

УДК 537.521

## Исследование процессов формирования слоев пространственного заряда в наносекундных электрических разрядах

Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, А.Р. Рамазанов, Г.Ш. Шахсинов

*Экспериментально обнаружено и исследовано формирование периодической плазменной структуры в виде стоячих страт в импульсных разрядах наносекундной длительности. Определены критические значения напряжения горения и разрядного тока, соответствующие верхней границе области формирования страт в инертных газах. Установлена взаимосвязь параметров страт и электрических характеристик разряда. Показано, что исследованные в работе страты являются ионизационно-дрейфовыми волнами.*

PACS: 52.40.Mj

Ключевые слова: электрический разряд, процесс, наносекунда, периодическая структура.

### Введение

В последние годы интенсивно изучаются характеристики, свойства и размеры визуализированных плазменных структур и механизмы самоорганизации плазмы, приводящие к стратификации разряда [1–4]. Несмотря на большое количество работ по исследованию слабоионизованной плазмы и переносу тока в электрических разрядах, проблема формирования в них упорядоченных плазменных структур остается все еще нерешенной. Большой экспериментальный материал о свойствах страт, приведенный, в частности, в [2, 3], относится к тлеющим разрядам постоянного тока. В то же время в литературе практически нет работ по исследованию механизмов формирования и параметров периодических структур в импульсных разрядах. Хотя считается установленным, что страты представляют собой явление, присущее именно неравновесной газоразрядной плазме, в которой основную роль играют процессы генерации и переноса заряженных частиц, уровень понимания этого интересного явления до сих пор весьма далек от совершенства. В этой связи систематические исследования областей существования стоячих страт и зависимости основных характеристик страт от внешних параметров в импульсных разрядах наносекундной

длительности могут дать дополнительные сведения о механизмах и динамике формирования регулярных периодических структур в слабоионизованной плазме.

В настоящей работе экспериментально исследованы области формирования и параметры периодических плазменных структур при различных внешних условиях в поперечных наносекундных разрядах с полым катодом в инертных газах.

### Эксперимент и его результаты

Для исследования процессов формирования и поведения упорядоченных плазменных структур в разрядах наносекундной длительности была использована экспериментальная установка с генератором специальной конструкции, вырабатывающим импульсы напряжения наносекундной длительности. Исследуемый разряд происходил в кварцевой трубке диаметром 5 см, внутри которой помещена электродная система из двух алюминиевых электродов, установленных на расстоянии 0,6 см друг от друга. Анод представляет собой плоскую пластину длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0,5 см, а катод — цилиндрический стержень длиной 5 см и диаметром 1,2 см, вдоль которого прорезана полость полукруглой формы радиусом 0,3 см. Конструкция разрядной камеры позволяла наблюдать структуру разряда и регистрировать пространственное распределение оптического излучения в разрядном промежутке и внутри полости катода. Описание экспериментальной установки, разрядной камеры и систем регистрации электрических и оптических характеристик разряда приведено в [5].

Были выполнены детальные исследования динамики формирования и поведения регулярной

Ашурбеков Назир Ашурбекович, профессор.

Иминов Кади Османович, доцент.

Рамазанов Атраш Рамазанович, мл. научн. сотрудник

Шахсинов Гаджи Шабанович, мл. научн. сотрудник

Дагестанский государственный университет.

Россия, 367025, Махачкала, ул. М.Гаджиева, 43а.

Тел.: (8–872–2) 67–58–17.

E-mail: nashurb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2013 г.

© Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Рамазанов А.Р., Шахсинов Г.Ш., 2014

периодической плазменной структуры в разрядном промежутке в диапазоне изменения давлений газа в разрядной камере (1–100 Торр) и амплитуды прикладываемого к электродам напряжения (0,1–1,5 кВ). В этих же условиях исследованы вольт-амперные характеристики и закономерности изменения тока и напряжения горения разряда. Исследования проводились в поперечных наносекундных разрядах в He, Ne и Ar.

В качестве примера ниже приводятся осциллограммы напряжения горения и тока и картины пространственного распределения оптического излучения поперечного наносекундного разряда при постоянном значении прикладываемого к электродам внешнего напряжения  $U_0 = 0,5$  кВ и различных значениях давления газа. На рис. 1 приведены характерные осциллограммы напряжения горения  $U_r$  и тока  $I_p$  разряда в аргоне.

