

УДК 533.9.02, 533.915, 533.92 (575.2) (04)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА  
В СМЕСИ 0.05 Хе /0.95 Не

*С.В. Автаева* – канд. физ.-мат. наук, доцент

Представлены результаты расчета установившейся динамики характеристик барьерного разряда в смеси 0.95 Не/0.05 Хе в рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения. Проанализировано развитие барьерного разряда.

*Ключевые слова:* барьерный разряд, одномерная гидродинамическая модель, смесь Не/Хе.

В настоящее время диэлектрические барьерные разряды (БР) в смесях инертных газов широко используются в качестве источников вакуумного ультрафиолетового излучения в эксимерных лампах и плазменных дисплейных панелях (ПДП) и являются объектом интенсивных исследований [1–6]. Наиболее часто в цветных ПДП используется смесь Хе-Не с концентрацией ксенона порядка 3–10%. Хе используется в качестве источника ВУФ излучения, а Не – как буферный газ, снижающий напряжение пробоя [3].

Существенной частью улучшения технологии ПДП является понимание основных физических процессов динамики плазмы, распределения энергии электронов и взаимодействия плазмы с поверхностью в ячейке ПДП. Это подтверждается резким увеличением в последние годы числа научных работ, публикуемых по этой проблеме в трудах конференций и научных журналах как исследовательскими институтами, так и исследователями, представляющими различные компании.

В данной работе в рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения проведен расчет установившейся динамики характеристик барьерного разряда в смеси 0.05Хе/0.95Не между параллельными плоскими электродами, покрытыми диэлектрическими слоями; приводится краткое описание диффузионно-дрейфовой модели БР и кинетической схемы элементарных физико-химических процессов в смеси неона и ксенона; рассматривается развитие газоразрядного процесса и характеристики БР, проводится анализ кинетической схемы.

**Одномерная диффузионно-дрейфовая модель БР.** Математическая модель БР основана на континуальном описании плазмы, использующем диффузионно-дрейфовое приближение для потоков частиц, и подробно описана в [7]. Вследствие малой подвижности ионов, диффузионно-дрейфовое движение ионов определяется локальным электрическим полем, а их концентрации удовлетворяют стандартным одномерным уравнениям непрерывности. Электронная компонента плазмы описывается уравнениями непрерывности и баланса энергии электронов, чем приближенно учитывается нелокальность функции распределения электронов по энергиям [8]. Напряженность электрического поля определяется через скалярный потенциал, удовлетворяющий уравнению Пуассона. Изменение концентраций нейтральных частиц во времени обусловлено их рождением и гибелью в элементарных физико-химических процессах, заданных кинетической схемой. Система уравнений дополняется граничными условиями на поверхности диэлектрических барьеров. Начальные условия задаются в виде однородных в пространстве распределений концентраций компонентов, энергии электронов и отсутствия электрического поля и поверхностных зарядов.

Транспортные коэффициенты электронов предварительно рассчитываются как функции средней энергии электронов с помощью программы Bolzig+ [9, 10]. Значения подвижностей ионов взяты из [11].

Численное решение системы дифференциальных уравнений проводится методом прямых [12] с полудискретизацией в пространстве ме-

тодом контрольного объема [13] на квазиравномерной сетке, учитывающей возможность возникновения больших градиентов зависимых переменных вблизи диэлектрических барьеров. Плотности конвективно-диффузионных потоков аппроксимируются экспоненциальной схемой [14].

Использовались две кинетические схемы элементарных физико-химических процессов в смеси 0.05Xe-0.95Ne. Первая кинетическая схема включает 17 компонент: атомы Xe и Ne в основном состоянии, атомы ксенона в метастабильном  $Xe_m^*(^3P_2)$ , резонансном  $Xe_r^*(^3P_1)$  и вышележащих возбужденных  $Xe^{**}$  состояниях; атомы неона в возбужденных состояниях  $Ne^*$ ,  $Ne^{**}$ , молекулы  $Xe_2^*(^3\Sigma_u^+)$ ,  $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+)$ ,  $Xe_2^{**}(O_u^+)$ ,  $Ne_2^*$ ; атомарные  $Xe^+$ ,  $Ne^+$ , молекулярные  $Xe_2^+$ ,  $Ne_2^+$  и комплексные  $NeXe^+$  ионы и электроны. Из второй кинетиче-

