

Моделирование диффузного разряда в диэлектрической трубке пониженного давления

А.О. Коковин, А.В. Козырев, В.Ф. Тарасенко*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

**kozzyrev@to.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В докладе представлено теоретическое объяснение феномена образования узкого плазменного образования, возникающий на фронте диффузного разряда в диэлектрической трубке пониженного давления. Получены детальные картины импульсного режима зажигания электрического барьерного разряда, на основе которого формируется диффузный разряд в трубке. Показано, что плазменное образование имеет импульсно-периодическую природу и представляет собой отрицательный стример, формирующийся между положительно заряженной диффузной плазмой и торцевой стенкой трубки.

Ключевые слова: диффузный разряд, стримерный механизм, теоретическое моделирование.

1. Введение

Разрядная плазма, формирующаяся в результате зажигания различных типов диффузных разрядов, является предметом многих теоретических и экспериментальных исследований. В частности, это связано с их схожестью с атмосферными явлениями в верхних слоях атмосферы, таких как красные спрайты, голубые струи, эльфы и другие [1, 2]. Так как атмосферные явления достаточно редки и их тяжело моделировать в лабораторных условиях, то интерес представляет исследование их лабораторных аналогов. Например, показано, что в положительном столбе тлеющего разряда [3], а также в апокамписческом разряде [4] можно наблюдать свечение со спектральным составом излучения, аналогичного красным спрайтам.

В работах [5, 6] показано, что для моделирования красных спрайтов можно использовать стримеры, инициируемые высокочастотным барьерным разрядом. Рассматриваются длинные (~1 м) кварцевые трубки, заполненные газом пониженного давления, на которые были снаружи наложены кольцевые электроды. При подаче импульсно-периодического напряжения на один из электродов (второй заземлен) зажигается барьерный разряд в межэлектродной области, и формируются плазменные диффузные струи по обе стороны от электродов. Плазменные диффузные струи представляет собой цилиндрические стримеры, близкие по форме к «столбчатым» спрайтам. В данной работе представлены результаты теоретического моделирования плазменных струй, формирующихся в длинных диэлектрических трубках при пониженном давлении газа (единицы Тор).

2. Описание теоретической модели

Для теоретического описания динамики диффузного разряда было использовано гидродинамическое описание плазмы. В основе модели лежит система гидродинамических уравнений в дрейфово-диффузионном приближении для плазменных электронов, уравнение непрерывности для всех заряженных компонент плазмы и уравнение Пуассона для согласованного электростатического поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_e = r_e, \quad \frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_\epsilon + e\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}_e = r_\epsilon, \quad \frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_i = r_i, \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

где n_e , n_i – концентрация электронов и ионов соответственно, $n_\epsilon = 3/2 n_e k_B T_e$ – плотность энергии электронов, \mathbf{j} – гидродинамические потоки в дрейфово-диффузионном

приближении, r_e – функция источника, определяемая кинетикой плазмохимических реакций, E – напряжённость электрического поля, e – элементарный заряд, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная. Такая модель была ранее использована авторами для описания различных типов газовых разрядов, таких как стационарный коронный разряд, искровой разряда, а также апокампиский разряд.

В основу задачи о пространственно-временной эволюции диффузного разряда легла серия экспериментальных работ [5, 6], из которых были взяты основные входные параметры. Здесь рассматривается коаксиальная диэлектрическая кварцевая трубка длиной $l_1 = 30$ см с внутренним радиусом $r_1 = 2.5$ см и толщиной стенок $dr_1 = 0.5$ см (рисунок 1). Зажигание разряда в трубке происходит между двумя кольцевыми электродами с одинаковой шириной $dz = 1$ см и толщиной $dr = 0.2$ см, расстояние между которыми равно $d = 6$ см. Правый кольцевой электрод (катод) подключён к идеализированному источнику напряжения, который формирует последовательность импульсов напряжения с частотой $\nu = 250$ кГц, Характеристики отдельного импульса напряжения следующие: амплитуда $U_0 = -5$ кВ, фронт $dt = 400$ нс и длительностью на полувысоте $t_{1/2} = 600$ нс. Второй кольцевой электрод, равно как и концы кварцевой трубки, представляют собой анод. В качестве дополнительного анода, который в эксперименте представляет собой металлический стенд, был добавлен коаксиальный заземленный электрод в виде внешней трубки радиуса $r_2 = 6$ см. С помощью дополнительных электродов внутри трубки формируется продольное электрическое поле, способствующее распространению диффузного разряда из области между кольцевыми электродами.

