

Влияние типа функции распределения электронов на характеристики наносекундного разряда в протяженных экранированных трубках с цилиндрическими полыми электродами

Н.А. Ашурбеков^{1,}, К.О. Иминов¹, Г.Ш. Шахсинов¹, М.Б. Курбангаджиева^{1,2}, К.М. Рабаданов¹*

¹*Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*

²*Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия*

^{*}*nashurb@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению характеристик плазмы наносекундного разряда в неоне в протяженной экранированной разрядной трубке с цилиндрическими полыми электродами. Приведены результаты исследований динамики формирования и распространения ионизационной волны в разрядном промежутке при различных давлениях. Выполнены экспериментальные исследования структуры продольных и поперечных неоднородностей плазмы в разрядной трубке в зависимости от амплитуд импульсов напряжения и давления газа. Показано, что поперечная структура фронта волны ионизации определяется режимом энергетической релаксации ускоренных электронов, формируемых на фронте волны ионизации.

Ключевые слова: полый катод, неон, ионизационная волна, неоднородности, функция распределения

1. Введение

Интерес к высоковольтным разрядам наносекундной длительности в инертных газах в последние годы возрастает в связи с возможностью их широкого практического применения [1–4]. Значительный практический интерес представляют, например, импульсные объемные разряды при средних и повышенных давлениях газов, которые используют, в частности, для создания химически активной плазмы и плазменных реакторов технологических установок. Такая плазма является востребованной при очистке и стерилизации поверхностей, при модификации поверхностей и приповерхностных слоев материалов в изделиях микро- и нанoeлектроники, разложении органических соединений и переработке отходов [1, 2]. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах интересует исследователей и как инструмент создания источников высокоэнергетических электронов и рентгеновского излучения [5, 6], когда без использования больших и дорогостоящих ускорителей электронов, электронные пучки можно формировать в самой газовой среде в результате его электрического пробоя.

Поэтому данные о параметрах плазмы импульсного разряда наносекундной длительности (например, распределение потенциала электрического поля, концентрации и энергии электронов, концентрации возбужденных частиц) крайне важны как с точки зрения ее использования в технологических процессах, так и для построения теоретических моделей путем сравнения результатов теоретических расчетов с экспериментально полученными данными в рамках разрабатываемых моделей.

2. Методы исследования и результаты

Для исследования и определения характеристик плазмы наносекундного разряда в неоне в протяженной экранированной разрядной трубке с цилиндрическими полыми электродами были проведены экспериментальные и численные исследования. Блок-схема экспериментальной установки, использованной в данной работе, приведена в работе [3, 4]. Разрядная трубка диаметром 1.2 см и длиной 50 см помещалась в алюминиевый экран диаметром 3 см. Вдоль разрядной трубки были установлены несколько емкостных и оптических датчиков для регистрации фронтов ионизирующих волн градиента потенциала и

оптического излучения на фронте волны ионизации, по которым определялись скорости перемещения фронтов волн ионизации. Для создания наносекундного газового разряда использовался генератор импульсов напряжения, который формировал два высоковольтных импульса напряжения с регулируемой амплитудой до 40 кВ, с длительностью фронта импульсов напряжения 50–80 нс и частотой повторения импульсов до 100 Гц [3].

Были реализованы три режима формирования высокоскоростных волн ионизации в экранированной разрядной трубке: а) два положительных импульса напряжения на оба конца плазменного волновода; б) положительный импульс напряжения на один конец, другой конец волновода заземлен; в) на один конец плазменного волновода подается положительный импульс напряжения, на другой – отрицательный (Рис.1)

