

1. 2005-23722. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada. 10—14 Jan. 2004, Reno, Nevada, USA.
2. Попов Н. А.// Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 10. P. 940—950.
3. Попов Н. А.// Там же. 2003. Т. 29. № 8. С. 754—767.
4. Попов Н. А.// Там же. 2006. Т. 32. № 3. С. 1—9.
5. Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В. Химия плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1987. Вып. 14. С. 207.
6. Aleksandrov N. L., Bazelyan E. M., Kochetov I. V., Dyatko N. A.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. № 30. С. 1616—1624.
7. Косый И. А., Костинский А. Ю., Матвеев А. А., Силаков В. П.// Труды ИОФАН. 1994. Т. 47. С. 37—57.
8. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных газовых явлений. — М.: Гостехиздат, 1966.
9. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
10. Биберман Л. М., Воробьев В. С. Якубов И. Т. Неравновесная кинетика низкотемпературной плазмы. — М.: Наука, 1982.
11. Осипов А. И., Уваров А. В.// УФН. 1996. Т. 166. № 6. С. 639—650.
12. Велихов Е. П., Письменный В. Д., Рахимов А. Т.// Там же. 1977. № 122. С. 419.
13. Ханартович А. П., Старостин А. Н.// В кн: Химия плазмы/ Под ред. Б. М. Смирнова— М.: Атомиздат, 1979. Вып. 6. С. 153.
14. Ким А. В., Гильденбург В. Б.// Физика плазмы. 1980. Т. 6. № 4. С. 496—499.
15. Ким А. В., Фрайман Г. М.// Там же. 1983. Т. 9. № 3. С. 613—617.
16. Голубев С. В., Грицинин С. И., Зорин В. Г., Косый И. А., Семенов В. Е. СВЧ-разряд высокого давления в пучках электромагнитных волн// В сб. Высокочастотный разряд в волновых полях. — Горький, ИПФ АН СССР, 1988. С. 136—197.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2006 г.

About a positive discharge column structure in a transversal air flow.

Part I

A. F. Alexandrov, V. L. Bychkov, S. A. Dvinin, V. V. Mikheyev, V. S. Sviridkina
M. V. Lomonosov Moscow State University. Physical Faculty, Russia

Given article is devoted to examination of direct current discharge characteristics of in a transversal gas flow. Processes in an area of the positive discharge column have been investigated numerically and analytically. It is shown, that the traversal size of the positive column appears to be essentially smaller at the account of electron attachment with respect to its absence. Approximate expressions for velocities of discharge boundaries displacement over a neutral gas and their dependence on curvature radius of occupied by plasma area have been obtained. Conditions of ionization — overheating instability development and its impact on the discharge characteristics have been discussed. It is shown that there are two possible modes of discharge development with respect to initial conditions. They are: the uniform slow warm-up of all discharge section and a mode of ionization — overheating instability, accompanied with diminution of the discharge traversal section, decrease of electric field strength in the positive column and sharp growth of temperature. Features of transition from one mode to another are explored at the account of the discharge traversal section growth and drift of ions along the electric current.

УДК 537.521

Каналирование газовых разрядов

А. З. Эфендиев, К. А. Эфендиев

Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Российская Федерация

Приведены результаты экспериментального исследования многоканального разряда, возникающего в гелии под действием излучения искры в однородном поле, когда напряжения на газовом промежутке меньше напряжения статического пробоя. Установлено, что причиной возникновения многоканального разряда является искажение поля у катода пространственным зарядом положительных ионов. Установлены закономерности формирования искровых каналов в гелии, аргоне, воздухе, азоте и элегазе (SF₆), дан обзор работ по каналированию газовых разрядов.

© Эфендиев А. З., Эфендиев К. А., 2007

В последние годы большое внимание уделяется исследованию объемных разрядов и их переходу в контрагированное состояние, что ограничивает время горения и мощность объемных разрядов, применяемых в

лазерной технике. В этой связи представляет интерес обзор работ, посвященных исследованию каналирования газовых разрядов.

В работе [1] установлено, что в однородном поле при облучении газового промежутка импульсом света от искры в нем возникает многоканальный разряд, горящий в форме параллельных токовых каналов (в форме кисти) при напряжениях, меньших статического пробивного напряжения. Отмечено, что причиной возникновения токовых каналов-кистей является резкое локальное искажение электрического поля на катоде пространственными зарядами положительных ионов.

Создавая искусственное искажение поля путем укрепления острей на катоде, можно подобрать такие условия, при которых при постепенном повышении напряжения на разрядном промежутке каналы возникают последовательно с каждого острей без внешнего облучения.

В работе [1] также исследовалось формирование искрового канала в гелии, аргоне, воздухе, азоте и элегазе (SF_6) в зависимости от напряжения пробоя, длины газового промежутка, который облучается светом от искры.

Методика эксперимента

Влияние интенсивного облучения светом от искры на возникновение разряда изучалось по методикам исследования пробоя облученных промежутков как в режиме недонапряжения, так и в режиме перенапряжения, разработанных в работах [1—3]. Мощность облучения в процессе эксперимента оставалась постоянной. Исследование временных характеристик вели с помощью осциллографов системы И. С. Стекольниковой, ОК-17 и С1-24.

Зависимость распределения потенциала от длины промежутка вдоль оси кисти снималась компенсационным методом цилиндрическим зондом, изготовленным из нихрома диаметром 0,2 мм [3].

Напряжение при пробоях в режиме недонапряжения измеряли электростатическими киловольтметрами типа С-50, С-95 и С-96, а силу тока — микроамперметром М-109 для многоканального разряда.

Исследование развития искрового канала в пространстве и времени исследовали методом соединения осциллографа с электронно-оптическим преобразователем (эпографом), временная развертка которых осуществлялась одним и тем же импульсом напряжения. Таким образом, имея эпограмму и осциллограмму для одного и того же разряда и в одном и том же масштабе времени, мы получаем возможность сравнивать изменения в падении напряжения на газовом промежутке от напряжения пробоя до напряжения горения дуги и оптические фазы развития разряда в пространстве и времени.

При исследовании импульсного пробоя газов напряжение пробоя и временные характеристики пробоя определялись по осциллограммам изменения напряжения на промежутке, относительная ошибка измерения времени менялась в пределах 1—10 %, а напряжения пробоя — 3—10 %.

Исследования проводились в следующих газах: гелий (чистота 99,8 %), аргон (с примесью азота 0,23 %, кислорода 0,05 %), азот (с примесью кислорода 0,5 %), элегаз (SF_6) (чистотой 98 %) и воздух.