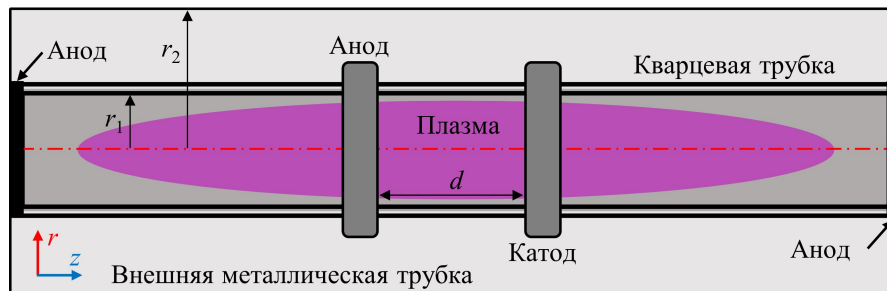


Рис. 1. Схематичное изображение разрядного промежутка (не в масштабе, осевая симметрия).

В качестве модельного газа рассматривается чистый азот при давлении $p = 1$ Торр. С целью упрощения модели в данной задаче рассматриваются только электроны и ионы N_2^+ , для которых были учтены только реакции ударной ионизации, диссоциации и рекомбинации. Такой выбор реакций обусловлен как малыми характерными временами зажигания разряда, так и желательной простотой теоретической модели.

Описанная выше теоретическая модель была успешно реализована в среде специализированного высокопроизводительного программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Для получения картины формирования диффузного разряда были рассчитан частотный режим зажигания диффузного разряда, ограничившись первыми импульсами напряжения.

3. Результаты

Рассмотрим основные результаты проведённого моделирования динамики диффузного разряда. На рисунке 2 приведено сравнение полученного в результате моделирования распределения плазмы в диэлектрической трубке с экспериментальной фотографией свечения плазмы при схожих условиях. Можно выделить область между кольцевыми

электродами, в которой протекают основные процессы плазмообразования, и наблюдается зажигание объёмного разряда. Заземлённые электроды вне диэлектрической трубки накладывают дополнительное продольное электрическое поле вдоль оси симметрии, что приводит к плавному вытягиванию плазмы из области ионизации. При таком вытягивании происходит пробой области между диэлектрической стенкой и плазмой, что способствует продвижению плазмы вдоль стенок трубки. При таком механизме пробоя реализуется электрический барьерный разряд на внутренней поверхности трубки.

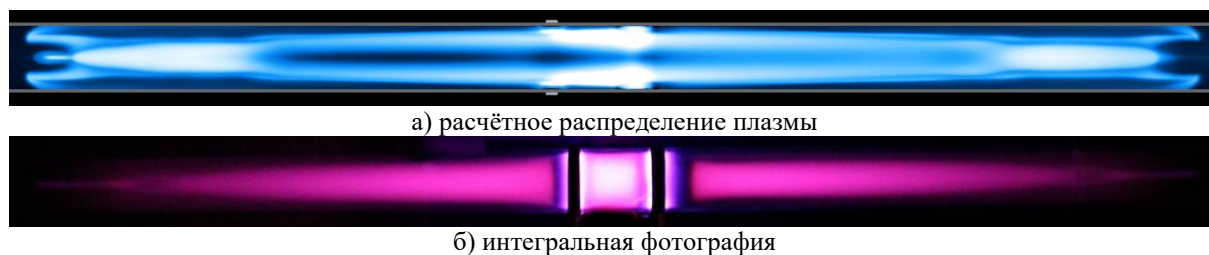


Рис. 2. Сравнительные изображения структуры диффузной плазменной струи.