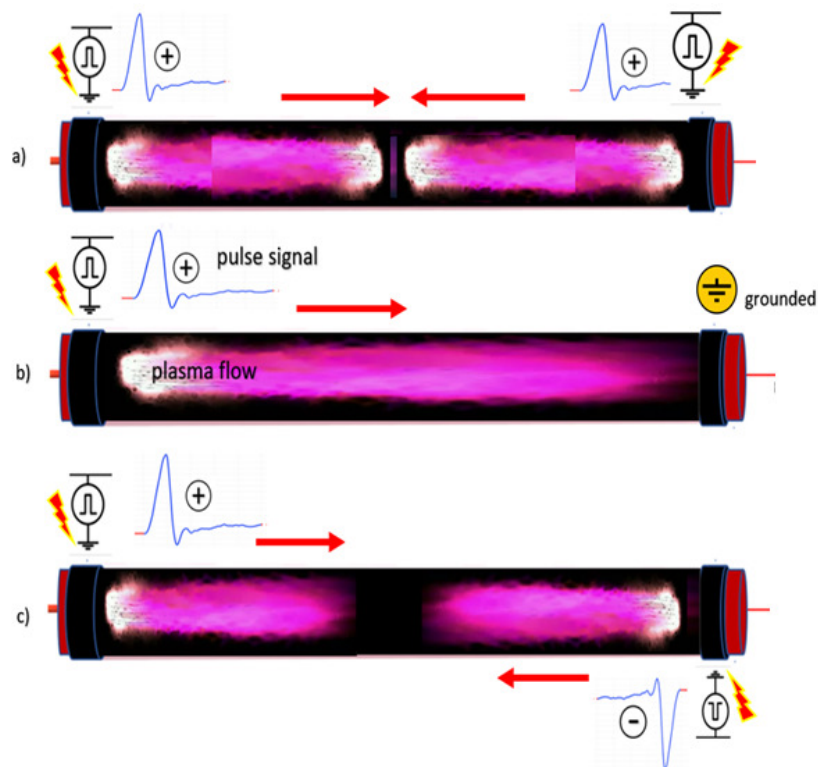


Рис.1. Схемы подачи импульсов напряжения на концы экранированной разрядной трубки (плазменного волновода): а) два положительных импульса напряжения на оба конца; б) положительный импульс напряжения на один конец, другой конец волновода заземлен; в) на один конец плазменного волновода подается положительный импульс напряжения, на другой – отрицательный.

Экспериментально были исследованы динамика формирования и развития высокоскоростных волн ионизации, спектральное распределение оптического излучения разряда и поперечная пространственная структура волн ионизации.

Были установлены следующие закономерности формирования и развития высокоскоростных волн ионизации:

- скорость распространения высокоскоростной волны ионизации меняется в пределах от 5×10^8 см/с до 1×10^9 см/с;
- скорость отрицательной волны ионизации при определенных условиях выше, чем скорость положительной волны ионизации;
- при больших давлениях газа волна ионизации затухает по мере распространения вдоль плазменного волновода;

- форма импульса оптического излучения сильно зависит от наличия встречных волн ионизации и их полярности;
- распространение встречных волн ионизации разной полярности приводит к укорочению длительности волны градиента потенциала в результате их взаимного гашения;
- при давлениях газа ниже 1 Торр волна ионизации имеет объемную форму, а при давлениях газа выше 10 Торр волна ионизации имеет цилиндрическую форму и распространяется вдоль внутренней стенки разрядной трубки.

В условиях аналогичных эксперименту было выполнено численное моделирование ионизационных процессов и динамики пространственно-временной структуры развития разряда. Для проведения численного эксперимента была создана двухмерная осесимметричная модель, геометрия которой соответствовала экспериментальной установке [3, 4]. Численная модель включала в себя плазменный модуль из программы COMSOL Multiphysics, в котором рассчитывается гидродинамическая модель плазмы [7], и программу LisbOn KInetics Boltzmann [8], в которой решается кинетическое уравнение Больцмана и вычисляется изотропная и анизотропная части ФРЭЭ в двухчленном приближении. Программа LisbOn KInetics Boltzmann из модуля программы Comsol в качестве входных параметров в каждый момент времени и в каждой точке области решения задачи получает значения приведенного электрического поля, давления и температуры газа, плотности электронов и ионов, распределения населенностей возбужденных состояний рабочего газа, а также соответствующие наборы сечений рассеяния электронов. Подробно алгоритм численного моделирования описан в наших работах [9, 10]. Такое сопряженное использование двух пакетов как одного целого позволяет моделировать развитие неоднородного нестационарного разряда и исследовать пространственно-временную эволюцию ФРЭЭ при наличии в разряде быстрых электронов, ускоренных на фронте волны ионизации в условиях слабой анизотропии функции распределения электронов по энергиям.

В качестве примера на Рис.2 приведены картины формирования и распространения ионизационной волны в разрядном промежутке при различных значениях давления газа при значении амплитуды импульса напряжения 14 кВ. Из результатов данных расчетов видно, что ионизационная волна формируется у поверхности анода и распространяется к катоду, при этом скорость распространения волны ионизации зависит от значения давления газа, как и показано выше. В дальнейшем, как видно на рисунке выше, пробой происходит примерно после 35 нс, концентрация электронов возле анода в 5–6 раз выше, чем в остальной части трубки. Фронт волны ионизации достигает середины трубки к 90 нс, на 125 нс фронт достигает катода, проникает внутрь полости катода, причем в полости катода и по краям полости формируется область максимальной ионизации. Далее видно, что формируется аналогичная картина внутри анода – фронт волны колоколообразной формы, но с существенно низким значением концентрации электронов, чем внутри катода. Расчеты распределения плотности заряженных частиц вдоль центра разрядного промежутка показывают, что с ростом величины приложенного поля концентрация электронов растет, достигает максимального значения примерно к 100 нс и потом постепенно спадает.

