

Импульсные плазменно-пучковые разряды с протяженным щелевым катодом и их технологические приложения

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

¹*Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*

²*Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия*

^{*}*nashurb@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований кинетических процессов развития наносекундных разрядов с протяженным щелевым катодом в инертных газах (He, Ne и Ar). Показано, что в зависимости от значений параметров приведенного электрического поля E/N и плотности электронов существуют три разные формы функционирования наносекундного разряда (стратифицированный разряд, однородный объемный разряд с пучком электронов и сильнооточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц). Показано, что при повышении значения прикладываемого напряжения в промежутке появляются высокоэнергетические электроны, которые разрушают пространственную периодическую структуру разряда. Обнаружено, что при высоких значениях прикладываемого внешнего поля вдоль центра полости в катоде и у выхода из полости катода формируется область нескомпенсированного положительного заряда, которая приводит к изменению пространственной структуры разряда и динамики ионизационных процессов. Проведено численное моделирование ионизационных процессов в разрядах с протяженным полым катодом и приведены результаты расчетов структуры фронта волны ионизации, скорости наработки заряженных частиц и возбужденных атомов. Выполнен анализ возможности использования двучленного приближения в расчетах функции распределения электронов (ФРЭ) и исследованы процессы релаксации ФРЭ как внутри полости катода, так и между электродами в условиях слабой анизотропии.

Ключевые слова: полый катод, кинетические процессы, импульсный разряд, высокоэнергетические электроны

1. Введение

В последние годы большое внимание уделяется исследованию физических свойств импульсных плазменно-пучковых разрядов (ППР) в инертных газах и их смесях, где в процессе электрического пробоя газа формируются быстрые электроны непосредственно в самом разряде [1–3]. Научный интерес к этим исследованиям связан как с фундаментальными вопросами физики импульсного пробоя газа, так с широким практическим применением неравновесной плазмы ППР в различных плазменных технологических устройствах, в частности, в прецизионных технологиях атомно-слоевого осаждения и атомно-слоевого травления поверхности материалов микро- и нанoeлектроники [4].

С точки зрения практических применений особый интерес представляют исследования наносекундных газовых разрядов с протяженным щелевым катодом при средних давлениях газа, в которых в процессе электрического пробоя газа в разряде формируются ленточные пучки ускоренных электронов с энергией несколько кэВ, как за счет эффекта полого катода, так и в результате возможности достижения высоких значений перенапряжений на разрядном промежутке вследствие коротких длительностей импульсов напряжений [5, 6].

В настоящей работе представлены результаты исследований импульсного наносекундного разряда с протяженным щелевым катодом, когда размеры катода и анода значительно превышает межэлектродное расстояние. Выбор такой конструкции электродной системы определялся из соображений возможности формирования в процессе электрического пробоя газа группы высокоэнергетических электронов с ленточной геометрией. Схематически поперечное сечение электродного узла разрядной камеры приведена на Рис.1. Разрядная камера представляла из себя кварцевую трубку диаметром 5

см, внутри которой помещены два алюминиевых электрода длиной 5 или 40 см, расположенных на расстоянии 0.6 см друг от друга. Анод представляет собой плоскую пластину длиной 5 или 40 см, шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Катод представляет собой цилиндрический стержень длиной 5 или 40 см и диаметром 1.2 см, вдоль которого прорезана полость прямоугольной формы шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см. Исследовались процессы формирования разряда в двух режимах: область разряда между электродами не ограничена (Рис.1а) и область разряда ограничена диэлектрическими стенками (Рис.1б).

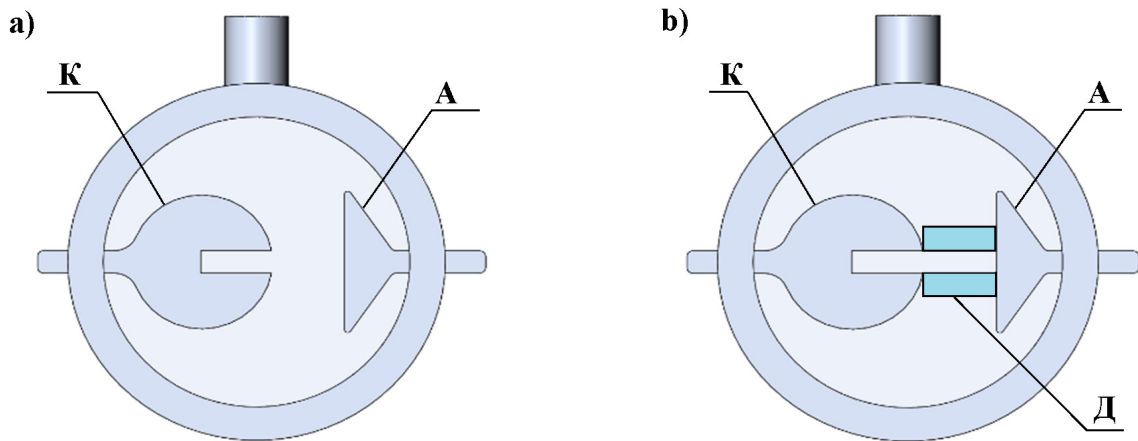


Рис.1. Поперечное сечение разрядной камеры при отсутствии (а) и наличии (б) ограничивающих разрядную область диэлектрических стенок.

