модернизированной модели для расчета полей, был учтен еще ряд требований, обусловленных практическим применением кода. В первую очередь, это работа со сложными геометриями, а следовательно использование нерегулярных (треугольных) расчетных сеток и полностью трехмерное моделирование. Дополнительные граничные условия для уравнения Пуассона делают

матрицу уравнений несимметричной и плохо обусловленной, а ее решение на нерегулярной сетке приводит к техническим трудностям.

В настоящий момент техническая реализация описанного подхода завершена. На простой геометрии (плоскопараллельные пластины) получены результаты моделирования ВЧ разряда и разряда постоянного тока как при использовании модели Дирихле, так и с обеспечением непрерывности тока. Идет исследование сходимости решения и подбор параметров разряда в более сложных геометриях.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».