

УДК 533.9

К расчету температуры области возбужденных атомов ионного слоя тлеющего разряда

Акатьев Илья Дмитриевич^{1, 2(*)}

akatevid@student.bmstu.ru

Яшин Максим Сергеевич²

yashinms@sialuch.ru

Онуфриев Валерий Валентинович¹

onufryev@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск, Россия

Аннотация. Проведено расчетное исследование температуры области возбужденных атомов ионного слоя высоковольтного термоэмиссионного диода. В системе уравнений, описывающих процессы в ионном слое высоковольтного термоэмиссионного диода в режиме обратного тока, расширено уравнение энергии — добавлен член, описывающий вынос энергии излучением, а также добавлено граничное условие, описывающее конвективный теплообмен с «холодным» электродом. Расчетным путем определена температура области возбужденных атомов в ионном слое, а также напряжение пробоя обратного дугового разряда. Представлены результаты расчетного исследования температуры области возбужденных атомов в сравнении с полученными значениями по существующей полуэмпирической модели и в эксперименте.

Ключевые слова: система преобразования тока, высоковольтный термоэмиссионный диод, ионный слой, область возбужденных атомов, температура

Введение. Создание системы преобразования тока (СПТ) мощной энергодвигательной установки (ЭДУ) связано с разработкой приборов плазменной электроэнергетики, одни из которых является высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод (ВПТД). Проектирование подобных устройств требует наличия зависимостей, позволяющих определить рабочее напряжение, не превышающее напряжения пробоя обратного дугового разряда. Дополнение и расширение существующей модели расчета напряжения зажигания обратного дугового разряда является целью данной работы. Основными задачами работы являются расчетное определение зависимости напряжения обратного дугового пробоя при рассмотрении механизмов выноса энергии излучением и конвекцией в электрод из области возбужденных атомов ионного слоя, а также сравнение полученных расчетных данных с результатами эксперимента [1, 2].

Метода и результаты исследования. В данной работе проведено исследование температуры области возбужденных атомов ионного слоя высоковольтного термоэмиссионного диода. Расчетное исследование основывается на решении системы одномерных уравнений, описывающих процессы в межэлектродном зазоре высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода в режиме обратного тока [2].

В уравнение энергии ионного слоя плазменного тиристора, входящее в систему уравнений, включен дополнительный член, описывающий вынос теплоты излучением [3]:

$$\frac{d}{dx} \left[\chi_a(T_a) \frac{dT_a(x)}{dx} \right] = -j_i(x) E(x) + n_e n_a \langle \sigma v \rangle_v E_\phi V,$$

где χ_a — коэффициент теплопроводности атомов пара цезия; T_a — температура атомов пара; j_i — плотность ионного тока; E — напряженность электрического поля в ионном слое; n_e — концентрация электронов; n_a — концентрация атомов; $\langle \sigma v \rangle_v$ — скорость возбуждения атомов электронным ударом; V — объем плазмы

Уточнено граничное условие вблизи «холодного» электрода, описывающее тепловой поток конвекцией в электрод [4]:

$$-\chi_a(T_a) \frac{dT_a(d_K)}{dx} = \alpha_0 \frac{1}{4} n_a \langle v \rangle k_B \frac{3}{2} (T_a(d_K) - T_A),$$

где d_K — толщина ионного слоя; α_0 — коэффициент аккомодации энергии; $\langle v \rangle$ — средняя тепловая скорость атомов; k_B — постоянная Больцмана; T_A — температура анода.

Решение системы уравнений для ионного слоя высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода в режиме обратного тока осуществлялось численным методом в программном комплексе MATLAB/Simulink.

Заключение. Результатом расчетного исследования ионного слоя высоковольтного термоэмиссионного вентиля является зависимость температуры атомов цезия в ионном слое, а также напряжение пробоя высоковольтного термоэмиссионного диода.

Список источников

- [1] Онуфриева Е.В., Алиев И.Н., Онуфриев В.В., Синявский В.В. Энергетические характеристики высокотемпературных плазменных вентилях систем преобразования тока космических энергодвигательных установок. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2016, № 3, с. 127–140.
- [2] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б. О расчете характеристик разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде в режиме обратного тока. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2017, № 6, с. 87–96.
- [3] Fam Le Kien, Dutta Gupta S., Balykin V., Hakuta K. Spontaneous emission of a cesium atom near a nanofiber: Efficient coupling of light to guided modes. *Phys. Rev. A*, 2005, no. 72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.032509>
- [4] Demirel Y., Demirel S., Satish C. Heat transfer in rarefied gas at a gas-solid interface. *Energy*, 1996, no. 21 (2), pp. 99–103. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00096-8](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00096-8)