ской схемы были исключены атомы  $Ne^{**}$  и молекулы  $Ne_2^*$ , поскольку, как показали расчеты, их концентрации в БР в смеси 0.05Xe-0.95Ne малы и можно ожидать, что реакции с их участием не оказывают заметного влияния на оптические и электрические характеристики разряда. Обе кинетические схемы представлены в табл. 1, а используемые в табл. 1 обозначения приведены в табл. 2. В табл. 1 уравнения, включенные в соответствующую схему, отмечены знаком “+”.

Для зависимостей констант скоростей  $k_i(\varepsilon)$  реакций с участием электронов от средней энергии электронов используются аналитические или табличные зависимости, здесь  $\varepsilon$  – энергия электронов. Последние предварительно рассчитываются усреднением сечений соответствующих процессов по функции распределения электронов по энергиям с помощью кода Bolzig+ [9, 10].

Таблица 1

Схема и константы скоростей элементарных процессов в смеси Ne/Xe

Реакция	Примечание	Схема		Константа скорости	Источ-ник
		1	2		
1	2	3	4	5	6
$e+Xe \rightarrow e+Xe$	Передача импульса	+	+	$k(\varepsilon)$	[15]
$e+Ne \rightarrow e+Ne$	«	+	+	$k(\varepsilon)$	[15]
$e+Xe \rightarrow 2e+Xe^+$	Прямая ионизация	+	+	$k(\varepsilon)$	[16]
$e+Ne \rightarrow 2e+Ne^+$	«	+	+	$k(\varepsilon)$	[15]
$2e+Xe^+ \rightarrow e+Xe^{**}$	Электрон-ионная рекомбинация	+	+	$5.4 \times 10^{-27} T_e^{-4.5} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[17]
$2e+Ne^+ \rightarrow e+Ne^*$	«	+	+	$1.35 \times 10^{-27} T_e^{-4.5} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[17]
$2e+Ne^+ \rightarrow e+Ne^{**}$	«	+	+	$1.35 \times 10^{-27} T_e^{-4.5} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[17]
$2e+Xe,^+ \rightarrow e+Xe^++Xe$	«	+	+	$5.4 \times 10^{-27} T_e^{-4.5} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[17]
$2e+Ne,^+ \rightarrow e+Ne^++Ne$	«	+	+	$5.4 \times 10^{-27} T_e^{-4.5} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[17]
$e+Xe_m^* \rightarrow 2e+Xe^+$	Ступенчатая ионизация	+	+	$7.85 \times 10^{-8} \varepsilon^{0.71} \times \exp(-3.77/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Xe_r^* \rightarrow 2e+Xe^+$	«	+	+	$7.85 \times 10^{-8} \varepsilon^{0.71} \times \exp(-3.77/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Xe^{**} \rightarrow 2e+Xe^+$	«	+	+	$2.15 \times 10^{-7} \varepsilon^{0.71} \times \exp(-2.4/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Ne^* \rightarrow 2e+Ne^+$	«	+	+	$4.1 \times 10^{-8} \varepsilon^{0.74} \times \exp(-5.0/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Ne^{**} \rightarrow 2e+Ne^+$	«	+	+	$1.28 \times 10^{-13} \varepsilon^{0.74} \times \exp(-3.1/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Xe \rightarrow e+Xe_m^*$	Возбуждение	+	+	$k(\varepsilon)$	[15]
$e+Xe \rightarrow e+Xe_r^*$	«	+	+	$k(\varepsilon)$	[15]
$e+Xe \rightarrow e+Xe^{**}$	«	+	+	$2.8 \times 10^{-8} \varepsilon^{0.725} \times \exp(-8.73/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Ne \rightarrow e+Ne^*$	«	+	+	$5.05 \times 10^{-9} \varepsilon^{1.69} \times \exp(-16.6/\varepsilon) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]

