

04;07;12

Непрерывный оптический разряд в термоэмиссионном преобразователе энергии лазерного излучения в электрическую энергию

© И.В. Алексеева, А.П. Будник, В.А. Жеребцов,
А.В. Зродников, С.Т. Суржиков

ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт им. акад. А.И. Лейпунского,
Обнинск

Поступило в Редакцию 3 октября 1998 г.

Разработана модель и рассчитаны характеристики непрерывного оптического разряда (НОР) в межэлектродном зазоре (МЭЗ) термоэмиссионного преобразователя энергии лазерного излучения в электрическую энергию (ТЭПЛ).

1. Идея термоэмиссионного метода преобразования энергии лазерного излучения в электрическую энергию предложена Н. Рейзером в 1973 г. [1], а затем в конце 80-х годов подтверждена экспериментально в [2]. Идея Рейзера основывается на еще более ранней работе [3]. Однако до сих пор не только не создана адекватная теория этого метода преобразования энергии, но даже не разработаны эффективные методы математического моделирования НОР в МЭЗ. Целью данной работы является создание модели и математическое моделирование стационарного НОР в ТЭПЛ.

ТЭПЛ можно рассматривать как газонаполненный диод с горячим эмиттером и менее нагретым коллектором, в МЭЗ которого горит НОР [2]. Особенностью разряда является протекание сквозь него электрического тока и близкое расположение электродов к области НОР с высокой температурой. Большую роль в балансе энергии НОР в МЭЗ играет отвод энергии на электроды как сильно неравновесным излучением плазмы, так и заряженными и нейтральными компонентами плазмы.

2. Анализ экспериментальных данных [2] показывает, что плазма в ТЭПЛ в основной части МЭЗ практически равновесна (назовем эту область ядром разряда). Отклонения от равновесия имеют место лишь

в тонких слоях вблизи электродов, причем толщина приэлектродного слоя, в котором температура тяжелых компонент плазмы T_i ниже температуры электронов T_e , значительно больше толщины слоя, в котором концентрация заряженных частиц ниже равновесной. Обобщая подход, развитый в [4,5] для термоэмиссионного преобразователя тепловой энергии в электрическую энергию (ТЭП) на случай ограниченного электродами НОР, можно значительно упростить описание разряда, выделив в приэлектродных областях три слоя (пространственного заряда, неравновесной и квазиравновесной плазмы). Из анализа процессов в этих областях можно определить граничные условия для равновесной плазмы ядра НОР.

В соответствии с основной идеей настоящей работы детально будем описывать процессы в области ядра НОР, а процессы в приэлектродных областях учтем с помощью граничных условий. Используя совместно хорошо разработанные методы теории НОР [6,7] и термоэмиссионного метода преобразования тепловой энергии в электрическую [8], можно получить замкнутую систему уравнений и граничных условий для описания стационарного ядра НОР в ТЭП. Эта система включает в себя уравнения, описывающие в квазиоптическом приближении распространение и поглощение лазерного излучения, перенос собственного излучения плазмы в многогрупповом приближении, а также уравнения, описывающие энергетический баланс в плазме, распределение электрического потенциала и плотности тока в плазме НОР (подробнее см [9]).

3. Если плазма у границы ионизирована слабо, то граничное условие для определения температуры плазмы на приэмиттерной границе равновесной области имеет вид

$$\begin{aligned}
 -(\lambda_i)_{T1} \left(\frac{dT}{dr} \right) \Big|_{T1} &= -2(T_{T1} - T_E) J_E - (\lambda_H)_{T1} \frac{\sqrt{2} T_{T1}}{L_{T1}} \\
 &\times \left[\ln \frac{T_{T1}}{N_E} - \left(1 - \frac{T_E}{T_{T1}} \right) \right]^{1/2} + \left(E_i + 2T_{T1} + e\Delta\varphi_{T1} \right. \\
 &\left. - T_{T1} \ln \frac{n_{T1}}{n_{i1}} \right) (j_i)_1 - J_{T1} \left[\left(\frac{1}{2} + k_{eT1}^{(T)} \right) T_{T1} - e\Delta\varphi_{T1} \right]. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Индексом "T1" помечены значения величин на границе. Условие (1) описывает энергетический баланс плазмы на границе. Его левая часть — поток тепловой энергии из ядра НОР. Эта энергия расходуется на подогрев до температуры плазмы T_{T1} эмиттированных с эмиттера электронов

