

03;04;10

Периодические плазменные структуры в наносекундном разряде с щелевым катодом

© Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева

Дагестанский государственный университет, Махачкала

E-mail: nashurb@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2010 г.

Экспериментально исследована пространственная структура оптического излучения поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом. Обнаружено формирование регулярной периодической структуры при формировании импульсного наносекундного разряда в гелии при средних давлениях газа. Определены границы существования плазменной структуры по напряжению горения и току разряда. Показано, что наблюдаемая плазменная структура отличается от известных типов страт.

В последние годы интенсивно изучаются параметры и свойства визуализировавшихся плазменных структур, формирующихся нелинейным взаимодействием электрического поля с потоками заряженных частиц в самоорганизующейся плазме [1–3]. Страты являются ярким примером самоорганизации плазмы газового разряда, поддерживаемой электрическим полем. Так, в работах [4,5] на основе анализа результатов исследования страт в инертных газах показано, что в положительном столбе разряда в гелии стоячие страты существуют в области давлений газа (0.01–1 Torr) и токов разряда (1–100 mA). В то же время следует отметить, что в инертных газах систематические исследования областей существования стоячих страт практически отсутствуют.

В настоящей работе нами было обнаружено формирование периодической структуры разряда в виде стоячих страт в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом в инертных газах при средних давлениях газа. Ниже приводятся результаты экспериментального исследования влияния давления газа в разрядной камере и внешнего электрического поля на формирование регулярной периодической структуры наносекундного разряда. Кроме того, экспе-

риментально определены критические значения напряжения горения и разрядного тока, при которых исчезает периодическая структура разряда в гелии.

Исследуемый разряд происходил между двумя алюминиевыми электродами длиной 5 см, расположенными в кварцевой цилиндрической трубке диаметром 3 см. Катод представлял собой круглый стержень диаметром 1.2 см с прорезом вдоль него шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см. Анод имел плоскую форму, в виде прямоугольной пластины, шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Расстояние между электродами составляло величину 0.6 см. Выбор такой формы полого катода и расстояния между электродами обусловлен требованиями формирования в процессе пробоя газа высокоэнергетичных электронов и устойчивым горением объемного разряда при средних давлениях газа. Подробное описание экспериментальной установки, генератора импульсов напряжения и системы регистрации приведено в [6].

Измерения тока и напряжения горения разряда производились с помощью омического шунта и калибровочного делителя напряжения. Оптическое излучение разряда и картины пространственного распределения оптического излучения между электродами регистрировались с помощью ФЭУ и ПЗС-матрицы, подключенных к компьютеру.

Были выполнены систематические экспериментальные исследования электрических, оптических характеристик и структуры пространственного распределения оптического излучения разряда в He в зависимости от давления газа и амплитуды импульсов напряжения на электродах.

Характерные осциллограммы напряжения горения и импульса тока разряда представлены на рис. 1, из которого видно, что длительность переднего фронта импульса напряжения составляла величину примерно 50–60 ns. При увеличении давления газа в разрядной камере с 15 до 60 Torr величина напряжения горения разряда (U_{br}) увеличивается примерно на 5%, а величина разрядного тока (I_{br}) более чем в два раза.

Систематические исследования пространственно-временной динамики формирования оптического излучения разряда показали, что при давлениях газа от 1 до 100 Torr с момента появления излучения в разрядном промежутке формируется регулярная периодическая структура разряда, напоминающая по внешнему виду стоячие страты. Во всех исследованных условиях слоистая структура положительного столба разряда появляется с катодной стороны и затухает по мере приближе-

