

УСЛОВИЯ ПОДОБИЯ ДЛЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННОГО СТРИМЕРА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДОВ ИГЛА-ПЛОСКОСТЬ

О.В. Болотов, В.И. Голота, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, В.Н. Остроушко, Л.М. Завада, А.Ю. Шулика

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

E-mail: golota@kipt.kharkov.ua

Сформулированы соотношения подобия для стримерных разрядов в воздухе. При наблюдении соотношений подобия экспериментально исследованы пространственно-временные, электродинамические и спектроскопические характеристики катодонаправленного стримера в воздухе при давлениях от 1 до 3 атм. Показано, что при сохранении произведения давления p на межэлектродное расстояние d и напряжения U на разрядном промежутке неизменными, развитие разрядов происходит подобным образом. Проведен анализ спектров излучения второй положительной системы азота в диапазоне длин волн 300...400 нм в воздухе при давлениях от 1 до 3 атм. Установлено, что профиль наблюдаемых полос излучения остаётся неизменным, а относительная интенсивность исследуемых спектральных линий, соответствующих переходам азота из состояния C^3P_u в V^3P_g , сохраняется.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется изучению газовых разрядов атмосферного давления, так как они находят широкое применение во многих плазмохимических технологиях [1,2]. При исследовании либо применении газовых разрядов часто приходится использовать соотношения подобия, основанные на размерных преобразованиях. Инварианты подобия очень полезны как при проведении экспериментов, так и при построении моделей. Обычно вместо расчетов всех величин, характеризующих разряд, рассчитывают (либо измеряют) инварианты, чем значительно облегчают задачу исследований. Соотношения подобия позволяют, в частности, использовать известные свойства разряда при одном давлении газа для прогнозирования характеристик разряда при различных других интересующих давлениях. Стоит отметить, что в физике слабоионизованной плазмы соотношения подобия [3, с.306, (3)] хорошо определены для идентификации параметров плазмы газового разряда при разных давлениях. Однако, несмотря на достаточно большое количество статей, посвященных соотношениям подобия в разрядах, а также их детальное обсуждение [4-7], до сих пор встречаются достаточно противоречивые суждения о подобии стримерных разрядов. Прежде всего это связано с множеством как экспериментальных, так и теоретических результатов, которые получены и проанализированы без сопоставления между собой. В связи с этим проведение теоретического анализа, формулировка эксперимента, обобщение и анализ полученных результатов должны стать объектом исследований в рамках одной работы. Это позволит выделить наиболее важные задачи и особенности при исследованиях законов подобия для разрядов.

2. УСЛОВИЯ ПОДОБИЯ

В самом общем виде газовый разряд описывается системой кинетических уравнений Больцмана и уравнений Максвелла для электромагнитного поля.

Поэтому при определении законов преобразования физических величин, характеризующих разряд, следует исходить из требования инвариантности уравнений Больцмана и уравнений поля. В работе [4] дано общее определение для подобия физических явлений: разряды называются подобными, если физические величины $G(\mathbf{r}, t)$ в пространственно-временных точках, связанных линейным преобразованием

$$\vec{r}' = s\vec{r}, \quad t' = st, \quad (1)$$

также выражаются с помощью линейного преобразования

$$G(\vec{r}', t') = s^{\gamma[G]} G(\vec{r}, t), \quad (2)$$

$\gamma[G]$ – называется показателем подобия.

Из (1) и (2) следует, что $\gamma[v] = 0$, т.е. при преобразованиях (1) скорости частиц \vec{v} одинаковы. Это, в свою очередь, приводит к выводу о том, что функции распределения частиц всех сортов инвариантны в подобных разрядах. Поэтому вместо приведенного выше можно пользоваться следующим определением подобия разрядов (указанным в [4]): два разряда называются подобными, если при преобразовании (1) нормированные функции распределения частиц всех сортов $f_k(\vec{r}, \vec{v}, t)$ по скоростям инвариантны.

Заметим, что для полного подобия разрядов недостаточно использовать соотношения подобия для величин в объеме, подобными должны быть и граничные условия для функций распределения частиц и компонент электромагнитного поля. Именно граничные условия приводят к необходимости сохранять подобие для длины межэлектродного промежутка и радиуса кривизны острейшего электрода. Однако, как будет видно из дальнейшего рассмотрения, в режиме катодонаправленных стримеров нет необходимости сохранять подобие для радиуса кривизны острейшего электрода, что подтверждается как численными расчетами, так и результатами наших экспериментальных исследований.