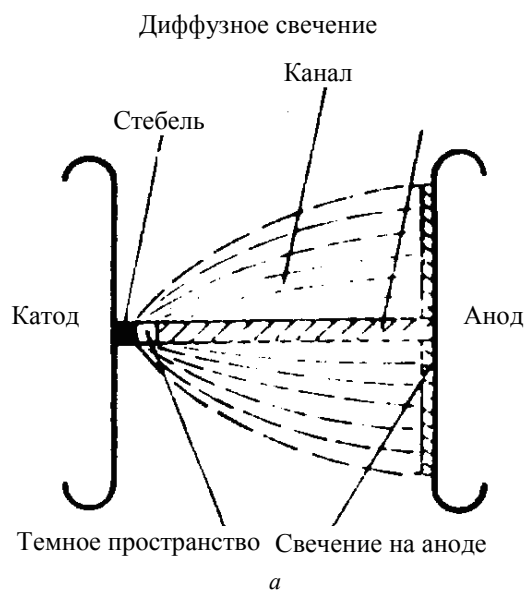
Экспериментальные данные и их обсуждение

В гелии при напряжениях, близких к минимальному напряжению пробоя U_m с облучением, наблюдалось возникновение многоканального разряда, состоящего из одной кисти, схематический вид которой приведен на рис. 1, а. Кисть состоит из пяти структурных элементов: стебля, канала, темного пространства, диффузного свечения вокруг канала и свечения на аноде.

Стебель находится на катоде (см. рис. 1, а, б) и поднимается над его поверхностью в виде цилиндра и свечится белым светом с бледно-фиолетовым оттенком.

От конца стебля, почти до анода, тянется канал диаметром чуть больше диаметра стебля, который светится бледно-фиолетовым светом. Вокруг канала имеется диффузное бледно-фиолетовое или голубое свечение в виде конуса с вершиной над поверхностью стебля.

При дальнейшем повышении напряжения горения канал исчезает, что ведет к повышению напряжения горения, при этом канал превращается в область голубого свечения (см. рис. 1, б). С повышением напряжения горения уменьшается длина стебля и темного пространства, увеличивается яркость свечения всех элементов кисти.



а

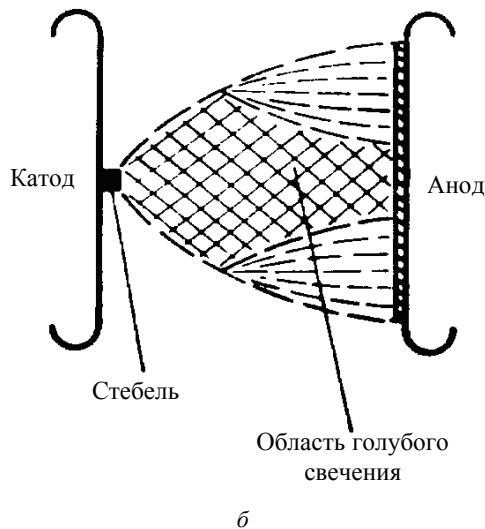


Рис. 1. Схематические виды кистей:
а — кисть с каналом; б — кисть без канала

При атмосферном давлении и длине промежутка 1 см под действием излучения искры при минимальном напряжении пробоя $U_{\min} = 1,7$ кВ возникает несамостоятельный многоканальный разряд. Самостоятельный разряд возникает при напряжении пробоя $U = 1,90$ кВ. В результате пробоя напряжение на промежутке снижается до 1,65 кВ.

Повышение напряжения горения на разрядном промежутке при горящем в нем многоканальном разряде после исчезновения канала приводит к его переходу в искровой разряд при напряжении U_k .

На рис. 2, а представлено развитие кисти, что обусловило повышение напряжения горения разряда, а также напряжения зажигания до $U_i = 2,2$ кВ, при этом напряжение на промежутке упало до 1,88 кВ, чему соответствовал ток $I = 0,05$ мА.

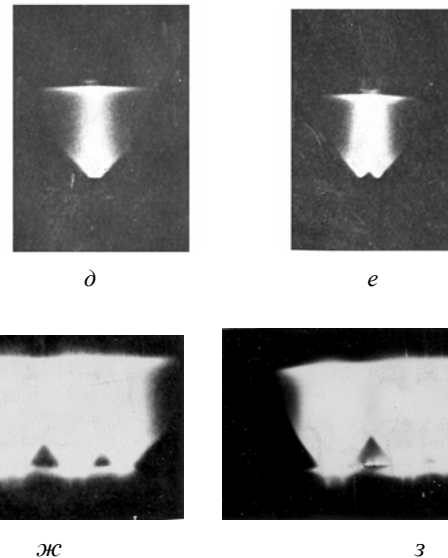
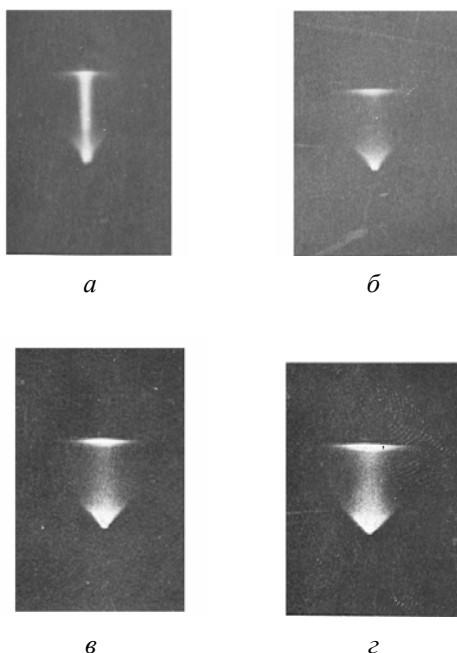


Рис. 2. Развитие многоканального разряда:
а—е — с повышением напряжения горения;
ж, з — со многими кистями
Анод — сверху, катод — внизу.

Повышение напряжения горения до 1,96 кВ приводит к исчезновению канала (см. рис. 2, б) и одновременному понижению тока до 0,045 мА. Дальнейшее повышение напряжения горения до 2,05 кВ приводит к росту тока от 0,045 до 0,08 мА (см. рис. 2, в, г). На рис. 2, д, е видно, как в газовом промежутке возникла вторая кисть под действием облучения первой кисти при повышении напряжения горения выше 2,05 кВ. На рис. 2, д зафиксированы две кисти, находящиеся в плоскости, проходящей через ось фотоаппарата, а на рис. 2, е — в плоскости, перпендикулярной оси.

При сравнении рис. 2, а и б видно, что переход от кисти с каналом к кисти без канала из-за роста напряжения горения связан с сужением стебля. На рис. 2, а диаметр стебля составлял 1,4 мм при $U_c = 1,88$ кВ, а на рис. 2, б диаметр уменьшился до 0,8 мм при $U_c = 1,96$ кВ.

В таблице приведены значения напряжений зажигания U_i , при которых возникает стационарный многоканальный разряд при подсветке, и напряжения горения U_c многоканального разряда, а также соответствующие им силы тока для газового промежутка длиной 1 см при давлении 760 Торр.

