УДК 537.538

А.А.КУДРЯВЦЕВ
старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета
А.В.МОРИН
аспирант кафедры общей и технической физики
А.С.МУСТАФАЕВ
профессор кафедры общей и технической физики

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПАРАМЕТРЫ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ В АРГОНЕ ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Проведен сравнительный анализ плазмохимических процессов в тлеющих разрядах высоких и низких давлений. На основе результатов численного моделирования определены процессы, играющие ведущую роль в формировании параметров тлеющих разрядов. Проверены соответствия между пространственным распределением основных характеристик тлеющих разрядов и распределением параметров ведущих плазмохимических процессов.

A comparative analysis of the plasma-chemical process in high- and low-pressure glow discharges is presented. Processes that determine parameters of glow discharges have been determined basing on numerical simulation results. Correlations between spatial distribution of the main glow discharge characteristics and distribution of the main plasma chemical processes are presented.

Параметры тлеющих разрядов определяются совокупностью большого числа элементарных процессов, среди которых неупругие столкновения электронов с возбужденными и невозбужденными атомами, неупругие столкновения атомов и ионов, процессы ассоциативной ионизации и диссоциативной рекомбинации и т.п.

В низкотемпературной плазме газовых разрядов процессами, приводящими к установлению баланса заряженных частиц, являются столкновения между частицами и уход на стенки и электроды [1, 3]. В результате столкновений происходит обмен энергией и импульсом, рождение и исчезновение тех или иных частиц плазмы. Уход заряженных частиц на стенки, наряду с процессами рекомбинации в объеме, приводит к гибели заряженных частиц.

Здесь проведен сравнительный анализ плазмохимических процессов в тлеющих разрядах высоких и низких давлений. На основе результатов численного моделирования выделены процессы, играющие ведущую роль в формировании параметров тлеющих разрядов. Проведены соответствия между пространственным распределением основных характеристик тлеющих разрядов и распределением параметров ведущих плазмохимических процессов.

Набор элементарных процессов используемых при моделировании тлеющих разрядов в аргоне при низких давлениях 3 Тор следующий:

Реакция	Процесс
$e + \mathrm{Ar} \rightarrow \mathrm{Ar} + e$	Упругие столкновения
$\mathrm{Ar} + e \rightarrow \mathrm{Ar}^+ + 2e$	Прямая ионизация
$\mathrm{Ar} + e \leftrightarrow \mathrm{Ar}^* + e$	Возбуждение метастабилей
$\mathrm{Ar}^* + e \rightarrow \mathrm{Ar}^+ + 2e$	Ступенчатая ионизация
$2\mathrm{Ar}^* \rightarrow \mathrm{Ar}^+ + \mathrm{Ar} + e$	Пенинговская ионизация
$\mathrm{Ar}^* \rightarrow \mathrm{Ar}$	Излучение

Перечень элементарных процессов учитываемых при моделировании тлеющих разрядов в аргоне при высоких давлениях (300 Тор) гораздо шире:

Реакция	Процесс
$e + Ar \rightarrow Ar + e$	Упругие столкновения
$Ar + e \leftrightarrow Ar^* + e$	Ar*-возбуждение
$Ar + e \leftrightarrow Ar^*r + e$	Ar*r-возбуждение
$Ar + e \leftrightarrow Ar^{**} + e$	Ar**-возбуждение
$Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	Прямая ионизация
$Ar^* + e \leftrightarrow Ar^{**} + e$	Возбуждение
$Ar^* + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	Ступенчатая ионизация 1
$Ar^*r + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	Ступенчатая ионизация 2
$Ar + e \rightarrow Ar + e$	Возбуждение
$Ar^{**} + Ar \rightarrow Ar^* + Ar$	Девозбуждение
$e + Ar^* \rightarrow E + Ar^*r$	Перемешивание
$E + Ar_2^* \leftrightarrow E + Ar_2^{**}$	Молекулярное перемешивание
$E + Ar_2^+ \rightarrow Ar + Ar^{**}$	Диссоциативная рекомбинация
$E + Ar_3^+ \rightarrow 2Ar + Ar^{**}$	Рекомбинация
$Ar^+ + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$	Конверсия
$Ar_2^+ + 2Ar \rightarrow Ar_3^+ + Ar$	Конверсия
$Ar_3^+ + Ar \rightarrow Ar_2^+ + 2Ar$	– " –
$Ar_2^{**} + Ar \rightarrow Ar^* + 2Ar$	Девозбуждение
$Ar^* + 2Ar \rightarrow Ar + Ar_2^*$	Конверсия в эксимеры
$2Ar^* \rightarrow Ar^+ + Ar + e$	Пенинговская ионизация
$2Ar^{**} \rightarrow Ar^+ + Ar + E$	– " –
$2Ar^*r \rightarrow Ar^+ + Ar + E$	– " –
$Ar^{**} + Ar^* \rightarrow Ar^+ + Ar + e$	– " –
$Ar^* + Ar^*r \rightarrow Ar^+ + Ar + e$	– " –
$Ar_2^* + Ar^* \rightarrow 2Ar + Ar^+ + e$	– " –
$Ar_2^* + Ar^*r \rightarrow 2Ar + Ar^+ + e$	– " –
$2Ar_2^* \rightarrow 2Ar + Ar_2^+ + E$	– " –
$Ar_2^* \rightarrow 2Ar$	Излучение
$Ar_2^{**} \rightarrow Ar + Ar^*$	– " –
$Ar^{**} \rightarrow Ar^*$	– " –
$Ar^*r \rightarrow Ar$	– " –

