

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Изменение функции распределения электронов по энергиям в плазме разряда унипольярного пробоя газа

В. П. Савинов^{1,a}, А. К. Сухов^{2,b}, Т. П. Копейкина²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Костромской государственный университет имени Н. А. Некрасова, физико-математический факультет. Россия, 156961, г. Кострома, ул. 1-го Мая, д. 14.

E-mail: ^asavinov1983@yahoo.com, ^bpriklmath@ksu.edu.ru

Статья поступила 21.04.2009, подdana в печать 05.06.2009.

Экспериментально установлено, что вид функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и плотность электронов в плазме малоизученного импульсного разряда унипольярного пробоя газа (УПГ) существенно изменяются во времени. На основе предложенной модели физического механизма разряда УПГ объясняется выявленный характер поведения параметров его плазмы.

Ключевые слова: разряд унипольярного пробоя газа, неравновесная плазма, диагностика плазмы, функция распределения электронов по энергиям.

УДК: 537.525. PACS: 52.50.Dg, 52.50.Nr, 52.80.-s, 52.80.Tn.

Введение

Разработка новых источников плазмы для различных применений, в частности плазменных технологий, атомно-водородной энергетики остается актуальной задачей. Предметом экспериментального изучения настоящей работы являются физический механизм и свойства плазмы малоизученного разряда УПГ с единственным электродом, внешним по отношению к содержащей плазму изолированной полости. В центре внимания находится электронный энергетический спектр неравновесной газоразрядной плазмы, обладающей выраженными каталитическими свойствами в отношении многочисленных физико-химических процессов.

1. Экспериментальная установка и методика измерений

В экспериментах использовалась цилиндрическая стеклянная трубка длиной 80 мм и внешним диаметром 35 мм, наполненная воздухом при давлении 0.5 Торр и содержащая электростатический зонд с задерживающей сеткой С и коллектором К (рис. 1).

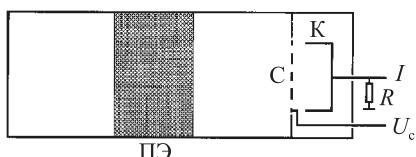


Рис. 1. Разрядная трубка. ПЭ — покрытие-электрод в виде сетки снаружи поверхности трубы, С — задерживающая сетка, К — коллектор

Разряд УПГ возбуждался импульсами потенциала отрицательной полярности, которые с частотой следования $f = 15$ кГц подавались на единственное покрытие — электрод в виде металлической сетки с ячейкой в 1×1 мм и шириной 25 мм, расположенной поверх

стеклянной стенки трубы. Амплитуда импульсов потенциала $\phi = 2.3$ кВ, длительность $\tau = 18$ мкс. На сетку С подавался изменяемый отрицательный потенциал $\phi_m = -3$ В $\div -30$ В. С помощью нагрузочного сопротивления $R = 600$ Ом измерялся ток коллектора I .

В работе исследовался спектр излучения разряда УПГ с помощью спектрографа ИСП-51, фотоумножителя ФЭУ-17А и компьютерного осциллографа DSO-2100, работавшего в режиме самописца.

С помощью стандартных методик в работе были получены функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и плотности электронов n_e газоразрядной плазмы. Вследствие большей подвижности электронов по сравнению с ионами (отрицательными) ток зонда I определялся только электронами. При увеличении задерживающего отрицательного потенциала сетки ϕ_m ток I уменьшался. Поскольку потенциал сетки ϕ_m определяет максимальную энергию E задерживаемых электронов $E = e\phi_m$, зависимость тока коллектора от потенциала сетки $I(\phi_m)$ (тормозная характеристика) позволяет определить распределение электронов по энергиям $f(E)$ из производной тормозной характеристики $dI/d\phi_m$ [1]:

$$f(E) = \frac{dn}{dE} = \frac{2}{e^2} \sqrt{\frac{2m}{e\varphi_m}} \cdot \frac{1}{S\Omega_k} \cdot \frac{dI}{d\varphi_m},$$

где S — площадь входного окна коллектора, Ω_k — телесный угол входа коллектора, e — заряд электрона, m — масса электрона.

