

04;07

**Приэмиттерная область
термоэмиссионного преобразователя
энергии лазерного излучения
в электрическую при высокой
концентрации легкоионизируемой
добавки**

© В.А. Жеребцов

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

Поступило в Редакцию 18 августа 2006 г.

С учетом изменения температуры электронов исследованы особенности приэмиттерной области термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию при высокой концентрации легкоионизируемой добавки у электрода. Показано, что в рассматриваемых условиях температура электронов в области изменяется в несколько раз. Отмечается качественное изменение ионного состава плазмы при удалении от электрода.

PACS: 52.50.Jm, 52.75.Fk, 84.60.Ny

Для получения характеристик термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию (ТЭПЛ), представляющих практический интерес, требуются эмиттер с высокой плотностью тока термоэлектронной эмиссии порядка 10^2 A/cm^2 и коллектор с низкой работой выхода электронов около 1.6 eV [1,2]. По существу, единственный способ удовлетворения этих требований — введение в межэлектродное пространство преобразователя энергии, заполненное инертным газом, легкоионизируемой добавки — цезия до высоких концентраций у эмиттера порядка 10^{17} cm^{-3} и более.

Исследование неравновесных приэлектродных областей преобразователя энергии при низких и средних (до 10^{16} cm^{-3}) концентрациях добавки у электрода показало [3,4], что добавка сосредоточена у электродов в слое более узком, чем ширина приэлектродных областей.

С увеличением концентрации добавки значительно возрастает плотность потока энергии, затрачиваемой на ее ионизацию, и при высоких, практически важных концентрациях цезия у эмиттера электронная теплопроводность оказывается недостаточной, чтобы обеспечить даже приближенное выполнение значительно упрощающего расчеты предположения о постоянстве температуры электронов T_e в приэлектродной области.

Для исследования приэмиттерной области при высоких концентрациях добавки у электрода разработана математическая модель, учитывающая изменение температуры электронов в области. Плазма описывается квазигидродинамическими уравнениями с граничными условиями на границе квазинейтральной плазмы и ленгмюровского слоя и на приэлектродной границе равновесного ядра непрерывного оптического разряда (НОР), аналогичными использованным в [4]. Из этих уравнений получена система нелинейных дифференциальных уравнений для концентрации ионов основного (инертного) газа n_i , атомов $n_a^{(a)}$ и ионов $n_i^{(a)}$ добавки, температуры тяжелых компонентов плазмы (атомов и ионов) T и температуры электронов T_e . Как и в модели с постоянной температурой электронов, эта система оказывается жесткой.

Вследствие высокой концентрации электронов у эмиттера и высоких скоростей ионизации атомов и рекомбинации ионов добавки их концентрации выходят на уровень, близкий ионизационно-равновесному на малом расстоянии от электрода. Это позволяет несколько упростить задачу, разбив приэлектродную область на две подобласти. В тонкой первой подобласти, прилегающей к ленгмюровскому слою, можно положить температуру тяжелых компонентов плазмы равной температуре эмиттера T_E . Во второй подобласти, прилегающей к равновесному ядру НОР, концентрации ионов и атомов добавки можно связать условием ионизационного равновесия. Далее система уравнений решалась методом Рунге–Кутты аналогично [4,5].

На рис. 1 и 2 в зависимости от безразмерной пространственной координаты x' , направленной по нормали к электроду в сторону плазмы, показаны характерные распределения параметров плазмы в приэмиттерной области ТЭПЛ, заполненного аргоном с добавкой цезия. На рис. 1 показаны распределения безразмерных концентраций атомов $n_a^{(a)}$ (1), ионов $n_i^{(a)}$ (2) цезия и параметра $q_i^{(a)}$ (3) в первой подобласти. На рис. 2 показаны распределения во второй подобласти безразмерных: a — температуры электронов T_e' (1) и тяжелых компонентов

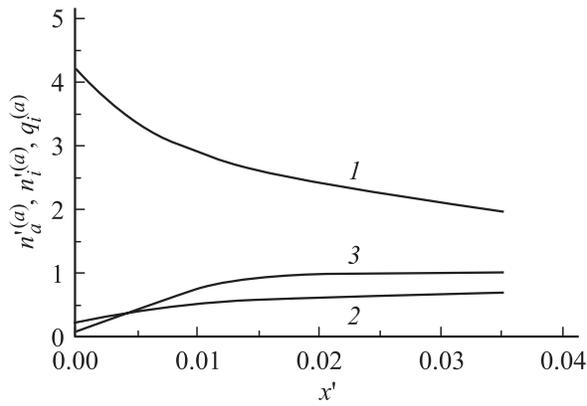


Рис. 1. Распределения параметров плазмы в первой подобласти.