1	2	3	4	5	6
$e+Ne \rightarrow e+Ne^{**}$	«	+		$5.85 \times 10^{-10} \bar{\epsilon}^{0.48} \times \exp(-18.5/\bar{\epsilon}) \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$e+Xe_2^+ \rightarrow Xe^{**}+Xe$	Диссоциативная рекомбинация	+	+	$2.0 \times 10^{-7} T_e^{-0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$e+Ne_2^+ \rightarrow Ne^++Ne$	«	+	+	$3.7 \times 10^{-8} T_e^{-0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[19]
$e+NeXe^+ \rightarrow Xe^{**}+Ne$	«	+	+	$8.0 \times 10^{-8} T_e^{-0.5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$e+Xe_2^+ \rightarrow Xe^++Xe+e$	Диссоциация иона димера	+		$k(\epsilon)$	[20]
$Ne_2^++Xe+Ne \rightarrow Xe^++3Ne$	Ионно-атомные реакции	+	+	$4.0 \times 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$NeXe^++Xe \rightarrow Xe_2^++Ne$	«	+	+	$5.0 \times 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$NeXe^++Xe \rightarrow Xe^++Ne+Xe$	«	+	+	$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe^++2Xe \rightarrow Xe_2^++Xe$	Ионная конверсия	+	+	$2.5 \times 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Ne^++2Ne \rightarrow Ne_2^++Ne$	«	+	+	$4.4 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Xe^++Xe+Ne \rightarrow Xe_2^++Ne$	«	+	+	$1.5 \times 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Ne^++Ne+Xe \rightarrow Ne_2^++Xe$	«	+	+	$8.0 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Xe^++2Ne \rightarrow NeXe^++Ne$	«	+	+	$1.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Ne^++Ne+Xe \rightarrow NeXe^++Ne$	«	+	+	$1.0 \times 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15, 19]
$Ne^++Ne^* \rightarrow Ne^++Ne+e$	Пеннинговская ионизация	+		$5.0 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[21]
$Ne^++Xe \rightarrow Xe^++Ne+e$	«	+	+	$7.5 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Ne^++Xe \rightarrow NeXe^++e$	«	+	+	$2.3 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe^{**}+Xe \rightarrow Xe_{m,r}^*+Xe$	Девозбуждение атомами	+	+	$5.0 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe^{**}+Ne \rightarrow Xe_{m,r}^*+Ne$	«	+	+	$1.0 \times 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_r^*+Xe \rightarrow Xe_m^*+Xe$	«	+	+	$2.18 \times 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_m^*+Xe \rightarrow Xe_r^*+Xe$	«	+	+	$1.26 \times 10^{-16} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_r^*+Ne \rightarrow Xe_m^*+Ne$	«	+	+	$3.11 \times 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_m^*+Ne \rightarrow Xe_r^*+Ne$	«	+	+	$1.62 \times 10^{-16} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Ne^{**}+Ne \rightarrow Ne^*+Ne$	«	+		$7.0 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[18]
$Xe_2^{**}+Xe \rightarrow Xe_2^{*(1)}+Xe$	«	+	+	$2.65 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_m^*+2Xe \rightarrow Xe_2^{*(3)}+Xe$	Конверсия в эксимеры	+	+	$8.53 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_r^*+2Xe \rightarrow Xe_2^{**}+Xe$	«	+	+	$1.55 \times 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Ne^++Ne+Ne \rightarrow Ne_2^++Ne$	«	+		$4.0 \times 10^{-34} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[19]
$Xe_r^*+Xe+Ne \rightarrow Xe_2^{**}+Ne$	«	+	+	$4.07 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_m^*+Xe+Ne \rightarrow Xe_2^{*(3)}+Ne$	«	+	+	$1.35 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Ne^++Ne+Xe \rightarrow Ne_2^++Xe$	«	+		$8.0 \times 10^{-34} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[19]
$Xe^{**}+Xe+Ne \rightarrow Xe_2^{*(3,1)}+Ne$	«	+	+	$0.8 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$	[19]
$Xe^{**} \rightarrow Xe_r^*+h\nu$	Спонтанное излучение	+	+	$2.7 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe^{**} \rightarrow Xe_m^*+h\nu$	«	+	+	$2.53 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_r^* \rightarrow Xe+h\nu$	«	+	+	$2.7 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_2^{*(1)} \rightarrow 2Xe+h\nu$	«	+	+	$5.0 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_2^{*(3)} \rightarrow 2Xe+h\nu$	«	+	+	$1.66 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Xe_2^{**} \rightarrow 2Xe+h\nu$	«	+	+	$9.0 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$	[15]
$Ne_2^* \rightarrow Ne+Ne+h\nu$	«	+		$7.50 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$	[20]
$Ne^* \rightarrow Ne+h\nu$	«	+		$0.5 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$	[21]
$Ne^{**} \rightarrow Ne^*+h\nu$	«	+		$0.12 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$	[21]