В условиях, при которых в разрядном промежутке формируется периодическая плазменная структура, осциллограммы напряжения горения имели одинаковую форму с длительностью переднего фронта 100–150 нс и со ступенькой на вершине длительностью от 500 до 1500 нс. Такая форма осциллограмм характерна для недонапряженного промежутка при импульсном пробое газов, когда между моментом приложения напряжения к разрядному промежутку и началом пробоя проходит некоторое время, называемое временем запаздывания пробоя. При этом однозначной зависимости времени запаздывания от давления газа не наблюдается.

Систематические исследования пространственно-временной динамики формирования оптического излучения разряда показали, что при давлениях газа от 1 до 100 Торр в гелии и неоне и от 1 до 30 Торр в аргоне в разрядном промежутке формируется регулярная периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. Слоистая

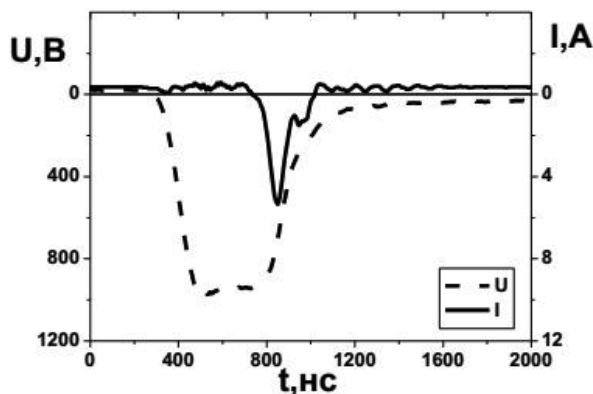


Рис. 1. Осциллограммы напряжения горения и тока разряда в аргоне при давлении газа 20 Торр

структура положительного столба появляется с катодной стороны и затухает к аноду. В полости катода при исследованных условиях регулярная структура не наблюдается (см. рис. 2). С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания страт, что приводит к уменьшению их длины, а количество страт увеличивается. При этом сильно уменьшается длина области фарадеевского темного пространства, и стратифицированный положительный столб вплотную приближается к поверхности катода. Сопоставление осциллограмм напряжения горения и разрядного тока с оптическими картинками разряда показывает, что периодическая структура образуется на стадии сформировавшегося разряда. Следовательно, по величине длительности импульса тока можно оценить длительность существования периодической плазменной структуры в импульсном разряде. Такие оценки показывают, что при  $p = 20$  Торр длительность существования периодической структуры в гелии больше чем в неоне и аргоне и составляет, примерно, 500 нс. При увеличении давления газа в разрядной камере от 5 до 60 Торр длительность существования периодической структуры во всех газах уменьшается почти два раза. При фиксированном значении давления газа с ростом амплитудного значения  $U_r$  и, соответственно,  $I_p$  постепенно уменьшается расстояние между стратами. При определенных значениях  $U_r$  и  $I_p$  они сливаются и регулярная периодическая структура исчезает. При дальнейшем увеличении значений  $U_r$  и  $I_p$  длина положительного столба продолжает уменьшаться уже за счет увеличения катодных частей разряда, а сам разряд переходит в короткий аномальный разряд.

На рис. 3 приведены зависимости значений напряжения горения разряда от давления газа на верхней границе формирования страт в разряде с катодом с полукруглой полостью в момент времени, соответствующего максимуму разрядного тока. Из рисунка видно, что критические значения  $U_r$  и  $I_p$  в разрядах в He, Ne и Ar существенно отличаются по абсолютным значениям и по характеру зависимости от давления газа в разрядной камере. В разряде в гелии при увеличении давления газа от 10 до 60 Торр наблюдается плавное увеличение критических значений  $U_r$  и  $I_p$  и при  $p = 60$  Торр достигают 700 В и 1,1 А, соответственно, (рис.3, а). В разряде в неоне при увеличении давления газа от 5 до 20 Торр наблюдается резкий рост значений  $U_r$  и  $I_p$ , но при дальнейшем увеличении давления рост  $I_p$  замедляется и постепенно выходит на максимум, который при  $p = 50$  Торр составляет 47 А. Величина  $U_r$  дости-

гает максимума при  $p = 20$  Торр ( $U_r = 1450$  В). В дальнейшем наблюдается небольшой спад (рис. 3, б). В разряде в аргоне, наоборот, с увеличением давления газа в камере наблюдается уменьшение критических значений  $U_r$  и  $I_p$  (рис. 3, в). Оказалось, что верхние границы значений  $U_r$  и особенно  $I_p$ , при которых еще существует периодическая плазменная структура в разряде в аргоне, существенно больше, чем в гелии, а в неоне больше чем в аргоне.