плазмы T' (2), b — концентраций ионов аргона n'_i (1), ионов цезия $n_i^{(a)}$ (2), электронов n' (3) и отношения концентрации ионов аргона к их равновесной концентрации в данной точке q_i (4), c — скорости ионизации-рекомбинации атомов аргона Γ'_i . Температуры электронов и тяжелых компонентов плазмы обезразмерены по отношению к 10^4 К, концентрации атомов и ионов основного газа и примеси, а также электронов — по отношению к $1.1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, скорость ионизации-рекомбинации — по отношению к $2.67 \cdot 10^{18} \text{ cm}^3/\text{s}$ и пространственная координата — по отношению к $6.7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$. Параметры $q_i^{(a)}$ и q_i характеризуют отклонения концентраций ионов примеси и основного газа от ионизационного равновесия. В области ионизации параметры $q_i, q_i^{(a)} < 1$, а в области рекомбинации $q_i, q_i^{(a)} > 1$. Результаты расчетов приведены для давления аргона $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, суммарной концентрации атомов и ионов цезия у эмиттера $4.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, температуры эмиттера $T_E = 2000 \text{ K}$, плотности тока термоэлектронной эмиссии с эмиттера $eJ_E = 200 \text{ A/cm}^2$ и плотности тока электронов на приэлектродной границе ядра НОР $eJ_T = 100 \text{ A/cm}^2$.

Температура электронов в первой подобласти изменяется мало, на величины порядка 10^2 K . В целом же в приэлектродной области в рассматриваемом случае она изменяется почти в три раза: от $T_{e1} = 3500 \text{ K}$ у электрода до $T_{eT} = 11000 \text{ K}$ у приэлектродной границы ядра НОР.

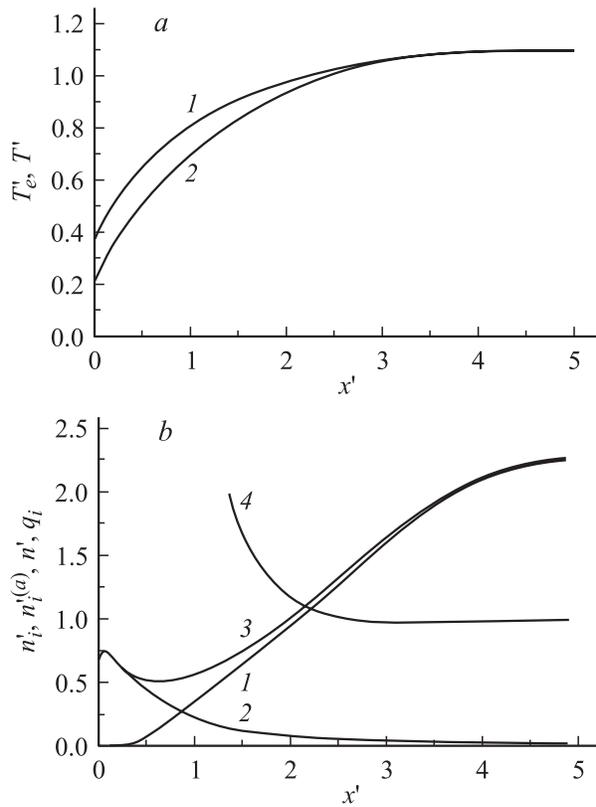


Рис. 2. Распределение параметров плазмы во второй подобласти.

Температура тяжелых компонентов плазмы в приэлектродной области ниже температуры электронов и приближается к ней по мере удаления от электрода.

Поскольку температура электронов в первой подобласти достаточно высока, в ней происходит интенсивная ионизация атомов цезия. При этом с удалением от электрода концентрация атомов цезия падает, а концентрация ионов нарастает, и на расстоянии порядка 10^{-2} ширины приэлектродной области они выходят на уровень близкий к ионизационно-равновесному ($q_i^{(a)} \approx 1$).