$T_e$  – температура электронов в эВ,  $\bar{\epsilon}$  – средняя энергия электронов в эВ.

Обозначения к табл. 1

Компонент	Конфигурация	Терм [L, S]-связь	Энергия, эВ	Стат. вес	Примечание
Хе	5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>	<sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0	1	Основное состояние
Хе <sub>m</sub> <sup>*</sup>	( <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ) 6s	( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )	8.31	5	Метастабильное состояние
Хе <sub>r</sub> <sup>*</sup>	( <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> ) 6s	( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )	8.44	3	Резонансное состояние
Хе <sup>**</sup>			≈9.44		Вышележащие возбужденные уровни
Хе <sub>2</sub> <sup>*(3)</sup>		( <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )1 <sub>u</sub>	7.91		Метастабильное состояние
Хе <sub>2</sub> <sup>*(1)</sup>		( <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )0 <sub>u</sub> <sup>+</sup>	8.05		Резонансное состояние
Хе <sub>2</sub> <sup>**</sup>		( <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )0 <sub>u</sub> <sup>+</sup>	8.31		Возбужденные колебательные состояния ( <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> )0 <sub>u</sub> <sup>+</sup>
Хе <sup>+</sup>	5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	12.08		Атомарный ион
Хе <sub>2</sub> <sup>+</sup>		<sup>2</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	11.1		Ион димера
Не	2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	<sup>1</sup> S <sub>0</sub>	0	1	Основное состояние
Не <sup>*</sup>	3s, 3s'		16.65	12	3s, s' возбужденные уровни
Не <sup>**</sup>	3p, 3p'		18.62	36	3p, p' возбужденные уровни. В схему 2 не включены
Не <sub>2</sub> <sup>*</sup>		<sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	15.5		Возбужденные молекулы. В схему 2 не включены
Не <sup>+</sup>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	21.56		Атомарный ион
Не <sub>2</sub> <sup>+</sup>		<sup>2</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	20.46		Ион димера
НеХе <sup>+</sup>			16.0		Комплексный ион
e <sup>-</sup>					Электрон

Хе<sup>+</sup>(<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>) с энергией ионизации 13.4 эВ и Не<sup>+</sup>(<sup>2</sup>P<sub>1/2</sub>) не учитываются.

### Результаты и обсуждение

В рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения проведен расчет установившейся динамики характеристик барьерного разряда в смеси 0.05 Хе – 0.95 Не между параллельными плоскими электродами, покрытыми диэлектрическими слоями с диэлектрической проницаемостью 5. Внешние параметры разряда: толщина диэлектрических слоев – 0,2 мм; ширина разрядного промежутка – 0,4 мм; давление – 350 Тор; напряжение питания – гармонический сигнал с частотой 100 кГц и амплитудой 400 В, температура газа – 300 К.

На рис. 1 показаны подаваемое на электроды напряжение, падение потенциала на разрядном промежутке, падение потенциала на диэлектрических барьерах ('memory' voltage) и плотность тока БР. Электрические характеристики БР в смеси 0.05 Хе – 0.95 Не, рассчитанные с использованием двух кинетических схем, полностью идентичны. Как видно на рисунке, каждые полпериода подводимого напряжения возникает один короткий импульс тока, после которого плазма распадается. Ограничение тока в БР обу-

словлено электрическим зарядом (рис. 2), накапливающимся на поверхности диэлектрических барьеров во время прохождения импульса тока.