При распространении катодонаправленного

стримера газ является слабоионизованным, а следовательно, можно пренебречь столкновениями заряженных частиц между собой по сравнению с их столкновениями с нейтральными частицами. Поскольку операторы $\partial/\partial t$, $\partial/\partial \bar{r}$ и $\partial/\partial \bar{v}$ при преобразованиях (1) имеют следующие показатели подобия: $\gamma[\partial/\partial t] = \gamma[\partial/\partial \bar{r}] = -1$, $\gamma[\partial/\partial \bar{v}] = 0$, то для инвариантности левой и правой частей кинетического уравнения Больцмана получим $\gamma[E] = -1$. Дополняя требованиями инвариантности уравнений Максвелла для поля, получим следующие инвариантные соотношения:

$$E/N, n_{e,i}/N^2, \varepsilon_e, j/N^2, v_{str}, \rho/N^2, \quad (3)$$

где \bar{E} – напряженность электрического поля; n_k – плотность частиц сорта k ; индексы e, i относятся к электронам и ионам; N – плотность нейтральных частиц; ε_e – энергия, получаемая электроном от электрического поля между столкновениями; v_{str} – скорость стримера; j, ρ – плотность тока, заряда, соответственно (они подобны соотношениям для плотностей частиц, так как скорости являются инвариантами).

В работе [7], основываясь на экспериментальном исследовании развития стримерного разряда при повышенных давлениях в воздухе, были сформулированы соотношения подобия. Исследования показали, что для сохранения подобия в развитии стримеров при различных давлениях достаточно при одинаковых значениях напряжения на разрядном промежутке поддерживать постоянными не только произведение pd , но и произведение pr (давления и радиуса кривизны игольчатого анода). Однако численные расчеты [8,9] свидетельствуют о наличии у стримера некоторого внутреннего масштаба, который не определяется радиусом острейшего электрода r , поэтому в соотношения подобия не должен входить приведенный радиус острейшего электрода. Радиус кривизны электрода выбран так, что во всем диапазоне исследуемых давлений распространяются только замыкающие промежуток стримеры. Его не следует менять в соответствии с выражением rN_0/N , так как он в данном случае не является параметром подобия (из-за наличия внутреннего масштаба стримера) и его изменение с давлением как раз приведет к отклонению от законов подобия, в частности, изменению средней скорости стримера. Поэтому для сохранения подобия в развитии стримеров при различных давлениях достаточно при одинаковых значениях напряжения на разрядном промежутке поддерживать постоянным произведение pd , т.е. выполнять следующие условия:

$$pd = const, E/p = const, U = const. \quad (4)$$

В соответствии с условиями подобия временные и пространственные масштабы стримеров, электронная плотность ведут себя с изменением плотности воздуха как $\sim N^{-1}$, $\sim N^{-1}$ и $\sim N^2$ [10] соответственно; характерные масштабы стримера остаются идентичными для тех же значений редуцированного

электрического поля E/N . Использование соотношений подобия значительно облегчает исследование свойств разрядов как при расчетах, так и при проведении экспериментов.

В последние два десятилетия стали широко проводиться [10-14] двумерные моделирования стримерного разряда в неоднородных полях в воздухе. В ранних работах [15] при моделировании стримерного разряда не учитывалось влияние фотоионизации газа, что приводило к несоответствию получаемых характерных пространственных масштабов с экспериментально наблюдаемыми геометрическими размерами стримера. Только в недавних работах [8,9] по моделированию стримера установлено, что существует внутренний пространственный масштаб, который определяется процессом фотоионизации газа. В работе [9] сделано предположение, что фотоионизация играет важную роль в динамике стримера и длина поглощения фотоионизирующего излучения определяет характерную ширину ионизованной области вокруг головки стримера. Другими словами, фотоионизация вводит пространственный масштаб и нелокальность в проблему стримера из-за того, что фотоионизация в заданной точке возникает благодаря излучению, приходящему со всего плазменного объема.

