

6. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. – P. 3865-3868.
7. Henkelman G., Uberuaga B.P., Jónsson H. A climbing image nudged elastic band method for finding saddle points and minimum energy paths // J. Chem. Phys. 2000. V. 113. – P. 9901-9904.
8. Wasilewski R.J., Kehl G.L. Diffusion of hydrogen in titanium // Metallurgia. 1954. V. 50. – P.225-230.
9. Papazoglou T.P., Hepworth M.T. Diffusion of hydrogen in α -titanium // Trans. Met. Soc. AIME. 1968. V. 242. – P.682-687.

Анализ фазовых портретов параметров диффузионной плазмы термоэмиссионного преобразователя энергии

Тарасова Л.П.

tarasova.luda31@mail.ru

Научный руководитель: к.т.н., доцент, Зимин В.П., Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет

Аннотация. В процессе исследования проводился математический анализ экспериментальных распределений параметров плазмы, с целью выявления на фазовых портретах областей, в которых при некоторых параметрах диода в плазме объемная ионизация начинает конкурировать с поверхностной ионизацией. В результате исследования получены фазовые портреты, качественные оценки.

В работе [1] была поставлена задача и изложены первые результаты построения и исследования поведения на фазовых плоскостях распределений параметров плазмы в диффузионном режиме работы термоэмиссионного преобразователя (ТЭП). В настоящей работе излагаются результаты, полученные после уточнения как оцифрованных экспериментальных данных, так и постановки задачи. Наряду с экспериментальными результатами, представленными в [2], были учтены распределения параметров диффузионной плазмы работы [3]. Изменение постановки задачи заключалось в замене вида аппроксимирующей функции. Вместо логарифмического приближения была взята функция экспоненциального вида. Это связано с тем, что логарифмическая функция у эмиттера ($x=0$) имеет особенность, что затрудняет проведение корректную экстраполяцию экспериментальных данных в области у эмиттера.

Результаты и их обсуждение

Уточненные оцифрованные данные распределений параметров плазмы были получены для двух наборов параметров ТЭП.

Для первого набора параметров преобразователя температура эмиттера $T_E=1565$ К, температура коллектора $T_C=860$ К, межэлектродный зазор $d=0,16$ см варьировалось давление насыщенных паров цезия в резервуаре p_{Cs} , мм рт. ст.: 1 – 0,44; 2 – 1,0; 3 – 2,0. Распределения параметров плазмы снимались на вольтамперной характеристики (ВАХ) в точке тока короткого замыкания. На основании анализа кривых Рейзора эмиттера преобразователя (Mo) получена оценка плотности тока короткого замыкания $J_{кз}$, mA/cm²: 1 – 46,2; 2 – 35,7; 3 – 26,6.

Для второго набора параметров преобразователя $T_E=1420$ К, $T_C=800$ К, $d=0,16$ см, $p_{Cs}=0,44$ мм рт. ст. варьировалась плотность тока на ВАХ ТЭП: J , mA/cm^2 : 4 – 0; 5 – 10; 6 – 14. Точка 4, в которой снимались распределения параметров плазмы, соответствует холостому ходу, а точка 6 – поджигу дуги.

Для плотности плазмы использовались три аппроксимирующие функции: линейная, квадратичный полином и синусоидальная. Последняя является собственной функцией уравнения диффузии плотности плазмы, учитывающего объемную ионизацию. Анализ критериев пригодности приближений показал, что для первого набора наилучшим приближением является синусоидальная аппроксимация (рис. 1). Сумма квадратов отклонений, нормированной на 10^{11} , изменяется от значения 0,0677 для $n=n_1(x)$ до 0,167 для $n=n_3(x)$. Критерий пригодности варьируется от 0,384 до 0,46. Имеется существенное отклонение от линейной зависимости. Это обстоятельство более отчетливо можно наблюдать на фазовых портретах распределений плотности плазмы (рис. 2). Здесь же показаны поведение аппроксимирующей функции в областях экстраполяции: кресты – приэмиттерная область, кружки – приколлекторная область.

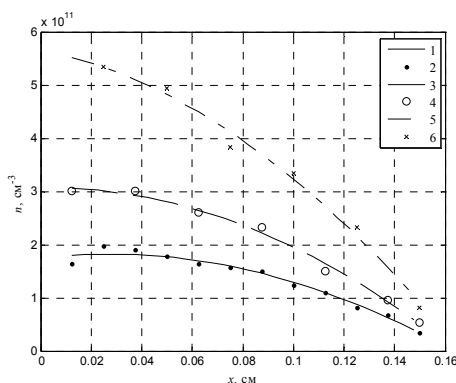


Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных распределений плотности плазмы функциями вида $n=a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1)$ для первого набора параметров ТЭП, p_{Cs} , мм рт. ст.: 1, 2 – 0,44; 3, 4 – 1,0; 5, 6 – 2,0

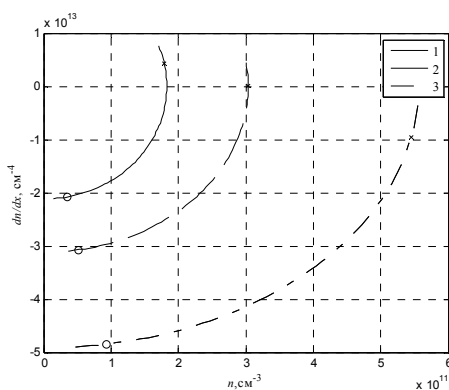


Рис. 2. Фазовые портреты распределений плотности плазмы в межэлектродном зазоре диода. Параметры ТЭП и аппроксимирующие функции как для рис. 1, p_{Cs} , мм рт. ст.: 1 – 0,44; 2 – 1,0; 3 – 2,0

Аналогичные закономерности имеются в поведении для аппроксимирующих функций потенциала пространства, занятого плазмой для первого набора параметров ТЭП (рис. 3, 4). Наилучшим приближением для V является квадратичный полином. Причем значения первого критерия (сумма квадратов отклонений) для трех аппроксимирующих функций слабо отличаются друг от друга, но по второму критерию пригодности приближения (R-square) преимущество имеет квадратичное приближение.