U_i , кВ	U_c , кВ	I_{dis} , мА	Примечание
2,20	1,87	0,05	Кисть с каналом
2,20	2,05	0,07	Канал исчез
2,20	2,00	0,10	Две кисти в газовом промежутке
2,20	2,02	0,12	—
2,20	2,05	0,15	—
2,20	2,08	0,17	—
2,20	2,10	0,21	Разряд становится нестабильным и затухает или переходит в искру

Данные таблицы относятся к стационарному многоканальному разряду, возникшему при подсветке, когда напряжение зажигания U_i равнялось 2,20 кВ. После зажигания разряда напряжение снизилось до 1,87 кВ при

токе 0,05 мА. Дальнейшее повышение напряжения горения до 2,05 кВ привело к исчезновению канала. При напряжении 2,05 кВ возникает вторая кисть рядом с первой, что приводит к падению напряжения на разрядном промежутке до 2,00 кВ и росту силы тока почти в два раза. Из таблицы также видно, что когда в промежутке имеется одна кисть и она горит при напряжении 1,87 кВ, то через него проходит ток $I_{dis} = 0,05$ мА. В случае, когда в промежутке имеются две кисти (при $U_c = 2,00$ кВ), через него проходит ток $I_{dis} = 0,10$ мА.

Таким образом, для данного напряжения горения сила разрядного тока определяется числом кистей в разрядном промежутке. Дальнейшее повышение напряжения от 2,00 до 2,10 кВ (когда в промежутке две кисти) приводит к росту тока от 0,10 до 0,21 мА. При напряжении $U_c = 2,10$ кВ многоканальный разряд становится нестабильным и затухает. В других подобных случаях многоканальный разряд переходит в искровой с резким падением напряжения на промежутке.

На рис. 3 представлена вольтамперная характеристика (ВАХ): участок АБ — это ВАХ многоканального разряда, состоящего из одной кисти; участки ВД ВАХ — многоканальный разряд из двух кистей, а ГМ — из четырех кистей. В целом ВАХ является возрастающей. Разрывы на участках БВ и ДГ ВАХ связаны с возникновением новых кистей в многоканальном разряде. Под действием излучений, горящих в промежутке кистей, без внешнего облучения с повышением напряжения горения возникают новые кисти, число которых в условиях опытов доходило до 14. Кисти занимали весь объем межэлектродного пространства.

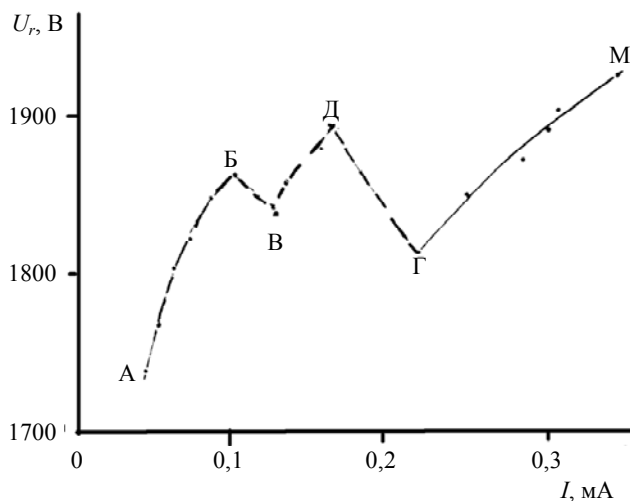


Рис. 3. Вольтамперная характеристика многоканального разряда

Как правило, когда число кистей в промежутке больше двух, новые кисти возникают попарно и располагаются по окружности. Расстояние между парными кистями остается постоянным в определенных условиях.

Таким образом, определен диапазон давлений от 360 до 1786 Торр, в котором появляется многоканальный разряд и когда длина газового промежутка равна 1 см.

При атмосферном давлении многоканальный разряд возникает при длине газового промежутка $d \geq 8$ мм.

На рис. 2, ж и з приведены многоканальные разряды, состоящие из многих кистей. Плотность тока в стебле при изменении давления от 478 до 1265 Торр остается почти постоянной и равной порядка 10^{-4} А/см². Авторами данной работы установлено влияние примеси аргона в гелии на возникновение многоканального разряда. В смеси гелия и аргона многоканальный разряд возникает до 840 Торр (парциальное давление аргона в смеси 220 Торр).

Анализируя экспериментальные данные о многоканальном разряде, можно отметить, что открыта новая форма разряда, которая возникает в гелии и смеси гелия с аргоном под действием излучения искрового разряда в диапазоне напряжений от минимального напряжения пробоя с подсветкой U_m до напряжения перехода многоканального разряда в искровой U_k , когда произведение pd меняется в пределах 360—1786 Торр·см. Новые кисти в нем возникают под действием излучения кистей, существующих в газовом промежутке, с ростом напряжения горения. Если кистевой разряд состоит из многих кистей, то основания их стеблей располагаются на окружности, радиус которой уменьшается с повышением напряжения горения разряда U_c . Сила тока через многоканальный разряд пропорциональна числу кистей при данном напряжении U_c .

Л. Леб [4], исследуя корону в воздухе с отрицательного острия, указал, что визуальные характеристики отрицательной короны аналогичны характеристикам тлеющего разряда. Если многоканальный разряд сравнить с последним, то можно заметить, что темное пространство в кисти соответствует темному Фарадееву пространству, стебель — отрицательному тлеющему свечению, а канал с окружающим диффузным свечением — положительному столбу.

Таким образом, одной из возможных причин возникновения многоканального разряда (в первоначально однородном поле) можно считать сильное искажение поля у катода положительным пространственным зарядом ионов, в основном оставленных последовательными группами электронных лавин, которые возникли под действием мощного ультрафиолетового облучения катода и газа. Возможно, когда положительный пространственный заряд подходит к поверхности катода, поле между ним и поверхностью катода резко усиливается, что приводит к пробое газа между поверхностью катода и положительным пространственным зарядом, т. е. в данном случае имеет место неполный пробой промежутка.

В условиях наших опытов за время существования подсветки может возникнуть много последовательных групп лавин. По нашему мнению, одна из таких групп лавин, развиваясь в суммарном поле электродов и пространственного заряда положительных ионов, оставленных предыдущими группами лавин, из-за статистических флуктуаций может создать большой пространственный заряд положительных ионов, что может вызвать возникновение катодного или активного пятна, которое становится обильным источником электронов. Далее электроны, выходящие из катодного (активного) пятна в сильном поле между поверхностью

катода и пространственным зарядом, производят сильную ионизацию и возбуждение газа, и поэтому эта область должна сильно светиться. Медленные электроны, потерявшие свою энергию на ионизацию и возбуждение газа между катодом и положительным зарядом, могут рекомбинировать с положительными ионами. Электроны, прошедшие область сосредоточения положительных ионов через темное пространство, попадают в положительный столб, где могут иметь место ступенчатая ионизация, возбуждение и рекомбинация. Процесс ступенчатой ионизации в гелии усиливается из-за наличия метастабильных состояний атомов гелия, чему способствует внешнее облучение. Непрерывный выход электронов из катода, по нашему мнению, обеспечивается бомбардировкой активного пятна положительными ионами и фотонами, рожденными в многоканальном разряде, о чем свидетельствует тот факт, что излучение многоканального разряда без внешнего облучения вызывает возникновение новых кистей.