При математическом моделировании распространения стримера обычно (см., например, [11-16]) описывается следующей осесимметричной системой уравнений (дрейфово-диффузионное приближение):

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rJ_{er})}{\partial r} + \frac{\partial J_{ez}}{\partial z} &= S_{ph} + S_i - S_{att} - L_{ep}, \\ \frac{\partial n_p}{\partial t} &= S_{ph} + S_i - L_{pn} - L_{ep}, \quad \frac{\partial n_n}{\partial t} = S_{att} - L_{pn}, \\ \Delta U &= -4\pi e(n_p - n_e - n_n), \quad \vec{J}_e = -D_e \nabla n_e - \mu_e \vec{E} n_e, \end{aligned} \quad (5)$$

где \vec{J}_e – электронный поток (плотность тока, деленная на абсолютную величину заряда электрона e) с компонентами $\{J_{er}, J_{ez}\}$; $\vec{E} = -\nabla U$ – напряженность электрического поля; U – потенциал; n – плотность частиц; D и μ – коэффициент диффузии и подвижность, соответственно. Индексы e, p, n относятся к электронам, положительным и отрицательным ионам соответственно. Для коротких стримеров, когда время распространения стримера не превышает несколько десятков наносекунд, можно пренебречь движением ионов из-за их малой подвижности. Члены в правых частях уравнений (5) описывают процессы наработки заряженных частиц. $S_{ph} \propto S_i p_d / (p + p_d)$ – скорость рождения электронно-ионных пар, благодаря фотоионизации в объеме газа ($p_d \approx 40$ Торр для воздуха); $S_i = \alpha \mu_e E n_e$ – скорость столквительной ионизации (α – коэффициент ионизации Таунсенда); S_{att} – скорость прилипания электронов к молекулам электроотрицательного газа; L_{ep}, L_{pn} – скорости рекомбинации электронов с положительными ионами, положительных и отрицательных ионов соответственно. Видно, что при низких ($p \ll p_D$) давлениях слагаемые S_{ph} и S_i удов-

летворяют условиям подобия, так как их учет не нарушает инвариантности уравнений непрерывности относительно преобразований подобия, при повышенных же давлениях скорость фотоионизации S_{ph} содержит по N на одну степень больше, чем остальные слагаемые уравнений непрерывности, что приводит к нарушению подобия. Слагаемые S_{att} , L_{ep} и L_{pn} описывают столкновения заряженных частиц, поэтому их учет нарушает условия подобия, полученные из условий превалирования столкновений с нейтральными частицами. Перед головкой стримера и в ее внутренней области членами S_{att} , L_{ep} и L_{pn} можно пренебречь [5,6]. Они влияют на распределения зарядов и полей, поэтому в плазменном канале и для описания стадии распространения коротких стримеров (порядка 1 см) их ролью можно пренебречь. Однако, эти члены являются одними из основных для описания периодической последовательности стримеров, когда протекают процессы релаксации объемного заряда.

Если эффекты фотоионизации можно не принимать во внимание, вышеуказанные инварианты подобия (3) работают очень хорошо для характеристик, описывающих короткие стримеры при низких давлениях (десятки Торр, т.е. когда трехтелным прилипанием, рекомбинацией, нагревом газа и процессами теплопроводности можно пренебречь). При более высоких давлениях газа, когда существенными становятся процессы прилипания, рекомбинации и фотоионизации происходит нарушение законов подобия [4] для разрядов, так как в них играют роль либо тройные (а не парные) соударения, либо столкновения заряженных частиц между собой. Эти представления возникают в соответствии с последними экспериментальными исследованиями свойств подобия положительных стримеров при различных давлениях в воздухе [7]. Предварительная работа [5] продемонстрировала, что процесс фотоионизации является наиболее критичным фактором, приводящим к отклонению от законов подобия для стримеров, распространяющихся в сильных однородных электрических полях ($> E_c$, где E_c – пороговое поле пробоя, определяемое равенством коэффициентов ионизации и диссоциативного прилипания в воздухе [3, с.135]). Поэтому основной задачей данной работы было определение экспериментальных условий, при которых возможно реализовать подобие в развитии разрядов при различных давлениях. Для нахождения режима, при котором для разрядов выполняются законы подобия [4], экспериментально определялось влияние давления на скорость распространения стримера в разрядном промежутке, спектральные характеристики излучения из генерационной зоны разряда, электродинамические характеристики разряда.