При прохождении импульса тока (активная фаза разряда) к одному из диэлектрических барьеров движется волна ионизации, на ее фронте средняя энергия электронов достаточно высока, поэтому при прохождении волны ионизации преобладают процессы прямой ионизации и прямого возбуждения атомов, и это приводит к резкому уменьшению средней энергии электронов за фронтом волны ионизации. Резкое повышение концентрации атомарных ионов и возбужденных атомов сопровождается конверсией в эксимеры и ионной конверсией. Процессы рекомбинации при прохождении волны ионизации не играют заметной роли, поскольку константы скорости этих процессов с ростом энергии электронов падают, к тому же у фронта волны ионизации концентрация заряженных частиц достаточно низка.

Во время послесвечения (пассивная фаза разряда), следующего за импульсом тока, плазма распадается со скоростью, определяемой процессами рекомбинации и диффузии. Во время этой

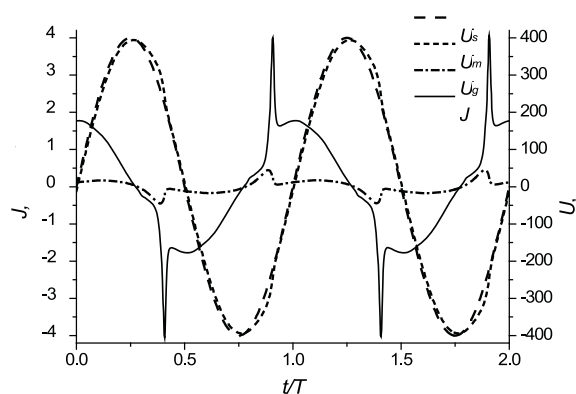


Рис. 1. Подаваемое на электроды напряжение  $U_s$ , падение потенциала на разрядном промежутке  $U_g$ , падение потенциала на диэлектрических барьерах  $U_m$  и плотность тока барьерного разряда  $J$ .

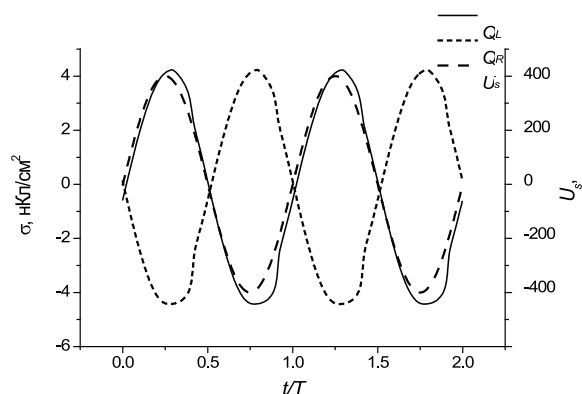


Рис. 2. Напряжение питания БР и динамика зарядов на поверхности диэлектрических барьеров.

фазы ток, протекающий через разряд, достаточно мал, так же как и падение напряжения на разрядном промежутке. Средняя энергия электронов падает до 1 эВ и ниже, скорости прямой ионизации и прямого возбуждения атомов малы. Вследствие процессов ионной конверсии концентрация атомарных ионов резко падает и преобладающими ионами становятся молекулярные ионы.

Приведенная напряженность электрического поля  $E$  и средняя энергия электронов  $\epsilon$  как функции  $z$  и  $t$  представлены на рис. 3 и 4. Видны два максимума  $E$  и  $\epsilon$ , появляющиеся в каждом из полупериодов вблизи одного из диэлектрических барьеров. Более высокий и узкий максимум соответствует фазе импульса тока, а второй – более слабый, широкий – фазе послесвечения.

В момент прохождения импульса тока концентрации всех компонент плазмы у поверхности диэлектрического барьера, к которому направлена волна ионизации, резко увеличиваются. На рис. 5 представлены пространственно-временные распределения концентрации электронов и атомов ксенона в резонансном состоянии. На рис. 6 представлены усредненные за период распределения концентраций  $N$  заряженных и нейтральных частиц в межэлектродном промежутке. Максимальные средние за период концентрации компонент плазмы наблюдаются на расстоянии  $\sim 0,05-0,1$  мм от поверхности диэлектрика.