### Анализ экспериментальных результатов

Известно, что слоистая структура положительного столба в любых газах является отражением электродинамических и кинетических процессов, происходящих в объеме плазмы, и формирование плазменных структур и скачков параметров плазмы зависит, в основном, от значений приведенного поля  $E/N$  и концентрации электронов  $n_e$ . Оценим их значения для условий рис. 2. Имея в виду, что исследованный нами тип наносекундного разряда является промежуточным между аномальным и нормальными разрядами [6], все последующие оценки и расчеты сделаны с учетом этого обстоятельства. Значения основных параметров разряда и плазменной структуры, соответствующие усло-

виям рис. 2, приведены в таблице. Размеры страт  $L_s$  определялись из оптических картин (рис. 2) по количеству страт в разрядном промежутке и длине области положительного столба, занимаемого ими. Средняя приведенная напряженность электрического поля оценивалась по значению напряжения горения разряда в момент максимума тока. При оценке значений  $(E/N)_p$  мы предположили, как и для аномального разряда, когда длина области катодного падения потенциала мала, что величина падения напряжения на плазменном столбе  $U_{ps} = 2 \cdot U_r / 5$  [7]. Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались по формуле  $n_e = j_p / eu_{dr}$ , где  $j$  — плотность разрядного тока,  $u_{dr}$  — дрейфовая скорость электронов. Плотность тока  $j_p = I/S$  вычислялась из экспериментальных значений силы тока  $I$  и площади поперечного сечения разряда  $S$ . Дрейфовая скорость электронов определялась из графиков исходя из величины приведенной напряженности электрического поля  $E/N$  [8].

Из таблицы видно, что размеры страт и концентрация заряженных частиц в плазме сильно зависят от рода рабочего газа. В аргоне продольный размер страты в пять раз меньше чем в гелии, а концентрация электронов в разрядной плазме на два порядка больше при примерно одинаковых разрядных условиях.

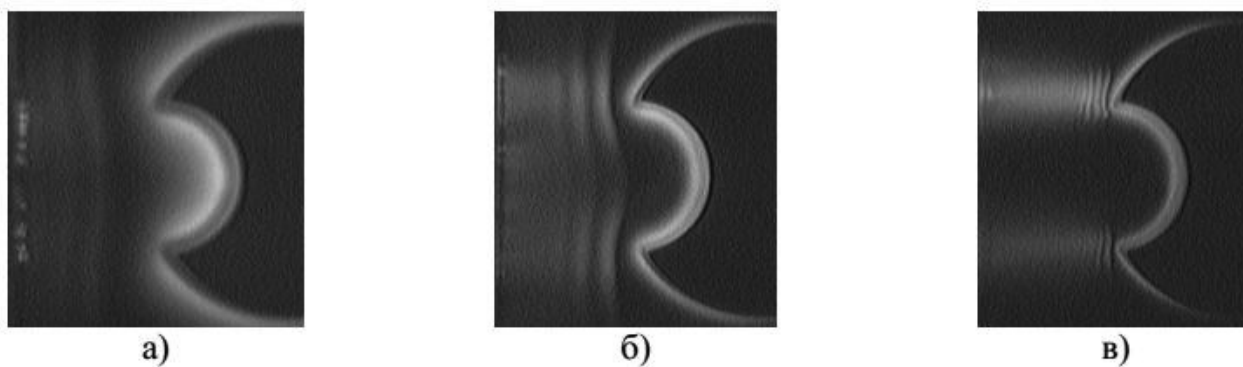


Рис. 2. Картины пространственной структуры разряда при  $p = 20$  Торр: а — He; б — Ne; в — Ar

