

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ^{*)}

Желтухин В.С., Киселев Г.Б., Савин А.Ю., Шемахин Е.Ю.

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
vzheltukhin@gmail.com

Исследуется неинвазивный метод измерения электронной плотности в поверхностном слое тлеющего разряда плазмы ртути на основе коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Метод основан на определении резонансных частот между плазменным слоем и радиочастотным сигналом с помощью единичного коэффициента стоячей волны (КСВ) [1] в сочетании с расчетом диэлектрической проницаемости и частоты Ленгмюра. Метод может быть использован для измерения электронной плотности в объеме плазмы, что критически важно для оптимизации работы антенн.

Для валидации предложенного метода оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) [2] в сочетании с моделированием плазмы на основе гидродинамической модели. Исследование выполнено на примере плазмы, генерируемой в ртутной лампе диаметром 24 мм с межэлектродным расстоянием 36 см при давлении 60 Па. К трубке с помощью металлических разъемов длиной $l_{metal} = 60$ см подключались источник ВЧ напряжения и измеритель КСВ (антенный анализатор CAPK-110) для средней энергии электронов в диапазоне от 4 до 10 Вт. Тлеющий разряд зажигался с балластным резистором сопротивлением 3,52 кОм, напряжение на резисторе составляло 572 В, напряжение на плазменной трубке составляло 62 В. Таким образом, максимальная мощность разряда оценивается примерно в 10 Вт.

Метод VSWR основан на определении резонансных частот между плазменным слоем и высокочастотным сигналом. Основу VSWR можно описать соотношениями (1):

$$\omega_{res} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1+\epsilon_r}}, \quad n_e = \frac{8\pi^2 \epsilon_0 m_e}{e^2} f_{res}^2, \quad (1)$$

где ω_{res} – резонансная частота, ω_p – плазменная частота, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость разрядной трубки, n_e – плотность плазмы, $f_{res} = \omega_{res}/2\pi$ – резонансная частота стоячих волн.

Для валидации экспериментальных данных была разработана упрощенная численная модель плазмы с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Модель учитывает основные элементарные процессы: ионизацию прямым электронным ударом и ступенчатую ионизацию, рекомбинацию заряженных частиц, возбуждение и деактивацию возбужденных состояний, и позволяет рассчитывать пространственные распределения концентрации заряженных частиц, возбуждённых атомов и электронной температуры.

Сравнение результатов, полученных с помощью VSWR и OES, показало хорошее согласие между экспериментальными данными и численными моделями. Исследование показало, что метод VSWR может быть эффективно использован для измерения плотности электронов в плазменных антеннах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного Фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту № 23-21-10096

Литература

- [1]. Akao Y., Ida Y. Electron density measurement of a plasma column by surface wave resonances. Journal of Applied Physics, 1964, 35(9), 2565-2570.
- [2]. Dine S., Booth J.P., Curley G.A., Corr C.S., Jolly J., Guillon J. A novel technique for plasma density measurement using surface-wave transmission spectra. Plasma Sources Science and Technology, 2005, 14(4), 777.

^{*)} DOI – тезисы на английском