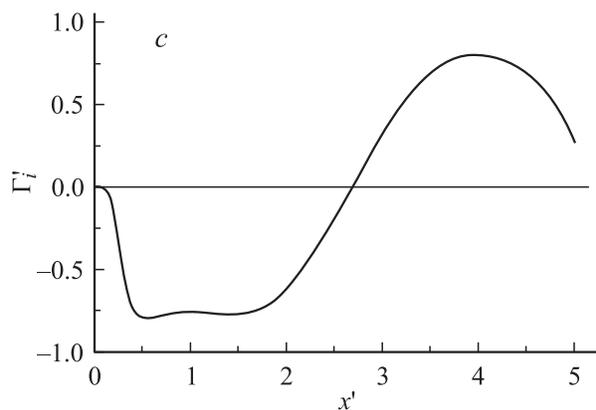


Рис. 2 (продолжение).

Во второй подобласти, в части, прилегающей к электроду, температура электронов недостаточна для поддержания концентрации ионов аргона n_i на уровне порядка их концентрации у приэлектродной границы ядра НОР n_{iT} . Здесь идет интенсивная рекомбинация ионов аргона ($q_i \gg 1$, $\Gamma_i' < 0$), поступающих из части приэлектродной области, прилегающей к приэлектродной границе ядра НОР, в которой температура электронов достаточно высока для генерации ионов аргона ($\Gamma_i' > 0$, $q_i < 1$). Концентрация ионов аргона при приближении к электроду спадает до уровня значительно меньшего концентрации ионов цезия на расстоянии от электрода, на порядок превышающем ширину первой подобласти. Концентрация же ионов цезия спадает при удалении от электрода до уровня значительно меньшего концентрации ионов аргона. Таким образом, при высокой концентрации цезия у электрода вследствие большого изменения температуры электронов в приэлектродной области с удалением от электрода качественно изменяется ионный состав плазмы: в непосредственной близости электрода плазма формируется ионами легкоионизируемой добавки, у границы же ядра НОР преобладают ионы основного газа. При этом концентрация электронов, равная суммарной концентрации ионов, оказывается немонотонной функцией.

Суммарная концентрация атомов и ионов цезия с удалением от электрода значительно уменьшается — от $n_1^{(a)} = 4.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ у электрода

до $n_T^{(a)} = 2.39 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ у приэлектродной границы ядра НОР. Таким образом, даже при высокой концентрации цезия у электрода и не очень высокой температуре электронов у приэлектродной границы ядра НОР концентрация цезия у границы ядра и в ядре разряда оказывается малой.

Таким образом, приведенные результаты расчетов показывают, что при высоких концентрациях цезия у эмиттера температура электронов в неравновесной приэмиттерной области изменяется в несколько раз, так что область разделяется на три подобласти: 1) ионизации атомов цезия ($q_i^{(a)} < 1$), непосредственно примыкающая к электроду; 2) рекомбинации ионов аргона ($q_i > 1$); 3) генерации ионов аргона ($q_i < 1$), примыкающая к ядру НОР. В первой подобласти практически отсутствуют ионы аргона, а плазма формируется ионами цезия. В третьей подобласти генерируются ионы аргона, идущие к электроду и рекомбинирующие во второй подобласти.

Поскольку в третьей подобласти температура электронов и скорость ионизации атомов аргона достаточно высоки и отстоит она достаточно далеко от электрода, то концентрация ионов аргона в подобласти близка к равновесной ($q_i \approx 1$). Кроме того, температура тяжелых компонентов плазмы в ней близка температуре электронов. Поэтому при расчетах характеристик преобразователя энергии эта подобласть может быть отнесена к ядру НОР.

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. М.: Энергоатомиздат, 1991. Т. 1. С. 462.
- [2] Алексеева И.В., Будник А.П., Жеребцов В.А. // Атомная энергия. 2004. Т. 96. № 2. С. 98–107.
- [3] Жеребцов В.А., Касиков И.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 17. С. 1–6.
- [4] Жеребцов В.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 15–21.
- [5] Жеребцов В.А. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 4. С. 1–8.