Итак, канал в кисти (см. рис. 1) образуется в цилиндрическом объеме с диаметром, определяемым диаметром активного пятна на катоде. Объяснением того, что канал с окружающим диффузным свечением имеет форму параболоида вращения, может быть ослабление поля между положительным пространственным зарядом и анодом, что приводит к усилению боковой диффузии электронов. На самом деле между средним радиальным расстоянием r , обусловленным диффузией электронов, и временем t их прохождения между положительным зарядом и анодом имеет место соотношение $r = \sqrt{2Dt}$, где D — коэффициент диффузии электронов.

При повышении напряжения горения канал в кисти преобразуется в область голубого свечения, которая расширяется при приближении к катоду (см. рис. 1, б), что связано с усилением поля положительных пространственных зарядов у катода.

Пропорциональность силы тока в многоканальном разряде числу кистей в нем для одного и того же напряжения горения, по нашему мнению, объясняется ограничением тока катодным (активным) пятном, как в дуговом разряде [5, 6].

Одним из доказательств последнего утверждения может служить тот факт, что кисть при приближении напряжения горения к напряжению перехода многоканального разряда в искровой начинает быстро менять свое положение в разрядном промежутке. Возможно, что это движение связано с истощением катодного (активного) пятна.

Экспериментальный факт, что стебли кистей, из которых состоит многоканальный разряд, располагаются на окружности, диаметр которой уменьшается с ростом напряжения горения, объясняется тем, что радиус окружности принимает определенное значение при равенстве магнитных сил притяжения параллельных токов (в кистях) и кулоновских сил отталкивания пространственных зарядов положительных ионов в кистях.

В работе [1] выдвинута идея о том, что если в однородном поле на катоде укрепить острия, которые создают резкие локальные нарушения однородности поля, то можно вызвать образование многоканального разря-

да, такого же, как в однородном поле под действием излучения искры. В качестве катода [3] использовали стальной электрод диаметром 4 см, в центре которого было впессовано острие из нержавеющей стали высотой 2 мм и с углом при вершине 20° , а также стальной электрод диаметром 8 см, на котором по концентрическим окружностям (расстояние между ними 5 мм) высотой 1,5 мм через 10° было впессовано 209 бронзовых острий диаметром 0,8 мм с радиусом при вершине 0,1 мм. Плоские аноды, соответственно, имели диаметры 4 и 8 см.

При установлении в центре катода одного острия разряд возникает в форме одного канала — кисти, который полностью замыкает разрядный промежуток, так что условие возникновения кисти имеет вид

$$\gamma \exp \int_r^d \alpha(x) dx = 1,$$

где r — радиус конца острия;

α — первый коэффициент Таунсенда с поправкой на неоднородность поля;

d — длина промежутка;

γ — третий коэффициент Таунсенда.

Наши исследования показали, что условия возникновения и горения многоканального разряда практически не зависят от материала катода и острий, а зависят при данных P и d от формы острий, их числа и расположения, что обусловлено, как и в случае коронного разряда, локализацией пространственных зарядов у острий [7], а независимость условий возникновения разряда от материала острий свидетельствует о том, что в возникновении разряда большую роль играют процессы, происходящие в самом газе.

Ход вольтамперной характеристики с одного острия аналогичен характеристике многоканального разряда в однородном поле, т.е. является возрастающим.

На рис. 4 приведено распределение потенциала вдоль оси от острия, установленного на катоде, до анода (кривая 2), снятое при $p = 253,3$ кПа, $d = 1,5$ см, $U_c = 5,5$ кВ, $I = 180$ мкА, через каждые 0,25 мм длины промежутка. Для наглядности на рис. 4 приведена пунктирная прямая, соответствующая распределению потенциала между острием и анодом, если бы поле было однородным, и распределение потенциала между электродами вне разряда (кривая 1). Как видно из рис. 4, у электродов имеются области резкого падения потенциала, обусловленного нескомпенсированным пространственным зарядом; потенциалы в точках вдоль оси от острия до анода ниже, чем в равноудаленных точках промежутка вне разряда.

Если обозначить минимальное напряжение зажигания при облучении через U_m , то $\frac{U_0 - U_m}{U_0} \cdot 100\%$ будет

максимальным недонапряжением, где U_0 — напряжение статического пробоя.

Эксперименты показывают, что максимальное недонапряжение промежутка под действием одного и того же облучения растет с ростом давления и длины промежутка.

Снижение напряжения пробоя, по-видимому, вызвано искажением поля пространственными зарядами, и в этом случае интеграл $\int_r^d \alpha(x) dx$ больше, чем интеграл при одном внешнем приложенном поле [8], и условие возникновения разряда удовлетворяется при более низких напряжениях на промежутке.

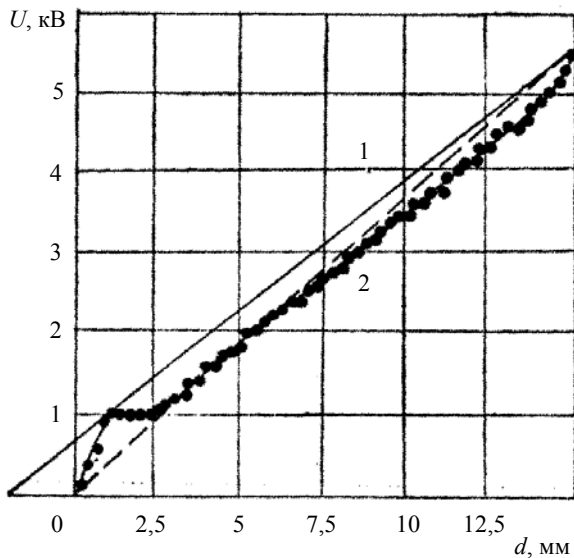


Рис. 4. Распределение потенциала между концом острия и анодом вдоль оси кисти

Зависимость времени формирования кисти t_f [3] от недонапряжения имеет резкий разрыв, свидетельствующий о смене механизма формирования разряда в зависимости от недонапряжения (рис. 5). Например, для $p = 253,3$ кПа, $d = 1,5$ см ($U_0 = 6,1$ кВ) при недонапряжении, меньшем 3 %, t_f имеет порядок 0,3 мкс, а при недонапряжении 3,3 % t_f увеличивается в 19 раз. Дальнейшее увеличение недонапряжения приводит к еще большему увеличению t_f . В случае больших недонапряжений накопление пространственного заряда происходит в соответствии с механизмом Таунсенда, в то время как при малых недонапряжениях скорость расширения области, занятой пространственным зарядом, по-видимому, увеличивается из-за вливания последовательных групп лавин.

При исследовании свойств многоканального разряда, когда на катоде установлено множество острий, были обнаружены различные формы разряда (рис. 6, а—е).