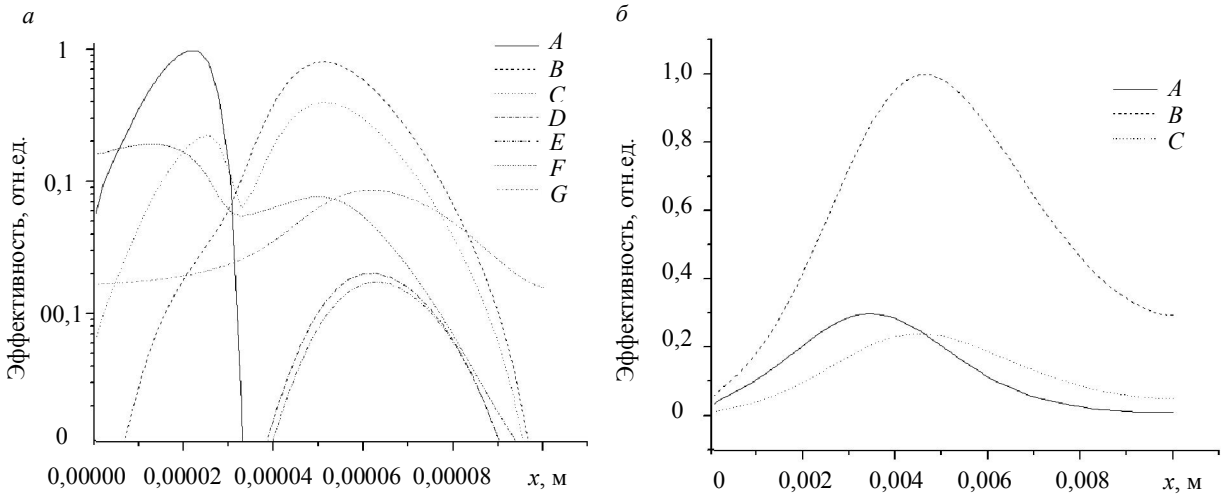


Рис.1. Осевое распределение эффективности плазмохимических процессов, нормализованное на максимум для малых токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*) соответственно
A – прямая ионизация; *B* – возбуждение; *C* – девозбуждение (*а*) и возбуждение метастабилей (*б*), *D*, *E* – рекомбинация; *F*, *G* – конверсия

Итак, основным отличием плазмохимии высоких и низких давлений является необходимость учета процессов, связанных с образованием и гибелью молекулярных ионов в случае разрядов высоких давлений.

Нормированные на максимум соотношения между характеристиками плазмохимических процессов, играющих основную роль при высоких и низких давлениях, представлены на рис.1.

В результате моделирования получены соответствия между пространственным распределением основных макроскопических параметров разряда и характеристиками ведущих плазмохимических процессов (рис.2-7).

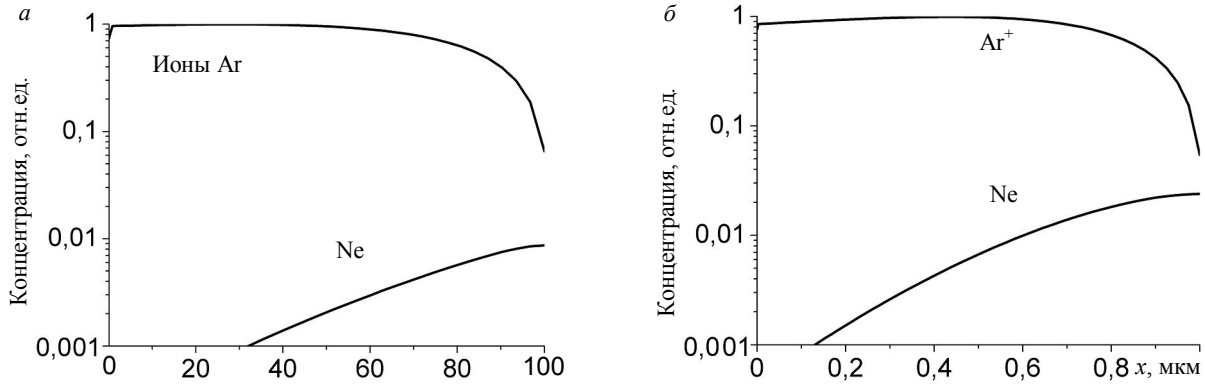


Рис.2. Осевое распределение концентрации электронов и положительных ионов для малых токов при давлении 300 Тор(*а*) и 3 Тор (*б*)

