

03;04

Распределение малой добавки легкоионизируемого газа в плазме термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию

© В.А. Жеребцов, И.И. Касиков

Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск
E-mail: zherebtsov@ippe.obninsk.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2005 г.

Исследовано пространственное распределение малой добавки легкоионизируемого газа в непрерывном оптическом разряде, горящем в межэлектродном зазоре термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию. Показано, что как в равновесном ядре разряда, так и в неравновесных приэлектродных областях добавка отводится на периферию разряда. Концентрация добавки у электродов на несколько порядков выше, чем в центре разряда.

Введение. Экспериментальные [1] и теоретические [2–4] исследования термоэмиссионного метода преобразования энергии лазерного излучения в электрическую энергию показывают, что для достижения характеристик преобразователя энергии, представляющих практический интерес, требуются эмиттер с плотностью тока термоэлектронной эмиссии порядка 10^2 А/см² и коллектор с низкой работой выхода электронов 1.6 eV. По существу, единственный способ удовлетворить эти требования — введение в межэлектродное пространство преобразователя энергии, заполненное инертным газом, легкоионизируемой добавки — паров цезия.

В условиях термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию (ТЭПЛ) в центральной области непрерывного оптического разряда (НОР) (ядре разряда) температуры

электронов и тяжелых компонент плазмы (ионов, атомов) близки и плазма практически равновесна. По мере приближения к электродам в узких (порядка 10^{-2} см) приэлектродных областях из-за увеличения плотностей потока тепла, переносимого тяжелыми компонентами плазмы, и потока ионов к электродам происходит отрыв температуры тяжелых компонент плазмы от температуры электронов, падают концентрации заряженных частиц и плазма становится неравновесной [2,5].

Присутствие в межэлектродном пространстве преобразователя энергии легкоионизируемой добавки кроме снижения работ выхода эмиттера и коллектора может приводить к ряду процессов как в равновесном ядре НОР, так и в неравновесных приэлектродных областях, существенно влияющих на преобразование энергии. Чтобы оценить роль этих процессов, необходимо знать распределения концентраций атомов и ионов добавки в межэлектродном пространстве преобразователя энергии. В данной работе для выявления качественных закономерностей этих распределений рассматриваются малые концентрации добавки, когда можно пренебречь ее влиянием на распределения параметров основного газа и электронов.

Ядро оптического разряда. Рассмотрим аксиально-симметричный ТЭПЛ с внутренним электродом (эмиттером) радиусом r_1 и внешним электродом (коллектором) с внутренним радиусом r_2 . В межэлектродном зазоре преобразователя энергии горит НОР, слабо неоднородный вдоль оси симметрии z . Учитывая высокую степень ионизации добавки в ядре НОР, для концентрации ионов добавки имеем

$$\frac{n_i^{(a)}}{n_{iT1}^{(a)}} = \frac{n_{T1}}{n} \left(\frac{T_{T1}}{T} \right)^{1+k_e^{(T)}} \exp \left[- \int_{r_{T1}}^r e J_{T1} \frac{r_1}{r} \frac{1}{n T u_e} dr \right], \quad (1)$$

где $n_i^{(a)}$ — концентрация ионов добавки; n — концентрация электронов; T — температура плазмы; J — плотность потока электронов; $k_e^{(T)}$, u_e — термодиффузионное отношение и подвижность для электронов; e — элементарный заряд. Нижними индексами „T1“ и „T2“ помечены величины на приэмиттерной и приколлекторной границах ядра НОР. В отсутствие тока через разряд концентрация добавки спадает от приэлектродной границы к центру ядра обратно пропорционально концентрации электронов и примерно квадрату температуры плазмы