Выбор такой формы поверхности катода и расстояния между электродами обусловлены требованиями устойчивого горения объемного разряда при средних давлениях рабочего газа. Конструкция разрядной камеры позволяла наблюдать структуру разряда и регистрировать пространственное распределение оптического излучения в разрядном промежутке и внутри полости катода.

2. Результаты и обсуждение

Были выполнены систематические экспериментальные исследования основных характеристик и пространственной структуры высоковольтных поперечных наносекундных разрядов со щелевым катодом в He, Ne и Ag в диапазоне изменения давления газа $p = 1\text{--}100$ Торг и величины прикладываемого к электродам напряжения $U_0 = 0.5\text{--}5$ кВ.

Экспериментально установлено, что в зависимости от значений параметра E/N и плотности электронов n_e существуют три разные формы функционирования исследованного наносекундного разряда, а именно: стратифицированный разряд, однородный объемный разряд с генерацией ленточного электронного пучка и сильноточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц [5–8].

Методом скоростной фоторегистрации экспериментально исследованы динамика формирования и развития ионизационных процессов и поперечную пространственную структуру разряда.

Методами лазерной абсорбционной спектроскопии исследована динамика наработки плотности метастабильных атомов инертных газов в процессе электрического пробоя газа.

Оптическими методами поляризационной спектроскопии выполнены исследования анизотропии процессов электронного возбуждения атомов.

Из экспериментальных результатов получены оценки плотности тока разряда, доли быстрых электронов и их средней энергии в зависимости от условий формирования разряда.

