

## Стратификация плазменного столба в поперечных наносекундных газовых разрядах с полым катодом

© Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов

Дагестанский государственный университет,  
367000, Махачкала, Россия  
e-mail: nashurb@mail.ru

(Поступило в Редакцию 9 июля 2014 г. В окончательной редакции 15 декабря 2014 г.)

Выполнены систематические экспериментальные исследования электрических, оптических характеристик и структуры пространственного распределения оптического излучения поперечного наносекундного разряда с полым катодом в инертных газах. Установлено, что при средних давлениях рабочего газа в наносекундных разрядах с протяженными электродами формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. Определены границы области формирования страт по давлению газа в гелии, неоне, аргоне и критические значения напряжения горения и тока разряда на этих границах. Исследованы условия формирования периодической плазменной структуры и определены значения основных параметров разряда и страт для исследованных условий. В качестве наиболее вероятного механизма формирования страт определены прямая ионизация атомов электронным ударом и дрейфовый процесс электронов в электрическом поле. Размытие плазменной структуры при повышении прикладываемого к электродам напряжения объясняется формированием ускоренных электронов в разрядном промежутке.

### Введение

Различные формы самоорганизации газового разряда, которые приводят к формированию пространственно неоднородных, стационарных и нестационарных упорядоченных структур в разряде, вызывают большой интерес и активно исследуются в последние годы [1–3]. Наиболее известным примером самоорганизации плазмы газового разряда, обусловленным кинетическими явлениями при ионизации, являются стоячие страты. Интересные дисперсионные характеристики и удобные пространственные и временные масштабы для экспериментального изучения делают страты идеальным объектом нелинейной физики. Экспериментальное исследование страт в положительном столбе стационарного тлеющего разряда началось еще в начале прошлого столетия. Хотя к настоящему времени накоплен достаточный экспериментальный материал о свойствах страт, которые, в частности приведен в [4–6], нет единого мнения об основных процессах и механизмах, приводящих к образованию периодических плазменных структур в нестационарной плазме газовых разрядов. Как следствие этого, нет общепризнанной концепции при описании явлений формообразования структур в низкотемпературной плазме. Картина выяснена в положительном столбе стационарного разряда с постоянным током, где ионизационно-диффузная природа страт является установленной. Показано, что в механизме стратификации положительного столба основную роль играют изменение скорости ионизации вдоль столба и процессы диффузии. Именно поэтому страты и получили свое второе название — ионизационные волны, хотя и в этом случае к 90-м годам прошлого столетия стало ясно, что механизмы стратификации плазмы весьма разнообразны.

В одном и том же газе (например, в Ne и Ar) в разных диапазонах давлений и токов имеют место, по крайней мере, три совершенно разных механизма возникновения страт: кинетический, связанный с „лестничным“ распределением электронов и эффектом бунчировки при низких давлениях и малых токах, гидродинамический, обусловленный диффузным полем и электронной теплопроводностью при малых давлениях и больших токах, и механизм, связанный с образованием перетяжек в контрагированном разряде при высоких давлениях [7].

Стоячие страты наиболее ярко выражены в молекулярных газах (водород, азот, воздух), а также в смесях инертных газов с молекулярными и наблюдаются в широком диапазоне разрядных токов и давлений газов. В чистых инертных газах систематические исследования областей существования стоячих страт и их параметров практически отсутствуют, за исключением работы [8], где показано, что стоячие страты в неоне существуют в основном внутри той области, где нет бегущих страт (при токах 1–10 мА и давлениях 0.1–1 Torr), и работы [9], где затухающие неподвижные страты наблюдались в гелии, неоне и аргоне при давлениях до  $10^{-2}$  Torr и токах до 100 мА.

В этой связи важное значение приобретает всестороннее исследование стоячих страт, впервые обнаруженных нами в поперечных наносекундных разрядах в инертных газах [10,11]. Исследования областей существования стоячих страт и зависимости основных параметров страт от внешних условий в наносекундных разрядах могут дать дополнительные сведения о динамике и механизмах формирования регулярных периодических структурах в слабоионизованной плазме.

Целью настоящей работы является установление областей существования стоячих страт по давлению, току,

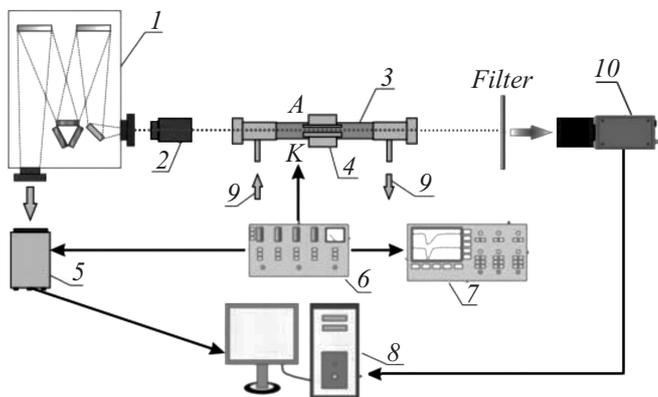
напряжению горения разряда и исследованию зависимости основных параметров страт от внешних условий в поперечных наносекундных разрядах с катодом с различной кривизной поверхности в инертных газах.

