Оптимизация характеристик плоской индуктивной антенны для возбуждения ВЧ разряда

С.А. Двинин, Н.И. Буслеев

Московский Государственный Университет имени М.В Ломоносова, Физический Факультет, Россия, Москва, dvinin@phys.msu.ru

Индуктивные высокочастотные реакторы [1, 2] стали использоваться в микроэлектронной технологии как альтернатива реакторам емкостного типа практически сразу же, как плазменные технологии начали использоваться для производства микропроцессоров. Для возбуждения разряда были предложены и реализованы в виде практических конструкций различные типы антенн. Для антенн простой формы (например, кольцевых) были также качественно исследованы их характеристики. Однако теоретическому расчету характеристик антенн и оптимизации их формы не уделялось должного внимания.

В данной работе проведен анализ антенн, основанный на представлении поля в плазменном реакторе в виде собственных колебаний [3, 4] частично заполненного плазмой реактора. Рассчитаны спектры волн (поверхностных и объемных), которые могут возбуждаться в различных диапазонах частот (10 МГц – 3 ГГц) в такой системе и резонансные частоты камеры при рабочих плотностях электронов (109 – 1012 см–3). Показано, что в разряде низкого давления обычно достаточно использовать не более 4 собственных функций. Приведены результаты для вакуумной камеры, содержащей цилиндрическую область, занятую плазмой и расположенную над ней область, заполненную диэлектриком.

Анализ пространственного распределения полей собственных волн показал, что чисто индуктивному типу соответствует разряд, поддерживаемый H-волнами (по отношению к оси z) с азимутальным числом m=0. Н-моды с m≠0 имеют радиальную компоненту поля, которая будет возбуждать емкостную составляющую на боковой стенке. Емкостной разряд в геометрии такого типа соответствует возбуждению E-волны, однако поскольку эта волна принципиально содержит и тангенциальную составляющую электрического поля, в чистом виде он реализован быть не может. Тангенциальная составляющая мала для центральных областей разряда и в случае малого размера диэлектрической области.

Аналитический расчет пространственного распределения поля в разряде показал, что на низких частотах индуктивный разряд имеет индуктивный импеданс, а разряд, поддерживаемый E-волной, имеет резонанс, когда на длине разряда (по радиусу) укладывается несколько полуволн поверхностной волны. Для различных мод разряда резонанс наблюдается при разных плотностях плазмы. На высоких частотах резонансы наблюдаются как для E-, так и для H- волн. Получены теоретические формулы, связывающие амплитуды различных собственных волн с формой проводников в индуктивной антенне. Получены условия минимизации и максимизации амплитуд отдельных мод. Показано, что азимутально симметричная (m=0) индуктивная мода возбуждается только азимутальным током. Z-компоненты тока в антенне возбуждают только электрические моды.

Сравнение численных расчетов с аналитическими для азимутально симметричных мод показало их хорошее согласие.

Литература

1. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Material Processing. N.-Y., Wiley, **2005**.
2. Samukawa S., Hori M., Raul S. et al. // J. phys. D: Appl. Phys. **2012**. V. 45. 253001.
3. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, **1968**.
4. Фелсен Л., Маркувитц Н. Излучение и рассеяние волн. Т. 1, Т. 2. М.: Мир, **1979.**