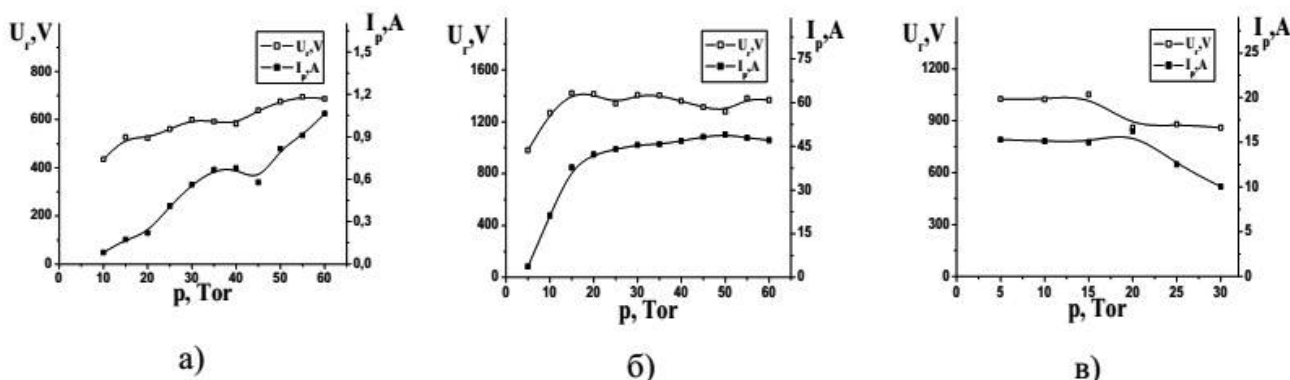


Рис. 3. Верхние границы формирования страт в разряде: а — He; б — Ne; в — Ar

Параметры разряда и плазменной структуры

Газ	$U_p$ , В	$J_p$ , А/см <sup>2</sup>	$(E/N)_p$ , Тд	$L_s$ , см	$n_e$ , см <sup>-3</sup>
He	460	0,017	70	0,13	$5,9 \cdot 10^9$
Ne	410	0,062	50	0,09	$2,6 \cdot 10^{10}$
Ar	700	0,950	71	0,02	$1,0 \cdot 10^{12}$

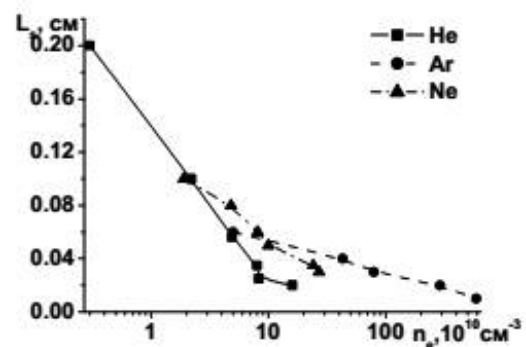
Для определения основных механизмов, участвующих в образовании периодической плазменной структуры в виде стоячих страт, сделаем некоторые оценки для случая разряда в гелии. При  $(E/N)_p \approx 70$  Тд дрейфовая скорость электронов  $u_{dr} \approx 1,8 \cdot 10^7$  см/с [8], и время дрейфового ухода электронов на анод составляет  $\tau_{dr} \approx d/u_{dr} \approx 30$  нс, где  $d = 0,6$  см расстояние между электродами. Дрейфовая скорость ионов при рассматриваемом значении  $E/N$   $u_+ \approx 2 \cdot 10^5$  см/с [9]. Время дрейфового ухода ионов на катод составляет  $\tau_+ \approx d/u_+ \approx 3 \cdot 10^{-6}$  с. Время диффузии электронов из разрядной области  $\tau_d = \Lambda^2/D$ , где  $\Lambda = R/2,4$  — характерная диффузионная длина,  $D = v_e^2/3 \cdot \nu_{ea}$  — коэффициент свободной диффузии. Для  $R = 1$  см,  $p = 20$  Торр и средней энергии электронов  $\varepsilon = 5$  эВ получим [10]  $v_e = 5,93 \cdot 10^7$  (э)<sup>0.5</sup>  $\approx 1,3 \cdot 10^8$  см/с и  $\tau_d \approx 1,1 \cdot 10^{-6}$  с.