Несмотря на преобладание атомов неона в смеси 0.95 Ne/0.05 Xe, концентрация ионов Ne<sup>+</sup> на несколько порядков меньше концентрации ионов Xe<sup>+</sup>, поскольку потенциалы ионизации (21.56 эВ) и возбуждения (16.65 и 18.62 эВ) атомов неона существенно больше потенциалов ионизации (12.08 эВ) и возбуждения (8.31, 8.44

и  $\approx 9.44$  эВ) атомов ксенона. Вклад атомарных ионов неона (так же как и молекулярных Ne<sub>2</sub><sup>+</sup>) в формирование электрических и оптических характеристик БР в смеси 0.95 Ne/0.05 Xe мал. В фазе импульса тока в кинетике электронов и атомарных ионов преобладает прямая ионизация, в фазе послесвечения – процессы ионной конверсии и диссоциативной рекомбинации. Молекулярные Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>, Ne<sub>2</sub><sup>+</sup> и комплексные NeXe<sup>+</sup> ионы образуются в результате ионной конверсии, перезарядки и пеннинговской ионизации и гибнут преимущественно в результате диссоциативной рекомбинации. Хотя в фазе импульса тока преобладающим ионом является ион Xe<sup>+</sup> и его концентрация близка к концентрации электронов, в среднем за период в центральной части разряда преобладающим ионом является Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>.

Среди возбужденных атомов и молекул в БР в смеси 0.05Xe-0.95Ne преобладают атомы ксенона в возбужденных состояниях. Концентрации эксимерных молекул ксенона существенно ниже концентраций возбужденных атомов, поэтому в излучении разряда преобладает излучение из резонансного состояния атомарного ксенона. Концентрации атомов неона в состоянии Ne<sup>\*\*</sup> и эксимерных молекул неона Ne<sup>\*</sup><sub>2</sub> много меньше концентраций возбужденных атомов и молекул ксенона. Как показали расчеты, исключение Ne<sup>\*\*</sup> и Ne<sup>\*</sup><sub>2</sub> из кинетической схемы незначительно сказывается на характеристиках плазмы, позволяя уменьшить число рассматриваемых элементарных физико-химических процессов и, тем самым, уменьшить время расчета установившихся характеристик БР на 20–25%. При использовании сокращенной кинетической схемы максимальные отличия наблюдаются для кон-

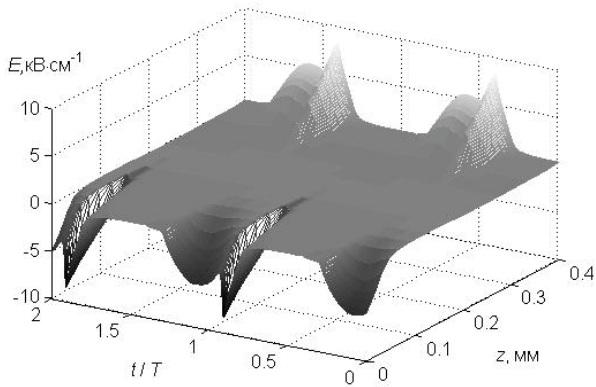


Рис. 3. Пространственно-временное распределение электрического поля.

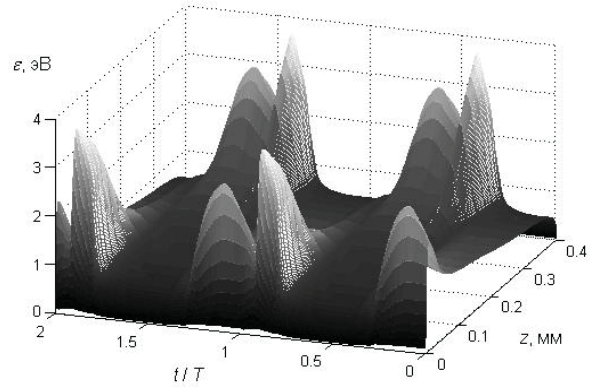


Рис. 4. Пространственно-временное распределение средней энергии электронов.