## 1. Методика и техника эксперимента

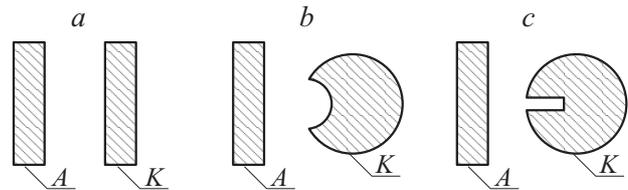
Для исследования условий формирования и параметров упорядоченных плазменных структур в импульсных разрядах наносекундной длительности была разработана и собрана автоматизированная экспериментальная установка (рис. 1). Установка состоит из генератора высоковольтных наносекундных импульсов напряжения (ГИН), разрядной камеры, системы откачки и контроля давления газа, систем регистрации электрических и оптических характеристик разряда с выводом всех результатов измерений на персональный компьютер (ПК). ГИН, собранный по схеме Блюмляйна, вырабатывает импульсы напряжения с передним фронтом 10–15 ns с регулируемой амплитудой до 10 kV и частотой повторения до 100 Hz [12].

Разрядная камера представляет собой кварцевую трубку диаметром 5 см, в которую помещена электродная система из двух алюминиевых электродов, расположенных на расстоянии 0.6 см друг от друга (рис. 1). Конструкция разрядной камеры позволяет наблюдать структуру разряда и регистрировать пространственное распределение оптического излучения в разрядном промежутке и в полости катода.

Для определения влияния геометрии поверхности катода на формирование периодической структуры и характеристики страт нами были проведены исследования с электродными системами с различной кривизной поверхности катода. Схематический вид поперечного разреза трех электродных систем приведен на рис. 2. В первом случае электродная система состояла из



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки для регистрации оптических картин разряда: 1 — монохроматор-спектрограф, 2 — объектив, 3 — разрядная камера, 4 — анод, катод, 5 — высокоскоростная фотокамера PI-MAX3ICCD Camera, 6 — ГИН, 7 — осциллограф, 8 — ПК, 9 — система напуска и откачки газа, 10 — ПЗС-камера LTV-СМН-400.



**Рис. 2.** Схематический вид поперечного разреза электродных систем.

одинаковых электродов, представляющих собой плоские пластины длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0.5 см (рис. 2, a). В остальных случаях катод представлял собой цилиндрический стержень длиной 5 см и диаметром 1.2 см, вдоль которого во втором случае прорезана полость полукруглой формы радиусом 0.3 см (рис. 2, b), в третьем случае — полость прямоугольной формы шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см (рис. 2, c).

Вакуумирование системы производилось с помощью вакуумного поста TSM 3A 1001 на основе турбомолекулярного насоса. Разрядная камера предварительно перед проведением экспериментов откачивалась до  $10^{-5}$  Торр. Кроме этого, после каждой серии измерений производилось обновление газа в разрядной камере.

Измерение тока разрядки и напряжения на разрядном промежутке производились с помощью омического шунта и калиброванного делителя напряжения. Для измерения тока разряда последовательно разрядному промежутку включался распределенный шунт из малоиндуктивных сопротивлений величиной 0.3  $\Omega$ . Напряжение на разрядном промежутке измерялось омическим делителем, собранным из малоиндуктивных сопротивлений с соответствующей коррекцией в области высоких частот. В качестве регистрирующих приборов использовались двухканальный аналого-цифровой преобразователь (ЦЗО АСК-3151), подключенный к ПК, и осциллограф типа Tektronix TDS 3032B.

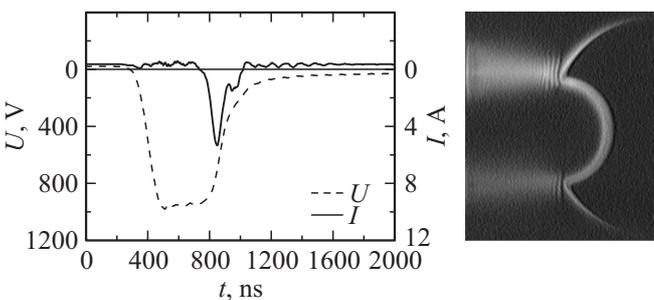
Для регистрации установившихся картин пространственного распределения оптического излучения и исследования структуры разряда использовалась ПЗС-камера модели LTV-СМН-400. Пространственно-временная динамика формирования периодической плазменной структуры разряда исследовалась с помощью высокоскоростной фотокамеры Prinseton Instruments PI-MAX3 ICCD Camera в режиме кадровый съемки оптических картин разряда через заданные промежутки времени. Для этого с помощью объектива изображение газового разряда фокусируется на входное отверстие высокоскоростной камеры PI-MAX3. Внутри камеры PI-MAX3 входное изображение фокусируется на фотокатод электронно-оптического преобразователя. Изображение с выхода усилителя в том же размере передается на ПЗС-матрицу. После детектирования ПЗС-матрицей изображение считывается контроллером, оцифровывается и передается через высокоскоростное соединение на ПК для обработки.