Полученные оценки показывают, что в наносекундных разрядах в инертных газах с параметрами  $(E/N)_p$  порядка 100 Тд и давлении газа в несколько десятков Торр можно исключить влияние диффузионных процессов переноса электронов и ионов, конвективных процессов переноса ионов и изменение плотности частиц газа  $N$  из-за его нагрева в формировании страт. В этих условиях незначительна роль процессов ступенчатой ионизации, а внутренние поля определяются только ионизацией прямым электронным ударом и дрейфовым переносом электронов в электрическом поле, формируемом объемным зарядом ионов. Таким образом, исследованные в данной работе стоячие страты, скорее всего, являются ионизационно-дрейфовыми волнами.

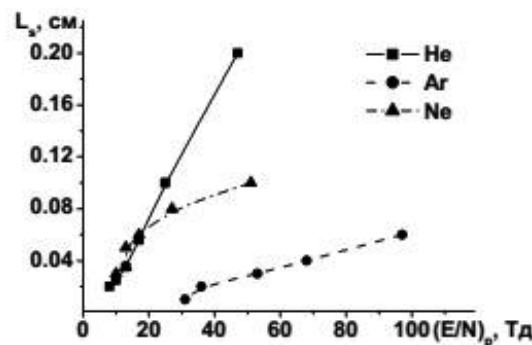
Анализ зависимости длины страты от основных параметров разряда в He, Ne и Ar (рис. 4) показывает, что с ростом атомного веса рабочего газа длина страты уменьшается. Для гелия максимальная длина страты при исследованных условиях составляет 0,2 см, для неона 0,1 см и для аргона 0,06 см. Концентрация свободных электронов в разряде с плазменной структурой при одинаковых внешних условиях увеличивается с ростом атомного веса рабочего газа. В аргоне концентрация электронов при идентичных условиях на два порядка больше, чем в гелии. Во всех исследованных условиях с увеличением концентрации электронов в разряде уменьшается длина страт. Максимальная концентрация электронов, при

которой еще наблюдается периодическая плазменная структура в гелии, составляет  $4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, а в аргоне —  $7 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. При постоянном давлении с ростом напряженности электрического поля и, следовательно, концентрации ускоренных электронов в разрядном промежутке периодическая плазменная структура размывается и исчезает.

По мере увеличения энерговклада и нелинейного взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем продольные размеры страт увеличиваются и могут определяться длиной изменения электрического поля, т.е. параметром  $I_E \sim E/4\pi en_e$  (векторизованный размер изменения напряженности электрического поля  $E$  [11]). Это справедливо до появления в разрядном промежутке ускоренных электронов. Если размеры деградации пучков высокоэнергетических электронов в плазме сравнимы или больше характерных размеров страт, то деградация пучков существенно влияет на процессы формирования регулярной



а)



б)

Рис. 4. Зависимость длины страты от параметров разряда с катодом с полукруглой полостью.

структуры. При энерговкладе в разрядный промежуток, который приводит к формированию пучка электронов с энергией достаточной, чтобы ускоренные электроны появились в разрядном промежутке, регулярная плазменная структура исчезает. Оценки длины пробега  $L$  ускоренных в области катодного падения потенциала электронов (в разряде с периодической плазменной структурой) можно в гелии провести по формуле [12]:

$$pL = 6,5 \times 10^{-4} (eU_k)^{1,54}$$

где  $U_k = 3 \cdot U_r / 5$  — величина катодного падения потенциала. Эти оценки показывают, что при изменении давления газа в разрядной камере от 10 до 60 Торр значения длины пробега ускоренных электронов  $L$  меняются от 0,16 до 0,06 см. Полученные значения  $L$  показывают, что длины пробега ускоренных в области катодного падения потенциала электронов в плазме меньше расстояния между боковыми поверхностями щели катода  $l = 0,2$  см и, следовательно, отсутствуют высокоэнергетические электроны в разрядном промежутке, а также отсутствует влияние эффекта полого катода на разряд между электродами.

Во всех экспериментах при постепенном увеличении величины прикладываемого к электродам напряжения плазменная периодическая структура исчезает и во всем разрядном промежутке начинает гореть однородный объемный разряд. Соответствующие оценки показывают, что при  $U_r \geq 1$  кВ (в зависимости от величины давления газа в разрядной камере) в промежутке появляются ускоренные электроны, которые, по-видимому, и разрушают плазменную структуру.