С течением времени концентрация продолжает увеличиваться, максимум локализован внутри анода. Своего пика концентрация достигает ближе к концу времени расчета и составляет примерно 10^{13} см^{-3} .

Численным экспериментом показано, что, так же, как и в эксперименте, поперечная пространственная структура фронта волны ионизации зависит от режима энергетической релаксации быстрых электронов, ускоренных на фронте волны ионизации. При низких давлениях газа фронт волны ионизации имеет объемную структуру (Рис.3а), а с повышением

давления газа выше 10 Торр, область ионизации прижимается к внутренним стенкам разрядной трубки с толщиной области усиленной ионизации около 2 мм (Рис.3б).

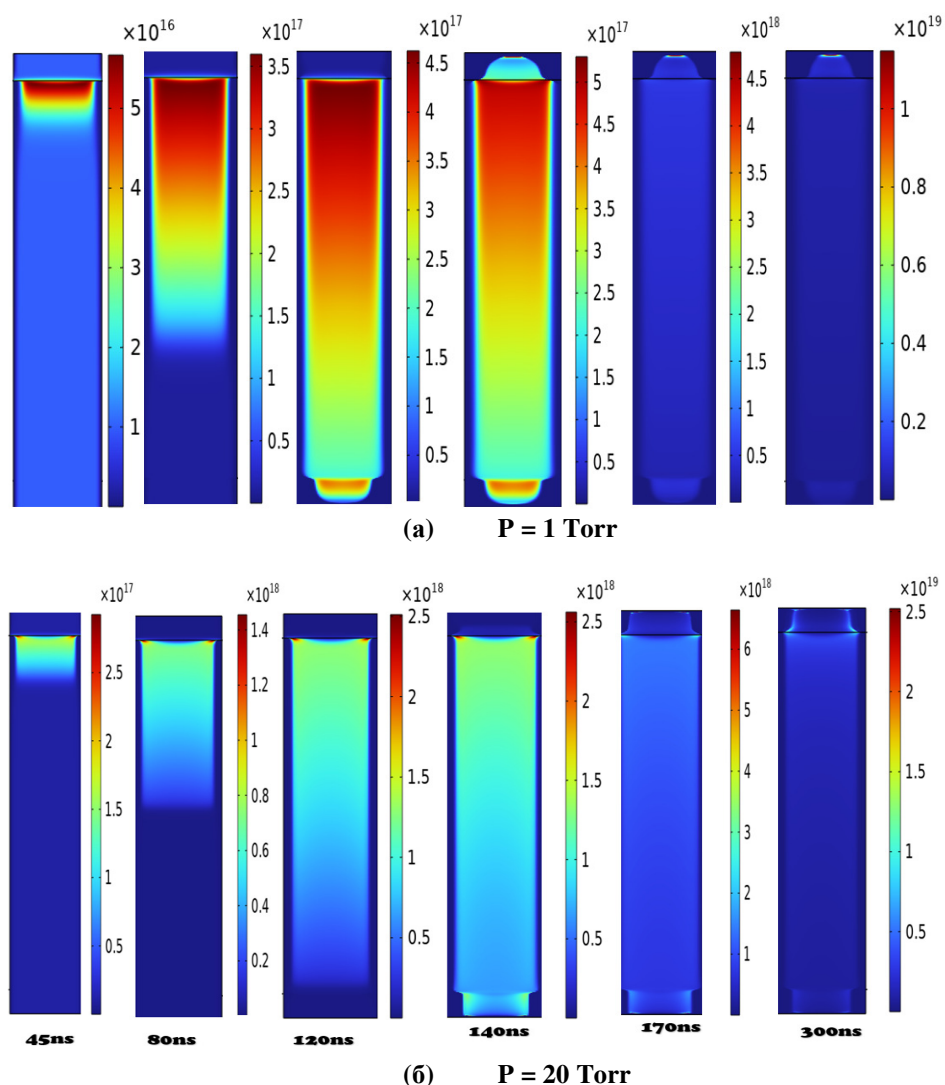


Рис.2. Динамика формирования и распространения ионизационной волны в разрядном промежутке при различных давлениях: а) 1 Torr, б) 20 Torr.