## 2. Экспериментальные результаты

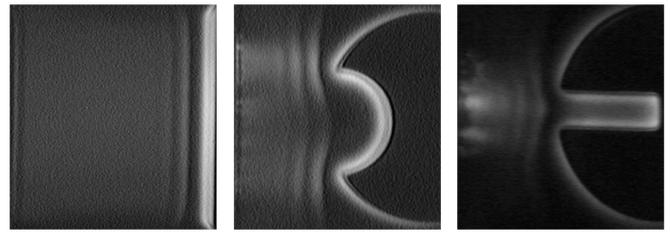
Были выполнены систематические экспериментальные исследования закономерностей формирования пространственной структуры разряда в диапазоне изменения давлений газа в камере (1–100 Torr) и амплитуды прикладываемого к электродам напряжения (0.1–1 kV). В этих же условиях измерены вольт-амперные характеристики и закономерности изменения тока и напряжения горения разряда. Исследования проводились в поперечных наносекундных разрядах с протяженным катодом с различной кривизной поверхности в He, Ne и Ar.

Было экспериментально установлено, что при небольших значениях напряжения горения, когда длина свободного пробега ускоренных в области катодного падения потенциала (КПП) быстрых электронов меньше характерного размера полости (полуширина), в промежутке между электродами формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. В разряде в гелии, неоне и аргоне при условиях формирования периодической плазменной структуры осциллограммы напряжения горения имеют практически одинаковую форму с длительностью переднего фронта 100–150 ns и со ступенькой на вершине длительностью от 1 до 3  $\mu$ s. Такая форма осциллограмм характерна для недонапряженного промежутка при импульсном пробое газов. Когда между моментом приложения напряжения к промежутку и началом пробоя проходит некоторое время, называемое временем запаздывания пробоя. На рис. 3 в качестве примера приведены осциллограммы напряжения горения ( $U_{br}$ ) и тока разряда ( $I_{br}$ ) и картина пространственного распределения оптического излучения разряда в аргоне. Из рисунка видно, что при максимуме  $I_{br} \approx 5.2$  A величина  $U_{br}$  составляет 710 V, а длительность импульса тока при это равна 250 ns. В этих условиях в разряде формируется ярко выраженная периодическая структура, состоящая из стоячих страт (рис. 3).

Систематические исследования пространственно-временной динамики формирования оптического излучения разряда показали, что при давлениях газа от 1 до 100 Torr в разряде в гелии и неоне и от 1 до 30 Torr



**Рис. 3.** Электрические характеристики и картина пространственного распределения оптического излучения разряда в аргоне при давлении газа  $p = 20$  Torr.