В случае, когда условия горения разряда с каждого острия не зависят от условий возникновения и горения рядом горящих кистей ($d < 0,8$ см), разряд горит в форме отдельных кистей (см. рис. 6, а). При этом соблюдается (как и в многоканальном разряде в однородном поле) пропорциональность силы тока в цепи числу кистей (каналов) в разряде. На один канал приходится 58,9 мкА (число каналов до 100). С увеличением длины промежутка более 0,8 см при pd , меньших 2280 Торр·см, разряд также горит в форме отдельных кистей, но из-за того, что рядом расположенные кисти перекрывают друг друга, образуя области повышенной

плотности тока (см. рис. 6, б), то никакой пропорциональности между силой тока в цепи и числом каналов в разряде не наблюдается.

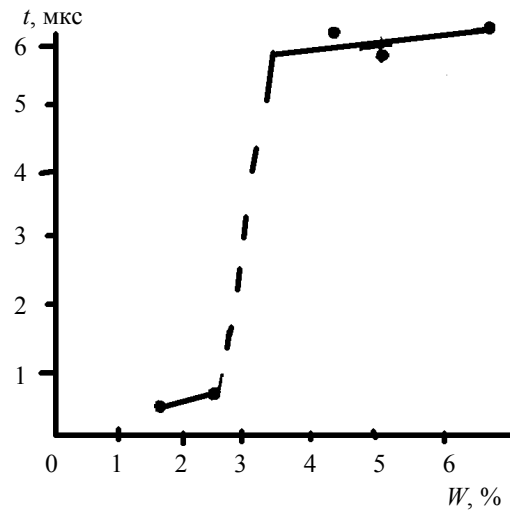
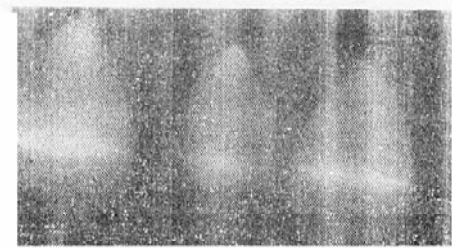
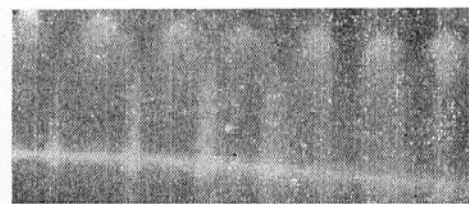


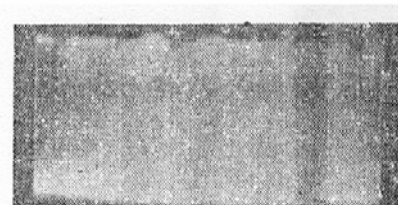
Рис. 5. Зависимость времени формирования кисти от недонапряжения газового промежутка



а



б



в

Рис. 6. Различные формы многоканального разряда при наличии острий на катоде

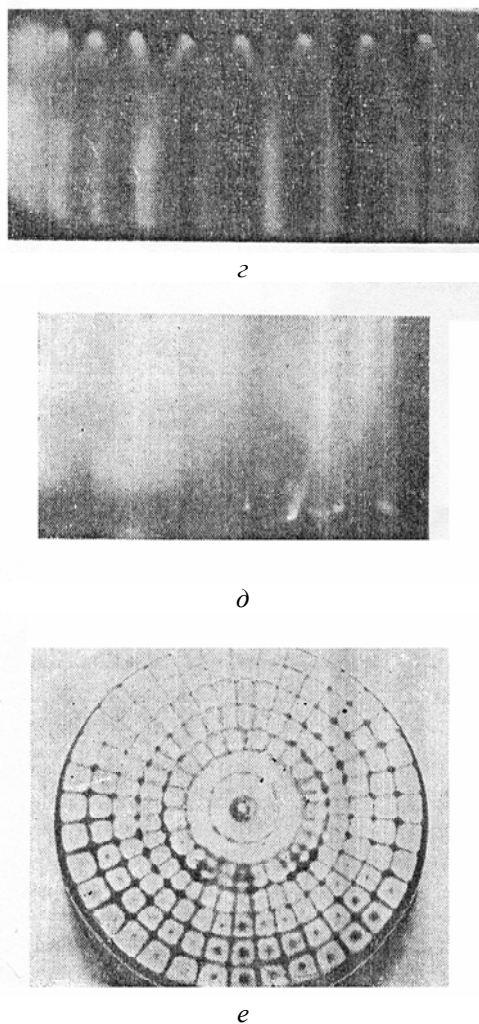


Рис. 6. Окончание

Первоначальное повышение напряжения U_c приводит к возникновению множества кистей, разделенных областями повышенной плотности тока. Горячие кисти равномерно занимают весь объем газоразрядного промежутка, а их катодные пятна равномерно распределяются у катода, как и в многоканальном разряде, в первоначально однородном поле. При большом количестве горящих кистей ($I = 2\text{—}3$ мА) совокупность катодных пятен начинает играть роль единого катодного пятна, вследствие чего разряд перестраивается и горит как единое целое (см. рис. 6, в).

Несмотря на то, что разряд горит как единое целое, плотность тока в различных областях разряда неодинаковая. Из-за различия плотности тока в промежутке электроэрозия анода в различных областях неодинаковая, что подтверждает фотография поверхности анода после того, как разряд горел в течение 4 ч при силе тока и напряжении горения, равных 3 мА и $U_c = 3,5$ кВ (см. рис. 6, е), соответственно.

В области перекрытия рядом горящих кистей на аноде плотность тока увеличивается, что приводит к увеличению напряженности поля у анода и положительного анодного падения потенциала, в результате чего область повышенной плотности тока стягивается.

При pd , равном 2280 Торр·см и выше, создаются условия для возникновения контрагированных каналов. Как правило, каналы возникают по внешнему краю электродов (см. рис. 6, з). Из каждого острия по внешней окружности обычно вытекает канал цилиндрической формы, каналы с двух соседних острий сливаются в один общий канал.

Контракция каналов в случае как тлеющего, так и дугового разряда низкого давления [9], по-видимому, обусловлена увеличением относительной роли ступенчатых процессов, объемной рекомбинации и ударов второго рода при увеличении давления. Так как магнитная сила, с которой притягиваются параллельные токи одного направления, пропорциональна длинам этих токов, то с увеличением длины промежутка вероятность слияния двух токов, вытекающих из соседних острий, увеличивается, что подтверждает эксперимент.

При напряжениях горения U_c , близких к напряжениям, при которых возникает искра, разряд становится нестабильным. В разрядном промежутке возникают тонкие, нитевидные "каналы-стримеры", замыкающие промежуток, что приводит к неизбежному пробое, при этом ток в цепи колеблется (см. рис. 6, д). Возникновение "стримеров" обусловлено образованием анодных пятен, происхождение которых, как и в случае дуги низкого давления [10], возможно связано с увеличением генерации ионов у анода. При локальном повышении генерации ионов толщина плазмы возрастает. Плазменный нарост вытягивается в сторону катода, что вызывает по его краям снижение анодного падения потенциала. Увеличение локальной плотности тока в области анодного пятна приводит к образованию "каналов-стримеров", а значит, к формированию искрового канала.