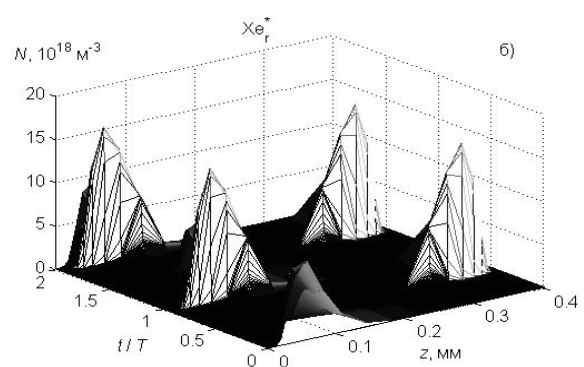
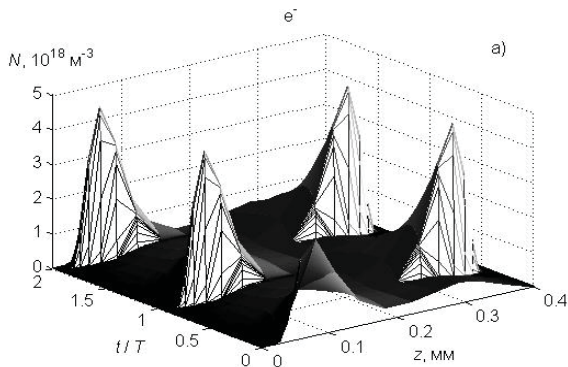


Рис. 5. Пространственно-временные распределения концентраций (а) электронов и (б) атомов ксенона в резонансном состоянии.

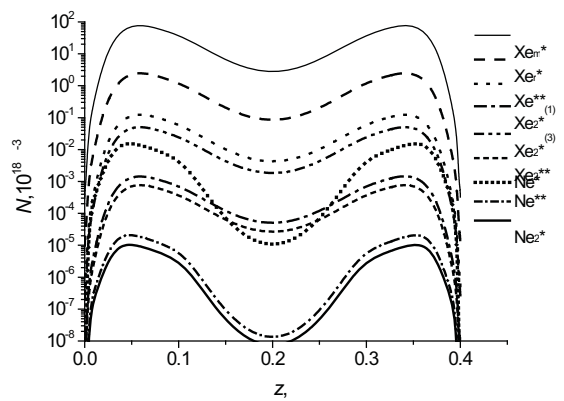
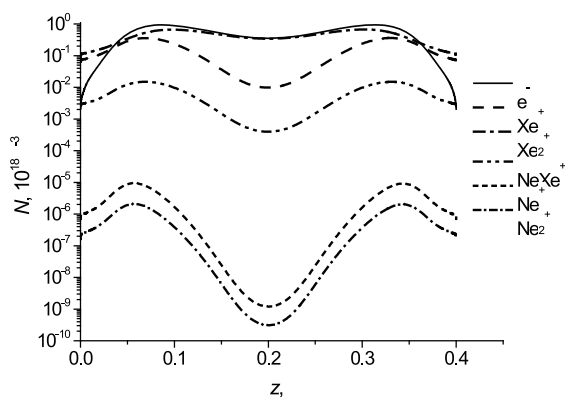


Рис. 6. Усредненные за период распределения в разрядном промежутке концентрации: а – заряженных компонент, б – нейтральных компонент.

центраций ионов неона  $Ne^+ \sim 5\%$ ,  $Ne_2^+ \sim 10\%$  во время активной фазы разряда. Различия между концентрациями остальных компонент плазмы и концентрациями ионов неона во время пассивной фазы разряда при расчетах с использованием двух кинетических схем не превышают 1%.