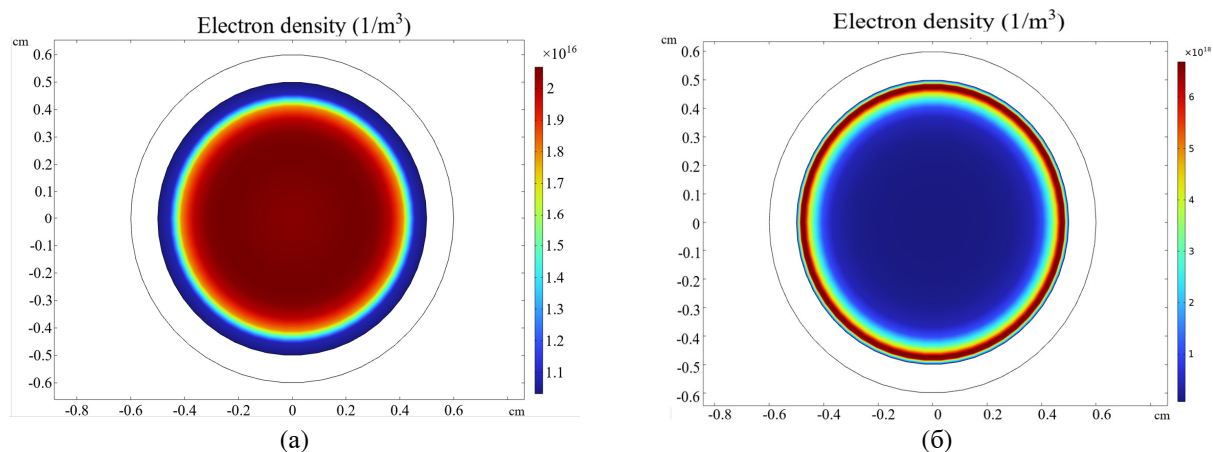


Рис.3. Поперечная структура фронта волны ионизации при давлении газа 1 Torr (а) и 20 Torr (б).

3. Заключение

Таким образом в данной работе проведены исследования по определению характеристик плазмы наносекундного разряда в неоне в протяженной экранированной разрядной трубке с цилиндрическими полыми электродами. Проведены исследования структуры продольных и поперечных неоднородностей плазмы в разрядной трубке в зависимости от амплитуд импульсов напряжения и давления газа. Приведены результаты исследований динамики формирования и распространения ионизационной волны в разрядном промежутке при различных давлениях газа. Показано, что структура фронта волны ионизации определяется режимом релаксации энергии электронов, ускоренных на фронте волны ионизации. При давлениях газа выше 10 Торр фронт волны ионизации имеет цилиндрическую форму с локализацией максимума вдоль внутренней стенки разрядной трубки. С уменьшением давления газа до 1 Торр и ниже поперечная структура фронта волны ионизации стремится к объемно форме. Эти рассчитанные закономерности хорошо совпадают с экспериментальными данными по формированию поперечной структуры фронта волны ионизации.

Благодарности

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90150 и государственного задания FZNZ-2020-0002, при использовании оборудования ЦКП «Аналитическая спектроскопия».

4. Литература

- [1] Dorf L., Wang J-C., Rauf S., Monroy G.A., et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50**(27), 274003, 2017; doi: 10.1088/1361-6463/aa7357
- [2] Vallée C., Bonvalot M., Belahcen S., Yeghoyan T., et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38**(3), 033007, 2020; doi: 10.1116/1.5140841
- [3] Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhshinov G.S., Kurbandagzhieva M.B., Rabadanov K.M., *Proceedings of SPIE - XV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, **12086**, 1208617, 2021; doi: 10.1117/12.2610779
- [4] Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhshinov G.S., Ramazanov A.R., *High Temperature* **53**, 627, 2015; doi: 10.1134/S0018151X15030025
- [5] Li C., Godyak V., Hofmann T., Edinger K., Oehrlein G.S., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38**(3), 033001, 2020; doi: 10.1116/1.5143537
- [6] Tarasenko V.F., *Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases*. (New York: Nova Publishers, 2016).
- [7] COMSOL Multiphysics 5.6 Release [online], www.comsol.com/release/5.6.
- [8] LisbOn KInetics Boltzmann [online], <https://github.com/IST-Lisbon/LoKI> (last access May 30, 2021).
- [9] Ашурбеков Н.А., Закарьяева М.З., Иминов К.О., Рабаданов К.М., Шахсинов Г.Ш., *Письма в ЖТФ*, **48**(10), 20, 2022; doi: 10.21883/PJTF.2022.10.52551.19180
- [10] Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Rabadanov K.M., Shakhshinov G.S. Zakaryayeva M.Z. Kurbandagzhieva M.B., *Plasma Sci. Technol.*, 2022; doi: 10.1088/2058-6272/ac9aa8