3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов по исследованию стримерного разряда требуется выполнение условий устойчивого режима горения разряда во всём исследуемом диапазоне давлений [10]. Для реализации устойчивого режима горения разряда перед прове-

дением экспериментов производилась специальная обработка игольчатого и плоского электродов. Устойчивое горение разряда характеризуется повторяемостью формы токового импульса и частоты следования токовых импульсов, регистрируемых во внешней цепи.

Исследования стримерного разряда при повышенных давлениях в воздухе проводились на установке, принципиальная схема которой представлена на Рис.1.

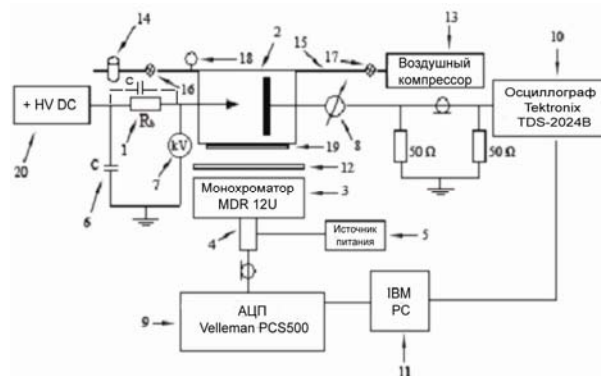


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – балластный резистор 130 кОм; 2 – разрядная камера; 3 – монохроматор; 4 – фотозлектронный умножитель (ФЭУ) Hamamatsu R9110; 5 – источник питания ФЭУ- power supply Hamamatsu C4900; 6 – емкостной фильтр напряжения 1000 нФ; 7 – высоковольтный щуп LeCroy PPE20kV; 8 – микроамперметр M906; 9 – АЦП; 10 – осциллограф; 11 – компьютер; 12 – кварцевый конденсор; 13 – компрессор Fias F 205; 14 – ротаметр; 15 – газопровод; 16,17 – натекатели; 18 – манометр; 19 – кварцевое окно; 20 – высоковольтный стабилизированный источник питания

Из проведенного выше анализа следует, что для сохранения подобия в развитии стримеров при различных давлениях достаточно выполнять условия (4). В экспериментах для каждого значения напряжения из исследуемого диапазона и при постоянном производстве pd снимались осциллограммы токовых импульсов разряда, измерялась частота T_{str}^{-1} следования импульсов тока, проводилась регистрация спектров излучения разряда, а также регистрировались профили отдельных полос излучения. При этом особое внимание уделялось исследованию изменения формы токовых импульсов разряда с ростом давления.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Осциллограммы токовых импульсов дают информацию о режиме горения разряда. Известно, что стримерный разряд может существовать в двух режимах [1], определяемых величиной напряжения, приложенного к разрядному промежутку: в режиме замыкающего разрядный промежуток стримера и в режиме незамыкающего разрядный промежуток стримера. Форма токового импульса, формирование которого обусловлено распространением стримера, является хорошим показателем при наблюдении за изменением режима горения разряда. Для установления соотношений подобия важным является, чтобы развитие стримерного разряда происходило в

одинаковом режиме при разных давлениях, поэтому экспериментально были определены условия, при которых катодонаправленные стримеры во всем диапазоне давлений замыкали разрядный промежуток, т.е. разряд находился в одном и том же режиме.

Проведенный анализ формы токовых импульсов показал, что при напряжении 14 кВ происходит устойчивое распространение замыкающих стримеров. При напряжениях 8, 10 и 12 кВ замыкающие стримеры с увеличением давления сменяются незамыкающими разрядный промежуток, т.е. происходит смена режима горения разряда. В частности, при напряжении 8 кВ только при атмосферном давлении стример замыкает разрядный промежуток, а увеличение давления до 1,5 атм и выше приводит к переходу разряда в режим незамыкающих стримеров. Поэтому эксперименты проводились при напряжении на разрядном промежутке 14 кВ для диапазона давлений от 1 до 3 атм (Рис.2). Межэлектродное расстояние изменялось в диапазоне от 5 до 15 мм, что позволяло поддерживать во всех экспериментах постоянным произведение $p \cdot d = 15$ мм·атм.