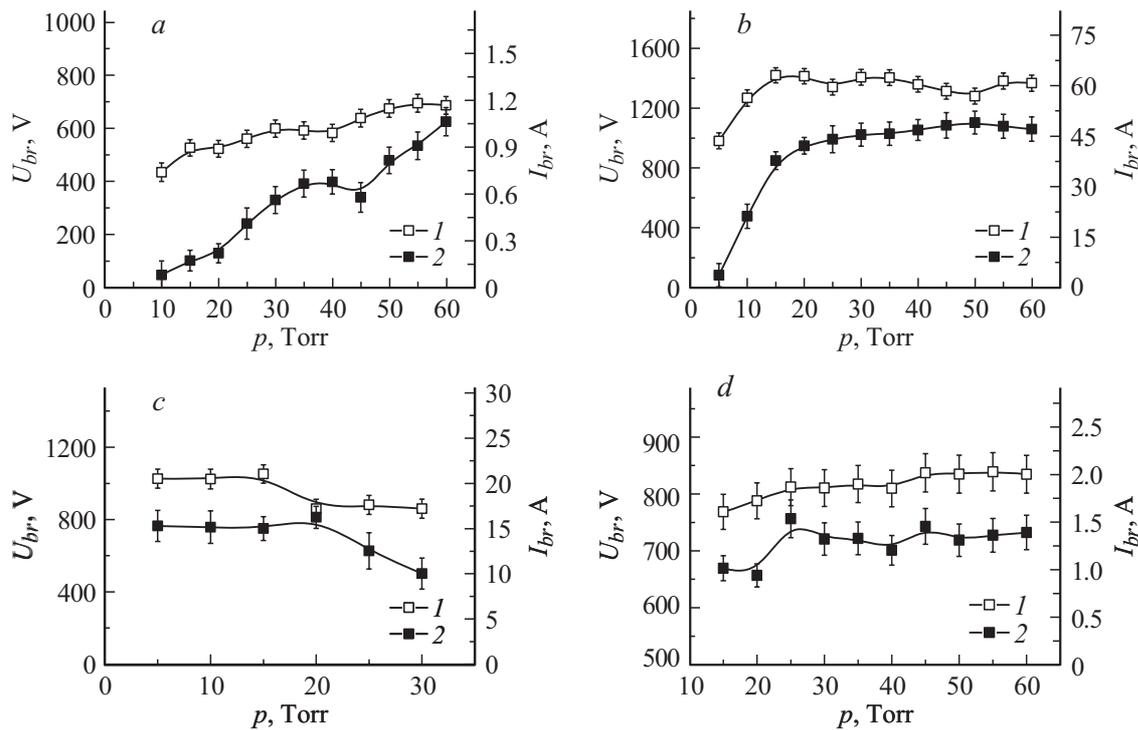


**Рис. 4.** Характерные картины пространственной структуры разряда в неоне с тремя типами катода при давлении газа  $p = 20$  Torr.

в разряде в аргоне формируется регулярная периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. На рис. 4 в качестве примера приведены картины пространственной структуры разряда с тремя различными электродными системами в неоне при одинаковых внешних условиях. Из рисунка видно, что в поперечном наносекундном разряде со всеми использованными электродными системами, в том числе и с электродной системой с плоскопараллельными электродами, формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. От геометрической формы поверхности катода в основном зависит форма самих страт и длина области положительного столба, занимаемая стратами. Слоистая структура плазменного столба во всех исследованных разрядах появляется с катодной стороны и затухает к аноду. При этом в области катода регулярная структура не наблюдается. Ближайшая к катоду страта, особенно при небольших давлениях, отличается от всех последующих по длине и интенсивности излучения. 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 фардеево темного пространства, и положительный столб вплотную приближается к поверхности катода.

Исследования разряда, в частности, с катодом с полукруглой полостью показали, что оптимальные условия формирования устойчивой плазменной структуры в разряде в гелии и неоне по току и особенно по напряжению горения разряда слабо зависят от давления газа в камере. При увеличении давления газа в разрядной камере от 10 до 60 Torr оптимальная величина  $U_{br}$  в обоих случаях практически не меняется и составляет примерно 420 V, а оптимальная величина  $I_{br}$  увеличивается почти в три раза в гелии от 0.04 до 0.11 A, в неоне от 0.24 до 0.65 A. В разряде в аргоне наблюдается более сильная зависимость оптимальных условий формирования плазменной структуры от давления газа. При увеличении давления газа от 5 до 25 Torr оптимальная величина  $U_{br}$  увеличивается от 430 до 770 V, а оптимальная величина  $I_{br}$  увеличивается более чем в двадцать раз от 0.25 до 5.30 A.

Результаты исследования пространственно-временной динамики формирования периодической структуры



**Рис. 5.** Верхние границы формирования страт в разряде с катодом с полукруглой полостью (*a* — He, *b* — Ne, *c* — Ar) и с катодом с прямоугольной полостью (*d* — He, 1 —  $U_{br}$ , 2 —  $I_{br}$ ).

разряда с помощью высокоскоростной фотокамеры PI-MAX3 показали, что периодическая структура формируется при пробое и сохраняется до завершения разряда [13]. Исходя из этого по длительности импульса тока можно оценить длительность существования периодической плазменной структуры в разряде. Такие оценки показывают, что с ростом давления газа в камере длительность существования периодической структуры разряда уменьшается. Например, в разряде с катодом с прямоугольной полостью при увеличении давления от 10 до 60 Torr длительность существования периодической структуры разряда в гелии и неоне уменьшается почти в два раза с 1.5 до 0.8  $\mu\text{s}$  в гелии и с 1 до 0.6  $\mu\text{s}$  в неоне, а в разряде в аргоне при увеличении давления от 5 до 30 Torr длительность существования периодической плазменной структуры уменьшается с 0.4 до 0.1  $\mu\text{s}$ .

Отметим здесь, что описанная выше картина наблюдается при значении прикладываемого к электродам напряжения  $U_0 = 0.5 \text{ kV}$ . При увеличении значения  $U_0$  наблюдаемые закономерности сохраняются, но при этом время запаздывания пробоя стремится к нулю, амплитудные значения  $U_{br}$  и  $I_{br}$  увеличиваются, длительности импульсов  $U_{br}$  и  $I_{br}$  существенно уменьшаются и соответственно уменьшается и время существования периодической структуры разряда.

При фиксированном значении давления газа с ростом величины  $U_{br}$  длина страт в разряде во всех газах посте-

пенно увеличивается и при определенных значениях  $U_{br}$  они сливаются и регулярная периодическая структура исчезает. При дальнейшем увеличении значений  $U_{br}$  в разрядном промежутке горит однородный объемный разряд.

