

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ НЕИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ДИОДА

Т.А. Пискунова, В.П. Зимин
Томский политехнический университет
ta042@rambler.ru

Введение

Изучение фазовых портретов распределений параметров низкотемпературной плазмы является актуальной задачей. Для построения адекватных моделей низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода необходимо разрабатывать новые критерии сравнения экспериментальных и модельных распределений параметров плазмы. В работах [1, 2] показано, что для этих целей удобно использовать фазовые портреты распределений параметров плазмы. Кроме этого, важное значение для задач диагностики параметров плазмы приобретает построение фазовых портретов неизмеряемых распределений параметров плазмы, таких как распределение плотности ионного тока в межэлектродном зазоре, распределение потока энергии электронного газа и др. В работе [3] получены соотношения, позволяющие на основе анализа фазовых портретов плотность плазмы – плотность ионного тока проводить диагностику распределения температуры электронов в межэлектродном зазоре.

В настоящем докладе представлены результаты исследования фазовых портретов неизмеряемых распределений параметров дуговой плазмы, полученных на основе анализа экспериментальных данных.

Основные соотношения для вычисления фазовых портретов распределений неизмеряемых параметров плазмы

Для слабоионизованной плазмы справедливы следующие основные выражения:

– для плотности ионного тока в межэлектродном зазоре термоэмиссионного диода (с учетом силы трения ионов об электроны R_{ei}):

$$J_i = \left(\frac{1}{\mu_{ea}} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1} \left[-\frac{J}{\mu_{ea}} - (\beta_e - 3/2)kn \frac{dT_e}{dx} \right] + \left(\frac{1}{\mu_{ea}} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1} \left[-(\beta_i - 3/2)kn \frac{dT_i}{dx} - k(T_e + T_i) \frac{dn}{dx} \right];$$

– для уравнения плотности тока электронов:

$$J_e(x) = J(x) + J_i(x) = \text{const};$$

– для плотности потока энергии электронного газа:

$$q_e = q_{eT} + q_{ec},$$

$$q_{eT} = -\lambda_e \frac{dT_e}{dx} + \beta_e J_e \frac{kT_e}{e}, \quad q_{ec} = -J_e V,$$

$$\lambda_e = \alpha_e D_e n k, \quad R_{ie} = J_e / \mu_{ei},$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; n – плотность плазмы; T_e , T_i – температура электронов и ионов; J – плотность тока диода; q_{eT} , q_{ec} – плотность потока энергии электронов, тепло-

вая (кинетическая) и конвективная (потенциальная) составляющие; V – потенциал пространства, занятого плазмой; D_e , μ_e , μ_{ea} , μ_i – коэффициенты диффузии и подвижности электронов и ионов; λ_e – коэффициент теплопроводности электронного газа; α_e , β_e – коэффициенты, учитывающие рассеяние электронов на атомах и ионах [5].

Для температуры тяжелой компоненты плазмы в слабоионизованной плазме диода хорошим приближением является линейное изменение вдоль зазора от температуры эмиттера до температуры коллектора.

Наличие зондовых измерений распределений $n=n(x)$, $T_e=T_e(x)$ и $V=V(x)$ позволяют вычислить $J_i=J_i(x)$ и $q_e=q_e(x)$. Спектроскопические измерения позволяют получить только два первых распределения, поэтому в этом случае $V=V(x)$ будет относиться так же к неизмеряемым параметрам плазмы.

Полученные результаты и их обсуждение

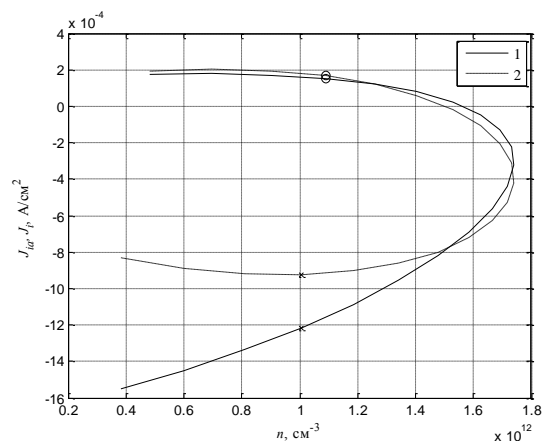
Экспериментальные распределения плазмы были получены в [4] для параметров термоэмиссионного диода: температура эмиттера $T_E=915$ К, давление насыщенных паров цезия $p_{Cs}=0,44$ мм рт.ст., межэлектродное расстояние $d=0,1$ см. Температура коллектора принималась равной $T_C=600$ К, работа выхода коллектора – $F_C=1,6$ эВ. По S-образным эмиссионным характеристикам [5] была оценена плотность эмиссионного тока эмиттера $J_{Ee}=0,51$ А/см².

Потенциал пространства, занятого плазмой вычислялся с помощью выражения, представленного в [5].

Для экспериментальных данных [4] имеются два распределения температуры $T_{ei}=T_{ei}(x)$ (медленные электроны) и $T_{eg}=T_{eg}(x)$ (быстрые электроны).

На рис. 1 и 2 представлены фазовые портреты неизмеряемых параметров плазмы, рассчитанные для двух токов диода.