В результате анализа токовых импульсов, приведенных на Рис.2, установлено, что при напряжении $U=14$ кВ средняя скорость стримера остаётся постоянной независимо от величины давления и составляет величину около $(2...3,5) \cdot 10^7$ см/с. Также показано, как и в [5], что произведения pT_{str} и $Qp = IT_{str}p$ (T_{str} – период следования токовых импульсов, Q – полный заряд, переносимый за импульс) тоже остаются постоянными. Сохранение произведения Qp следует из сохранения среднего за импульс тока I , который контролировался в экспериментах, и из постоянства произведения pT_{str} . Анализ осциллограмм токовых импульсов показывает, что в данных экспериментальных условиях разряд существует в форме стримеров, замыкающих разрядный промежуток, и для разрядов сохраняются инварианты (3) во всём рассматриваемом диапазоне давлений, что, в свою очередь, свидетельствует о выполнении законов подобия [3]. Важно отметить, что сохранение средней скорости стримера происходит только в режиме, при котором во всём диапазоне давлений наблюдается устойчивое развитие замыкающих стримеров.

При повышении давления из-за тушения синглетных состояний возбужденного азота $N_2(C^3\Pi_u)$ (в результате трехтельных соударений, см. [13,18]) интенсивность фотоионизирующего излучения падает обратно пропорционально давлению. Напомним, что быстрое изменение тока перед замыканием промежутка обусловлено фотоэмиссией из катода. При сохраняющейся неизменной глубине поглощения фотонов материалом катода по такому же закону будет спадать фотоэмиссионный ток, приводя к уменьшению максимальной амплитуды импульсов тока при увеличении давления, что и наблюдается на осциллограммах.

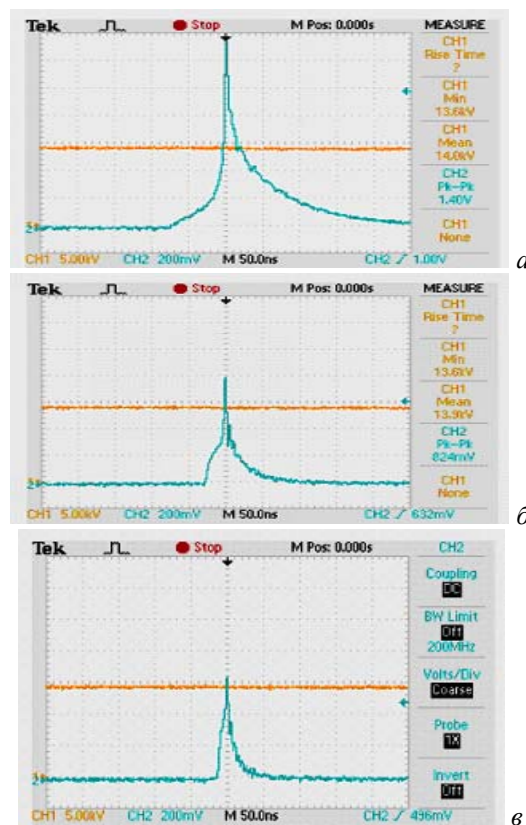


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока разряда (CH1) и напряжения на разрядном промежутке (CH2) при различных давлениях в воздухе:

$p=1$ атм, $d=15$ мм, $U=14$ кВ, $I=55$ мкА, $T_{str}=107$ мкс (а); $p=2$ атм, $d=7,5$ мм, $U=13,95$ кВ, $I=50$ мкА, $T_{str}=55$ мкс (б); $p=3$ атм, $d=5$ мм, $U=14$ кВ, $I=50$ мкА, $T_{str}=33$ мкс (в)

5. ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА

Спектроскопические исследования излучения разряда могут дать информацию не только о локальных характеристиках разряда (в частности, о функции распределения электронов), но и позволяют проследить динамику их изменения во времени.

Объектами для исследований характеристик излучения разряда являлись полосы излучения 2-й положительной системы азота, которые легко появляются в стримерном разряде в воздухе. Регистрация спектрального состава излучения проводилась в диапазоне длин волн 300...400 нм. Выбор диапазона обусловлен наличием интенсивных линий излучения второй положительной системы азота [17,18], которые являются удобными объектами для исследований. При каждом значении давления исследуемого диапазона регистрировалась форма наиболее интенсивных спектральных линий, снимались осциллограммы токовых импульсов разряда, измерялась частота следования импульсов тока. Регистрация излучения проводилась из прианодной (на расстоянии ~1 мм от поверхности острейшего анода) области разрядного промежутка, интенсивность излучения которой максимальна по отношению к интенсивности излучения из остальных областей разрядного промежутка.