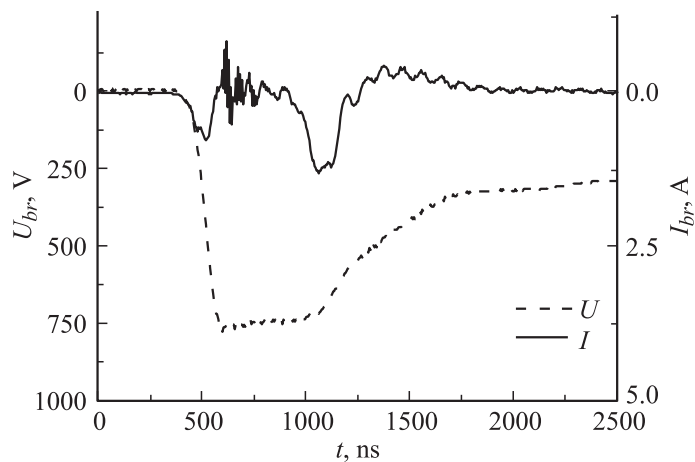


Рис. 1. Осциллограммы напряжения горения и тока разряда при давлении газа $p = 15$ Торр.

ния к аноду. При этом заметим, что внутри щели катода регулярная структура не наблюдается. Ближайшая к катоду слоистая структура принимает искривленную форму, близкую к форме поверхности катода, и отличается от всех последующих структур по форме, длине и интенсивности излучения. С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания периодической структуры, что приводит к уменьшению их длины, в то же время количество „страт“ увеличивается. Детальные экспериментальные исследования показали, что с ростом давления газа сильно уменьшается длина области фарадеева темного пространства и положительный столб вплотную приближается к поверхности катода (рис. 2). Одновременно с этим внутри щели катода с увеличением давления газа разряд начинает прижиматься к стенкам щели и по центру образуется темное пространство. При фиксированном значении давления газа с ростом величины U_{br} и соответственно величины I_{br} длина страт также постепенно уменьшается и при определенных значениях U_{br} и I_{br} они сливаются и регулярная периодическая структура исчезает. При дальнейшем увеличении значений U_{br} и I_{br} в разрядном промежутке горит однородный сильноточный объемный разряд.

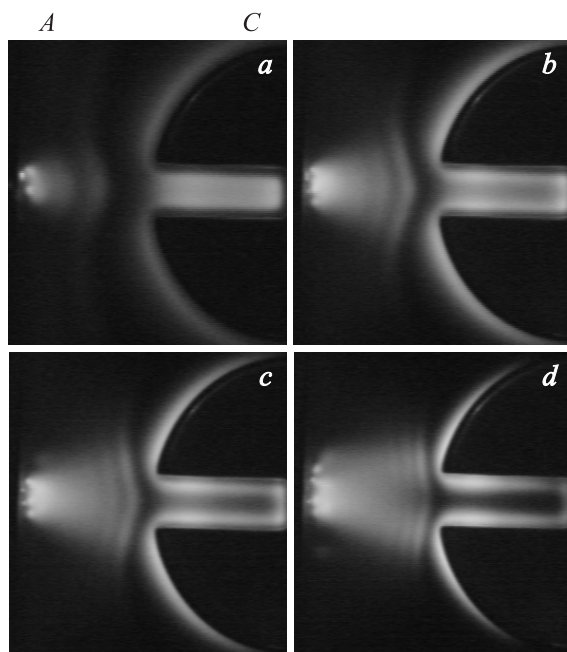


Рис. 2. Регулярная периодическая структура разряда в He (*a* — $p = 15$ Torr, *b* — $p = 30$ Torr, *c* — $p = 45$ Torr; *d* — $p = 60$ Torr). *A* — анод, *C* — катод.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные зависимости от давления газа критических значений напряжения горения и тока разряда, при которых исчезает периодическая структура разряда.

Исследования показали, что при увеличении давления газа в разрядной камере критическое значение напряжения горения медленно растет с 760 до 830 В, а критическое значение разрядного тока ведет себя сложным образом, а именно сначала до 25 Torr растет, далее наблюдается небольшой спад и при дальнейшем увеличении давления газа практически не меняется (рис. 3).