(первое слагаемое в правой части), отводится на эмиттер теплопроводностью тяжелых компонент плазмы (ионов, атомов), расходуется на генерацию в неравновесном приэлектродном слое отводимых на эмиттер ионов и отводится от границы электронным током (последнее слагаемое). Здесь T_E — температура эмиттера, λ_r — коэффициент теплопроводности плазмы, J_E — плотность потока эмитированных с эмиттера электронов, λ_H — коэффициент суммарной теплопроводности тяжелых компонент плазмы; L_{T1} — длина термической релаксации у эмиттера, E_i — потенциал ионизации атома, e — заряд электрона, $\Delta\varphi_{T1}$ — скачок потенциала между равновесной плазмой и эмиттером, n — концентрация электронов (ионов), n_{i1} — квазиравновесная концентрация электронов (ионов) у эмиттера (при $T_e = T_{T1}$, но $T_i = T_E$), $(j_i)_1 = -(D_{a1}n_{i1})/(\sqrt{2}L_{i1})$ — плотность потока ионов на эмиттер, D_{a1} — коэффициент амбиполярной диффузии эмиттера, L_{i1} — длина ионизационной релаксации вблизи эмиттера, J — плотность потока электронов, $k_e^{(T)}$ — термодиффузионное отношение электронов. Аналогичный вид имеет граничное условие для определения температуры и на приколлекторной границе равновесной области. Остальные граничные условия формулируются стандартным образом и ввиду недостатка места здесь не приводятся. Отметим, что особое внимание к приэлектродным областям в этой работе обусловлено их определяющей ролью в процессе преобразования энергии [3].

4. Система уравнений для ядра НОР решалась численно методом стационарирования [10]. Решению задачи предшествовало формирование базы данных коэффициентов переноса, теплофизических и оптических свойств аргоновой плазмы в условиях ТЭПЛ. Расчеты проведены для наполненного аргоном преобразователя при температурах электродов $\sim 10^3$ К, давлении аргона $P \sim 1$ atm, J_E — до $\sim 10^3$ А/см². Трубчатый пучок лазерного излучения с длиной волны $5.3 \mu\text{m}$, направленный вдоль оси z , фокусировался в кольцо на расстоянии F от входа в ТЭПЛ ($z = 0$) в центр зазора между эмиттером и коллектором, которые представляли собой два коаксиальных цилиндра радиусами r_1 и r_2 соответственно. Выбор такой геометрии позволяет, с одной стороны, используя аксиальную симметрию, упростить математическое описание, а с другой стороны, учесть то обстоятельство, что для эффективной работы ТЭПЛ необходимо, чтобы площадь эмиттера значительно превышала площадь коллектора. Полагалось, что лазерное излучение полностью отражается от электродов, а излучение плазмы полностью поглощается ими.

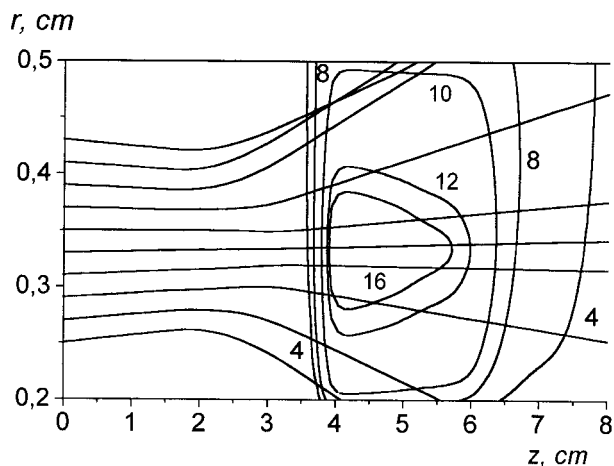


Рис. 1. Изотермы и ход лучей через плазму НОР для диода в режиме холостого хода с $r_1 = 0.2$ см и $r_2 = 0.5$ см, мощность лазерного излучения — 90 кВт, $J_E = 500$ А/см², $P = 1$ атм, $F = 15$ см. Числа вблизи изотерм — температура (кК).

Типичные результаты расчетов представлены на рис. 1, 2. Продольный вдоль оси z размер высокотемпературной области НОР достигает примерно 2 см и значительно превышает расстояния между электродами (0.3 см). Температура плазмы в середине зазора достигает примерно 18 кК, а у границ области ядра разряда и неравновесных приэлектродных областей падает до 9 кК. Рефракция лазерного излучения существенно влияет на формирование структуры НОР (рис. 1). Большой перепад температуры на тонких ($\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ см) приэлектродных областях обуславливает большие ($\sim 10^3$ Вт/см²) потоки тепла, переносимого тяжелыми компонентами плазмы из области ядра разряда на электроды. Высокая температура плазмы у электродов обуславливает также большие затраты энергии на генерацию в неравновесных областях ионов. Тем не менее в рассмотренных условиях основные потери энергии из разряда связаны с собственным излучением плазмы (до 10^4 Вт/см²).