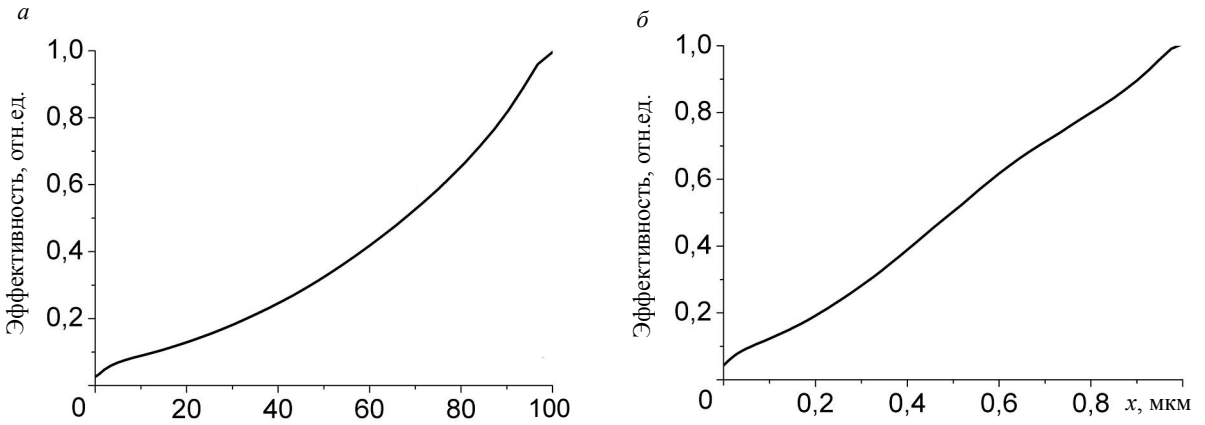


Рис.3. Осевое распределение эффективности прямой ионизации для малых токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*)

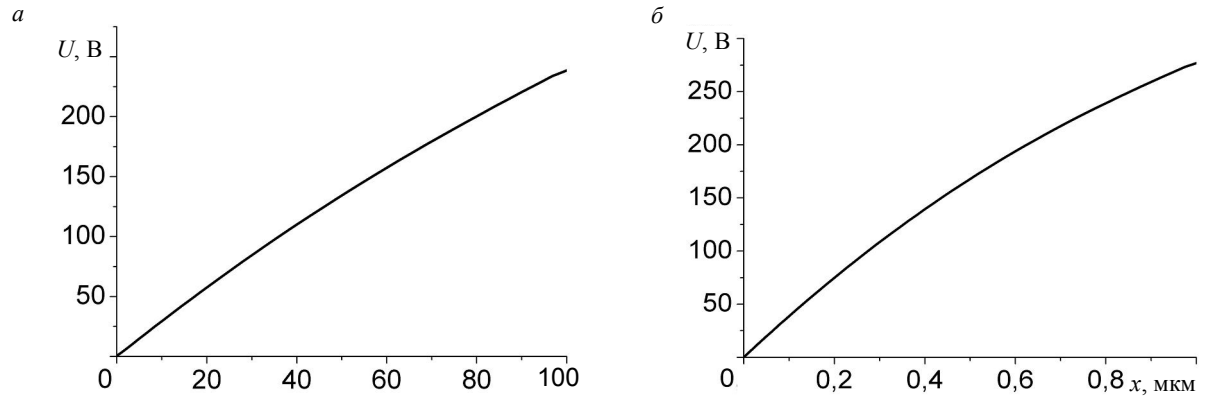


Рис.4. Осевое распределение потенциала для малых токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*)