Из функции распределения $f(E) = dn/dE$ определялась концентрация электронов n_e в различные моменты времени согласно работе [1]:

$$n_e = \int_0^\infty \frac{dn}{dE} dE = \frac{2}{e} \sqrt{2m} \int_0^\infty \frac{dj}{dE} \cdot \frac{dE}{\sqrt{E}},$$

где $j = I/S$ — плотность тока коллектора.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментально исследовались поведение тока коллектора зонда, ФРЭЭ и спектр излучения разряда УПГ. Осциллограмма тока коллектора $I(t)$ (рис. 2) отражает динамику физических процессов в разряде. В данном случае внутренняя поверхность диэлектрика под ПЭ является катодом разряда. Главная особенность осциллограммы $I(t)$ — наличие двух максимумов в течение одного инициирующего разряда импульса потенциала ϕ .

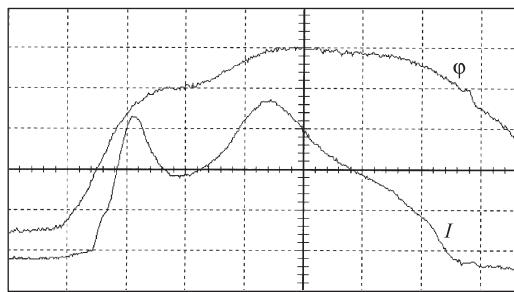


Рис. 2. Импульсы инициирующего разряда потенциала (вверху) и тока коллектора (внизу). Развертка 2 мкс/дел, разрешение (вертикальная шкала) — 500 В/дел для потенциала и 20 мА/дел для тока (осциллограммы перевернуты)

Первый максимум в начальной стадии развития разряда ($t \sim 2$ мкс) объясняется возникновением пробоя газа и формированием объемного заряда в разряде. Этот отрезок времени характеризуется максимальными значениями напряженности электрического поля и интенсивными объемными процессами ионизации и возбуждения газа. Следующий после первого максимума спад тока I и достижение минимума через 4 мкс объясняется возникновением в трубке газоразрядной плазмы, которая экранирует электрическое поле инициирующего импульса потенциала и замедляет процессы ионизации в объеме и транспорта зарядов к зонду. Поле концентрируется в области близи ПЭ.

Появление второго максимума осциллограммы $I(t)$ объясняется тем, что, через 2–4 мкс после возникновения плазмы в трубке положительные ионы приходят на отрицательно заряженную поверхность диэлектрика под ПЭ. Бомбардировка диэлектрика ионами вызывает эмиссию электронов с плотностью, близкой к таковой в случае эмиттера — металлического электрода [2]. Эмиттированные электроны ускоряются большим приэлектродным напряжением, превращаясь в высокоэнергетичные электронные пучки, направленные к центру разряда. В результате возникают интенсивные процессы ионизации и возбуждения газа пучками и возрастает ток на коллекторе.

Ранее было установлено, что при создании разряда УПГ импульсами положительной полярности в осциллограмме тока коллектора $I(t)$ второй максимум отсутствует [3]. Это понятно, так как на активном электроде с положительным потенциалом процесс электронной эмиссии не возникает.

Характерной особенностью осциллограммы $I(t)$ является быстрое уменьшение тока коллектора еще до начала уменьшения амплитуды импульса потенциала.

ла ϕ (рис. 2). Такое поведение тока I обусловлено рядом факторов с учетом того, что разрядное напряжение создается высоким отрицательным потенциалом (и соответственно поверхностным отрицательным зарядом) поверхности диэлектрика под ПЭ. Поверхностный отрицательный заряд уменьшается вследствие: 1) поверхностной рекомбинации положительных ионов с электронами; 2) электронной эмиссии, вызванной бомбардировкой ионами; 3) последующего уменьшения амплитуды импульса потенциала ϕ .

Следует обратить внимание на уменьшение скорости спада тока I после второго максимума (рис. 2), что будет объяснено ниже на основании дополнительных данных.

Для расчета ФРЭЭ на осциллограммах $I(t, \phi_m)$ были выбраны характерные моменты времени, соответствующие первому максимуму (2 мкс), минимуму (4 мкс), второму максимуму (7 мкс) и участку спада тока коллектора (10 мкс).

Вид полученных ФРЭЭ представлен на рис. 3. Следует отметить, что ФРЭЭ определялись в пристеночной области плазмы. Однако можно считать, что в центральной части разряда вид ФРЭЭ был аналогичный. Ранее было установлено [4], что в плазме разрядов низкого давления при выполнении условия $pR < (1-10)$ Торр·см (p — давление газа, R — расстояние между электродами) ФРЭЭ является нелокальной, т. е. сохраняет свой вид в пространстве. В условиях наших экспериментов $pR = 4$ Торр·см.