Плазма в центральной области ядра НОР практически полностью ионизована. В приэлектродных же областях степень ионизации плазмы невелика (< 0.1). Распределение потенциала электрического поля

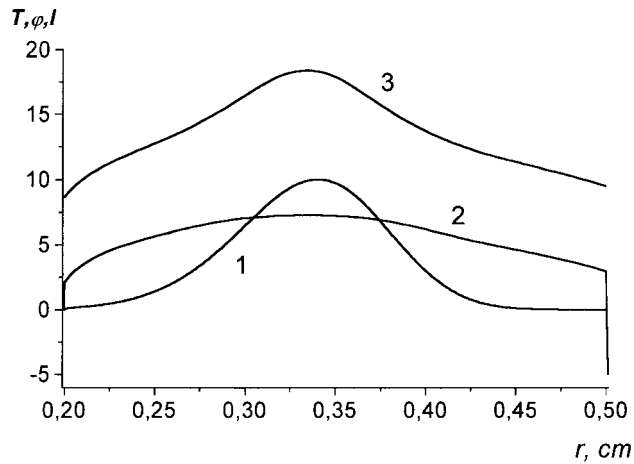


Рис. 2. Распределения по радиусу интенсивности (I) лазерного излучения (1) при $z = 0$ в относительных единицах, а также при $z = 5$ см потенциала (φ) электрического поля (2) в В и температуры (T) плазмы (3) в кК. Для тех же параметров ТЭПЛ, что и на рис. 1.

в МЭЗ имеет характерную структуру с большим приколлекторным скачком (~ 10 В) и относительно небольшим падением на плазме ядра разряда (~ 1 В). Расчеты показали, что с увеличением тока через диод температура плазмы у эмиттера возрастает за счет разогрева электронов на приэмиттерном падении потенциала, а у коллектора уменьшается. Однако эти изменения температуры невелики вследствие сильной (экспоненциальной) зависимости от температуры энергии, отводимой на электроды тяжелыми компонентами плазмы, а также энергии, затрачиваемой на генерацию ионов в неравновесных приэлектродных областях.

Таким образом, в данной работе впервые предложен эффективный подход к теоретическому исследованию термоэмиссионного метода преобразования энергии лазерного излучения в электрическую энергию, разработана математическая модель НОР и рассчитаны распределения параметров плазмы в МЭЗ преобразователя и потоки энергии на электроды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 97-02-17583).

Список литературы

- [1] *Rasor N.S.* // Laser-energy conversion symposium. NASA Ames Research Center. NASA TM X-62. 1973. P. 51–62.
- [2] *Козлов Н.П., Пекшеев А.В., Протасов Ю.С., Суслов В.И.* // Радиационная плазменная динамика. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 462–498.
- [3] *Waymouth J.F.* // Journal of the Institution of Electrical Engineers. 1962. V. 8. N 8. P. 380–383.
- [4] *Мойжес Б.Я., Бакиит Ф.Г.* // ЖТФ. 1968. Т. 38. В. 709–723.
- [5] *Бакиит Ф.Г., Коробова И.Л., Мойжес Б.Я.* // ЖТФ. 1971. Т. 41. В. 2. С. 387–400.
- [6] *Суржиков С.Т.* Вычислительный эксперимент в построении радиационных моделей механики излучающего газа. М.: Наука, 1992.
- [7] *Будник А.П., Вакуловский А.С., Попов А.Г., Суржиков С.Т.* // Математическое моделирование. 1996. Т. 8. № 5. С. 1–22.
- [8] *Бакиит Ф.Г., Дюжес Г.А., Марциновский А.М., Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е., Сонин Э.Б., Юрьев В.Г.* Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. 480 с.
- [9] *Будник А.П., Дьяченко П.П., Жеребцов В.А., Зродникова А.В.* Препринт № 2653. Обнинск: ФЭИ, 1997. 33 с.
- [10] *Алексеева И.В., Будник А.П., Жеребцов В.А., Суржиков С.Т.* Препринт № 2679. Обнинск: ФЭИ, 1998. 23 с.