Также были исследованы критические значения  $U_{br}$  и  $I_{br}$ , соответствующие верхней границе области формирования страт в разрядах в гелии, неоне и аргоне. На рис. 5 в качестве примера приведены зависимости значений  $U_{br}$  и  $I_{br}$  на верхней границе области формирования страт от давления газа в разрядах с катодом с полукруглой полостью и для сравнения в разряде в гелии с катодом с прямоугольной полостью (рис. 5, *d*). Из рисунка видно, что критические значения  $U_{br}$  и  $I_{br}$  сильно зависят от рода газа. Существенно зависит от рода газа и характер поведения критических значений  $U_{br}$  и  $I_{br}$  от величины давления газа в камере. В разряде в гелии при увеличении давления газа от 10 до 60 Torr критические значения  $U_{br}$  и  $I_{br}$  почти линейно увеличиваются. Критическое значение  $U_{br}$  увеличивается почти в 2 раза от 420 до 700 V, критическое значение  $I_{br}$  увеличивается на порядок от 0.15 до 1.15 A (рис. 5, *a*). В разряде в неоне при увеличении давления газа от 5 до 60 Torr критическое значение  $U_{br}$  увеличивается на 30% от 1000 до 1300 V, а критическое значение  $I_{br}$  увеличивается на порядок. Критическое значение  $I_{br}$  в начале при увеличении давления газа до 15 Torr резко и линейно растет от 4 до 38 A, при дальнейшем

росте давления значение  $I_{br}$  продолжает уже медленно расти и достигает при  $p = 50 \text{ Torr}$  до  $50 \text{ A}$  (рис. 5, *b*). Следовательно, верхние границы значений  $U_{br}$  и  $I_{br}$ , при которых еще существует периодическая плазменная структура в разряде, в неоне существенно больше, чем в гелии: значения  $U_{br}$  увеличиваются в три раза, а значения  $I_{br}$  более чем на один порядок. В разряде в аргоне критические значения  $U_{br}$  и  $I_{br}$  с ростом давления газа уменьшаются в отличие от их значений в разряде в гелии и неоне. При увеличении давления газа от  $5$  до  $30 \text{ Torr}$  критическое значение  $U_{br}$  уменьшается примерно на  $25\%$  от  $1250$  до  $1000 \text{ V}$ . Критическое значение  $I_{br}$  ведет себя сложным образом, в частности, при увеличении давления газа от  $5$  до  $20 \text{ Torr}$  практически не меняется и составляет  $15\text{--}17 \text{ A}$  и при дальнейшем увеличении давления газа линейно уменьшается от  $10 \text{ A}$  при  $p = 300 \text{ Torr}$  (рис. 5, *c*). В разряде в гелии с катодом с прямоугольной полостью величины критических значений  $U_{br}$  и  $I_{br}$  выше, особенно при небольших значениях  $p$ , чем в разряде с катодом с полукруглой полостью и слабо зависят от давления газа (рис. 5, *d*). В итоге область формирования периодической плазменной структуры в разряде в неоне шире, чем в аргоне, а в аргоне шире, чем в гелии, особенно по величине разрядного тока.

Систематизация полученных экспериментальных результатов показывает:

1. В импульсных разрядах наносекундной длительности в инертных газах при средних давлениях рабочего газа и небольших значениях прикладываемого к электродам напряжения формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт.

2. Слоистая структура плазменного столба во всех исследованных условиях появляется с катодной стороны и затухает к аноду. Внутри полости катода регулярная структура не наблюдается.

3. С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания страт, что приводит к уменьшению их длины и увеличению их количества.

4. Периодическая плазменная структура формируется на стадии формирования самого разряда. С ростом давления газа в камере, атомного веса рабочего газа и значения прикладываемого к электродам напряжения длительность существования плазменной структуры в разряде уменьшается.

5. Верхние границы формирования плазменной структуры по напряжению горения, и в особенности, по разрядному току в неоне намного выше, чем в аргоне, а в аргоне выше, чем в гелии.

### 3. Обсуждение результатов

Поскольку в настоящей работе исследуется импульсный разряд наносекундной длительности с протяженным полым катодом, причем открытый с двух сторон, мы