а



б

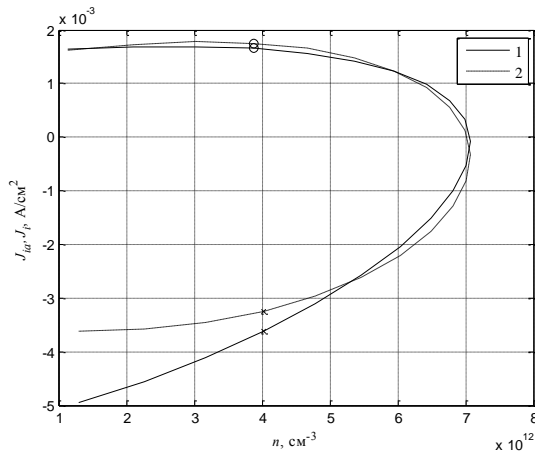
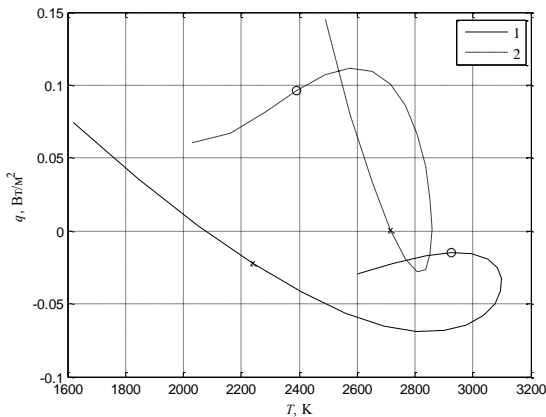


Рис. 1. Фазовый портрет распределения плотности ионного тока $J_{ia}=J_{ia}(x)$ для плотности тока $J_1=0,26$ А/см² (а) и $J_2=0,33$ А/см² (б): для $T_{ei}(x)$ (1) и для $T_{eg}(x)$ (2)

а



б

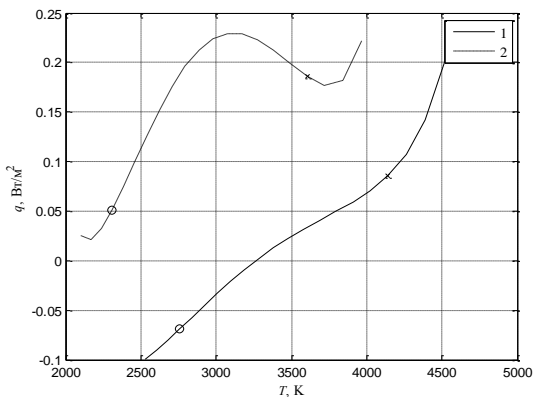


Рис. 2. Фазовые портреты для распределений плотности потока энергии электронного газа q_e : 1 – для плотности тока $J_1=0,26$ А/см², 2 – для плотности тока $J_2=0,33$ А/см² для температуры $T_{eg}(x)$ (а), для температуры $T_{ei}(x)$ (б)

Крестами указана область у эмиттера, кружками – область у коллектора.

Для соответствующих распределений T_e фазовые портреты для J_i -n подобны.

Для распределения $J_i=J_i(x)$, относящегося к $T_{eg}=T_{eg}(x)$, имеются экстремумы вблизи электродов.

Сила R_{ei} слабо влияет на J_i , т.к. мал ток J_e и незначителен вклад в подвижность электронно-ионных столкновений.

Значение J_i у эмиттера для J_2 приблизительно в 4 раза больше (по модулю), чем для J_1 , у коллектора – на порядок больше.

Ассиметричная форма фазовых портретов (рис. 1, кривые 1) обусловлена монотонно убывающей (экспоненциальной) зависимостью $T_{ei}=T_{ei}(x)$.

Фазовые портреты на плоскости q_e - T_e (рис. 2) существенно нелинейные. Более того, для зависимости $T_{eg}=T_{eg}(x)$ фазовый портрет самопересекается (рис. 2, а, кривая 2). Это обстоятельство может служить дополнительным критерием проверки модели на адекватность.

Заключение

■ Получены и проанализированы распределения неизмеряемых в эксперименте параметров плазмы для двух температур электронов $T_{ei}=T_{ei}(x)$ и $T_{eg}=T_{eg}(x)$. Фазовые портреты этих параметров имеют как количественные, так и качественные различия. Качественные различия имеются в основном для плотности потока энергии электронного газа. Найденные особенности и различия фазовые портреты неизмеряемых распределений параметров плазмы позволяют использовать их для проверки существующих моделей процессов в зазоре диода на адекватность.

Литература

4. Зимин В.П. Анализ концепции построения и исследования фазовых портретов экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 7–14.

5. Пискунова Т.А. Оценка отклонения состояния дуговой плазмы термоэмиссионного диода от термодинамического равновесия / Т.А. Пискунова Т.А., В.П. Зимин // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XI Междунар. научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2013. – С. 99–101.

6. Zimin V.P. Burning condition for a plasma layer of a cesium arc with volume recombination // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – № 3/2. – С. 36–39.

7. Низковольтная дуга в термоэмиссионных преобразователях. / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, И.Л. Коробова и др. // ЖТФ. – 1968. – Т. 38. – Вып. 7. – С. 1075–1094.

8. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма/ Бакшт Ф.Г. и др. – М.: Наука, 1973. – 480 с.