В результате проведенных исследований спектрального состава излучения разряда были зарегистрированы спектры излучения, соответствующие второй положительной системе азота (переход $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$). Для более детального анализа в экспериментах отдельно регистрировалась форма наиболее интенсивных полос излучения 2-й положительной системы азота. В качестве исследуемых спектральных линий были выбраны линии, соответствующие следующим длинам волн переходов азота из состояния $C^3\Pi_u$ в $V^3\Pi_g$: 1) $\lambda = 337.1$ нм, переход (0-0); 2) 357.6 нм, переход (0-1); 3) 315.7 нм, переход (1-0). Выбор указанных линий был обусловлен целью исследовать особенности заселения различных колебательных уровней молекулы азота в условиях эксперимента (Рис.3).

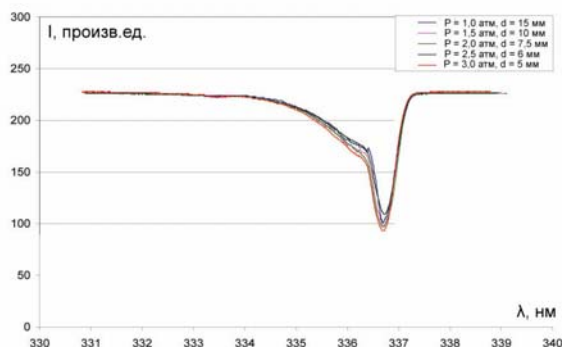


Рис.3. Профили полосы излучения 2-й положительной системы азота для различных давлений в воздухе. Исследуемый переход $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$ (0-0).
Напряженность на разрядном промежутке
 $U = 14,05$ кВ; $p \cdot d = 15$ атм·мм;
средний ток разряда $I_{cp} = 50$ мкА

Из рассмотрения Рис.3 следует, что во всём исследуемом диапазоне давлений профиль наблюдаемых полос излучения остаётся практически неизменным, при этом небольшие различия в интенсивности полос излучения связаны с малым отклонением от устойчивого режима горения разряда.

ВЫВОДЫ

Сформулированы условия подобия для стримерных разрядов, что позволяет сравнивать токовые характеристики разряда и динамику распространения стримера при различных давлениях.

Экспериментально показано, что в диапазоне давлений 1...3 атм в воздухе при выполнении соотношений подобия для стримерного разряда динамика развития стримеров является также подобной. В частности, при приложении к разрядному промежутку напряжения, равного 14 кВ, и сохранении $p \cdot d = 15$ мм·атм наблюдалось устойчивое развитие стримеров во всем диапазоне исследуемых давлений, при этом измеренные средняя скорость распространения стримера v_{str} и произведения pT_{str} и Qp оставались постоянными.

Проведены экспериментальные исследования спектроскопических характеристик излучения стримерного разряда при повышенных давлениях в воздухе в рамках выполнения соотношений подобия. Зарегистрированы спектры излучения второй поло-

жительной системы азота (переход $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$) в диапазоне длин волн 300...400 нм. Зарегистрирована форма наиболее интенсивных полос излучения при горении разряда в воздухе в диапазоне давлений от 1 до 3 атм. Установлено, что во всём исследуемом диапазоне давлений профиль наблюдаемых полос излучения остаётся практически неизменным, а относительная интенсивность исследуемых спектральных линий, соответствующих переходам азота из состояния $C^3\Pi_u$ в $V^3\Pi_g$, сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Голота, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, И.А. Пашенко, С.Г. Пугач, А.В. Яковлев. Исследование нестационарных мод в игла-плоскость газовом разряде при атмосферном давлении в различных $N_2 - O_2$ смесях // *ВАНТ. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4, с.254-257.
2. Z. Buntat, I.R. Smith, N.A.M. Razali. Ozone generation using atmospheric pressure glow discharge in air // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009, v.42, p.235202.
3. Y.P. Raizer. *Gas Discharge Physics*. New York: "Springer", 1991.
4. А.А. Рухадзе, Н.Н. Соболев, В.В. Сокоиков. Подобие нестационарных низкотемпературных разрядов // *Успехи физических наук*. 1991, т.116, №9, с.195-199.
5. N. Liu and V.P. Pasko. Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites // *J. Geophys. Res.* 2004, v.109, p.A04301.
6. Muehe C. Scaling laws for high density plasmas // *J. Appl. Phys.* 1974, v.45, p.82.
7. S. Achat, Y. Teisseyre and E. Marode. The scaling of the streamer-to-arc transition in a positive point-to-plane gap with pressure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1992, v.25, p.661-668.
8. А.А. Kulikovskiy. The role of photoionization in positive streamer dynamics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000, v.33, p.1514-1524;
9. А.А. Kulikovskiy. The role of absorption length of photoionizing radiation in streamer dynamics in weak field: a characteristic scale of ionization domain // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1999, v.33, p.L3-L9.
10. В.И. Голота, О.В. Болотов, Б.Б. Кадолин, В.Н. Остроушко, Л.М. Завада, А.Ю. Шулика. Экспериментальные исследования развития катодонаправленного стримера в воздухе при повышенных давлениях // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»* (6). 2008, №4, с.204-208.
11. N.Yu. Babaeva and G.V. Naidis. Simulation of positive streamers in air in weak uniform electric fields // *Phys. Lett. A*. 1996, v.215, p.187-190.
12. N.Yu. Babaeva and G.V. Naidis. Dynamics of positive and negative streamers in air in weak uniform electric fields // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, v.25, p.375-379.
13. А.А. Kulikovskiy. Production of chemically active species in the air by a single positive streamer in a nonuniform field // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, v.25, p.439-46.

