

УДК 537.521

Исследование процессов формирования периодической плазменной структуры в импульсных 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. 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, а также 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. В литературе практически нет работ по исследованию механизмов формирования и параметров периодических структур в импульсных разрядах.

Целью данной работы является экспериментальное исследование стратификации импульсных разрядов наносекундной длительности, которые могут дать дополнительные сведения о механизмах и динамике формирования регулярных периодических структур в слабоионизованной плазме.

Экспериментальная установка

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.

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 10 декабря 2013 г.

© Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Рамазанов А.Р.,

Шахсинов Г.Ш., 2014

Конструкция разрядной камеры позволяла наблюдать структуру разряда и регистрировать пространственное распределение оптического излучения в разрядном промежутке и одновременно внутри полости катода. Более подробное описание экспериментальной установки и систем регистрации электрических и оптических характеристик разряда приведено в [5].

Были выполнены исследования динамики формирования и поведения регулярной периодической плазменной структуры в разрядном промежутке в He, Ne и Ar в диапазоне изменения давлений газа в разрядной камере 1–100 Торр, а также при вариации амплитуды прикладываемого к электродам напряжения в пределах 0,1–1 кВ.

Результаты исследований

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 структура положительного столба появляется с катодной стороны и затухает к аноду. В полости катода при исследованных условиях регулярная структура не наблюдается (см. рисунок). 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 фарадеево темного пространства, а стратифицированный положительный столб вплотную приближается к поверхности катода.

Сопоставление осциллограмм напряжения горения и разрядного тока с оптическими картинками разряда показывает, что периодическая структура формируется на стадии сформированного разряда. Следовательно, по величине длительности импульса тока можно оценить длительность существования периодической плазменной структуры в импульсном разряде. Такие оценки показывают, что при давлении $p = 20$ 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.

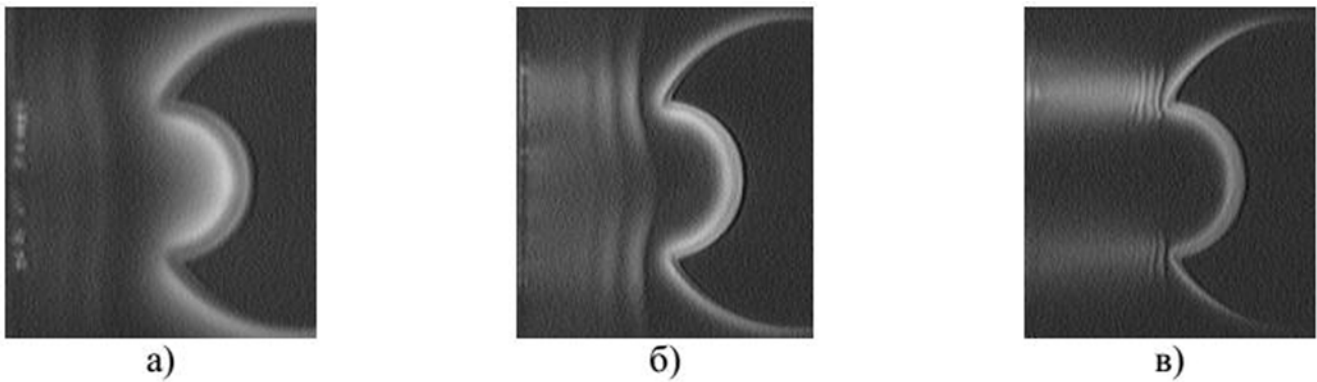


Рисунок. Картины пространственной структуры разряда при $p = 20$ Торр: а – He; б – Ne; в – Ar.

При фиксированном значении давления газа с ростом амплитудного значения напряжения горения U_c и, соответственно, разрядного тока I_p наблюдается постепенное уменьшение расстояния между стратами. Последние при определенных значениях U_c и I_p даже сливаются, и регулярная периодическая структура исчезает. При дальнейшем увеличении значений U_c и I_p длина положительного столба продолжает уменьшаться уже за счет увеличения катодных частей разряда, т.е. разряд переходит в режим короткого аномального разряда.

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 электрического поля E/N (здесь N – концентрация газа) и концентрации электронов n_e . Оценим их значения для условий рисунка. Имея в виду, что исследованный нами тип наносекундного разряда является промежуточным между аномальным и нормальным разрядами [6], все последующие оценки и расчеты были сделаны с учетом этого обстоятельства. Значения основных параметров разряда и плазменной структуры, соответствующие условиям рисунка, приведены в таблице.

Размеры страт L_s определялись из оптических картин по количеству страт в разрядном промежутке и длине области положительного столба, занимаемого ими. Средняя приведенная напряженность электрического поля $(E/N)_p$ 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 мало, что величина падения напряжения на плазменном столбе $U_{ps} = 2 \cdot U_c / 5$ [7]. Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались по формуле $n_e = j_p / e v_{dr}$, где j – плотность разрядного тока, v_{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.

Таблица

Параметры разряда и плазменной структуры

Газ	U_c , В	J_p , А/см ²	$(E/N)_p$, Тд	L_s , см	n_e , см ⁻³
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 $v_{dr} \approx 1,8 \cdot 10^7$ см/с [8], а время дрейфового ухода электронов на анод составляет $\tau_{dr} \approx d/v_{dr} \approx 30$ нс, где $d = 0,6$ см расстояние между электродами. Дрейфовая скорость ионов при рассматриваемом значении $E/N \cdot v^+ \approx 2 \cdot 10^5$ см/с [9]. Время дрейфового ухода ионов на катод составляет $\tau^+ \approx d/v^+ \geq 3 \cdot 10^{-6}$ с. Время диффузии электронов

из разрядной области $\tau_d = \Lambda^2/D$, где $\Lambda = R/2,4$ – характерная диффузионная длина, $D = v_e^2/3 \cdot v_{ea}$ – коэффициент свободной диффузии. Для $R = 1$ см, $p = 20$ Торр и средней энергии электронов $\epsilon = 5$ эВ получим [10] $v_e = 5,93 \cdot 10^7 (\epsilon)^{0,5} \approx 1,3 \cdot 10^8$ 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 давлением газа в несколько десятков Торр можно исключить влияние диффузионных процессов переноса электронов и ионов, конвективных процессов переноса

ионов и изменение концентрации частиц газа N из-за его нагрева в формировании страт. В этих условиях незначительна роль процессов ступенчатой ионизации, и 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 являются ионизационно-дрейфовыми волнами.

Анализ зависимости длины страты от основных параметров разряда в He, Ne и Ar 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 $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а в аргоне $-7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Во всех экспериментах при постепенном увеличении величины прикладываемого к электродам напряжения плазменная структура исчезает, и во всем разрядном промежутке начинает гореть однородный объемный разряд. Соответствующие оценки показывают, что при $U_2 \geq 1 \text{ кВ}$ (в зависимости от величины давления газа в разрядной камере) в промежутке появляются ускоренные электроны, которые, по-видимому, и разрушают плазменную структуру.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что в поперечных импульсных разрядах наносекундной длительности с протяженным полым катодом формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. В исследованных условиях основными процессами, участвующими в формировании плазменной структуры, являются прямая ионизация атомов электронным ударом и дрейфовый перенос электронов в электрическом поле, а 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. *Аиурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 1.
5. *Аиурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63.
6. *Аиурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева 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., Lucas 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.

Investigation of the processes of periodic plasma structure formation in a nanosecond pulsed electric discharge

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

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

Received December 10, 2013

The formation of 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].