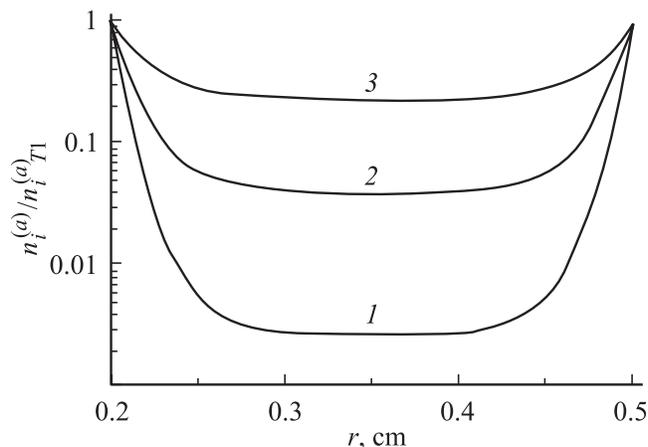


Рис. 1. Распределение концентрации ионов цезия в ядре НОР при $r_1 = 0.2$ см; $r_2 = 0.5$ см; $J_{T1} = 0$; 1 — $T_{T1} = T_{T2} = 8000$ К, 2 — $10\,000$ К; 3 — $12\,000$ К.

($k_e^{(T)} \approx 0.7$). Температура плазмы в центре ядра T_M слабо зависит от режима преобразователя энергии, так что отношение концентраций добавки на границе и в центре ядра растет с уменьшением температуры плазмы на границах ядра. Протекание тока через разряд до $J_{T1} \approx 400$ А/см² не приводит к качественным изменениям в распределении ионов добавки в ядре НОР, несколько снижая их концентрацию в центре ядра и в приколлекторной области. На рис. 1 показаны распределения концентрации ионов цезия в ядре НОР в аргоне при давлении $5 \cdot 10^4$ Па и различных температурах плазмы на приэлектродных границах ядра. Концентрация цезия в центре ядра может снижаться на один-два порядка по сравнению с концентрацией на границах.

Приэлектродные области оптического разряда. Приэлектродные области будем рассматривать в рамках модели [5], полагая их одномерными плоскими и пренебрегая изменением температуры электронов в областях. Рассмотрим случай не очень высоких температур плазмы на приэлектродных границах ядра НОР, когда основной газ в областях слабоионизован. Распределения концентрации электронов (ионов основного газа) n , температуры тяжелых компонент плазмы T , электрического потенциала φ в приэлектродной области исследованы в [5].

Для ионов и атомов добавки меем

$$\frac{dj_i^{(a)}}{dx} = -\frac{dj_a^{(a)}}{dx} = \Gamma_i^{(a)},$$

$$j_i^{(a)} = -D_i^{(a)} \frac{dn_i^{(a)}}{dx} - n_i^{(a)} u_i^{(a)} \frac{d\varphi}{dx}, \quad j_a^{(a)} = -D_a^{(a)} \frac{dn_a^{(a)}}{dx}. \quad (2)$$

Здесь $n_i^{(a)}$, $n_a^{(a)}$, $j_i^{(a)}$, $j_a^{(a)}$ — концентрации и плотности потока ионов и атомов добавки; $\Gamma_i^{(a)}$ — скорость ионизации–рекомбинации для добавки [6]; $D_i^{(a)}$, $D_a^{(a)}$ — коэффициенты диффузии ионов и атомов добавки; $u_i^{(a)}$ — подвижность ионов добавки.

На границе квазинейтральной плазмы и ленгмюровского слоя ($x = 0$) к уравнениям (2) ставятся известные граничные условия для плотностей потока ионов и атомов добавки [6] и суммарной концентрации атомов и ионов добавки $n_1^{(a)} = n_{i1}^{(a)} + n_{a1}^{(a)}$. На приэлектродной границе ядра НОР ($x \rightarrow \infty$) поставим условие равновесия для добавки. Нижними индексами „1“ и „T“ помечены величины на границе квазинейтральной плазмы и ленгмюровского слоя и на приэлектродной границе ядра НОР.

Из (2) для концентрации атомов и ионов добавки получена система двух уравнений первого и второго порядка, которая решалась численно методом Рунге–Кутты аналогично [5].