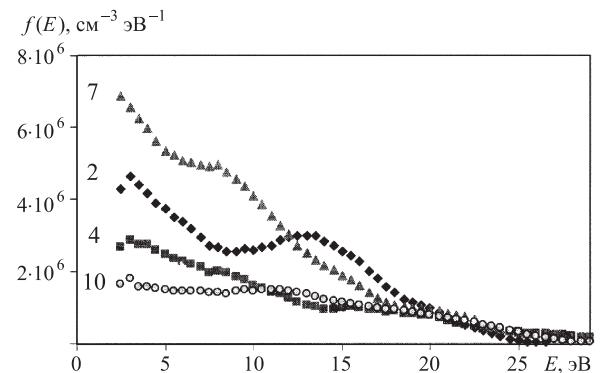


Рис. 3. Функции распределения электронов по энергиям. Цифры соответствуют интервалу в мкс от начала импульса потенциала ϕ

Для удобства анализа ФРЭЭ были построены в полулогарифмическом масштабе, где максвелловское распределение имеет вид прямой линии (рис. 4). При этом для каждого момента времени было рассчитано максвелловское распределение, наиболее близкое к экспериментальному, с соответствующей температурой электронов T_e .

Значения электронной концентрации n_e для различных моментов времени приведены в таблице.

Концентрация электронов n_e в течение импульса потенциала ϕ

Время	2 мкс	4 мкс	7 мкс	10 мкс
$n_e, \text{ см}^{-3}$	$5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$

Полученные значения концентрации соответствуют призондовой области и должны быть меньше плотности

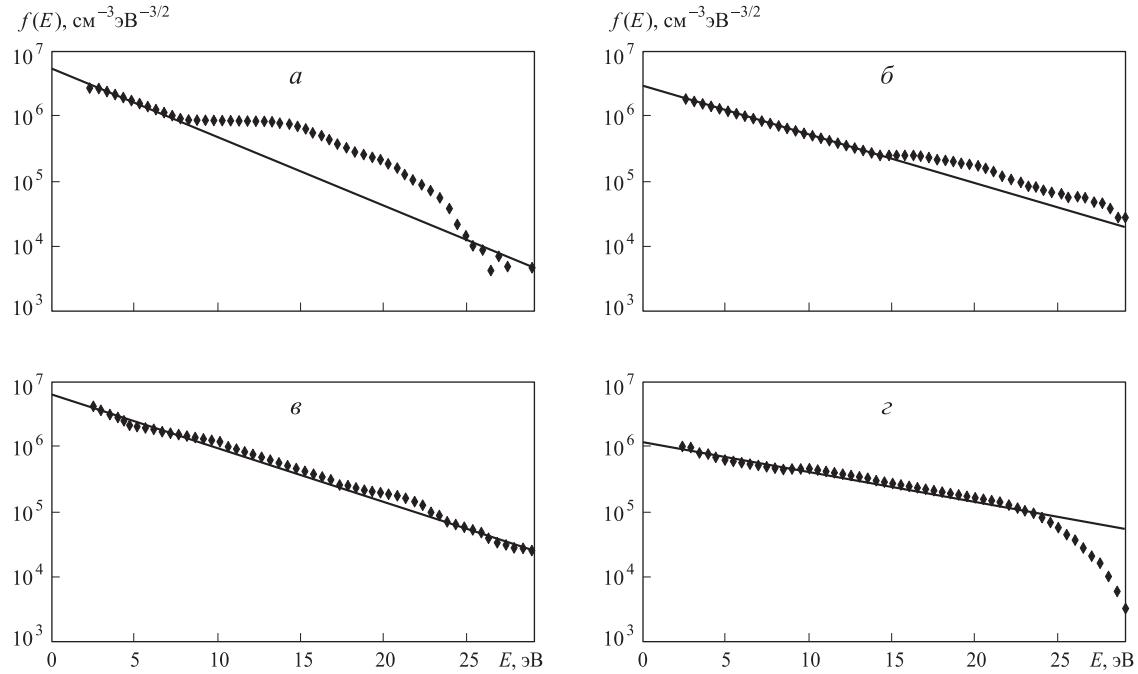


Рис. 4. Приведенные функции распределения электронов по энергии в полулогарифмическом масштабе в различные моменты времени t от начала импульса потенциала: $a - t = 2$ мкс, $T_e = 4.1$ эВ; $b - t = 4$ мкс, $T_e = 5.8$ эВ; $c - t = 7$ мкс, $T_e = 5.3$ эВ; $d - t = 10$ мкс, $T_e = 9.5$ эВ