Важным вопросом при использовании БР в качестве источника света в ячейках ПДП является эффективность излучения [3]. В данной работе в рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения [7] эффективность излучения  $\eta_k$  для возбужденных частиц сорта  $k$  рассчитывается как отношение мощности их излучения к вкладываемой в разряд мощности. Результаты расчета эффективности излучения  $\eta_k$  на различных длинах волн и суммарная эффективность излучения  $\eta = \sum_k \eta_k$  представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эффективность излучения ( $\eta_k$ ) на различных длинах волн и суммарная эффективность излучения  $\eta = \sum_k \eta_k$  для схемы 1 и схемы 2

Излучающий компонент	$\lambda$ , нм	$\eta_k$ , %	
		Схема 1	Схема 2
$He_r^*$	147	5.19	5.17
$Ne^*$	Видимый свет	0.001	
$Ne^{**}$	УФ	0.001	
$He_2^{**}$	152	0.03	0.03
$He_2(^1\Sigma_u^+)$	172	1.10	1.10
$He_2(^3\Sigma_u^+)$	172	2.13	2.12
$Ne_2^*$	83	0.002	
$\eta$		8.45	8.43

Как видно из данных табл. 3, суммарная эффективность излучения БР составляет 8,45% при расчете со схемой 1, и – 8,43% при использовании схемы 2. Основную долю излучения составляет излучение атомов  $He_r^*$  (61%) и эксимеров  $He_2(^1\Sigma_u^+)$ ,  $He_2(^3\Sigma_u^+)$  (38% в сумме). На излучение атомов и эксимеров неона приходится менее 1% от суммарного излучения.

В рамках одномерного диффузионно-дрейфового приближения проведен расчет установившейся динамики характеристик барьерного разряда в смеси 0.05 Хе- 0.95 Не при давлении 350 Тор в газоразрядном зазоре толщиной 400 мкм. Показано, что при расчете характеристик БР эксимерные молекулы неона и атомы в высоколежащих возбужденных состояниях могут не учитываться, поскольку их учет не изменяет электрических и оптических характеристик разряда.

Основную долю излучения разряда составляет излучение атомов  $He_r^*$  и эксимеров  $He_2(^1\Sigma_u^+)$ ,  $He_2(^3\Sigma_u^+)$  ксенона. Излучение атомов и эксимеров неона составляет менее 1% от общего излучения. Суммарная эффективность излучения составляет 8,43–8,45%.

### Литература

1. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А. и др. // УФН. – 2003. – Т. 173. – №2. – С. 201.
2. Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Arslanbekov R.R. and Kolobov V.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – V. 37. – P. 2987.
3. Boeuf J.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – V. 36. – R53.
4. Oh J.-S. and Tachibana K. // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 98. – 103302.
5. Lanlan Yang, Yan Tu, Xiong Zhang et al. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2007. – V. 16. – P. 392.
6. Kim K.N., Jeong D.C., and Moon C.H. // JAP. – 2008. – V. 47. – №4. – P. 2259.
7. Автаева С.В., Кулумбаев Э.Б. // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34. – №6. – С. 497.
8. Иванов В.В., Манкелевич Ю.А., Прошина О.В. и др. // Физика плазмы. – 1999. – Т. 25. – №7. – С. 646.
9. BOLSIG+ 2005 CPAT: <http://www.codiciel.fr/plateforme/plasma/bolsig/bolsig.php>.
10. Hagelaar G.J.M. and Pitchford L.C. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2005. – V. 14. – P. 722.
11. Piscitelli D., Phelps A.V., Urquijo J., Basurto E. and Pitchford L.C. // Phys. Rev. E. – 2003. – V. 68. – 046408.
12. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978.
13. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. Allen D., Southwell R. // Quart. J. Mech. Appl. Math. – 1955. – V. 8. – P. 129.
15. Meunier J., Belenguer Ph., and Boeuf J.P. // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 78. – P. 731.
16. Oda A., Sakai Y., Akashi H. and Sugawara H. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – V. 32. – P. 2726.
17. Бойченко А.М., Держисев В.И., Жидков А.Г. и др. // Труды ИОФАН. – 1989. – Т. 21. – С. 44.
18. Johnson T.H., Cartland H.E., Genoni T.C. et al. // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 66. – 5707.
19. Kushner M., Rauf S. // J. Appl. Phys. – 1999. – V. 85. – №7. – P. 3460.
20. Eckstrom D.J., Nakano H.H., Lorents D.C. et al. // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64. – P. 1679.
21. Uhrlandt D. and Franke St. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2002. – V. 35. – P. 680.