Следующая стадия развития разряда представляет собой формирование области диффузной плазмы внутри трубки. По мере удаления от кольцевых электродов напряжённость электрического поля становится настолько низкой, что дальнейший пробой промежутка между диэлектрической стенкой и пристеночной плазмой невозможен. Это приводит к пространственному ограничению барьерного разряда, которое можно явно наблюдать на рисунке 2а. На границе барьерного разряда формируется такое распределение плазмы и согласованного электрического поля, которое формирует диффузный столб на фронте плазменной струи.

Отдельный интерес представляет механизм формирования светящихся отростков, наблюдаемых на фронте диффузного разряда (рисунок 3). В зависимости от полярности напряжения наблюдаются различные структуры отростков. В данной работе мы ограничимся рассмотрением отрицательной полярности на потенциальном электроде. В этом случае они наблюдаются на обоих концах трубки и представляют собой узкое (по сравнению с диффузным каналом) вытянутое вдоль оси трубки плазменное образование.

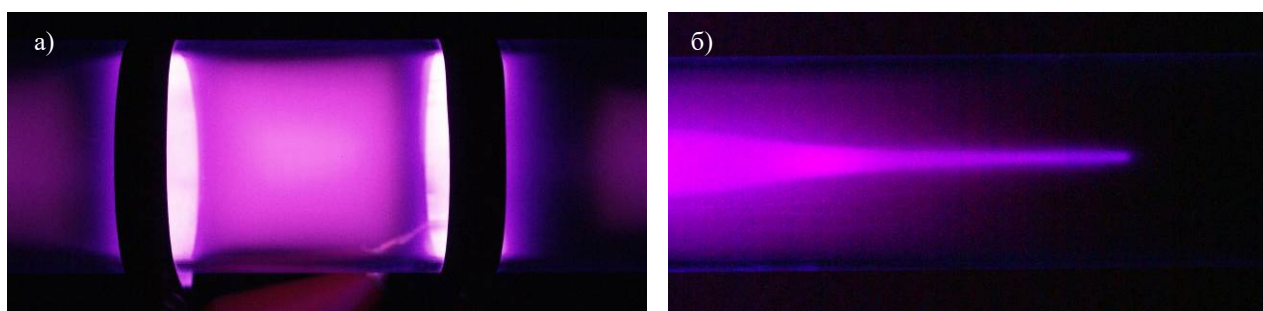


Рис. 3. Фотографии свечения: а) межэлектродного промежутка и б) плазменного отростка на фронте диффузного разряда при отрицательной полярности напряжения.

Подробно рассмотрим динамику формирования плазменного отростка на фронте диффузного разряда. На рисунке 4 показаны временные профили напряжения и тока разряда, протекающего между кольцевыми электродами. Регистрируемый ток в электрической цепи представляет собой только ток смещения, что обуславливается механизмом токопереноса в электрическом барьерном разряде.