14. A.A. Kulikovskiy. Positive streamer in a weak field in air: a moving avalanche-to-streamer transition // *Phys. Rev. E* 1998, v.57, p.7066-7074.
15. A.A. Kulikovskiy. Analytical model of positive streamer in weak field in air: application to plasma chemical calculations // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1998, v.26, p.1339-1346.
16. M.I. Dyakonov and V.Y. Kachorovskii. Streamer discharge in homogeneous field // *Sov. Phys. JETP*. 1989, v.68, p.1070-1074.
17. M.V. Zheleznyak, A.Kh. Mnatsakanian, and S.V. Sizykh. Photoionization of nitrogen and oxygen mixtures by radiation from gas discharge // *High Temp.* 1982, v.20, p.357-362.
18. G.W. Penney and G.T. Hummert. Photoionization measurements in air, oxygen and nitrogen // *J. Appl. Phys.* 1970, v.41, p.572-577.

Статья поступила в редакцию 26.03.2010 г.

SIMILARITY CONDITIONS FOR CATHODE-DIRECTED STREAMER IN NEEDLE-PLANE ELECTRODE SYSTEM

O.V. Bolotov, V.I. Golota, B.B. Kadolin, V.I. Karas', V.N. Ostroushko, L.M. Zavada, A.Yu. Shulika

It is experimentally shown that in a pressures range 1...3 atm in air at performance of similarity ratio for a streamer discharge the development dynamics of streamers is also similar. In particular, at a voltage equal 14 kV and preservation $p \cdot d = 15$ atm mm steady development of streamers in all range of researched pressure was observed, thus the distributions of a streamer v_{str} measured average velocity remained constants. Spectra of radiation of the second positive system of nitrogen are registered in a range of of wavelengths of 300...400 nm. It is established, that in all range of pressure the structure of observable spectral lines of radiation is constant, and relative intensity of spectral lines, corresponding to transitions of nitrogen from state $C^3\Pi_u$ in $B^3\Pi_g$ is kept.

УМОВИ ПОДІБНОСТІ КАТОДОСПРЯМОВАНОГО СТРИМЕРА У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ ГОЛКА-ПЛОЩИНА

О.В. Болотов, В.І. Голота, Б.Б. Кадолін, В.І. Карась, В.М. Остроушко, Л.М. Завада, А.Ю. Шуліка

Сформульовано співвідношення подібності, які дозволили порівнювати струмові характеристики розряду та динаміку поширення стримера при різних тисках. Показано, що існує діапазон тисків, в якому розряд розрядів відбувається подібним чином при збереженні незмінними добутку $p \cdot d$ та напруги U на розрядному проміжку. Зареєстровані спектри випромінювання другої позитивної системи азоту у діапазоні довжин хвиль 300...400 нм у повітрі при тисках від 1 до 3 атм. Встановлено, що у всьому досліджуваному діапазоні тисків профіль спостережених смуг випромінювання залишається практично незмінним, а відносна інтенсивність досліджуваних спектральних ліній, які відповідають переходам азоту зі стану $C^3\Pi_u$ до $B^3\Pi_g$, зберігається.