На рис. 2 показаны характерные распределения безразмерных концентраций ионов $n_i^{(a)'} = n_i^{(a)}/n_1^{(a)}$, атомов $n_a^{(a)'} = n_a^{(a)}/n_1^{(a)}$ добавки цезия и электрического поля $E' = (d\varphi/dx)/(d\varphi/dx)_1$ в приэлектродной области ТЭПЛ, заполненного аргоном при давлении $5 \cdot 10^4$ Па, при температуре электрода $T_E = 1000$ К и токе термоэлектронной эмиссии с электрода $J_E = 0$. На рисунке $x' = x/L_{iT}$, L_{iT} — длина ионизационной релаксации основного газа, вычисленная при условиях на приэлектродной границе ядра НОР и характеризующая ширину приэлектродной области [5]. При удалении от электрода вследствие интенсивной ионизации концентрация атомов добавки быстро спадает. Концентрация ионов добавки при удалении от электрода слегка нарастает, а затем спадает. В результате на расстоянии от электрода порядка $10^{-2}L_{iT}$ суммарная концентрация ионов и атомов добавки уменьшается на два порядка, не достигнув ионизационного равновесия.

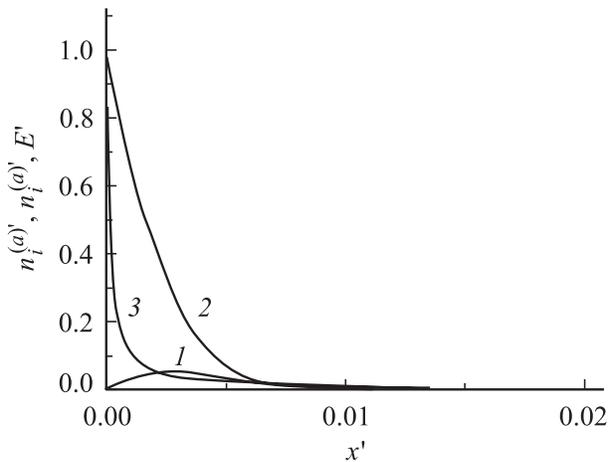


Рис. 2. Распределение концентрации ионов (1), атомов (2) цезия и электрического поля (3) в приэлектродной области при $J_T = 0$.

Таким образом, вблизи электрода в области шириной порядка длины ионизации атомов добавки $L_{ia}^{(a)} \sim 10^{-2}L_{iT}$ происходит почти полная ионизация атомов, десорбированных с электрода. Большая разность потенциалов между областью ионизации добавки и границей ядра препятствует проникновению образовавшихся ионов в ядро НОР. Низкая концентрация ионов в области ионизации (по сравнению с $n_1^{(a)}$) обусловлена большой величиной электрического поля, отводящего ионы на электрод. Выключение электрического поля качественно изменяет распределение добавки в приэлектродной области. При удалении от электрода концентрация атомов добавки быстро падает, а концентрация ионов нарастает практически до величины $n_1^{(a)}$. Далее эти концентрации на расстоянии от электрода порядка $10^{-2}L_{iT}$ выходят на ионизационное равновесие.

Локализация легкоионизируемой добавки на периферии разряда может наблюдаться и в разрядах других типов, когда температура электронов достаточно высока для интенсивной ионизации атомов добавки, а электрическое поле формируется электронами и ионами основного газа.

Заключение. Исследовано пространственное распределение малой добавки легкоионизируемого газа в непрерывном оптическом разряде в термоэмиссионном преобразователе энергии лазерного излучения в электрическую энергию, заполненном инертным газом. Показано, что как в равновесном ядре НОР, так и в неравновесных приэлектродных областях добавка отводится на периферию разряда и сосредоточивается в узком приэлектродном слое. Концентрация добавки у электрода на несколько порядков выше, чем в центре разряда.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 04–02–97218).

Список литературы

- [1] Козлов Н.П., Пекшев А.В., Протасов Ю.С., Суслов В.И. // Радиационная плазмодинамика. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 462–498.
- [2] Алексеева И.В., Будник А.П., Дьяченко П.П. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 11. С. 91–98.
- [3] Будник А.П., Жеребцов В.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 6. С. 60–65.
- [4] Алексеева И.В., Будник А.П., Жеребцов В.А. // Атомная энергия. 2004. Т. 96. № 2. С. 98–107.
- [5] Жеребцов В.А. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 4. С. 1–8.
- [6] Бакиш Ф.Г., Дюжнев Г.А., Марциновский А.М. и др. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. М.: Наука, ГРФМЛ. 1973. 480 с.