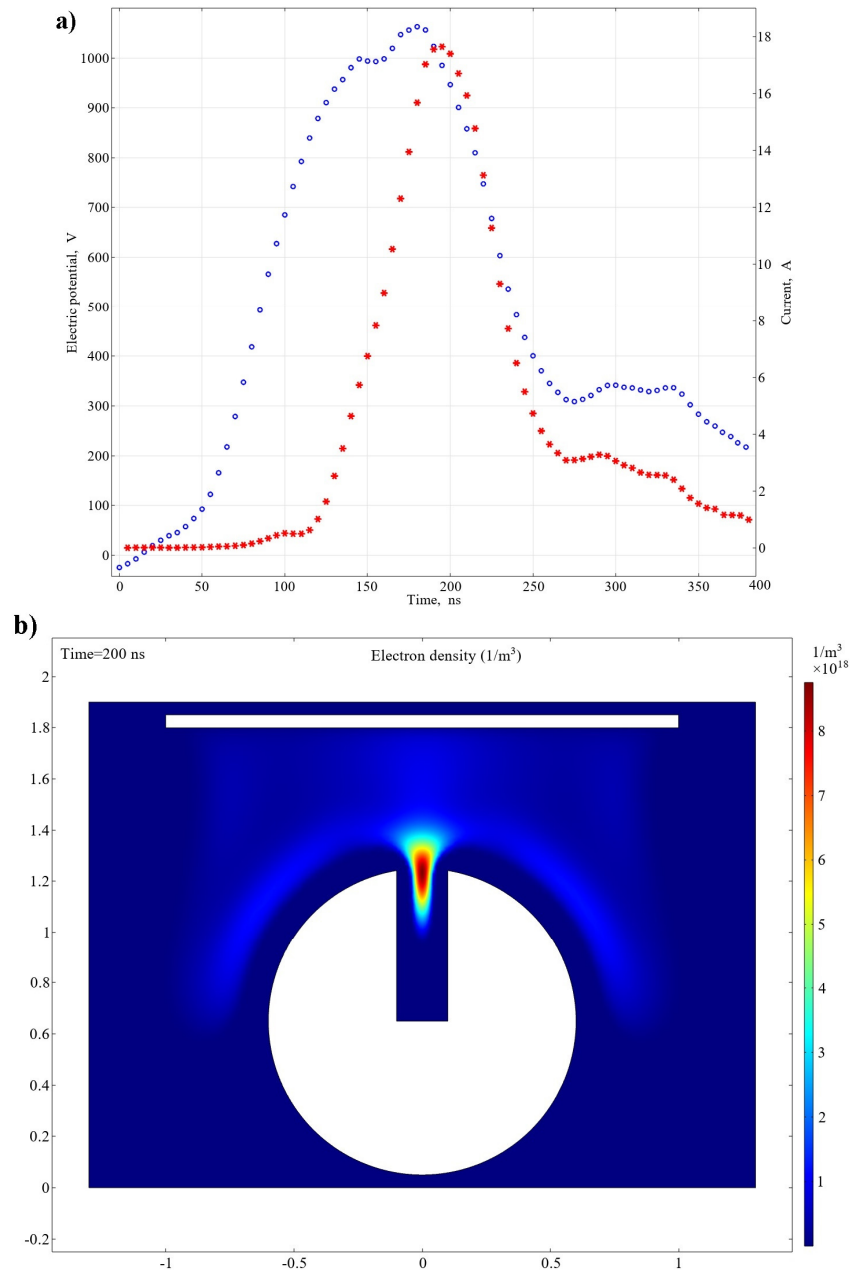


Рис.2. Осциллограммы напряжения горения и разрядного тока – (а) и картина численного моделирования пространственного распределения плотности электронов в неоне при давлении газа $p = 10$ Торр, амплитуде импульсов $U_0 = 1$ кВ – (б).

Для рассматриваемой геометрии разряда были выполнены серии численных экспериментов по исследованию динамики пространственного распределения параметров плазмы и их энергетических характеристик в процессе формирования и развития наносекундного разряда в He, Ne и Ar с протяженным щелевым катодом. Подробное описание численной модели можно найти в работе [8]. На Рис.2, в качестве примера приведены характерные осциллограммы импульсов тока и напряжения на электродах и распределение плотности электронов в разрядной камере для момента времени 200 нс после подачи импульса напряжения в неоне при давлении 10 Торр. Из рисунка видно, что у входа в катодную область формируется плотный плазменный столб с максимальной плотностью электронов $8.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Для рассматриваемых условий предложена численная модель и выполнены исследования по изучению динамики формирования и релаксации ФРЭ в плазменном столбе между электродами и внутри полости катода для условий слабой анизотропии ФРЭ [9].

Показано, что исследованный в данной работе тип наносекундного разряда с протяженным щелевым катодом может найти применение для создания широкоапертурного источника низкоэнергетичных ионов плоской геометрии с управляемой энергией ионов за счет регулирования условий в разряде (давления газа, амплитуды импульсов напряжения) и расстояния между областью плазмы и поверхностью подложки. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке и оптимизации прецизионных технологий атомно-слоевого травления подложек изделий микро- и нанoeлектроники.

3. Заключение

Таким образом, исследования наносекундного разряда с протяженным щелевым катодом показывает наличие трех форм функционирования таких типов разряда и возможность генерировать высокоэнергетичные ускоренные электроны в процессе электрического пробоя газа. Построена численная модель динамики пространственного распределения параметров плазмы и их энергетических характеристик в поперечных наносекундных разрядах с протяженным щелевым катодом. Показана перспективность применения исследованного типа разряда в прецизионных аддитивных плазменных технологиях.

Благодарности

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90179 и государственного задания FZNZ-2020-0002, при использовании оборудования ЦКП «Аналитическая спектроскопия».

4. Список литературы

- [1] Бабич Л.П., *УФН*, **190**, 1261, 2020; doi: 10.3367/UFNr.2020.04.038747
- [2] Korolev Y.D., Koval N.N., *Journal of Physics D: Applied Physics*, **51**, 323001, 2018; doi: 10.1088/1361-6463/aacf10
- [3] Tarasenko V.F., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 034001, 2020; doi: 10.1088/1361-6595/ab5c57
- [4] Lock E.H., Fernsler R.F., Slinker S.P., Singer I.L., Walton S.G., *J. of Phys. D-Appl. Phys.*, **47**, 425206, 2014; doi: 10.1088/0022-3727/47/42/425206
- [5] Tarasenko V.F., *Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases vol. 1, (Chapter 12. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Generation of high-energy electrons in the nanosecond gas discharges with a hollow cathode)*, (New York: Nova Publishers, 2016).
- [6] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С., *ЖТФ*, **80**(8), 63, 2010; doi: 10.1134/S1063784210080104
- [7] Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Popov O.A., Shakhshinov G.Sh., *Plasma Sci. Technol.*, **19**, 035401, 2017; doi: 10.1088/2058-6272/19/3/035401
- [8] Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Shakhshinov G.Sh., Zakaryaeva M.Z., Rabadanov K.M., *Plasma Sci. Technol.*, **22**, 125403, 2020; doi: 10.1088/2058-6272/abbb78
- [9] Ашурбеков Н.А., Закарьяева М.З., Иминов К.О., Рабаданов К.М., Шахсинов Г.Ш., *ПЖТФ*, **48**(10), 20, 2022; doi: 10.21883/PJTF.2022.10.52551.19180