На рис. 7, а—г показаны осциллограммы изменения напряжения и эопограммы пробоя гелия. С помощью второго луча осциллографа записан затворный импульс, который выключает эопограф. В этом случае различные стадии оптического развития разряда фиксируются путем выключения эопографа с помощью затворного импульса.

На рис. 7, а затворный импульс выключает эопограф в области ступени напряжения, и на соответствующей эопограмме видно только диффузное свечение, что является экспериментальным подтверждением предположения Роговского [7] о том, что ступень в падении напряжения на пробиваемом промежутке связана с возникновением тлеющего разряда. Перемещение затворного импульса к концу ступени и началу резкого спада напряжения (см. рис. 7, б) приводит к тому, что на фоне диффузионного свечения в середине газового промежутка возникает святающаяся область, распространяющаяся к аноду и катоду, образуя канал, соединяющий электроды в течение времени около 200 нс (см. рис. 7, в, з).

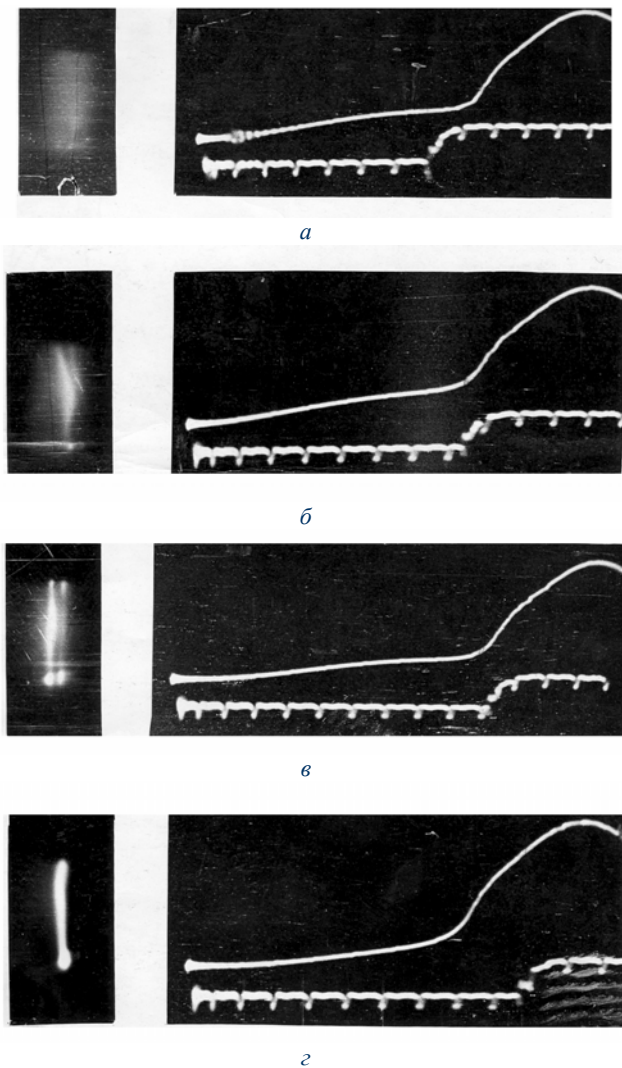


Рис. 7. Осциллограммы и эопограммы для одного и того же разряда.

На затворном импульсе метки времени частотой $\nu = 5$ МГц

Анализ этих осциллограмм и эопограмм пробоя гелия в режиме недонапряжения показывает, что в середине газового промежутка возникает свечение, от которого к аноду и катоду двигаются стримеры со скоростью $\sim 10^4$ м/с. После на катод и аноде возникают стримеры, которые двигаются навстречу друг другу с такой же скоростью и встречаются в области, лежащей ближе к катоду, что приводит к возникновению искрового канала.

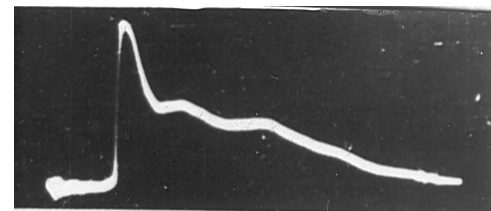
У стримеров, возникающих в середине промежутка, и анодного стримера светятся головки, что свидетельствует о наличии усиления напряженности поля, приводящего к ионизации газа перед головкой стримеров. Возможность такого характера формирования канала рассмотрена в работе [11].

При импульсном пробое гелия эопограммы и осциллограммы показывают, что в течение времени, равного сумме времени падения напряжения до ступени и длительности ступени напряжения, в промежутке около катода возникает диффузионное свечение, которое распространяется по направлению к аноду и катоду со

скоростью $\sim 2,8 \cdot 10^4$ м/с. Позже, сначала на аноде, а потом на катоде возникают яркосветящиеся образования (стримеры), которые распространяются навстречу друг другу со скоростью $\sim 10^3$ м/с, как и в режиме недонапряжения.

Начиная с перенапряжений $\sim 146\%$ (напряжение $U = 5,8$ кВ, длина промежутка $d = 1$ см) согласно эопограммам имеет место изменение в механизме пробоя, которое заключается в том, что, как и прежде, сначала возникает диффузное свечение в виде канала, которое движется от катода к аноду. Позже, сначала у катода, а потом у анода возникают светящиеся области. Из области свечения около катода свечение со скоростью $\sim 10^4$ м/с движется до встречи со свечением из анодной области. Анодное и катодное свечения также распространяются, соответственно, к аноду и катоду.

На рис. 8, а приведены осциллограмма и эопограмма импульсного пробоя гелия, а на рис. 8, б — их схематические изображения. Видим соответствие между формой осциллограммы пробоя и эопограммой: в газовом промежутке возникает тлеющий разряд, чему на осциллограмме соответствуют спад напряжения до ступени и ступень напряжения. На эопограмме видны каналы (см. рис. 8, а), которые берут начало в катодной половине промежутка и распространяются к аноду на некоторое расстояние, после чего канал прекращает свое дальнейшее продвижение. При этом светится только головка канала. После исчезновения первого канала приблизительно через 20—50 нс возникает второй канал, который берет свое начало ближе к катоду, чем первый канал. Второй канал проходит по направлению к аноду большее расстояние, чем первый канал, после чего возникает третий канал, и этот процесс продолжается до тех пор, пока канал не соединит катод и анод газового промежутка. После возникновения двух—трех каналов около поверхности анода появляется свечение, которое перемещается как к аноду, так и к катоду. Когда канал соединяется с этим свечением, формирование искрового канала завершается (см. рис. 8, б).