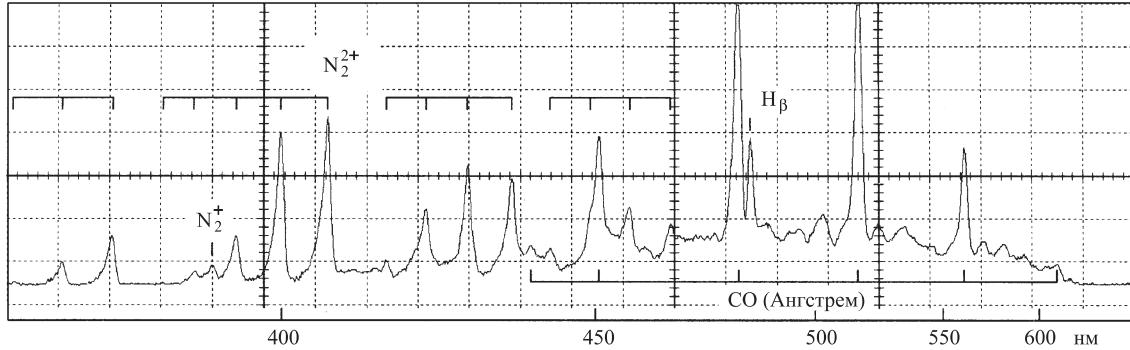


Рис. 5. Спектр излучения разряда УПГ в воздухе при давлении $p = 0.5$ Торр, амплитуда потенциала отрицательного импульса $\phi = 2.3$ кВ

электронов в центре разряда, где интенсивность процесса ионизации газа максимальна. Из качественных наблюдений свечения разряда можно допустить, что в окрестности зонда концентрация n_e уменьшается на порядок величины.

Приведенный на рис. 5 оптический спектр излучения разряда УПГ в воздухе показывает, что основной вклад в свечение вносят возбужденные молекулы азота N_2 (вторая положительная система $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ с потенциалом возбуждения от 11.2 до 12.1 эВ), молекулы оксида углерода CO (система Ангстрема с потенциалом возбуждения от 10.8 до 11.9 эВ), наблюдается заметная линия водорода H_β . При повышении амплитуды инициирующего разряд потенциала φ наблюдалось резкое увеличение интенсивности излучения линий CO. Наблюдаемый спектр излучения обусловлен присутствием в воздухе остаточных паров воды и углекислого газа CO_2 .

Согласно полученным результатам (рис. 3, 4), вид ФРЭ существенно зависит от момента времени в тече-

ние импульса потенциала φ . В начале импульса, когда максимальна напряженность электрического поля, происходит пробой газа, создается ионизованный газ, ФРЭ сильно неравновесна и обогащена сверхтепловыми электронами в интервале энергий 8–25 эВ (рис. 4, a). При этом низкоэнергетическую часть плотности электронов условно можно характеризовать температурой $T_e = 4.1$ эВ. Как известно [5], в этих условиях также интенсивно возбуждаются электронно-колебательные энергетические уровни молекул, оказывающие сильное катализическое влияние на все физико-химические процессы в плазме.

По мере развития разряда в период 2–7 мкс после начала импульса потенциала φ упомянутая ранее группа сверхтепловых электронов исчезает (рис. 4, b, c). Это объясняется наличием большого количества физико-химических процессов в плазме (возбуждение электронно-колебательных уровней, ионизация, диссоциация, химические реакции), энергетические пороги которых

находятся как раз в пределах энергетического диапазона исследуемых ФРЭЭ [5, 6].

Поведение средней электронной температуры T_e во времени (рис. 4) можно объяснить следующим образом. В процессе пробоя основная энергия электрического поля вкладывается в ионизацию, внутренние энергетические степени свободы молекул и ускорение зарядов. Поэтому средняя энергия теплового движения относительно невелика (2 мкс — $T_e = 4.1$ эВ). При завершении пробоя ускоренные электроны релаксируют по импульсу и энергии, обогащая средний интервал энергий (4 мкс — $T_e = 5.8$ эВ). По мере включения в поддержание разряда пучковой ионизации должна проявляться тенденция к снижению T_e в такой плазме [7] (7 мкс — $T_e = 5.3$ эВ). Наконец, резкое увеличение T_e во время спада тока коллектора (10 мкс — $T_e = 9.5$ эВ) объясняется освобождением значительной энергии, запасенной в электронно-колебательно возбужденных уровнях молекул. Действительно, характерные времена жизни возбужденных состояний составляют, например, для N_2 ($B^3\Pi_g$) — 6.5 мкс, N_2^+ ($A^3\Pi_{ui}$) — 14 мкс, O_2 ($A^3\Sigma_u^+$) — 20 мкс [6]. Большая энергия, запасенная в метастабильных состояниях N_2 ($A^3\Sigma_u^+$), N_2 ($a'^1\Sigma_u^-$), N_2 ($a^1\Pi_g$), N_2 ($E^3\Sigma_g^+$), O_2 ($b^1\Sigma_g^+$), также высвобождается при сверхупругих столкновениях электронов с метастабилями.