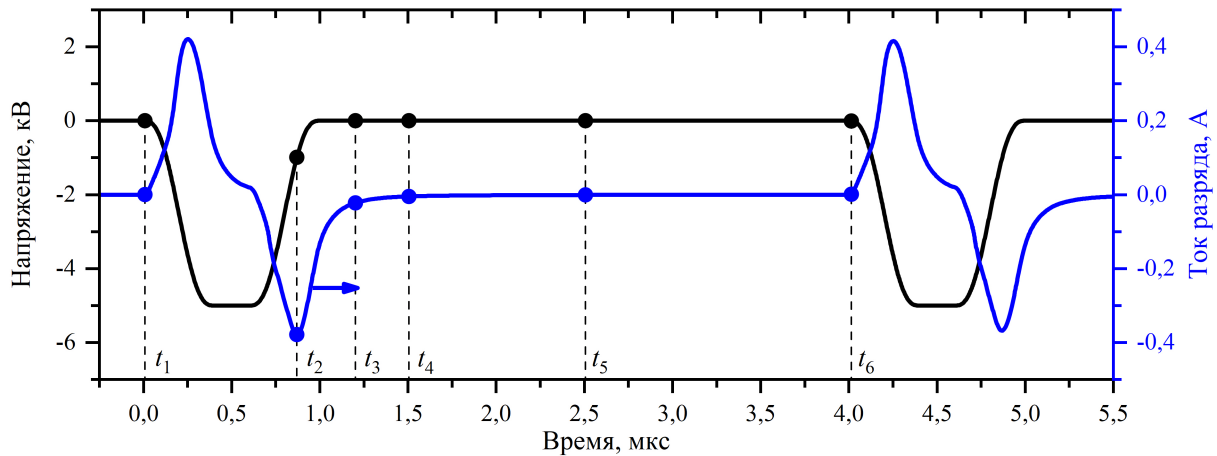


Рис. 4. Временные профили напряжения и тока разряда между кольцевыми электродами. Отмечены моменты времени, в которых показана динамика формирования стримера на фронте диффузного разряда.

На рисунке 5 показана динамика квазинейтральной плазмы в различные моменты времени с привязкой к импульсу напряжения. Детальное теоретическое исследование показало, что плазменный отросток представляет собой отрицательный стример, который формируется на фронте диффузного канала. Стример формируется на обратном импульсе тока смещения и прорастает на несколько сантиметров вдоль оси симметрии. Средняя величина приведённого электрического поля на фронте составляет $E/N \approx 1000$ Тд, т.е. десятикратное превышение статической пробивной напряженности. После подачи импульса напряжения движение стримера обеспечивается собственным электрическим полем, которое выносятся на фронт стримера. Потенциал плазмы относительно потенциального электрода при этом составляет $\sim +150-200$ В.