Нами выполнен качественный анализ механизмов формирования наблюдаемой периодической структуры наносекундного разряда. Известно, что формирование плазменных структур и скачков параметров плазмы зависит в основном от значений приведенного поля (E/N)

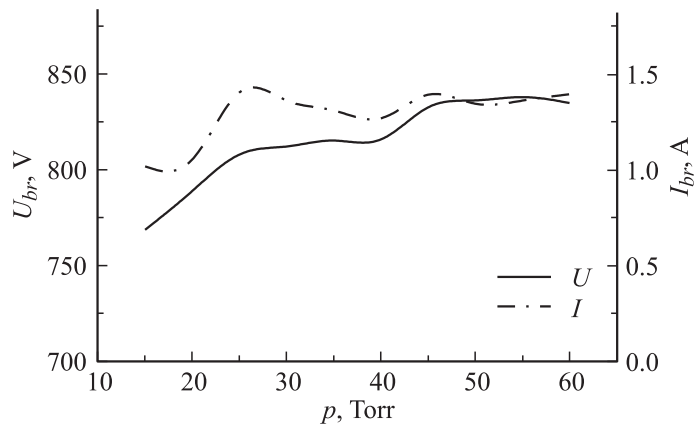


Рис. 3. Верхняя граница существования регулярной периодической структуры по напряжению горения и по току.

и концентрации электронов (n_e). Оценим их значения для условий рис. 2, $a-d$.

Поскольку исследуемый в данной работе поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом является относительно новой и малоизученной формой электрического разряда, проверим, соответствует ли исследуемый разряд известному аномальному тлеющему разряду (АТР) и его основным законам. Для оценки величины катодного падения потенциала (КПП) U_c в АТР может использоваться закон подобия $U_c = f(j/p^2)$. Аппроксимация этой зависимости для гелия дает следующее соотношение [7]:

$$j_a/p^2 = 2.5 \cdot 10^{-12} U_c. \quad (1)$$

Для оценки величины электрического поля в катодном слое $0 < x < d_c$ также может быть использована аппроксимация $E/E(0) = (1-x)^m$, $0 < m < 1$, где $E(0)$ — напряженность электрического поля у поверхности катода, d_c — длина области катодного падения потенциала [5]. Для условий АТР, когда d_c мало, $m = 2/3$, дает значение для оценки величины КПП

$$U_c = 2E(0)d_c/5. \quad (2)$$

Параметры разряда в гелии

Рис. 2	U_{br}, V	$J \cdot 10^3, A/cm^2$	$L_s \cdot 10^2, cm$	U_s, V	$E/N, 10^{17} V \cdot cm^2$	$n_e, 10^{11} cm^{-3}$
<i>a</i>	550	115	14	110	111	0.12
<i>b</i>	610	188	10	92	62	0.65
<i>c</i>	630	205	8	63	42	1.07
<i>d</i>	642	298	5	42	32	2.33

По формуле (1) нами были рассчитаны плотности тока j_a для эквивалентного АТР, соответствующие экспериментальным значениям напряжения горения в момент достижения максимума разрядного тока с использованием осциллограмм, соответствующих условиям рис. 2, *a–d*. При оценке значений U_c по формуле (2) величина $E(0)d_c$ бралась равной величине U_{br} в максимуме I_{br} .

Проведенные оценки показали, что полученные по формулам (1) и (2) значения j_a и экспериментальные данные плотности тока разряда на катоде j_c удовлетворительно согласуются между собой.

Оценки длины пробега ускоренных в области КПП электронов в плазме по формуле [8]

$$p\Lambda = 6.5 \cdot 10^{-4} (eU_c)^{1.54}$$

показывают, что при изменении p от 15 до 60 Торг значения Λ меняются от 0.17 до 0.06 см. Поскольку для всех исследованных условий длина свободного пробега электронов по отношению к неупругим процессам больше длины области КПП и электроны, эмитируемые с поверхности катода, проходят область КПП без столкновений, то эти электроны приобретают энергию $\varepsilon = eU_c$ [9]. Полученные значения Λ показывают, что длины пробега ускоренных в области КПП электронов в плазме меньше расстояния между боковыми поверхностями внутри щели катода $l = 0.2$ см, следовательно, отсутствует влияние эффекта полого катода на разряд между электродами (особенно для условий рис. 2, *b–d*). Исходя из этого, при дальнейших оценках исследуемый поперечный наносекундный разряд мы отнесли к АТР.