Следует отметить, что наблюдающееся заметное замедление спада тока коллектора I в конце импульса потенциала (рис. 2) также объясняется рассмотренным повышением электронной температуры T_e , увеличивающим поток электронов в направлении зонда. В связи с ростом T_e увеличиваются диффузионные потери на стенках трубки высокоэнергетичных электронов, что наблюдается на рис. 4, г.

Установленная в настоящей работе возможность эффективной наработки оксида углерода в разряде УПГ с последующей конвертацией его в водород представляет интерес для атомно-водородной энергетики [8].

Change of the electron energy distribution function in the discharge plasma of the unipolar breakdown of gas

V. P. Savinov^{1,a}, A. K. Sukhov^{2,b}, T. P. Kopeikina²

¹Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²Faculty of Physics and Mathematics, N.A. Nekrasov Kostroma State University. 1-st May str. 14, Kostroma 156961, Russia.

E-mail: ^asavinov1983@yahoo.com, ^bprikmath@ksu.edu.ru.

It is experimentally demonstrated that the electron energy distribution function (EEDF) character and the electron density in plasma of insufficiently studied pulse discharge of the unipolar breakdown of gas (UBG) essentially change in time. The specific behavior of the plasma parameters discovered by us can be explained with the help of proposed discharge UBG physical model.

Keywords: the discharge of a unipolar breakdown of gas, nonequilibrium plasma, plasma diagnostic, an electron energy distribution function.

PACS: 52.50.Dg, 52.50.Nr, 52.80.-s, 52.80.Tn.

Received 21 April 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2009).

Сведения об авторах

1. Савинов Владимир Павлович — докт. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: savinov1983@yahoo.com.
2. Сухов Андрей Константинович — канд. физ.-мат. наук, доцент каф. прикл. матем. и информ. технологий КГУ им. Н. А. Некрасова; тел.: (4942) 34-41-96, e-mail: priklmath@ksu.edu.ru.
3. Копейкина Татьяна Павловна — аспирантка каф. теор. физики КГУ им. Н. А. Некрасова; e-mail: tat_kop@mail.ru.

Заключение

На основании результатов проведенного экспериментального исследования разряда УПГ, возбуждаемого импульсами потенциала отрицательной полярности, предложена физическая модель данного разряда, в которой определяющую роль играют граничные процессы — эмиссия электронов с поверхности диэлектрика под внешним электродом и генерация приэлектродных электронных пучков. Дано объяснение различия механизмов разряда УПГ, возбуждаемого импульсами потенциала отрицательной и положительной полярности. Установлены энергетический интервал обогащения ФРЭЭ сверхтепловыми электронами и особенности динамики вида ФРЭЭ и плотности электронов в разряде. Обнаружено значительное повышение электронной температуры в конце разряда, обусловленное выделением энергии, запасенной в электронно-колебательно возбужденных энергетических уровнях молекул. Задокументирован процесс интенсивной наработки моноксида углерода с последующей конвертацией его в водород, представляющий интерес для практических применений в плазмохимии и атомно-водородной энергетике.

Список литературы

1. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М., 1969.
2. Ковалевский В.Л., Савинов В.П. // Физика плазмы. 1994. **20**. С. 322.
3. Герасимов И.В., Сухов А.К. // Вестник КГУ имени Н. А. Некрасова. 2005. № 11. С. 5.
4. Цендин Л.Д. // ЖЭТФ. 1974. **66**. С. 1638.
5. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М., 1984.
6. Радиге А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М., 1980.
7. Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. М., 1978.
8. Белоусов И.Г., Легасов В.А., Русанов В.Д. // Вопросы атом. науки и техники. Сер. Ат.-водор. энергетика. 1977. № 2(3). С. 158.