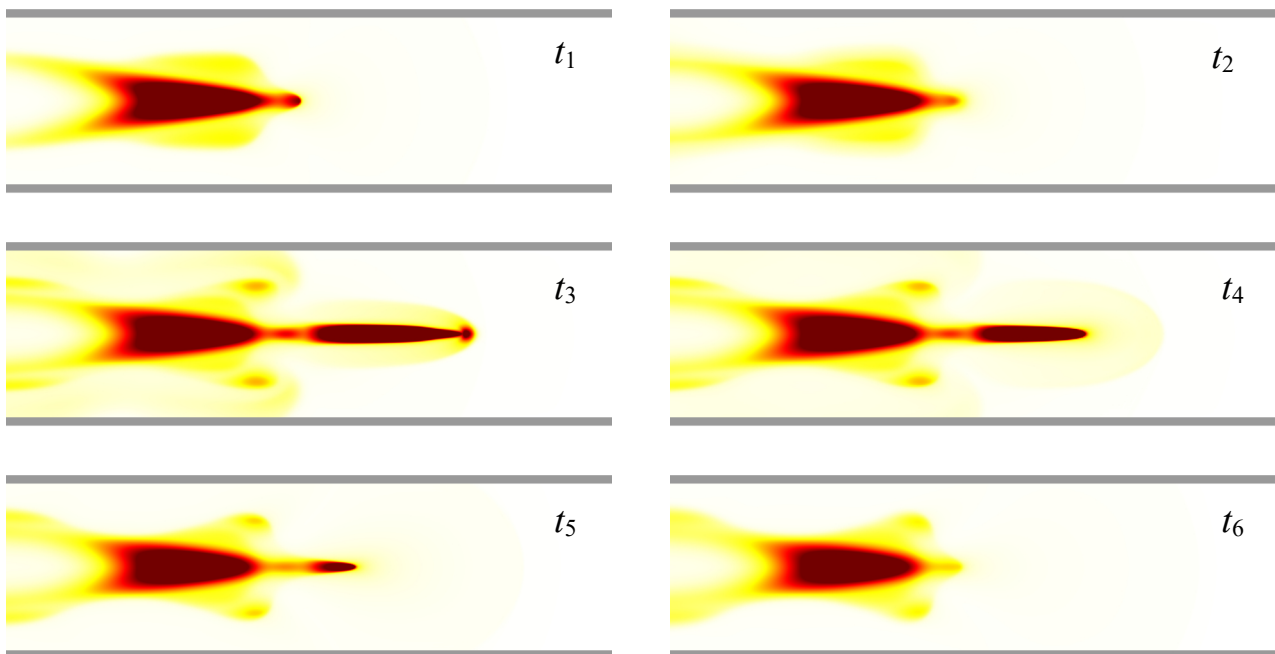


Рис. 5. Динамика формирования плазменного отростка на фронте диффузного разряда с привязкой по времени к импульсу напряжения.

Стример имеет импульсно-периодическую структуру: он зарождается при максимуме тока разряда (момент времени t_2), вырастает на максимальную длину в несколько сантиметров за время протекания тока $\Delta t = t_3 - t_2$ и затухает до следующего импульса напряжения. Отметим, что формирование стримера определяется наличием дополнительных электродов на конце трубки и внешнего коаксиального электрода, которые обеспечивают небольшое (~ 0.1 кВ/см) продольное электрическое поле вдоль оси симметрии. Без размещения внешнего коаксиального электрода (в эксперименте его эквивалентом выступал металлический стенд и/или поверхность Земли) развитие плазменных диффузных струй в расчетах не наблюдалось.

4. Заключение и выводы

Проведено теоретическое моделирование процесса зажигания диффузного разряда в диэлектрической трубке пониженного давления. Показано, что при импульсно-периодической подаче напряжения отрицательной полярности на кольцевой электрод происходит зажигание электрического барьерного разряда на внутренней поверхности трубки.

Сформированная плазма вытягивается невысоким продольным электрическим полем вдоль оси трубки, что приводит к пространственному ограничению барьерного разряда и формированию плазменной диффузной струи в направлении обоих концов трубки.

Показано, что на фронте диффузной плазмы формируется узкое плазменное образование, представляющее собой отрицательный стример. Стример имеет импульсно-периодическую природу и появляется при падении тока смещения, протекающего на кольцевые электроды.

Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 24-29-00166).

5. Список литературы

- [1] E.R. Williams, Sprites, Elves, and Glow Discharge Tubes, *Physics Today*, **54**(11), 44–47, 2011, doi: 10.1063/1.1428435
- [2] D.D. Sentman, E.M. Wescott, Red sprites and blue jets: Thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere, *Physics of Plasmas*, **2**(6), 2514–2522, 1995, doi: 10.1063/1.871213
- [3] Y. Goto, Y. Ohba, K. Narita, Optical and spectral characteristics of low pressure air discharges as sprite models, *Journal of Atmospheric Electricity*, **27**(2), 105–112, 2007, doi: 10.1541/jae.27.105
- [4] E.A. Sosnin, N.Y. Babaeva, V. Y. Kozhevnikov, A. V. Kozyrev, G. V. Naidis, V. A. Panarin, V. S. Skakun, and V. F. Tarasenko, Modeling of transient luminous events in Earth's middle atmosphere with apokamp discharge, *Phys.-Uspekhi*, **64**(2), 191–210, 2021
- [5] V. F. Tarasenko, N. P. Vinogradov, E. Kh. Baksht, and D. A. Sorokin, Experimental Simulation of Red Sprites in a Laboratory, *Journal of Atmospheric Science Research*, **05**(03), 26–36, 2022, doi: 10.30564/jasr.v5i3.4858
- [6] D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, and N. P. Vinogradov, Analogs of columnar sprites initiated in low-pressure air and nitrogen, *Physics of Plasmas*, **30**(8), 083515, 2023, doi: 10.1063/5.0153509