Значения основных параметров разряда, соответствующих условиям 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. Величина характерного потенциала, приходящая на одну страту (U_s), определялась по количеству страт в разрядном промежутке и величине падения напряжения на плазменном столбе (U_{ps}) в момент максимума тока $U_s = U_{ps}(L_s/L_{ps})$, где L_{ps} — длина положительного столба. Средняя приведенная напряженность электрического поля E/N рассчитывалась по значению напряжения горения разряда в момент максимума тока. При оценке значений E/N и U_s мы предположили, что величина падения напряжения на плазменном столбе такая же, как и для аномального разряда, т.е. $U_{ps} = 3U_{br}/5$. Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались по формуле $n_e = J/ev_{dr}$, где J — плотность тока разряда; e — заряд электрона, $v_{dr} = 10^6 + 7.6 \cdot 10^5 E[\text{V/cm}]/p[\text{Torr}]$ [10].

Из приведенной таблицы видно, что величина характерного потенциала, приходящего на одну страту для всех исследованных условий, больше потенциала ионизации атомов гелия, и это отличие не позволяет отнести наблюдаемую плазменную структуру к ранее исследованным известным типам страт. Если предположить, что наблюдаемая плазменная структура относится к стратам S типа, то, воспользовавшись потенциалом ионизации атомов гелия и количеством страт (N) в разрядном промежутке, можно оценить значение величины (КПП) $U_c = (U_{br} - 24.59 \cdot N) \text{V}$. Такие оценки показывают, что с ростом давления газа и соответственно плотности катодного тока величина U_c уменьшается, поскольку при этом в эксперименте в He, Ne и Ar количество страт увеличивается (в аргоне при увеличении давления газа от 5 до 25 Torr количество страт увеличивается более двух раз [11]). Это противоречит результатам наших экспериментов и экспериментов других исследователей [12], которые показывают существенное увеличение значения U_c с ростом давления газа и плотности катодного тока. Следовательно, наблюдаемая в этой работе плазменная структура отличается от известных типов страт. По-видимому, при формировании периодической плазменной структуры в условиях данной работы наряду с внешним электрическим полем важную роль играют и внутренние поля, возникающие из-за разделения зарядов за счет процессов амбиполярной диффузии. Внутренние поля вместе с внешним полем управляют энерго-массово-импульсными потоками заряженных частиц, что приводит к самоорганизации плазменной среды и формированию наблюдаемых плазменных структур во внешнем электрическом поле.

Таким образом, полученные в работе экспериментальные результаты показывают, что в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом при средних давлениях рабочего газа формируется регулярная периодическая структура в виде стоячих страт, отличающаяся от известных типов страт. Для всех исследованных условий экспериментально определена верхняя граница существования регулярной плазменной структуры по напряжению горения и по току разряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг., проекты НК-105П/1, НК-182П/7.

Список литературы

- [1] Демьянов А.В., Мазалов Д.А., Напартович А.П. и др. // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. № 4. С. 1266.
- [2] Фортвов В.Е., Ваулина О.С., Петров О.Ф. и др. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. № 4. С. 798.
- [3] Высикайло Ф.И. // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. № 5. С. 1071.
- [4] Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. // УФН. 1980. Т. 132. В. 4. С. 601.
- [5] Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О. и др. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб., 2004. 248 с.
- [6] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С. и др. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 4. С. 485.
- [7] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 90. С. 138.
- [8] La Verne Jay A., Mozumder A.J. // Phys. Chem. 1985. V. 89. N 20. P. 4219.
- [9] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 12. С. 47.
- [10] Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. 390 с.
- [11] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С. и др. // Материалы V Всероссийской конференции ФЭ-2008. Махачкала, 2008. С. 77.
- [12] Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.