имеем дело с самоорганизацией нестационарной неравновесной плазмы со сложными граничными условиями. Корректное описание стратификации такой нестационарной плазмы с помощью системы дифференциальных уравнений для электронов, ионов и электрического поля с учетом влияния объемного заряда в трехмерном случае (страты являются положительно заряженными плазменными 3D-структурами) является отдельной и достаточно сложной задачей. Исходя из этого ниже мы остановимся на качественном анализе полученных результатов и сделаем попытку объяснить природу образования страт в столь сложных условиях. Как известно, наблюдаемый слоистый положительный столб 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 в исследованных разрядах при условиях стратификации. Имея в виду, что исследованный нами наносекундный разряд при условиях стратификации близок к промежуточному между аномальным и нормальным разрядами, все последующие оценки сделаем с учетом этого обстоятельства. Значения основных параметров разряда с катодом с полукруглой полостью и плазменной структуры приведены в табл. 1–3. Средняя приведенная напряженность электрического поля  $(E/N)_p$  оценивалась по значению напряжения горения разряда в момент максимума разрядного тока. При оценке значений  $(E/N)_p$  мы предположили, как и для нормального разряда, что величина падения напряжения на плазменном столбе  $U_{ps} = U_b/2$ . Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались по формуле  $n_e = j/ev_{dr}$ , где  $j$  — плотность разрядного тока,  $v_{dr}$  — дрейфовая скорость электронов (определялась из графиков  $v_{dr}(E/N)$  [14]). Размеры страт ( $l_s$ ) определялись из оптических картин по количеству страт в разрядном промежутке и длины области плазменного столба, занимаемого ими. Длина релаксации энергии электронов за счет упругих ударов с атомами газа вычислялась по формуле  $\lambda = v_{dr}\tau$ , где  $\tau = (\delta v_{ea})^{-1}$  — время релаксации энергии электронов, коэффициент  $\delta = 2m/M$ ,  $v_{ea}$  — частота упругих электрон-атомных столкновений. Для гелия  $\delta = 2.76 \cdot 10^{-4}$ ,  $v_{ea} = 2.4 \cdot 10^9 p [\text{Torr}]s^{-1}$ ; для неона  $\delta = 5.52 \cdot 10^{-5}$ ,  $v_{ea} = 6 \cdot 10^9 p [\text{Torr}]s^{-1}$ ; для аргона  $\delta = 2.76 \cdot 10^{-5}$ ,  $v_{ea} = 13 \cdot 10^9 p [\text{Torr}]s^{-1}$  [15].

Анализ экспериментальных результатов и полученных оценок параметров разряда и плазменной структуры в He, Ne и Ar показывает, что размеры страт и концентрация заряженных частиц в плазме сильно зависят от рода рабочего газа. В аргоне продольный размер страты почти в пять раз меньше, чем в гелии, а концентрация электронов в разрядной плазме на два порядка больше при примерно одинаковых разрядных условиях. Страты имеют максимальную длину в разряде с катодом с полукруглой полостью и при  $p = 5 \text{ Torr}$  составляют  $0.2$ ,  $0.1$  и  $0.05 \text{ cm}$  для гелия, неона и аргона соответственно.

**Таблица 1.** Параметры разряда с катодом с полукруглой полостью и плазменной структуры в гелии

$p$ , Torr	10	15	20	25	30	35	40	50	60
$U_{br}$ , V	400	420	425	430	430	425	430	410	420
$J$ , $10^{-3}$ A/cm <sup>2</sup>	7	17	17	18	22	24	32	27	36
$(E/N)_p$ , Td	121	84	64	52	43	37	33	25	21
$n_e$ , $10^9$ cm <sup>-3</sup>	1.2	4.4	6.1	8.0	12.3	16.3	28.6	29.1	47.9
$l_s$ , $10^{-1}$ cm	1.40	0.90	0.66	0.54	0.51	0.47	0.37	0.34	0.30
$\lambda$ , cm	6.64	2.88	1.62	1.11	0.72	0.49	0.35	0.22	0.13

**Таблица 2.** Параметры разряда с катодом с полукруглой полостью и плазменной структуры в неоне

$p$ , Torr	10	15	20	25	30	35	40	50	60
$U_{br}$ , V	490	480	450	420	420	420	420	490	430
$J$ , $10^{-3}$ A/cm <sup>2</sup>	40	52	62	72	75	72	74	156	163
$(E/N)_p$ , Td	149	96	68	51	42	36	32	30	22
$n_e$ , $10^{10}$ cm <sup>-3</sup>	0.6	1.3	2.0	2.9	3.6	3.9	4.4	9.8	13.4
$l_s$ , $10^{-1}$ cm	0.70	0.54	0.46	0.38	0.34	0.32	0.30	0.24	0.20
$\lambda$ , cm	12.38	5.84	3.62	2.17	1.61	1.21	0.94	0.69	0.40

Во всех исследованных условиях с ростом атомного веса рабочего газа концентрация свободных электронов в разряде с плазменной структурой растет. В разряде с катодом с прямоугольной полостью (рис. 2, *c*) концентрация электронов существенно больше, чем с другими электродными системами. Максимальная концентрация электронов, при которой еще наблюдается периодическая плазменная структура в разряде, с катодом с прямоугольной полостью в гелии составляет  $4 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-3</sup>, в аргоне  $7 \cdot 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>. Сравнение результатов приведенных в табл. 1 и 4, показывает, что в разряде с катодом с прямоугольной полостью также существенно выше значения плотности тока и приведенного поля при примерно одинаковом значении длины страт. Во всех исследованных условиях с ростом концентрации плазменных электронов в разряде длина страт уменьшается, а с ростом приведенного поля  $(E/N)_p$  наоборот, длина страт увеличивается. При постоянном давлении с ростом напряженности электрического поля и следовательно, концентрации ускоренных электронов в разрядном промежутке периодическая плазменная структура размывается и исчезает.