а

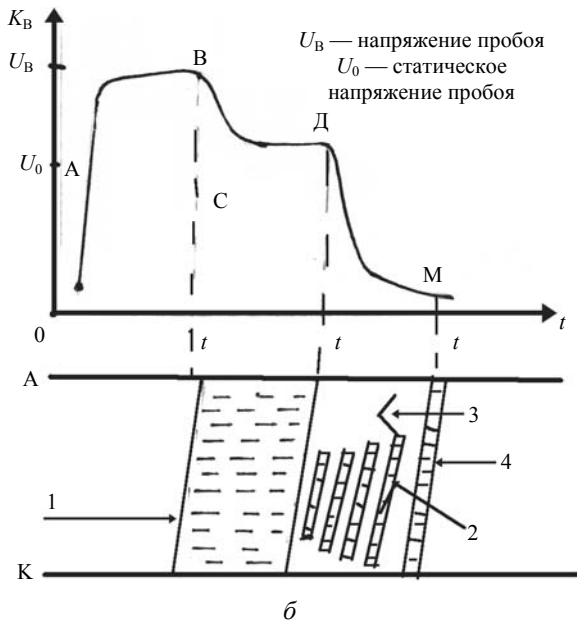


Рис. 8. Импульсный пробой гелия:

a — осциллограмма и эпограмма; *б* — схематические изображения осциллограммы и эпограммы;
1 — диффузионное свечение; 2 — каналы; 3 — свечение у анода; 4 — искровой канал

Возникновению и развитию каналов, окончательно формированию искрового канала на осциллограмме соответствует спад напряжения от напряжения ступени до напряжения горения дуги. Механизм формирования искрового канала в аргоне, по нашим данным, в основном является таким же, как и в гелии. Скорости расширения канала в гелии и аргоне, определенные по эпограммам, есть величина порядка 10^3 м/с, что находится в хорошем согласии с литературными данными.

Импульсный пробой азота, воздуха и элегаза имеет один и тот же механизм. На рис. 9, *a, б* приведены осциллограмма и эпограмма импульсного пробоя азота и их схематическое изображение. В азоте первое видимое диффузное свечение возникает около катода и распространяется по направлению к электродам, около поверхности катода возникает яркосветящаяся область (см. рис. 9, *a*), свечение которой быстро прекращается. Приблизительно через 60—80 нс возникает вторая вспышка. Число таких световых вспышек бывает до 10 и больше. Каждой световой вспышке (на рис. 9, *б* схематически они обозначены крестиками) у катода соответствует канал у анода, длина которого растет с ростом номера канала (до перенапряжений 12—15 % каналы не наблюдаются). Формирование искрового канала связано с падением напряжения на промежутке от напряжения пробоя до напряжения горения дуги, что подтверждается хорошим совпадением времени формирования канала, определенного по эпограмме, со временем падения напряжения на промежутке от напряжения пробоя до напряжения горения дуги.

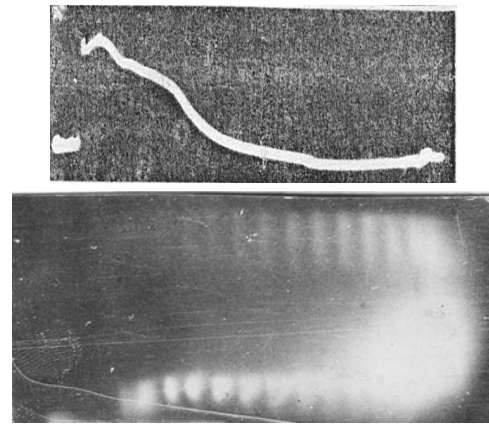


Рис. 9. Импульсный пробой азота:

a — осциллограмма и эпограмма; *б* — схематические изображения осциллограммы и эпограммы;
1 — диффузионное свечение; 2 — каналы; 3 — свечение у анода; 4 — искровой канал; + — вспышки света

По нашему мнению, возникновение каналов в гелии, аргоне, азоте, воздухе и элегазе (SF_6), а также вспышки света у катода в молекулярных газах связаны с неоднократным прохождением волн отрицательного напряжения от катода к аноду, возникновение которых связано с процессами на катоде, в частности, с формированием катодного пятна. Периодичность процессов, приводящих к формированию катодного пятна очевидна и определяет периодичность возникновения вспышек и каналов. Длины каналов определяются энергией, накопленной электронами в области катодного падения потенциала. Характер движения каналов по направлению к электродам свидетельствует о возможности механизма плазменной теории пробоя, рассмотренной в работах [12—17].

В работе [9] отмечено, что при формировании наносекундного объемного разряда нитевидные каналы образуются тогда, когда электронные лавины не пересекаются вследствие их малой плотности. В работе [18] при исследовании формирования разряда при атмосферном давлении с помощью фотоэлектронного реги-

стратора ФЭР2-1 установили, что в объемной стадии разряда возникают плазменные каналы.

В работе [19] исследовали несамостоятельный разряд в азоте при атмосферном давлении, поддерживаемый пучком электронов. В данных условиях образуются катодные пятна, которые располагаются не беспорядочно по поверхности катода, а группируются в концентрические окружности. Аналогичная регулярная структура наблюдалась и при разряде в метане [20].

В работе [20] отмечены высоковольтные волны ионизации (ВВИ), возникающие в плазме тлеющего разряда при самопробое оксидной пленки на катоде, что приводит к переходу тлеющего разряда в дуговой разряд.

В обзоре [21] излагается современное состояние исследований в области физики мощных электрических разрядов высокого давления, способных возбудить большие объемы газа. Рассматриваются экспериментальные результаты и основные физические модели их формирования и контракции путем каналирования.

В работе [22] рассмотрены недостатки стримерной теории Мика, Леба и Ретера и сформулированы положения новой модели пробоя, где движение волны пробоя связывается с распространением бегущей электромагнитной волны в плазменном волноводе. По новой плазменно-волновой модели пробоя газов каналирование является следствием плазменного состояния газа.

Часто для исследования электрического пробоя газов и его использования в технике применяется облучение газового промежутка ионизирующим излучением, тем самым газ переводится в плазменное состояние.

Анализируя вышеизложенное, можно прийти к заключению, что каналирование разряда является общим явлением для газовых разрядов. Каналирование встречается как в стационарных, так и в нестационарных разрядах. Механизм каналирования определяется природой газа, давлением, недонапряжением, перенапряжением газового промежутка, состоянием поверхности катода, внешним облучением. Возникновение каналов в многоканальном разряде связано с искажением поля у катода положительным пространственным зарядом. При больших недонапряжениях механизмом формирования канала является механизм Таунсенда, при малых недонапряжениях к последнему прибавляется расширение области, занятой положительным пространственным зарядом по направлению к катоду из-за вливания последовательных групп лавин, образуемых электронами, возникающими при фотоионизации газа и фотоэффекте на катоде, что ускоряет формирование канала.