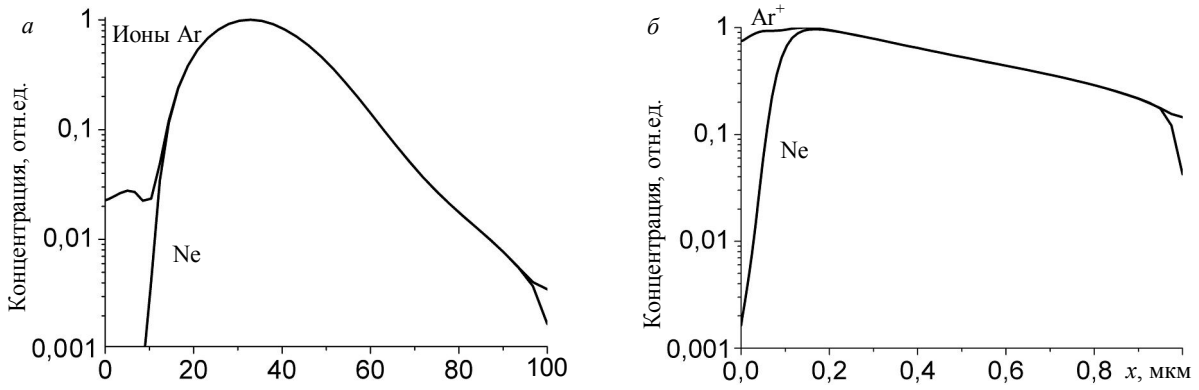


Рис.5. Осевое распределение концентрации электронов и положительных ионов для больших токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*)

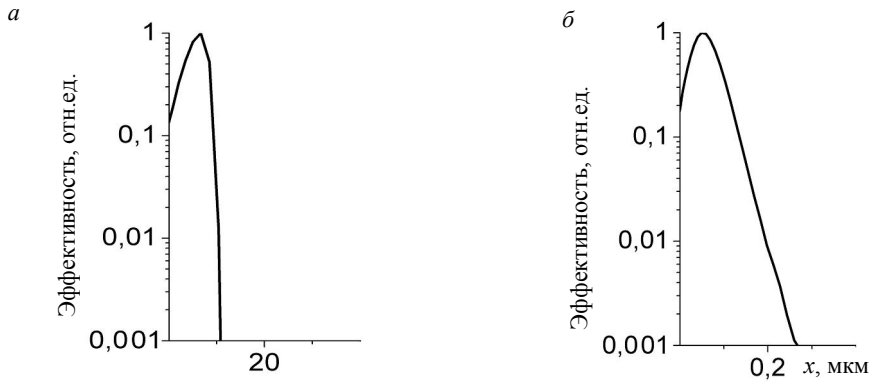


Рис.6. Осевое распределение прямой ионизации для малых токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*)

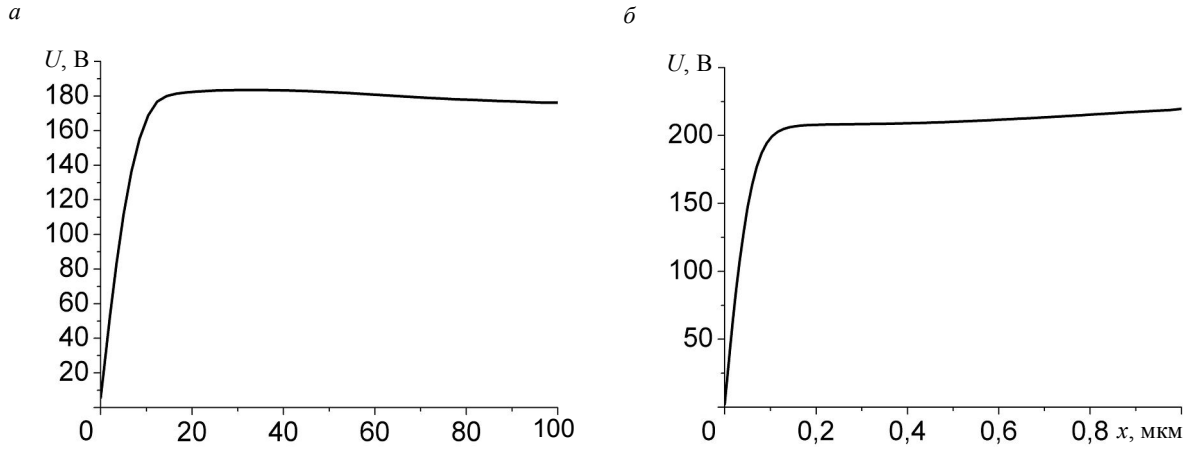


Рис.7. Осевое распределение потенциала для больших токов при давлении 300 Тор (*а*) и 3 Тор (*б*)

Важной особенностью плазмохимических процессов в тлеющих разрядах является их неравновесность т.е. прямые процессы редко оказываются уравновешены обратными [2]. В образовании заряженных частиц ведущую роль играет процесс прямой ионизации. Гибель частиц обусловлена как процессами рекомбинации, так и уходом заряженных частиц на стенки разрядной камеры и электроды. В случае низких давлений ведущую роль играют процессы гибели частиц путем ухода на стенки, в случае высоких – гибель в объеме, т.е. рекомбинация. Пространственная структура параметров основных параметров разряда имеет прямую связь с пространственным распределением параметров плазмохимических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.

2. *Кудрявцев А.А.* Положительный столб тлеющего разряда. СПб: Изд-во СПбГУ, 2006.

3. *Биберман Л.М.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.