**Таблица 3.** Параметры разряда с катодом с полукруглой полостью и плазменной структуры в аргоне

$p$ , Torr	5	10	15	20	25
$U_{br}$ , V	430	580	670	710	770
$J$ , $10^{-3}$ A/cm <sup>2</sup>	63	286	550	1267	2080
$(E/N)_p$ , Td	253	176	134	108	93
$n_e$ , $10^{11}$ cm <sup>-3</sup>	0.3	1.6	3.8	10.2	18.6
$l_s$ , $10^{-1}$ cm	0.48	0.32	0.25	0.20	0.16
$\lambda$ , cm	10.03	3.62	1.93	1.19	0.89

Для определения основных механизмов, участвующих в образовании периодической плазменной структуры в виде стоячих страт, сделаем некоторые оценки для случая разряда в гелии. При  $(E/N)_p \approx 70$  Td дрейфовая скорость электронов  $v_{dr} \approx 1.8 \cdot 10^7$  cm/s [14], и время дрейфового ухода электронов на анод составляет  $\tau_{dr} \approx d/v_{dr} \approx 30$  ns, где  $d = 0.6$  cm — расстояние между электродами. Дрейфовая скорость иона при рассматриваемом значении  $E/Nv_+ \approx 2 \cdot 10^5$  cm/s [16]. Время дрейфового ухода ионов на катод составляет  $\tau_+ \approx d/v_+ \geq 3 \cdot 10^{-6}$  s. Время диффузии электронов из разрядной области  $\tau_d = \Lambda^2/D$ , где  $\Lambda = R/2.4$  — характерная диффузионная длина,  $D = v_e^2/3v_{ea}$  — коэффициент свободной диффузии. Для  $R = 1$  cm,  $p = 20$  Torr и средней энергии электронов  $\varepsilon = 5$  eV, используя оценочную формулу из [15],  $v_e = 5.93 \cdot 10^7 (\varepsilon)^{0.5} \approx 1.3 \cdot 10^8$  cm/s, получим  $\tau_d \approx 1.1 \cdot 10^6$  s.

Полученные оценки показывают, что в наносекундных разрядах в инертных газах с параметрами  $(E/N)_p$  порядка 100 Td и давлении газа в несколько десятков Torr 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 и внутренние поля определяются только ионизацией прямым электронным ударом и дрейфовым переносом электронов в электрическом поле, формируемом объемным зарядом ионов, т.е. исследованные в настоящей работе стоячие страты скорее являются ионизационно-дрейфовыми волнами, а не ионизационно-диффузионными, как в стационарных разрядах [4–6]. Возможность ионизационно-дрейфового механизма формирования страт подтверждают результаты оценок дли-

**Таблица 4.** Параметры разряда с катодом с полукруглой полостью и плазменной структуры в неоне

$p, \text{Torr}$	10	15	20	25	30	35	40	50	60
$U_{br}, \text{V}$	550	560	570	575	600	605	605	605	605
$J, 10^{-3} \text{ A/cm}^2$	47	48	50	60	74	101	123	145	200
$(E/N)_p, \text{Td}$	156	113	86	70	61	52	46	37	31
$n_e, 10^9 \text{ cm}^{-3}$	6.6	9.4	13.1	19.7	28.4	46.4	64.1	101.8	176.1
$l_s, 10^{-1} \text{ cm}$	1.20	0.90	0.75	0.60	0.49	0.45	0.39	0.31	0.26
$\lambda, \text{cm}$	6.76	3.21	1.80	1.15	0.82	0.59	0.45	0.27	0.18

ны энергетической релаксации электронов за счет упругих ударов, которые на порядок больше чем длина страт (табл. 1–4), а также согласием длины страты с длиной свободного пробега электронов в разряде. Электроны ускоряются под действием самосогласованного поля в области скачка потенциала между стратами и на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для возбуждения и ионизации атомов газа. Затем в результате ионизации образуется группа медленных электронов, которые, двигаясь в электрическом поле вновь набирают энергию и так далее. Подтверждением такого механизма образования страт являются результаты работы [17], в которой для страт малой амплитуды в неоне приводятся экспериментально полученные графики возмущения функции распределения электронов в зависимости от фазы волны.

В табл. 5 для фиксированного значения давления газа  $p = 20 \text{ Torr}$  приведены критические значения приведенного поля и концентрации электронов на верхней границе области формирования страт, при которых плазменная структура размывается, и разряд с катодом с полукруглой полостью переходит в однородную объемную форму горения.

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  $I_E \sim E/4\pi en_e$  — векторизованным размером изменения напряженности электрического поля  $E$  [18]. Это справедливо до появления в разрядном промежутке ускоренных в катодном слое электронов. Если размеры деградации пучков высокоэнергетических электронов в плазме сравнимы или больше характерных размер страт, то деградация пучков существенно влияет на процессы формирования регулярной структуры. При энерговкладе в разрядный промежуток, который приводит к формированию пучка электронов с энергией, достаточно, чтобы ускоренные электроны появились в разрядном

промежутке, регулярная плазменная структура исчезает. В итоге слияния всей системы начальных страт происходит перенос тока при формировании только одного слоя — отрицательного свечения у катода с формированием однородного положительного столба.