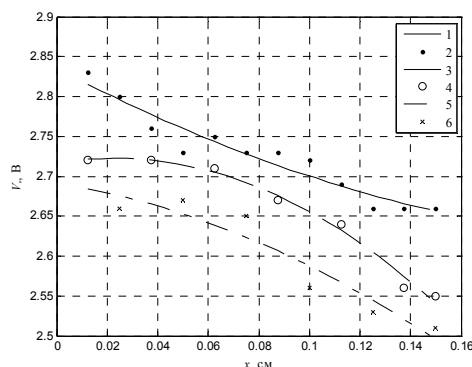


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных распределений потенциала пространства, занятого плазмой функциями вида $V=p_1 \cdot x^2+p_2 \cdot x+p_3$ для первого набора параметров ТЭП, p_{Cs} , мм рт. ст.: 1, 2 – 0,44; 3, 4 – 1,0; 5, 6 – 2,0

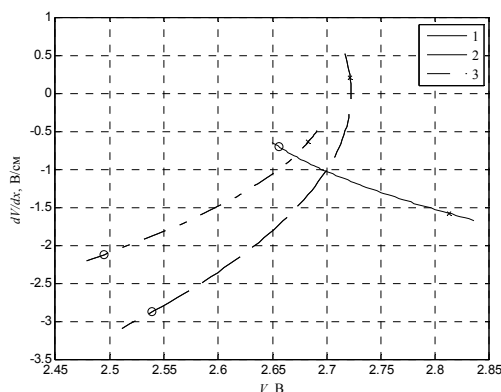


Рис. 4. Фазовые портреты распределений потенциала пространства, занятого плазмой. Параметры ТЭП и аппроксимирующие функции как для рис. 3, p_{Cs} , мм рт. ст.: 1 – 0,44; 2 – 1,0; 3 – 2,0

Аппроксимация экспериментальных зависимостей для второго набора параметров ТЭП показала, что наилучшим приближением для распределений плотности плазмы является квадратичный полином. На фазовых портретах этих зависимостей (рис. 5) нелинейность проявляется не так отчетливо как для первого набора данных. Особый интерес вызывает поведение зависимости $n=n_6(x)$ и её аппроксимации, полученной в точки поджига дуги. Но данные в области $x < 0,05$ см, наиболее интересной с точки зрения процессов поджига, отсутствуют [3]. Поэтому наилучшим приближением является полином второй степени.

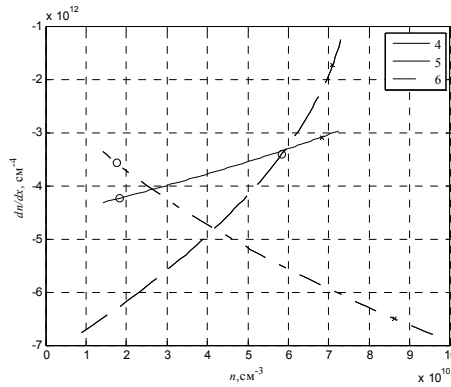


Рис. 5. Фазовые портреты экспериментальных распределений плотности плазмы функциями вида $n=p_1 \cdot x^2+p_2 \cdot x+p_3$ для второго набора параметров ТЭП, J , mA/cm^2 : 4 – 0; 5 – 10; 6 – 14

На фазовых портретах потенциала пространства, занятого плазмой для второго набора параметров ТЭП в области у эмиттера так же наблюдаются области нелинейного поведения, протяженность которых увеличивается с ростом плотности тока диода J .

Анализ аппроксимирующих зависимостей для плотности плазмы показал, что уже при малых значениях плотности тока в диффузионном режиме работы диода объемная ионизация начинает конкурировать с поверхностной и фазовые портреты плотности плазмы значительно отклоняются от прямой линии.

Список литературы:

1. Тарасова Л.П. Построение и анализ фазовых портретов диффузионной плазмы термоэмиссионного диода / Л.П. Тарасова, В.П. Зимин // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XI Междунар. научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных.– Томск, 2013.– С. 123–125.
2. Бакшт Ф.Г., Дюжев Г.А., Марциновский А.М. и др. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / под ред. Б.Я. Мойжеса и Г.Е. Пикуса. – М.: Наука, 1973. – 480 с.
3. Зондовые исследования плазмы в термоэмиссионных преобразователях с высоким давлением паров цезия. II. Проверка методов зондов. Некоторые результаты измерений в диффузионном и дуговом режимах / Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский, Б.Я. Мойжес и др. // ЖТФ. – 1966. – Т. 36. – Вып. 4. – С. 692–703.