### Заключение

Проведенные в данной работе экспериментальные исследования показывают, что в поперечных импульсных разрядах наносекундной длительности с протяженным полым катодом формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт, причем существуют верхние границы области формирования страт по напряжению горения и разрядному току. В промежутке между электродами формирование периодической плазменной структуры в виде стоячих страт происхо-

дит при небольших значениях прикладываемого напряжения, когда длина пробега ускоренных в области катодного падения потенциала быстрых электронов меньше характерного размера (полуширины) полости.

Экспериментально установлено, что периодическая плазменная структура образуется на стадии сформировавшегося разряда. Длительность ее существования составляет от 50 до 500 нс и зависит от давления газа в разрядной камере и величины прикладываемого к электродам напряжения.

Оценки показывают, что в исследуемых условиях основными процессами, участвующими в формировании плазменной структуры, являются прямая ионизация атомов электронным ударом и дрейфовый перенос электронов в электрическом поле. Скорее всего, механизм формирования наблюдаемой периодической плазменной структуры имеет ионизационно-дрейфовую природу.

*Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания Минобрнауки России на проведение НИР.*

### Литература

1. *Высикайло Ф.И.* // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. № 5. С. 1071
2. *Kolobov V. I.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 487
3. *Цендин Л.Д.* // УФН. 2010. Т. 180. № 2. С. 139
4. *Аишурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев В.С., Кобзев О.В.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 1
5. *Аишурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзев В.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63.
6. *Аишурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзев В.С.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 16. С. 62
7. *Голубовский, Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О.* и др. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. — С. — Пб., 2004.
8. *Kucikarpaci H.N., Saelee H.T., Luces J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. V. 14. P. 9.
9. *Helm H.* // J. Phys. B. 1977. V. 10. P. 3683
10. *Райзер, Ю.П.* Физика газового разряда — М.: Наука, 1992
11. *Высикайло Ф.И.* // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 10. С. 1268
12. *La Verne Jay A., Mozumder A.* // J. Phys. Chem. 1985. V. 89. No. 20. P. 4219

## Study of processes at formation of space charge layers in the nanosecond electric discharges

*N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, A. R. Ramazanov, and G. Sh. Shakhshinov.*

Daghestan State University  
43a M.Gadjiev str., Makhachkala, 367025. Russia  
E-mail: nashurb@mail.ru  
Received December 20, 2013

*The formation of a periodic plasma structures in the form of standing striations in nanosecond pulsed discharges were experimentally observed and investigated. The critical value of the burn voltage and discharge current, corresponding to the upper boundary of the formation of striations in inert gases, are determined. The relation between the parameters of the striations and the electrical characteristics of the discharge is established. It is shown that the strata studied in this work are ionization-drift waves.*

PACS: 52.40.Mj

*Keywords:* electric discharge, process, nanosecond, periodic structure.

### References

1. F. I. Vysikailo, J. Exp. Theor. Phys. **125**, 1071 (2004).
2. V. I. Kolobov, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, 487 (2006).
3. L. D. Tsendin, Usp. Phys. **180**, 139 (2010).
4. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, V. S. Kobzeva, et al., High Temperature **50**, 1 (2012).
5. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, V. S. Kobzeva, et al., Tech. Phys. **80**, 63 (2010).
6. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, V. S. Kobzeva, et al., Tech. Phys. Lett. **36**, 62 (2010).
7. Yu. B. Golubovskii, A. A. Kudryavtsev, V. O. Nekuchaev, et al., *Kinetics of Electrons in Nonequilibrium Gas-Discharge Plasma* (S. Ptb., 2004) [in Russian].
8. H. N. Kucukarpaci, H. T. Saelee, and J. Luces, J. Phys. D: Appl. Phys. **14**, 9 (1981).
9. H. Helm, J. Phys. B. **10**, 3683 (1977).
10. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1992) [in Russian].
11. F. I. Vysikailo, Plasma Physics Reports **16**, 1268 (1990).
12. Jay A. La Verne, and A. Mozumder, J. Phys. Chem. **89**, 4219 (1985).