Оценки длин пробега ускоренных в области КПП электронов в разряде с периодической плазменной структурой в гелии из данных табл. 1 по формуле [19]

$$pL = 6.5 \cdot 10^{-4} (eU_c)^{1.54} \quad (1)$$

(здесь  $U_c = U_b/2$  — значение КПП) показывают, что при изменении давления газа в разрядной камере от 10 до 60 Torr значения  $L$  меняются от 0.23 до 0.04. Полученные значения длины пробега ускоренных в области КПП электронов в плазме меньше радиуса полукруглой полости катода  $r = 0.3 \text{ cm}$ , следовательно, в разрядном промежутке отсутствуют высокоэнергетические электроны. В то же время оценка по формуле (1) значения  $L$  по данным табл. 5 для гелия дает  $L = 0.3 \text{ cm}$ . Это подтверждает, что уже при критических значениях  $U_{br}$ , соответствующих верхней границе области формирования страт в разряде, в промежутке появляются ускоренные в области КПП электроны, которые, по-видимому, и разрушают плазменную структуру. При напряжении горения выше критических значений плазменная структура исчезает, и во всем разрядном промежутке формируется однородный объемный разряд.

## Заключение

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показывают, что в поперечных наносекундных разрядах с катодом с различной кривизной поверхности в гелии, неоне и аргоне в определенном диапазоне условий формируется периодическая структура разряда в виде стоячих страт. Периодическая структура образуется при небольших значениях напряжения горения, когда длина свободного пробега ускоренных в области катодного падения потенциала быстрых электронов меньше характерного размера полости (полуширина). Плазменная структура появляется на стадии формирования разряда, длительность ее существования в исследованных условиях меняется от 0.1 до  $1.5 \mu\text{s}$  и зависит от рода рабочего газа, давления и величины прикладываемого к электродам напряжения. Определены критические значения напряжения горения и разрядного тока на

**Таблица 5.** Параметры разряда

Газ	$U_b, \text{V}$	$J, \text{A/cm}^2$	$(E/N)_p, \text{Td}$	$n_e, \text{cm}^{-3}$
He	730	0.04	85	$2.1 \cdot 10^{10}$
Ne	1600	7.33	194	$1.1 \cdot 10^{12}$
Ar	1420	2.75	172	$1.7 \cdot 10^{12}$

верхней границе области формирования периодической структуры в разряде в гелии, неоне и аргоне. Оценки показывают, что в исследованных наносекундных разрядах основными процессами, приводящими к стратификации разряда, являются ионизация элеткронным ударом и дрейфовый перенос электронов в самосогласованном электрическом поле и плазменная структура имеет ионизационно-дрейфовую природу. Одной из причин размывания плазменной структуры при повышении прикладываемого к электродам напряжения является формирование ускоренных электронов в разрядном промежутке.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектной части госзадания Минобрнауки России в научной деятельности, проект 3.12622.2014К.

## Список литературы

- [1] Демьянов А.В., Мазалов Д.А., Напартович А.П. и др. // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. № 4. С. 1266–1272.
- [2] Golubovskii Yu.B., Skoblo A.Y., Wilke C. et. al. // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 72. P. 026414–026421.
- [3] Tsendin L.D. // Plasm. Sourx. Sci. Technol. 2009. Vol. 18. P. 014020.
- [4] Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. // УФН. 1980. Т. 132. Вып. 4. С. 601–637.
- [5] Kolobov V.I. // J. Phys. D: All. Phys. 2006. Vol. 39. P. R487–R506.
- [6] Цендин Л.Д. // УФН. 2010. Т. 180. № 2. С. 139–164.
- [7] Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д. и др. Кинетика электронов в неравновсной газоразрядной плазме. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 248 с.
- [8] Ruzicka T. // Czech. J. Phys. Ser. B. 1968. Vol. 18. N 7. P. 928–936.
- [9] Twiddy N.D. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1961. Vol. 262. N 1310. P. 379–394.
- [10] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 16. С. 62–69.
- [11] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 1–7.
- [12] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63–70.
- [13] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Рамазанов А.Р., Шахсинов Г.Ш. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 15. С. 71–79.
- [14] Kiskuprasi H.N., Lucas J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. Vol. 14. P. 2001–2014.
- [15] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [16] Helm H. // J. Phys. B. 1977. Vol. 10. P. 3683–3697.
- [17] Голубовский Ю.Б., Скобло А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 16. С. 78–85.
- [18] Высикайло Ф.И. // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. № 5. С. 1071–1081.
- [19] LaVerneJay A., Mozumder A. // J. Phys. Chem. 1985. Vol. 89. N 20. P. 4219–4225.