Новые каналы в многоканальном разряде возникают под действием излучения горящих в промежутке кистей. Формирование искрового канала как в режиме недонапряжения, так и в режиме перенапряжения происходит в течение времени падения напряжения на промежутке от напряжения пробоя или от напряжения ступени до напряжения горения дуги. Формированию канала предшествует диффузное свечение. Формирование искрового канала происходит не прохождением одной отрицательной волны напряжения, как принято по теории стримеров, а прохождением нескольких волн отрицательного напряжения, что важно для создания

теории искрового канала. Стационарно горящий многоканальный разряд можно использовать для исследования механизма перехода объемного разряда в канальный.

Упорядоченное расположение кистей в многоканальном разряде (стебли кистей устанавливаются на окружности, радиус которой определяется напряжением горения) связано с необходимостью равенства сил, действующих на кисть. В многоканальном разряде через кисти (каналы) текут токи одного направления и поэтому между ними действуют магнитные силы притяжения, с одной стороны, с другой стороны — между ними действуют силы электростатического отталкивания объемных зарядов положительных ионов. Кисти в газовом промежутке занимают такие положения, в которых эти силы уравновешены. По мнению авторов, эти соображения можно применить к нитевидным каналам, возникающим при формировании наносекундного объемного разряда [9].

Полученные экспериментальные данные также могут быть использованы для создания различных газоразрядных приборов и структурной плазмы.

Л и т е р а т у р а

1. Эфендиев А. З. Дис. ... д-ра техн. наук. — Махачкала, 1968.
2. Эфендиев А. З. // Сб. науч. сообщений. Даггосуниверситет. 1968. Вып. 1. С. 3.
3. Эфендиев А. З., Аливердиев А. А. // Известия вузов. Сер. Радиофизика. 1977. № 8. С. 1224.
4. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. — М.: ИЛ, 1950.
5. Кесаев И. Г. Катодные процессы ртутной дуги. — М.: Госэнергоиздат, 1961.
6. Финкельбург Б. И. Электрические дуги. — М.: ИЛ, 1961.
7. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. — М.: ИЛ, 1960.
8. Энгель А. Ионизованные газы. — М.: Наука, 1950.
9. Клименко К. А., Козырев А. В., Королев Ю. Д., Новоселов Ю. Н. // Пробой диэлектриков и полупроводников. — Махачкала, 1984. С. 28
10. Клярфельд Б. Н., Неретина А. Н. // ЖТФ. 1960. № 12. С. 186.
11. Ульянов К. Н. // Тез. докл. Всес. совещ. по физике электрического пробоя газов. — Махачкала, 1982. С. 6.
12. Омаров О. А., Рухадзе А. А., Шнейерсон Г. А. // ЖТФ. 1979. Т. 49. С. 1997.
13. Омаров О. А., Хачалов М. Б., Эфендиев А. З. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. С. 338.
14. Бройтман А. П., Омаров О. А., Решетняк С. А., Рухадзе А. А. Кр. сообщения по физике/ ФИАН. 1984. № 9. С. 27, 41.
15. Бройтман А. П., Омаров О. А., Решетняк С. А., Рухадзе А. А. // Кр. сообщения по физике// Там же. № 6. С. 50.
16. Бройтман А. П., Омаров О. А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 7. Вып. 7. С. 389.
17. Омаров О. А., Рухадзе А. А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 3. С. 536.
18. Курбанисмаилов В. С., Кадиева П. Г., Хачалов М. Б.: Тез. докл. IV Всес. конф. по физике газового разряда. — Махачкала, 1984. С. 159.
19. Ефремов А. М., Ковальчук Б. М. // Известия вузов. Сер. Физика. 1982. № 4. С. 22—31.
20. Василяк Л. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Филогин И. В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263.
21. Осипов В. В. // Там же. 2000. Т. 170. № 3. С. 226.
22. Шелоболин А. В. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 2. С. 187—197.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2006 г.

A channeling of gas discharge

A. Z. Efendiev, K. A. Efendiev

Daghestan State University, Makhachkala, Russia

The results of experimental research of multi-channel discharge, occurred in helium under the influence of spark radiation in the uniform field, when the strength in the gas interval is less than the strength of static breakdown, are represented. It is established that the origin of multi-channel discharge is caused by the field distortion by spatial charge of positive ions at cathode. The patterns of forming of spark channels in helium argon, air, nitrogen, elegas (SF_6) are determined. It is done a review of works on channel formation of the gas discharges.

УДК 533.523.3

Экспериментальное исследование влияния расхода газа на импульсы тока отрицательной короны в аргоне

Г.-Н. Б. Дандарон

Восточно-Сибирский государственный технологический университет, г. Улан-Удэ, Россия

Б. Б. Балданов

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН,
г. Улан-Удэ, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния расхода газа на параметры импульсно-периодического режима отрицательной короны в потоке аргона. Установлено, что увеличение расхода газа вызывает увеличение длительности и изменение формы импульса тока отрицательной короны.

Теоретические и экспериментальные исследования коронного разряда в основном проводятся в неподвижной газовой среде. Одним из актуальных направлений в изучении коронного разряда является исследование его характеристик в потоке газа, что имеет большое практическое значение в связи с разработкой различных газодинамических устройств (электрофилтры, плазмохимические реакторы и т. д.) [1, 2].

В начальных исследованиях отрицательной короны обнаружено, что регистрируемый электрический ток — не стационарная величина, а совокупность импульсов, которые следуют с определенной частотой (частотой Тричела) [3, 4]. Импульсно-периодический режим отрицательной короны (импульсы Тричела) в воздухе и различных газовых смесях является известным и достаточно изученным эффектом, но обобщение результатов на случай движущейся газовой среды представляет собой самостоятельную задачу [5—7]. В работах [8, 9] показано, что отрицательная корона в электроположительных газах (N_2 , Ar) реализуется при слабой прокачке газа через разрядную камеру. Начальным этапом развития разряда в электроположительных газах является импульсно-периодический режим, который характеризуется регулярными импульсами тока, аналогичными импульсам Тричела в воздухе.

Малоисследованным, но универсальным эффектом является влияние потока газа в катодном слое короны на его параметры, в том числе на его устойчивость [10, 11]. Важность этого вопроса связана с ключевой ролью катодного слоя в функционировании разряда, так как установлено, что импульсы Тричела обусловлены не-

стационарностью тлеющего катодного слоя короны при малых токах короны [12, 13].

Целью данной работы является исследование импульсно-периодического режима отрицательной короны в аргоне и влияние на него потока газа.

Экспериментальная техника и методика

© Дандарон Г.-Н. Б., Балданов Б. Б., 2007

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разрядная камера — это стеклянная колба в форме цилиндра с внутренним диаметром 18 см и высотой 22 см, в которой имеются две трубки диаметром 4 мм для ввода и вывода аргона. Катод-острие представляет собой вольфрамовый стержень с радиусом закругления вершины конуса $r = 25$ мкм, плоский электрод в данной конфигурации электродов представляет собой стальную пластину (диаметром $D = 3—15$ см).